

ARMAND DUTREIX

BIOClimatisme

ET PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS



EYROLLES

Armand Dutreix, ingénieur énergéticien, a été conseiller et maître d'œuvre en maîtrise de l'énergie et en production performante d'énergie dans l'industrie au niveau européen. Il a créé en 2007 son propre bureau d'études spécialisé en maîtrise de l'énergie et en conception bioclimatique de bâtiments, A3E-EnR (Aix-en-Provence) devenu en 2010 Athermia. Ses missions d'assistance à la maîtrise d'ouvrage l'ont amené à collaborer sur des projets d'intérêt général avec l'Ademe PACA et différentes instances publiques (DRAC, Conseils Régionaux, Généraux et autres collectivités publiques, organismes HLM...). Il travaille régulièrement avec Observ'ER, l'observatoire des énergies renouvelables.

BIOCLIMATISME ET PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS

ARMAND DUTREIX

Ce livre s'adresse avant tout aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, architectes et bureaux d'études, désireux de faire progresser la conception des bâtiments, avides de comprendre les grands principes de la conception bioclimatique, mais sceptiques sur notre capacité à nous libérer des énergies fossiles. Il s'adresse aussi plus généralement à tous ceux qui, inquiets de l'évolution du climat et de notre environnement, s'interrogent sur notre aptitude à répondre au défi du facteur 4, en leur démontrant que dans le bâtiment, qui représente près de la moitié de nos besoins énergétiques, c'est possible, et même facile.

Après un rappel de l'expérience ancestrale de l'homme en bioclimatisme, l'auteur explique les principes de la conception bioclimatique, les solutions architecturales et les techniques induites, qui permettent à moindre coût un confort constant, de nuit comme de jour, été comme hiver. Ces solutions qui évitent toute technologie complexe découlent de quatre notions, le déphasage thermique, l'amortissement thermique, l'inertie thermique déportée, et une gestion performante des flux d'air, explicitées ici dans un langage accessible à tout non-spécialiste de l'énergie.

Son expérience l'amène à relativiser les performances des modèles de construction passive nord-européens tant vantés, pour s'intéresser aux besoins spécifiques des régions plus chaudes. S'appuyant sur des évaluations scientifiques des performances thermiques des matériaux et équipements des bâtiments, il propose des solutions bioclimatiques adaptées, telles que murs Trombe, puits climatiques, caves solaires...

L'autre intérêt de cet ouvrage est de développer une méthodologie de conduite de projets, pour des ouvrages à usage aussi bien individuel, collectif, qu'industriel.

BIOCLIMATISME

ET PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS

ARMAND DUTREIX

BIOCLIMATISME

ET PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS

EYROLLES



Groupe Eyrolles
61, Bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Photo de couverture : Architecte Raphaël Bobeda, photo Armand Dutreix



Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée notamment dans les établissements d'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2010, ISBN : 978-2-212-12702-7

Dédicace

À mes parents, nés sans pétrole, sans qui je ne serais rien.

À mes enfants, qui n'auront bientôt plus de pétrole, et sans qui je ne serais plus rien.

À ma femme aussi, née comme moi dans l'opulence du pétrole, et ce n'est pas rien.

Sommaire

PRÉFACE	12
AVANT-PROPOS	14
<hr/>	
<u>PREMIÈRE PARTIE</u>	
LE BIOCLIMATISME DE NOS ANCIENS	17
1 LES RÈGLES DU BIOCLIMATISME	18
LE BIOCLIMATISME ?	18
LES CONDITIONS D'UNE CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE	18
LA RÉGULATION DU CORPS HUMAIN	19
LE CLIMAT	20
LE SOLEIL	21
LES CONDITIONS CLIMATIQUES	22
2 L'ARCHITECTURE ET LE BIOCLIMATISME	27
SAVOIR-FAIRE TRADITIONNEL	27
LA MAISON MOZABITE	27
L'IGLOO INUIT	29
ADAPTATION BIOCLIMATIQUE	30
ARCHITECTURE MÉDITERRANÉENNE	32
INERTIE THERMIQUE OU NON ?	33
<hr/>	
<u>DEUXIÈME PARTIE</u>	
PRINCIPES DE BIOCLIMATISME	35
1 L'ENVIRONNEMENT ET LE BIOCLIMATISME	36
LE DROIT AU SOLEIL	36
LES PIEDS SUR TERRE	37

LA TOURMENTE DU VENT	37
L'HYGROMÉTRIE	40
2 BASES DU CALCUL THERMIQUE	42
LA THERMODYNAMIQUE, QU'EST-CE QUE C'EST ?	42
TRAVAIL, CHALEUR ET ÉNERGIE	43
TEMPÉRATURE	43
LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE	44
BÂTIMENT BBC	47
PRINCIPALES NOTIONS ÉNERGÉTIQUES	49
RÉSISTANCE THERMIQUE R	49
COEFFICIENT U	50
PONTS THERMIQUES	50
DJU – DEGRÉS-JOURS UNIFIÉS	50
TRANSFORMER LE COEFFICIENT U EN KILOWATTHEURES	51
TRANSFORMER LE COEFFICIENT U EN KILOWATTS	52
CALCUL DU C_{EP} – ÉTIQUETTE ÉNERGIE	54
COEFFICIENT DE FORME	54
L'ÉNERGIE ET LE SOLEIL	55
ÉCLAIREMENT	56
FACTEUR DE LUMIÈRE DU JOUR	57
INFLUENCE DU BRUIT	58
3 L'ÉNERGIE ET LA MATIÈRE	60
MASSE VOLUMIQUE « ρ »	60
CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE « C »	60
CONDUCTIVITÉ THERMIQUE « λ »	61
CHALEUR ET MATERIAUX	61
DÉFINITION DE LA DIFFUSIVITÉ	62
DÉFINITION DE L'EFFUSIVITÉ	62
4 L'ÉNERGIE ET LA TERRE	63
L'ÉNERGIE DE L'EAU	63
L'ÉNERGIE DE L'AIR	63

L'ÉNERGIE DE LA TERRE	64
AMORTISSEMENT THERMIQUE TERRESTRE	64
5 VENTILATION NATURELLE	68
VENTILATION PAR SIMPLE OUVERTURE	68
VENTILATION TRAVERSANTE	69
VENTILATION PAR CONVECTION	69
6 DYNAMIQUE DE L'ÉNERGIE DANS LES MATÉRIAUX	71
LA PARABOLE DU POT DE FLEURS	71
LE CYCLE DE LA VAPEUR D'EAU	73
LE CYCLE DE L'EAU DANS LES MATÉRIAUX	75
REMONTÉES CAPILLAIRES	79
7 LA TRIPLE RÈGLE DU BIOCLIMATISME	82
ACCUMULER L'ÉNERGIE : L'INERTIE THERMIQUE	82
VALORISER LE CLIMAT : LE DÉPHASAGE THERMIQUE	85
RÉGULER LE CLIMAT : L'AMORTISSEMENT THERMIQUE	86
ÉCONOMISER L'ÉNERGIE : L'ISOLATION THERMIQUE	86
VITESSE DE TRANSFERT THERMIQUE	87
DÉPHASAGE THERMIQUE TERRESTRE	88
8 LES MATÉRIAUX, L'ÉNERGIE ET LE BIOCLIMATISME	90
LE PRINCIPE DE SÉLECTION DES MATÉRIAUX	90
CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX	91
INADÉQUATION DES MATÉRIAUX NATURELS ?	93
ÉCO-MATÉRIAUX	96
CLASSIFICATION DES CONSTRUCTIONS BOIS	96
MATÉRIAUX ET SANTÉ	98
ÉNERGIE FINALE – ÉNERGIE PRIMAIRE	99
CONTENU ÉNERGÉTIQUE DES COMBUSTIBLES	100
CONTENU EN CO ₂ DES ÉNERGIES	101
ÉNERGIE FATALE	103

ÉNERGIE GRISE DES CONSTRUCTIONS	104
FDES (FICHES DE DÉCLARATIONS ENVIRONNEMENTALES)	108
9 CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX	112
MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	113
COMPLEXES À BASE DE MATÉRIAUX NATURELS	120
MATÉRIAUX D'ISOLATION	120
PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ ET DE PAREMENT	123
10 PERFORMANCE DES VITRAGES	125
LES COEFFICIENTS U	125
FACTEUR SOLAIRE	126
QUALITÉ THERMIQUE DE LA FENÊTRE	126
CALCUL DES APPORTS SOLAIRES	127
CONCLUSIONS	138
TROISIÈME PARTIE	
SOLUTIONS DE BIOCLIMATISME	141
1 LES OUTILS DU BIOCLIMATISME	142
LA DÉMARCHE ENVIRONNEMENTALE	142
LA MÉTHODOLOGIE DE CONDUITE DE PROJETS	143
L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE	145
L'ANALYSE EN COÛT GLOBAL	147
LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	148
LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	149
L'INSTRUMENTATION DES BÂTIMENTS	151
2 PRINCIPES DE CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE	
MÉDITERRANÉENNE	152
LA CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE TRADITIONNELLE	152
L'HABITAT PROVENÇAL TRADITIONNEL	154

3 LES FORMES ET TECHNIQUES BIOCLIMATIQUES	157
CONCEVOIR BIOCLIMATIQUE	157
L'ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR	157
LA FORME BIOCLIMATIQUE	158
LES PAROIS EXTÉRIEURES	159
LA VENTILATION	161
LE MUR RESPIRANT	165
LE MUR TROMBE	167
LES TEINTES BIOCLIMATIQUES	170
LA TOITURE	172
LA TOITURE VÉGÉTALISÉE	173
LA PROTECTION SOLAIRE DES FENÊTRES	175
LE PUITS CLIMATIQUE	178
DIMENSIONNEMENT D'UN PUITS CLIMATIQUE	181
PUITS CLIMATIQUE THERMIQUEMENT ISOLÉ	182
PUITS CLIMATIQUE À DOUBLE FLUX	183
PUITS CANADIEN + VMC DOUBLE FLUX	185
PLANCHER À INERTIE ET ISOLATION PÉRIPHÉRIQUE DES SOLS	186
PLANCHER CHAUFFANT À INERTIE	187
LE DÉPHASEUR THERMIQUE	188
4 L'ÉNERGIE SOLAIRE	191
LE CHAUFFAGE SOLAIRE HYDRAULIQUE	191
LE CHAUFFAGE SOLAIRE AÉRAULIQUE	193
LA CLIMATISATION SOLAIRE	194
LE CHAUFFAGE AU BOIS	196
LA GÉOTHERMIE	200
LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE	200
LE COMPORTEMENT HUMAIN	201

QUATRIÈME PARTIE**SOLUTIONS ARCHITECTURALES** 205**1| ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE** 206

GESTION DES APPORTS SOLAIRES D'ÉTÉ	207
GESTION DES APPORTS SOLAIRES D'HIVER	208
TRAITEMENT DE L'INERTIE DU BÂTIMENT	210
AMORTISSEUR THERMIQUE SEMESTRIEL	212
DÉPHASEUR THERMIQUE ADIABATIQUE	214
INERTIE INTÉRIEURE	215
MUR TROMBE	216
VENTILATION NATURELLE	217
BAGDIR	218
PAROIS À LAME D'AIR	219
CHEMINÉE ROMAINE	220
PAROI PARIÉTODYNAMIQUE	220
PUITS ROMAIN	221
MOUCHARABIEH OU GARGOULETTE	222
SIPHON THERMIQUE	225
CHAUFFAGE PAR HYPOCAUSTE	226
POÊLE DE MASSE	227

PORTFOLIO 229**CONCLUSION| UN FUTUR BIOCLIMATIQUE ?** 238

RESPECTER L'HOMME	238
REDÉCOUVRIR L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE	238
BIBLIOGRAPHIE	240

Préface

Notre monde moderne ne saurait vivre sans consommer de l'énergie, mais cette consommation, non maîtrisée, s'accompagne d'effets évidents, autant sociaux qu'économiques et écologiques. Consommer mieux et consommer moins doit être la clef de voûte de notre société.

La question énergétique, malgré sa prégnance sur notre vie quotidienne, n'est pas facile à aborder. L'énergie, particulièrement celle que l'on ne consomme pas, est invisible. Sa production est complexe, elle nécessite technicité et connaissances réglementaires, c'est le domaine de la société technologique. La maîtrise de sa consommation est encore plus complexe, elle nécessite un changement de paradigme sociétal, qui nous impose d'inventer une nouvelle voie de développement.

Le monde du bâtiment, qui représente à lui seul près de 40 % des besoins énergétiques en France, est à l'aube d'une révolution, d'une ampleur égale à ce que l'on a pu connaître dans d'autres secteurs avec par exemple l'arrivée de la machine à vapeur comme moyen de transport, ou, plus récemment, le développement des moyens de communication entre les hommes avec Internet. Tout est à réinventer : les notions d'économie de moyens, de sobriété énergétique, d'adaptation sociale, de qualité sanitaire, de confort, et bien sûr à travers ces notions les outils pour y parvenir.

Forte de son expérience dans la lutte contre le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources naturelles, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur a franchi une étape décisive avec le programme AGIR pour l'énergie (Action globale innovante pour la région). Lancé fin 2006, ce programme place la Région à la pointe de l'innovation en matière de développement soutenable et solidaire. Parmi les six grands axes de ce programme, le bâtiment du xx^e siècle occupe une place de choix. La Région incite fortement au développement sur tout son territoire d'une offre de bâtiments ayant un faible impact écologique.

Ainsi le programme AGIR a permis en mai 2008 la création du Pôle régional d'innovation et de développement économique solidaire (PRIDES) « Bâtiments durables méditerranéens » (BDM). Faisant suite à la mise en place

de la charte environnementale par le Comité de Développement du Bâtiment de Qualité Environnementale (CoDé-BaQuE), ce PRIDES « BDM » permet à tous les acteurs du bâtiment (collectivités publiques, associations professionnelles, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, architectes, bureaux d'études, entreprises, utilisateurs des bâtiments, etc.) de travailler ensemble à la définition du bâtiment de demain dans un contexte méditerranéen. À l'opposé du chacun pour soi qui prévaut encore trop souvent, cette démarche « BDM » innove à plus d'un titre.

Mais au-delà de cette concertation novatrice et constructive, la volonté d'agir et d'innover pour inventer le bâtiment du xx^e siècle ne se suffit pas à elle-même. Encore faut-il chercher et trouver les moyens de cette innovation. C'est dans ce mouvement d'innovation largement soutenu par la Région que l'ouvrage d'Armand Dutreix est le bienvenu, car il apporte aux acteurs du bâtiment un certain nombre de clés originales, indispensables pour ouvrir le chemin de l'évolution voire de la révolution du bâtiment.

Parler de bâtiments à énergie passive ou positive pour assurer leur mission première, le confort humain, reste à ce jour difficile, tant les habitudes et le scepticisme se heurtent à toute idée novatrice. C'est pourtant dès demain que les bâtiments basse consommation (BBC), qui apparaissent aujourd'hui encore à nombre d'acteurs comme une performance hors d'atteinte, deviendront la norme minimale en deçà de laquelle il sera interdit de construire ou rénover. Cet ouvrage apporte un regard neuf sur la thermique du bâtiment, vu comme un objet dynamique, interagissant avec son environnement climatique considéré comme un atout à valoriser plutôt que comme une contrainte à vaincre.

Après un rappel des acquis ancestraux dans la science architecturale, l'ouvrage nous fait parcourir tous les fondements de l'énergie du bâtiment dans son contexte environnemental et humain, ce qu'on appelle le bioclimatisme, en s'appuyant sur la compréhension moderne des phénomènes thermiques. Puis il nous conduit à travers les principes fondateurs d'une maîtrise approfondie de l'énergie

du bâtiment, en détaillant les différentes « briques » destinées à la constitution d'un bâtiment performant. Enfin, sur la base de cette démonstration théorique, il décrit un certain nombre de solutions pouvant être mises en œuvre pour aboutir à l'objectif recherché : un bâtiment capable de subvenir par lui-même à l'ensemble de ses besoins énergétiques, autant pour assurer la fraîcheur estivale que la chaleur hivernale, dans un environnement de qualité et sain, sans technologie complexe, et sans nécessiter le recours à l'exploitation de ressources énergétiques fossiles vouées à se raréfier, voire à disparaître.

Le coût global d'un bâtiment sur sa durée de vie comprend bien sûr son investissement initial, mais également un coût quatre fois supérieur à cet investissement,

représenté principalement par la consommation d'énergie, sans oublier le coût de son démantèlement en fin de vie, et du traitement des déchets qui en découle. Une construction bioclimatique a pour objectif de fortement réduire ce coût global, au prix d'un petit effort d'innovation lors de sa conception. Puisse cet ouvrage apporter sa contribution à la révolution à venir dans le monde du bâtiment, pour inventer des constructions soutenables, respectueuses des utilisateurs présents comme des générations futures.

Annick Delhaye,
vice-présidente du conseil régional PACA,
déléguée à l'Écologie, à l'Environnement
et au Développement durable

Avant-propos

Chacun en convient, depuis un demi-siècle, nous construisons n'importe comment d'un point de vue énergétique. Depuis la première crise énergétique de 1973, la seule réponse trouvée aux gouffres à énergie que sont les bâtiments a été le toujours plus : toujours plus de technologie et toujours plus de dépenses, toujours plus de pétrole et toujours plus de gaspillage, toujours plus de pollution de l'intérieur des bâtiments et de crises d'asthme pour les enfants, toujours plus de réglementations bridant l'innovation à force de vouloir trouver une solution par une voie sans issue. Les peintures au plomb,

l'amiante, les CFC (chlorofluorocarbones), la légionellose, les COV (composés organiques volatils), rien ne suffit à arrêter ce prétendu progrès assis sur un pétrole voué à disparaître, mais qui nous empoisonne irrémédiablement, nous, nos enfants et leur planète.

Une autre réponse pour sortir de l'impasse est le bioclimatisme. Encore faut-il l'utiliser à bon escient, et non comme une apparence sous un simple effet de mode. Encore faut-il aussi ne plus considérer ce bioclimatisme comme une démarche décalée, réservée à quelque maison individuelle hors du commun, de conception « écolo-extrémiste », mais comme un outil moderne et porteur d'avenir, applicable à tout bâtiment, qu'il s'agisse d'une école, d'un immeuble de bureaux ou d'une usine.

Ce qui a motivé la réflexion qui suit est aussi le constat récurrent qu'on oublie que le bioclimatisme n'a pas de sens s'il est sorti de son contexte géographique et climatique, et que vouloir appliquer sans réflexion des recettes, et non des principes, élaborées dans un autre contexte, amène, au mieux à un échec, au pire à des catastrophes architecturales. Au XVII^e siècle déjà, Blaise Pascal affirmait : « *On ne voit rien de juste ou d'injuste qui ne change de qualité en changeant de climat.* »

Le propos de cet ouvrage, en écho aux solutions venues des précurseurs nordiques du bioclimatisme architectural, est d'évoquer plus spécifiquement une étude de cas, une démonstration par l'exemple de la spécificité régionale du bioclimatisme, en l'appliquant à une région particulière, la région méditerranéenne, afin de démontrer que ces modèles nordiques, aussi grande soit leur qualité, ne peuvent servir de référent universel. Même si la plupart des sujets abordés traitent du bioclimatisme en général, certains points traités pourront surprendre et paraître discutables ou contestables si l'on oublie cette localisation géographique de l'exemple pris.

L'une des spécificités de la région méditerranéenne tient en particulier à l'importance du confort d'été, qui, lorsqu'il



Maison islandaise – L'architecture bioclimatique, énergétiquement performante, est le mariage réussi entre le besoin de confort de l'être humain et les ressources naturelles, une architecture sachant se fondre dans son environnement. (Photo Bernard Arditti, architecte DESA)

n'est pas pris en compte comme la priorité des priorités, y compris à 2 000 mètres d'altitude, transforme en été une construction, pouvant être considérée ailleurs comme *a priori* de bonne qualité énergétique, voire bioclimatique, en une étuve. Les Allemands eux-mêmes s'interrogent sur cet aspect de leur modèle passif, « *les occupants des maisons passives trouvent le confort d'été moins bon que le confort d'hiver*¹ ». Et le bioclimatisme ne concerne pas uniquement les logements individuels, mais aussi et surtout le logement collectif et les bâtiments tertiaires et industriels, bâtiments dans lesquels le confort d'été est encore plus sensible et difficile à traiter sans recourir à des climatiseurs énergivores lorsque le bâtiment n'est pas « réfléchi » sous un angle bioclimatique.

Le deuxième point à garder en mémoire est que cette réflexion se limite strictement aux bâtiments, sur l'aspect technique de leur conception, avec la vision réductrice de l'énergéticien, et n'intègre pas d'autres critères majeurs de l'acte de construire, tels que par exemple l'urbanisme ou l'impact sociétal de l'architecture. L'architecture n'est pas l'objectif, elle est la réponse à une contrainte. Il revient à l'architecte d'intégrer dans son projet les principes bioclimatiques, puis de jouer avec la liberté qui lui est donnée, sa sensibilité et son imagination, pour inventer un bâtiment parfaitement intégré à son environnement. Le bioclimatisme ne peut progresser que dans une relation de confiance entre l'énergéticien et l'architecte, dans une collaboration complice, pas dans un rapport conflictuel, de doute ou de mépris.

Rappelons qu'un énergéticien n'est pas un thermicien. Son métier, contrairement au thermicien, est de trouver les moyens de ne pas consommer d'énergie. Il considère que l'approche énergétique d'un projet ne peut se dissocier de l'approche architecturale, de la conception du bâtiment et de ses formes, des matériaux employés, de la qualité de la lumière et de l'air, et de l'intégration de ce projet dans son environnement naturel, urbain, social et climatique.

La consommation des bâtiments : une priorité

Comme le rappelle régulièrement l'Ademe, en France, les bâtiments représentent 43 % de l'énergie consommée et 22 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). Diminuer les impacts négatifs des bâtiments sur l'environnement, c'est possible dès maintenant. Les idées, la technique, les matériaux, les équipements et les pratiques existent.



Enfin, à titre de digression anecdotique, et pour ceux qui pourraient au fil de cette lecture se sentir « bousculés » dans leurs pratiques, je fais miennes les conclusions du professeur Charlan Nemeth, de l'université de Berkeley (Californie), sur l'effet de la dissidence sur les groupes de décision : « *L'expression d'un désaccord, même infondé, stimule les pensées menant à des solutions meilleures et plus créatives. Alors que l'on va rejeter la personne en désaccord, on sera plus à même de s'informer de la question. On multipliera les stratégies pour résoudre les problèmes. Lorsqu'il y a unanimité, on a tendance à mépriser l'opinion opposée, tirer des conclusions hâtives et présupposer qu'il y a unanimité.* »

Le doute, l'abandon des habitudes et la remise en cause des certitudes, surtout lorsqu'elles se traduisent en réglementations et, accessoirement, en consommation de pétrole, sont les seules voies possibles du progrès. Il y a tant de vérités acquises dans le bâtiment. Peut-être est-ce pour cela que les progrès y sont si difficiles.

1. *Comparaison internationale bâtiment et énergie*, Jean-Christophe Visier, CSTB 2008.



PREMIÈRE PARTIE

LE BIOCLIMATISME DE NOS ANCIENS

1| LES RÈGLES DU BIOCLIMATISME

LE BIOCLIMATISME ?

L'homme se sent souvent dans la modernité en se forçant à une rupture vis-à-vis de la nature. Négliger l'environnement, glorifier la technologie, rejeter ce qui est ancien, oublier la simplicité et l'humilité, mépriser la mémoire architecturale collective de l'humanité sont malheureusement souvent ses lignes de conduite.

La prise de conscience indispensable de la problématique climatique et la raréfaction des énergies fossiles nous amènent à reconsiderer notre manière de juger de ce qui est réellement moderne. Le bioclimatisme fait partie de ces sujets considérés récemment encore comme archaïques, mais qui, dès lors qu'on l'approche un peu, nous montre sa complexité et nous renvoie à notre propre archaïsme vis-à-vis de certaines évidences, admises par nos ancêtres, et que nous avons aujourd'hui du mal à comprendre nous-mêmes sous l'éclairage de la technologie toute puissante et de la « science sans conscience »¹.

Oh, bien sûr, les anciens faisaient souvent du bioclimatisme comme Monsieur Jourdain, avec leurs moyens. Sans calculs scientifiques, juste en utilisant le bon sens commun : en hiver, il fait froid, on cherche le soleil, en été, il fait chaud, on tente de s'en protéger. Regardez soigneusement les constructions traditionnelles, elles sont quasiment toutes construites dans le respect de ces simples bases et de quelques autres, pas beaucoup plus compliquées à comprendre. Mais cette recherche du soleil ne se fait pas en concurrence avec le climat environnant, elle s'effectue dans la synergie bioclimatique.

Que signifie au juste le mot « bioclimatisme » ? Comment peut-on faire du climat « bio » ? « Construire de façon bioclimatique » pourrait se traduire par « construire en mettant en harmonie le climat avec la biologie humaine ». Cela a déjà un peu plus de sens. Et d'une question, on passe à la suivante : en quoi une construction a-t-elle à voir avec la biologie humaine ?

Se poser la question et surtout y répondre, c'est comprendre tout le sens du bioclimatisme. Avant de parler de construction, nous allons donc faire une petite digression et commencer par parler de l'humain qui occupe un bâtiment.

LES CONDITIONS D'UNE CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE

Faisons un petit retour vers un lointain passé et mettons-nous à la place d'un animal préhistorique un peu particulier, debout sur ses pattes postérieures. Son nom est *Homo sapiens*. La Terre est encore dans une période glaciaire. *Homo sapiens* n'a ni pull en viscose ni veste polaire synthétique, ni chaudière fioul ni polystyrène, juste sa peau et, éventuellement, celle d'une bête difficilement chassée. Pourtant, il survit dans ce froid polaire. Il se réfugie au fond des grottes, comme à Lascaux ou dans la grotte Cosquer. Il y survit assez confortablement pour trouver le loisir d'y réaliser des peintures rupestres. Étonnant ? Pas tant que cela.

1. Il ne s'agit sûrement pas ici de renier ni la science ni la technologie, mais de les remettre à leur place : au service de l'homme, ni plus, ni moins.

LA RÉGULATION DU CORPS HUMAIN

Au fond d'une grotte, nuit et jour, été comme hiver, période glaciaire ou pas, il fait de l'ordre de 10 à 15 °C, la température de la croûte terrestre. Pas très chaud, répondront ses descendants *Homo petroleus* du xxi^e siècle. Mais *Homo sapiens* ne se plante pas devant sa télé au fond de son canapé, il bouge, il court, il s'active.

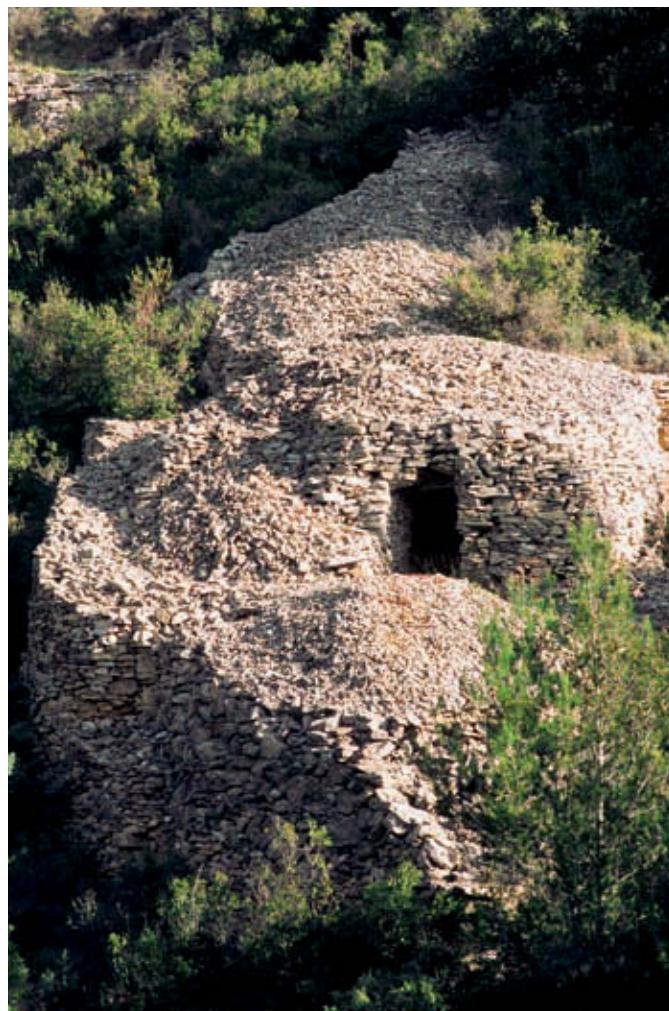
Homo sapiens est un mammifère, à sang chaud, qui régule sa température intérieure. Son corps, devant limiter sa température à 37,5 °C, a besoin de dissiper son trop-plein d'énergie. C'est une chance, car maintenir son corps à 37,5 °C est un gouffre à calories quand il fait froid et se révèle surtout difficile si on ne bouge pas. On pourrait en déduire que l'idéal serait de se prélasser nu dans un milieu à 37,5 °C. Mais chacun sait qu'il n'en est rien et que la bonne température est nettement plus basse. Plusieurs facteurs (en plus de la couche de graisse isolante située sous la peau) conditionnent la température corporelle :

- l'activité physique (pour produire de l'énergie et chauffer le corps) ;
- la température ambiante (pour ne pas avoir trop de déperditions, mais sans cuire) ;
- la vitesse du vent (pour évaporer la transpiration et se refroidir si besoin, à éviter s'il fait froid) ;
- la quantité d'eau dans l'air (l'hygrométrie, pas trop faible, pour que la peau ne meure pas desséchée, mais aussi pas trop élevée, pour pouvoir transpirer) ;
- le rayonnement thermique ambiant (rayonnement solaire, bien sûr, mais aussi rayonnement de la matière environnante, pour réchauffer, si besoin, le corps).

Le rayonnement de la matière environnante nous ramène à la grotte. *Homo sapiens* y est environné d'une roche, *a priori* froide, mais qui, en réalité, rayonne en permanence à 15 °C, dans une atmosphère elle-même à 15 °C. Il n'y a quasiment aucun vent, il n'y pleut pas, il n'y neige pas, il y règne une hygrométrie régulière. L'énergie qu'il perd par déperdition thermique est juste égale à celle qu'il reçoit par rayonnement. S'il était nu et immobile, pour maintenir sa température interne à 37,5 °C, sa température de confort (celle de sa peau) serait de 24 °C environ, dans une hygrométrie de 40 à 70 %. Mais *Homo sapiens* bouge et se couvre d'une peau de bête, la température ambiante d'équilibre pour compenser ses besoins thermiques, au sec, sans vent, est alors d'environ 15 °C. Son habitat (sa grotte) est bioclimatique. Il y survit sans

problème, même si dehors, la nuit, il fait – 40 °C avec un blizzard à édenter un mammouth.

Un habitat bioclimatique permet d'utiliser l'environnement, afin d'assurer de façon totalement passive une ambiance maintenant « sans effort » les conditions de confort du corps humain. Sans effort ? *Homo sapiens* est fainéant depuis les origines, par nature, mais de façon intelligente. Il sait que produire un environnement confortable peut consommer énormément d'énergie.



Les hommes ont de tout temps utilisé l'inertie de la Terre pour se protéger des aléas climatiques, avec les moyens que l'environnement mettait à leur disposition. Ici, chapelle à Saint-Chinian (34). (Photo Claire Cormu.)



Soleil, climat et effet de serre

Le climat de la Terre fonctionne comme un moteur thermique, dont le carburant serait le soleil, et le circuit de refroidissement, l'atmosphère. Si le circuit de refroidissement est ralenti, la température du moteur augmente jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit trouvé. Il existe un équilibre entre le rayonnement qui nous arrive du soleil et le rayonnement qui s'échappe vers l'espace. Un changement climatique se produit lorsque l'énergie solaire totale absorbée n'équivaut pas à l'énergie totale libérée. Le rayonnement absorbé apporte à la planète de la chaleur qu'elle restitue en permanence en direction de l'atmosphère. Ce rayonnement est alors absorbé par les gaz à effet de serre, ce qui réchauffe l'atmosphère. Puis cette chaleur est réémise vers la Terre. Ce rayonnement qui retourne vers la Terre constitue l'effet de serre.

Soit c'est sa propre énergie qu'il doit consommer, en grettant, donc en mangeant beaucoup – donc en chassant beaucoup – soit il se la procure autrement, en brûlant par exemple du pétrole, s'il n'a plus la capacité de réfléchir, ou en utilisant l'environnement à son profit, s'il réfléchit. *Homo sapiens* réfléchit, lui. Il ne considère pas son environnement climatique comme lui étant hostile, mais comme un don de la nature avec lequel il doit composer. Il vit dans un habitat bioclimatique.

Au fil du temps qui passe, le climat de la Terre se réchauffe progressivement, les glaciers reculent, l'air extérieur devient supportable une bonne partie de l'année. Alors *Homo sapiens* sort de plus en plus de sa grotte, puis il finit par construire des maisons, en toile de cuir ou en toile tissée, puis en pierre, en terre, en bois, en paille, avec tout ce qu'il trouve, dans le respect du lieu où il habite. Avec un peu de feu de bois, il s'en sort l'hiver. Avec un puits romain et des constructions massives, il supporte l'été. Au fil des millénaires, il acquiert une connaissance profonde des règles architecturales, même s'il n'en a pas toujours l'explication rationnelle.

Malheureusement, ses lointains descendants trouvent un jour du pétrole. Les *Homo petroliens* se mettent à construire en oubliant les règles de base d'une construction adaptée au climat et au lieu et compensent leur erreur par du pétrole et de la technologie de plus en plus sophistiquée à mesure que leur ignorance grandit !

LE CLIMAT

Après avoir rappelé rapidement l'unique objectif d'une construction, qui est le confort humain, nous allons faire un second détour par le climat.

Entre la jungle tropicale de la Guyane et les rigueurs givantes de la terre Adélie, la métropole française possède un climat particulier, propre à sa situation terrestre. Sans aller si loin, le climat français n'a rien à voir avec le climat allemand, autrichien, suisse, canadien ou suédois. Et le climat du sud de la France n'a pas non plus grand-chose de commun avec celui de l'ouest, du nord ou de l'est du pays.

Vouloir utiliser son environnement, et donc son climat, implique d'abord de ne pas le considérer comme hostile à l'homme, mais comme une source potentielle de son bien-être. Vouloir utiliser son environnement implique ensuite d'apprendre à reconnaître ses spécificités, sans chercher à normaliser, à copier aveuglément et sans comprendre ce que fait le voisin. Une maison bioclimatique alsacienne ne le sera plus en Provence et une construction autrichienne ou allemande le sera encore moins. Un label de qualité énergétique suisse, ou même parisien, traduit et appliqué sans réfléchir, peut devenir un gage de non-qualité en région méditerranéenne.

En France, un site de construction se trouve généralement dans une situation semi-océanique tempérée (donc quasi idéale), mais avec une plus ou moins forte influence maritime. Il subit quatre saisons bien différenciées, avec un régime de pluie variable selon la région (régulier sur l'année dans la zone d'influence atlantique, à périodes marquées avec deux saisons sèches en zone méditerranéenne...). L'ensoleillement est globalement important, quelle que soit la région (par rapport au nord de l'Europe), avec une intensité marquée en Méditerranée et en altitude. La fluctuation annuelle des températures ambiantes est modérée (par rapport au nord et au centre de l'Europe), mais avec une moyenne variant de façon non négligeable entre le Nord et le Sud.

On le voit, les paramètres varient beaucoup selon la région, la latitude et l'altitude, et la manière de construire devra s'adapter à chaque situation, comme nous allons peu à peu le préciser. D'une façon générale, les hivers sont quand même trop froids pour assurer dans un bâtiment un confort équivalent à celui de la grotte, sans apporter une importante source d'énergie complémentaire, et les étés sont trop chauds pour nous enfermer dans une boîte

étanche, si elle n'est pas rafraîchie. Seules les intersaisons (nous parlons bien de la chanceuse France métropolitaine) assurent des conditions climatiques idéales pour le confort du corps humain.

Il nous faut donc répondre à cette contradiction : trouver une source extérieure d'énergie en hiver et nous en protéger en été, sans oublier de maintenir une hygrométrie constante, dans une ambiance sans déplacement d'air en hiver mais correctement ventilée en été, tout en assurant un rayonnement thermique homogène, confortable et adapté à la saison.

Compliqué ? *Homo sapiens* y arrivait bien, lui, dans sa grotte ! Sommes-nous incapables de reproduire ce qu'il faisait ? L'*Homo petroliens* des temps modernes aurait-il à ce point régressé, en 20 000 ans ?



Maîtriser le soleil, règle de base de toute construction.
(Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

Sommes-nous devenus si incompétents que nous ne sachions plus construire des bâtiments respectueux du fonctionnement normal de notre corps, pouvant s'adapter, sans combustible fossile, à notre besoin de confort au fil des heures et des saisons ? Inutile de préciser que les principes actuellement communément admis de l'architecture et de la construction sont totalement à l'opposé de ces règles de base. C'est ce que nous allons pouvoir progressivement confirmer, en expliquant les règles du bioclimatisme.

LE SOLEIL

Avant d'entrer dans les détails d'une construction bioclimatique, adaptée aux besoins de confort de l'homme, nous allons faire un dernier détour vers le ciel. Certains ont dû constater en regardant dehors que tourne autour de la planète Terre (à moins que ce ne soit l'inverse ?) un objet que l'on appelle « soleil ». Le soleil irradie en permanence sur Terre une puissance de 178 000 TW, alors que l'ensemble des besoins modernes de l'humanité en énergie se situe aux environs de 10 TW. Dit autrement, le soleil envoie sur Terre quasiment 18 000 fois de quoi couvrir la totalité des besoins de l'humanité en énergie. Chaque jour, la Terre reçoit du soleil l'équivalent d'un demi-siècle de consommation d'énergie de l'humanité moderne ! Il y a de la réserve². À condition, bien sûr, de savoir et de vouloir utiliser cette manne quasi infinie, gratuite et éternelle.

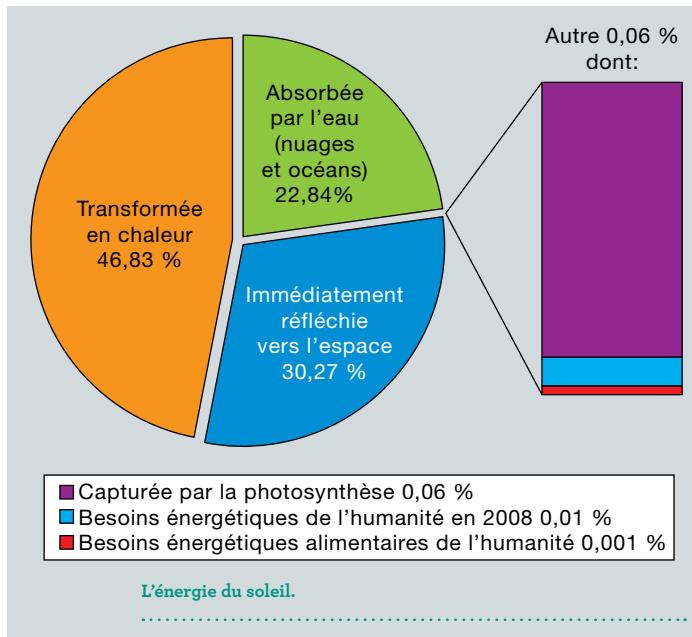


Une construction de qualité doit présenter une architecture adaptée à son climat, sachant le valoriser plutôt que de s'y opposer.
(Photo Philippe Buffard.)

2. La France métropolitaine, à elle seule, reçoit l'équivalent de la production de 8 000 centrales nucléaires.

L'énergie du soleil

Énergie solaire reçue sur Terre (en térawatts)	178 000
Immédiatement réfléchie vers l'espace	53 000
Transformée en chaleur	82 000
Absorbée par l'eau (nuages et océans)	40 000
Capturée par la photosynthèse	100
Besoins énergétiques de l'humanité en 2008	10
Besoins énergétiques alimentaires de l'humanité	0,6



Un enfant le sait : le soleil, en hiver, se lève au sud-est, monte au-dessus de l'horizon sud à moins de 30°, puis replonge rapidement vers le sud-ouest. Si bien que seul le mur sud d'une construction reçoit correctement du soleil en hiver. En été, il se lève au nord-est, monte à plus de 60° à midi, avant de redescendre vers le nord-ouest. En été, ce sont les murs est et ouest ainsi que les toitures qui sont surtout exposés au soleil. Cette différence fondamentale entre l'hiver et l'été est un atout majeur : si nous pouvons valoriser l'ensoleillement sur le mur sud et nous protéger du soleil sur les façades est et ouest

ainsi que sur la toiture, et plus ou moins sur la façade sud selon le lieu, un grand pas sera franchi vers la réponse aux contraintes que nous nous sommes posées. Il restera à adapter ces mesures aux conditions particulières de chaque région.

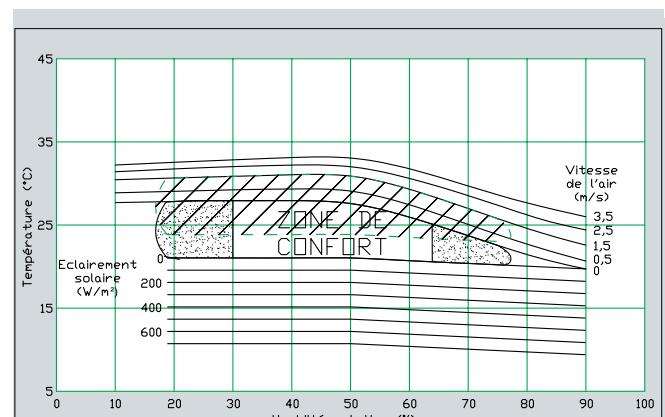
On notera enfin que, quelles que soient la saison et la région en France, la température de nuit, en l'absence du soleil, est généralement insuffisante (sauf cas très particulier de canicule) pour assurer le confort humain. Elle est de ce fait suffisante pour apporter, si besoin, la fraîcheur éventuellement recherchée, à condition, là aussi, de savoir la valoriser.

LES CONDITIONS CLIMATIQUES

Rappelons les conditions climatiques qui influencent le confort humain et qui fixent les contraintes d'une construction :

- la température ambiante ;
- l'hygrométrie ;
- le vent ;
- le rayonnement thermique ambiant ;
- l'activité humaine.

D'après Victor Olgay, dans son *Guide de l'architecture bioclimatique*, tome III, la zone de confort se situe



La plage de confort hygrothermique de l'être humain peut être déplacée en modifiant dans une certaine mesure la vitesse de l'air ou en jouant sur l'éclairement solaire reçu (d'après V. Olgay, *Guide de l'architecture bioclimatique*, tome III).

en fonction de la température et de l'humidité de l'air, comme sur le schéma à la page précédente, soit idéalement entre environ 22 et 27 °C, avec une humidité relative comprise grossièrement entre 20 et 60 %.

En augmentant la vitesse de l'air, dans certaines limites, la zone de confort se déplace vers le haut. En augmentant l'ensoleillement direct, elle se déplace vers le bas. Ces valeurs sont évidemment relatives et dépendent de nombreux facteurs, dont l'âge et la santé de la personne, son habitude climatique, son habillement, la turbulence de l'air...

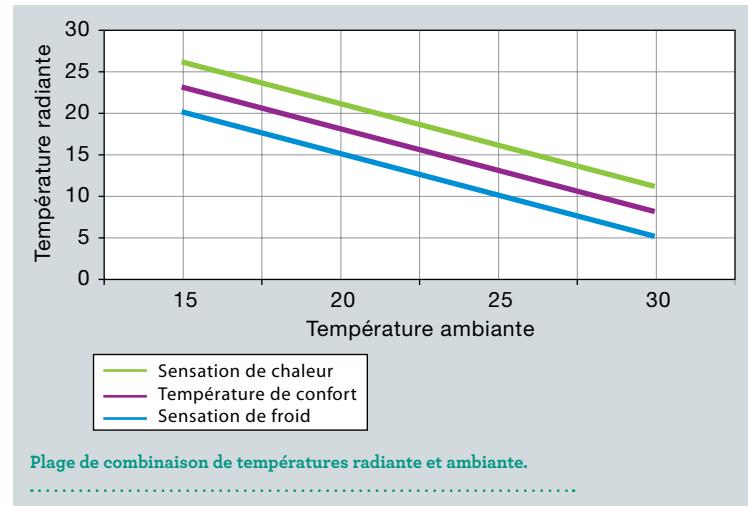
La température ressentie

La température ambiante doit être de 24 °C pour un être humain nu, mais comme nous vivons en général habillés, une ambiance idéalement de 19 à 20 °C suffit, un peu moins même, si nous acceptons de porter un pull. Nos constructions doivent simplement compenser la différence entre l'ambiance intérieure recherchée et le climat extérieur, pendant l'hiver, trop froid, et pendant l'été, trop chaud.

En fait, nous pouvons supporter moins de 19 °C en hiver et plus de 24 °C en été³. La plage de température ressentie supportable (nous disons bien supportable, pas agréable) se situe plutôt entre 14 °C en hiver et 27 °C en été. Nous parlons ici de la température ressentie et non de la température au thermomètre. Cette température ressentie est approximativement la moyenne de la température ambiante (celle de l'air) et de la température radiante (celle transmise par rayonnement). Si en hiver les murs sont à 10 °C et l'air à 20 °C, la température ressentie sera de 15 °C, donc supportable. Dit autrement, la somme des températures rayonnante et ambiante permettant une sensation de confort idéal est, de façon surprenante, celle du corps humain.

$$T_{\text{ambiante}} + T_{\text{radiante}} = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À noter que, par rapport à la température ressentie idéale, le corps humain a une sensation de froid à partir de 3 °C de moins, et une sensation de chaud à partir de 3 °C de plus, comme représenté sur la figure ci-contre. Mais ce qui gêne le plus, ce n'est pas tant la tempéra-



ture ressentie, que les variations de cette température selon l'orientation et la partie du corps. C'est pourquoi, par exemple, un chauffage radiant trop intense, directionnel par définition, ou un mur trop froid sont rarement confortables.

Pour être plus précis, la température ressentie se détermine en fonction de la température T_i de surface S_i de chacune des parois intérieures du local :

$$T_{\text{ressentie}} = \frac{1}{2} \cdot T_{\text{radiante}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum S_i \cdot T_i}{\sum S_i}$$

L'hygrométrie

En France métropolitaine, nous avons de la chance. L'hygrométrie est dans la plage de confort toute l'année, sauf à se planter sous la pluie. Il n'y a pas d'effort particulier à faire, si ce n'est de veiller à ne pas modifier l'hygrométrie naturelle. Comme nous transpirons, que nous cuisinons, que nous nous lavons à l'eau chaude, il nous faut régulièrement évacuer le surplus d'humidité que nous apportons dans les constructions (nous ferons abstraction ici de quelques cas particuliers, comme les piscines, les cuisines collectives, ou certaines industries). Il suffit de renouveler régulièrement l'atmosphère avec de l'air extérieur pour maintenir une hygrométrie stable.

3. Les aspects socioculturels et le fait de vivre sous certaines conditions climatiques, par exemple, impactent fortement cette sensation de confort : qui n'a vu au printemps un Africain grelotter sous une triple doudoune, quand un Écossais se promène en bras de chemise, alors qu'un Français supporte encore facilement un pull ? Il en va de même entre un jeune et une personne âgée, entre un malade et un sportif...

La pluie

Se protéger de la pluie est la première raison d'être d'une construction. L'eau, au contact du corps, aggrave fortement les déperditions thermiques (dans nos contrées en tout cas) et génère immédiatement un sentiment d'inconfort. Accessoirement, avec le temps, elle peut fortement dégrader la construction. Une construction doit donc protéger et se protéger de la pluie.

On relèvera toutefois que la pluie est aussi la source de la vie. Sans elle, il n'y aurait ni rivières ni nappes phréatiques et encore moins d'eau potable. La pluie n'est donc pas une agression de la nature contre l'homme, mais une ressource, pardon, LA ressource indispensable à la survie des hommes. Le souci d'une construction n'est donc pas de lutter contre la pluie, mais de savoir la valoriser.

Le vent

Se protéger du vent est l'autre raison d'être d'un bâtiment, durant trois saisons sur quatre (sauf en été). Une construction doit être parfaitement étanche à l'air, tout en pouvant laisser circuler le vent en été, surtout en zone méditerranéenne. C'est pourquoi on construit des fenêtres ouvrantes qui, en plus de laisser entrer la lumière, permettent de ventiler si besoin, mais uniquement dans ce cas.

On notera ici (nous aurons l'occasion d'y revenir, ainsi que sur la notion d'énergie grise) qu'il ne faut pas confondre étanchéité à l'air et dictature de l'étanchéité à l'air : consommer 3 en énergie grise pour gagner 1 en consommation sur la durée de vie du bâtiment permet peut-être de répondre à certains labels, mais pas de maîtriser l'énergie et de construire durablement. Il arrive toujours un moment où la recherche de la performance absolue coûte en énergie de fabrication plus que ce que cette recherche de performance permettra de gagner durant la vie du bâtiment. À titre d'exemple, l'utilisation abusive de rubans adhésifs synthétiques, riches en énergie grise, pour répondre ponctuellement à un test de label, ne garantit en rien une performance durable.

En particulier en zone méditerranéenne, nous y reviendrons aussi, cette obsession de l'étanchéité à l'air nous venant des pays nordiques et froids n'est non seulement pas forcément judicieuse ni justifiée, mais peut se transformer en désastre, pour peu qu'elle soit appliquée de façon dogmatique et irréfléchie.

Le rayonnement thermique

Nous avons commencé à aborder ce sujet peu connu du rayonnement thermique de l'environnement, qui détermine la température radiante. La source en est principalement le rayonnement solaire, de façon directe, diffuse ou indirecte. Le rayonnement solaire, sous forme de lumière, permet de voir le jour, mais surtout il se convertit en chaleur au contact de la matière opaque, qu'il s'agisse de la peau humaine, du sol terrestre ou d'un mur. Le rayonnement diffus, sous forme de lumière, lui aussi, provient des effets de réflexion de notre environnement : nuage, plan d'eau, neige, sol, mais aussi d'autres constructions, de l'humidité de l'air... Ces deux sources sont d'une intensité globalement en corrélation avec la saison, il faut donc les valoriser l'hiver et s'en protéger l'été. Dans le nord de la France, le rayonnement diffus est supérieur au rayonnement direct, sauf en été. Comme il n'y fait habituellement pas trop chaud, on pourra tolérer ce rayonnement diffus. Dans le sud de la France, le rayonnement direct moyen est toujours largement supérieur au rayonnement diffus. Il faudra alors impérativement se protéger de ce rayonnement direct, et limiter le rayonnement diffus.



L'approche bioclimatique permet d'assurer un confort intérieur en tout lieu et en toute saison. Ici, maison individuelle de 100 m² à ossature bois avec isolation en matériaux naturels et serre bioclimatique au Collet-de-Dèze (48). (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)



La troisième source, indirecte, provient de la restitution dans l'environnement de l'énergie emmagasinée dans la matière, résultat de l'absorption des deux précédentes sources. Cette restitution se fait avec un certain décalage dans le temps (déphasage), qui peut être nul, mais aussi très important. Sa présence participant, en l'absence de soleil, pour moitié à la sensation de confort, sa maîtrise est donc fondamentale. L'objectif ici est surtout de moduler le délai de restitution, afin de pouvoir bénéficier de la chaleur solaire au moment où il n'y a plus de soleil : la nuit pour le soleil du jour, l'hiver pour le soleil d'été. Si le premier cas est assez simple à résoudre, le second l'est nettement moins. Il devient pourtant fondamental en zone méditerranéenne, si on ne veut pas se condamner à la climatisation électrique.

L'étanchéité à tout prix ?

À quoi sert une étanchéité poussée à l'outrance par exemple dans un établissement scolaire, quand on considère le nombre d'ouvertures de portes chaque heure, surtout quand cet établissement est par ailleurs une étuve durant les trois quarts de l'année scolaire, si ce n'est en plein mois de janvier dans certaines salles, comme on le voit trop souvent en Provence ? Il est assez vain de parler d'étanchéité à l'air dans un bâtiment où certaines fenêtres doivent être ouvertes douze mois sur douze pour assurer un confort acceptable. S'obnubiler sur ce sujet n'a pas toujours beaucoup de sens. Pas plus que sur le renforcement de l'étanchéité à l'air appliquée au bâtiment non chauffé d'un magasin de fruits et légumes, comme on a déjà pu le voir recommander.



Un intérieur doit répondre au besoin de confort thermique. En région chaude, la gestion de la lumière et les matériaux employés sont la principale condition d'une fraîcheur ambiante agréable. Dans cette maison individuelle de Saint-Quentin-la-Poterie (30), des teintes claires ont été choisies pour limiter la sensation de chaleur. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)



Conditions de confort et apports humains

Selon les pièces, l'activité est différente, mais les besoins de confort aussi. Dans une chambre, lorsque le corps est au repos, souvent protégé par une couette ou une couverture isolante, il ralentit son métabolisme, sa température de confort baisse (si une activité physique y est pratiquée, elle fait également baisser la température de confort...). Dans une salle de bains, le corps est nu et mouillé, sa température de confort augmente. Dans une salle de restauration, le corps digère et dégage beaucoup d'énergie (en plus des plats chauds servis), dans une salle de réunion ou une salle de classe, le nombre de personnes présentes fait fortement varier les apports thermiques et hygrométriques humains, dans un bureau, à l'inverse, la station assise fait baisser la déperdition naturelle du corps, ce qui augmente la température nécessaire au confort, mais les ordinateurs provoquent l'effet inverse. La conception d'un bâtiment doit donc intégrer l'utilisation de chaque pièce et y adapter les conditions de confort.

La deuxième forme tient à l'utilisation d'équipements utilisateurs d'énergie, principalement électrique. Chaque kilowattheure électrique consommé (éclairage, cuisson, électroménager, ordinateur, imprimante...) se transforme immanquablement en énergie thermique rayonnée dans l'ambiance. Chaque kilowattheure qui s'inscrit au compteur électrique se transforme en kilowattheure de chauffage. Si ce phénomène est appréciable en hiver, il devient détestable en été. Il nous faut donc dans une construction porter une attention particulière à ces sources d'énergie, de plus en plus présentes dans nos bâtiments, afin de les valoriser l'hiver, mais surtout de nous en protéger l'été.

On notera que pour évaluer la consommation énergétique nécessaire au chauffage ou au rafraîchissement d'un bâtiment existant ou d'une pièce et donc sa qualité thermique, il faut impérativement intégrer les apports humains, mais surtout la consommation électrique durant la période de chauffage, ce que nombre d'intervenants, et jusqu'à la réglementation thermique *via* son célèbre DPE⁵, oublient systématiquement de faire. Et c'est souvent, dans le bilan thermique total, une part des apports (et donc de la déperdition du bâtiment) loin d'être négligeable.

L'activité humaine

La première forme d'énergie de cette activité est liée à l'activité physique⁴ : en nous activant, notre corps produit de l'énergie qu'il doit dissiper, participant ainsi à notre sensation de confort, mais apportant également à notre environnement immédiat de l'énergie rayonnée.

-
4. On considère qu'un être humain au repos rayonne de l'ordre de 60 W, et 80 W en station assise studieuse. Si cette quantité d'énergie peut sembler faible dans une habitation, il n'en est plus de même dans une salle de classe, une salle de réunion ou dans une salle de cinéma. En été, une présence humaine importante dans une salle implique de traiter le besoin de rafraîchissement lié aux apports humains.
5. Le DPE (Diagnostic de performance énergétique) est un puissant outil d'éducation à la maîtrise de l'énergie, mais dans sa conception actuelle, il n'est pas vraiment idéal pour évaluer la qualité énergétique d'une construction. En effet, le DPE consiste en une évaluation très sommaire de la consommation théorique d'énergie d'un bâtiment, soit sur la seule base des factures d'énergie, soit sur la constitution des parois.

2| L'ARCHITECTURE ET LE BIOCLIMATISME

Après ce rapide rappel des règles de base des besoins du confort physiologique, nous allons nous intéresser à la manière dont nos ancêtres y répondaient.

Walter Erdelen, vice-directeur général pour les Sciences naturelles à l'Unesco, l'a clairement énoncé : « *Le monde regorge de connaissances multiples, très approfondies mais souvent ignorées. Ces systèmes de connaissance traditionnels jouent pourtant un rôle essentiel. Il nous faut sortir de notre ethnocentrisme et de l'"occidentalocentrisme" ambiant pour apprendre de ces savoirs.* »

SAVOIR-FAIRE TRADITIONNEL

Depuis plusieurs milliers d'années, l'homme a accumulé une longue expérience de l'architecture. Construisant alors par besoin et non par mode, pour son confort et non pour son prestige, il s'est concentré sur l'objectif unique du bâtiment : le confort humain. De longs siècles d'expérimentations, d'échecs et d'amélioration des techniques lui ont permis, parfois sans trop comprendre pourquoi cela marchait, de mettre au point avec les moyens dont il disposait des constructions répondant de façon la plus simple possible aux contraintes qui se posaient à lui.

Or il existe depuis une cinquantaine d'années une tendance fâcheuse⁶ à croire que la technologie est supérieure à tout ce qui s'est fait avant et que, si incompatibilité il y a, il faut alors renier le passé. La technologie n'a pourtant pas réponse à tout. On le constate tous les jours dans les bâtiments modernes : à grand renfort de pétrole en hiver et d'électricité en été, on arrive à peine

à dépasser la qualité de confort que peuvent offrir des styles architecturaux vernaculaires n'utilisant quasiment aucune énergie. Et à chaque défaut constaté, on ajoute un peu plus de technologie et on renie un peu plus la mémoire du passé, ce qui ne fait que déplacer le problème et le complexifier encore plus, sans le régler.

Pour nous en convaincre, nous allons faire à nouveau un petit saut dans le passé et voir comment construisaient les générations précédentes. Afin de mieux cerner les solutions qui avaient été mises en œuvre, nous choisirons pour commencer des modèles venant de régions au climat extrême.

On cite souvent en exemple comparatif l'igloo des Inuits et l'habitat vernaculaire des Mozabites (mais il y en a bien d'autres qu'on pourrait utiliser comme démonstration).

LA MAISON MOZABITE

Nous allons donc commencer par décrire la maison d'un ksar (village) mozabite.

Le M'Zab est une région située à 600 km au sud d'Alger, sur un plateau rocheux dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres. C'est dans le creux de l'oued M'Zab, sur des pitons rocheux, que s'est érigée la pentapole, les cinq cités millénaires célébrées par Le Corbusier. Sur le plan climatique, cette région est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver, variant d'un minimum de 0 °C à + 46 °C. Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que

6. Bien évidemment, il ne s'agit pas ici d'essayer de laisser penser que les conditions de confort passées doivent être aujourd'hui reproduites à l'identique ni qu'elles ne peuvent être améliorées, mais de montrer que le progrès ne peut jamais se construire en niant l'expérience accumulée au fil des siècles et des millénaires.

ceux d'hiver sont froids et humides. La période des vents de sable s'échelonne de mars à mai. La région, aride par définition, est parfois l'objet de très violentes précipitations et d'inondations. En gros, la Provence, en encore un peu plus chaud et sec quand même, et au climat encore un peu plus violent.

Dans de telles conditions, les Mozabites ont, depuis plus de mille ans, élaboré une technique architecturale sans égale, parfaitement intégrée aux conditions sévères de leur région. De nombreux ouvrages traitent de ce sujet⁷, et il n'est pas question ici de prétendre leur faire concurrence. Nous nous limiterons à un bref aperçu de la qualité énergétique de cette architecture, toute de confort véritable, de tradition et de lumière.

La maison mozabite ne possède aucune isolation, aucun chauffage, aucune étanchéité à l'air, aucune ventilation électrique, aucune climatisation. Juste du savoir-faire.

La température ambiante intérieure y dépasse rarement les 30 °C en été, dans une ambiance extérieure supérieure à 45 °C, et ne descend pas en dessous de 15 °C la nuit en plein hiver, le tout sans technologie complexe. Il ne manque presque rien aux Mozabites pour tenir 22 °C douze mois sur douze.

La maison mozabite est construite à partir de briques d'argile crue séchées au soleil, sur une base carrée ou légèrement rectangulaire, comportant généralement un étage. Les murs extérieurs sont recouverts de tons pastel afin de limiter la réverbération du soleil. Ils sont largement aveugles, mais portent de très étroites fenêtres basses, parfois masquées par des balcons de bois. Un couloir en chicane, fermé par une lourde porte en bois de palmier, conduit à un patio carré, l'*ouastdar*, entouré de petites chambres longues et étroites. Ce patio situé au cœur de la maison en est le lieu le plus frais. Quatre piliers supportent le toit du patio qui est couvert sur sa plus grande partie. Au centre, une ouverture, le *chebek*, pratiquée dans son plafond, distribue une lumière tamisée et permet à l'air et au jour de pénétrer avec parcimonie, ainsi qu'à la fumée de s'échapper. Au premier étage, les chambres aveugles, les *ikomar*, sont situées sur le pourtour et reçoivent leur lumière de l'intérieur. Au centre, un espace sans plafond, le *tirrarghet*, se transforme en

lieu de séjour agréable au printemps ou à l'automne. Au deuxième étage, une terrasse, entourée de hauts murs assurant l'intimité, permet d'y dormir lors des chaudes nuits d'été.

Dans le ksar, les ruelles sont étroites et en lacet, afin de briser le vent des tempêtes de sable et limiter au maximum la violence solaire sur les murs et les sols. Les lieux de réunion publique, comme la mosquée, sont carrément construits sous terre.

Les Mozabites mangent et dorment à même le sol, bien qu'ils sachent faire de magnifiques meubles en bois sculpté. Cette tradition relève plus d'un problème climatique et d'une réponse intelligente à la situation que d'un manque de modernité : dans leur climat torride, le confort vient du sol. Les Mozabites ont instinctivement compris que leur confort ne pouvait être assuré qu'en valorisant la température moyenne journalière, en effaçant dans leur habitation les fluctuations journalières extrêmes de leur climat. Or la seule façon d'obtenir ce résultat est de permettre d'abord aux murs d'absorber un maximum de chaleur dans la journée et de la restituer la nuit puis de valoriser la température interne de la terre à 15 °C en toute saison.

Le matériau employé est la terre crue, renforcée par le bois de palmier pour les plans horizontaux. Lentement mûrie et solidifiée au soleil du Sahara, cette terre crue présente une très forte inertie thermique, mais assure aussi une continuité thermique totale entre tous les volumes construits. Munies de très peu d'ouvertures vers l'extérieur et d'une lourde porte d'entrée en bois, les constructions respirent principalement par un patio intérieur protégé du soleil et par des petits puits de lumière permettant un flux d'air généré par tirage thermique. En journée, l'air frais se trouve piégé dans la construction et s'y maintient. L'air progressivement réchauffé à l'intérieur des habitations s'élève lentement, assurant son lent renouvellement. La nuit, la température extérieure chutant fortement, le tirage naturel s'amplifie et recharge la masse des murs en fraîcheur nocturne, évacuant la chaleur accumulée dans les murs durant la journée. Le rez-de-chaussée des constructions récupère la fraîcheur du sol, sans être échauffé par l'air surchauffé du jour.

7. À lire en particulier : *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, d'André Ravéraeu (Actes Sud, 2003).



Les murs servent d'accumulateurs et de transfert d'énergie entre le jour et la nuit, en limitant les variations de température de l'air ambiant à l'intérieur des constructions. Lors des périodes de canicule, les habitants disposent des jarres d'eau poreuses devant les entrées d'air. En s'évaporant, l'eau absorbe la chaleur de l'air entrant et le rafraîchit. Cette humidité se diffuse dans l'habitation et elle est absorbée par les murs et les sols. En se condensant de nouveau dans la terre crue, la vapeur d'eau cède une nouvelle fois sa chaleur, qui est alors transférée dans les murs directement depuis l'air entrant et stockée dans la terre des parois, en attente de la fraîcheur nocturne qui permettra de l'évacuer par convection naturelle. L'ensoleillement extérieur des murs permet à l'eau en surplus de s'évaporer de nouveau, limitant la surchauffe des murs.

Par rapport aux canons de la construction moderne en Europe et en France, prétendue économe en énergie, ces bâtiments présentent les particularités suivantes, qui les rendraient non conformes aux standards établis :

- il n'y a aucune isolation ni des parois ni des planchers bas ;
- il n'y a aucune étanchéité à l'air ;
- la pénétration du soleil est strictement limitée aux besoins de lumière ;
- les parois sont protégées au maximum du rayonnement solaire direct ;
- les matériaux laissent librement circuler la vapeur d'eau ;
- la ventilation est naturelle et maintient un air parfaitement sain ;
- les échanges thermiques entre l'air entrant et l'air sortant se font grâce aux parois et à la vapeur d'eau ;
- les parois assurent un rayonnement thermique homogène et garantissent ainsi un bon confort aux occupants.

Mais le plus important reste de comprendre que si quelqu'un envisageait de « moderniser » ces constructions, en appliquant nos labels énergétiques et nos réglementations thermiques, en les isolant thermiquement et en les rendant étanches à l'air et à la vapeur d'eau, le résultat au niveau du confort serait insupportable à leurs occupants, à un degré non plus désagréable, mais pratiquement mortel.

Un modèle d'adaptation

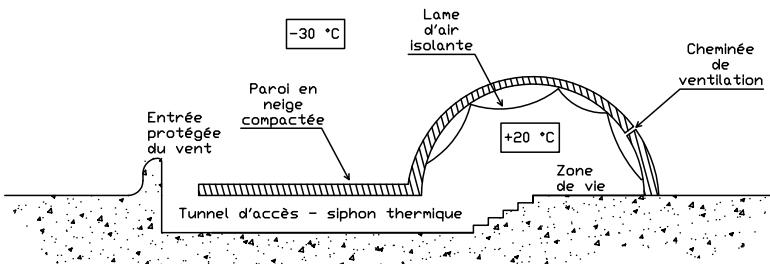


La science architecturale mozabite est unanimement reconnue comme un exemple de parfaite adaptation au climat brûlant de l'été et glacial de l'hiver du M'Zab, au point d'être inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco. Le Corbusier, après avoir découvert le M'Zab, se plaignait que « notre progrès fut si laid ».

L'IGLOO INUIT

Changeons radicalement de lieu géographique et transportons-nous au Groenland pour étudier de plus près l'igloo des Inuits. Les Inuits habitent dans un milieu que notre regard d'occidental juge comme particulièrement agressif. Mais ils y vivent heureux, en se transmettant leurs connaissances de génération en génération.

Dans la construction de l'igloo, rien n'est laissé au hasard. Il est construit en neige compacte (rappelons-le : jamais en glace). Sa forme en demi-sphère offre un minimum de résistance et de contact au blizzard et, accessoirement, un minimum de surface aux échanges thermiques. L'entrée, sans porte, et dont le sommet se trouve en dessous du niveau du sol intérieur, se prolonge à l'extérieur par un tunnel d'accès. L'air glacé, piégé dans ce tunnel, interdit,



Coupe de principe d'un igloo.

par un effet de siphon, à l'air intérieur de s'échapper par la porte d'entrée. Une étroite cheminée latérale permet le renouvellement d'air. Sa hauteur par rapport au sol et son diamètre sont calculés pour que le débit d'air par convection naturelle soit juste suffisant pour pouvoir être compensé par les apports thermiques internes. Les Inuits cuisent, se chauffent et s'éclairent avec un petit brûlot utilisant de la graisse animale.

La paroi extérieure, constituée de blocs de neige compactée, montés en spirale, est frottée afin d'étanchéifier les blocs de neige entre eux. À l'intérieur, elle est parfaitement lissée afin que toute surface fondue coule le long de la paroi et regèle immédiatement, tout en restituant sa chaleur à l'air ambiant. Les Inuits tendent des peaux

de bêtes aux murs afin d'assurer un rayonnement thermique confortable et homogène, ces peaux créant une lame d'air isolante. Les lits sont en hauteur, sur des pieds en bois. Ce n'est pas parce qu'ils aiment plus le luxe que les Mozabites, le bois est rare chez les Inuits, mais simplement parce qu'ainsi, en hauteur, ils sont hors du contact du sol gelé et se situent là où l'air est le plus chaud.

La température intérieure d'un igloo ainsi construit peut atteindre 20 °C par une température extérieure de -30 °C, et reste positive à hauteur du corps lorsqu'il fait -50 °C dehors. Quelles que soient les conditions climatiques extérieures et la température intérieure, les parois restent glacées et ne rayonnent ni n'absorbent aucune chaleur, ce qui leur assure leur durabilité.

Il n'est pas question de prétendre que le confort d'un igloo est idéal, mais serions-nous aujourd'hui capables de faire mieux sans pétrole, s'il faisait -50 °C dehors, avec nos matériaux ultrasophistiqués ? Pourtant, dans un igloo, il n'y a ni VMC double flux, ni verre, ni acier, ni béton, ni polystyrène, ni triple vitrage, ni chauffage électrique, ni test d'infiltrométrie, forcément négatif vu l'absence de porte. Juste du savoir-faire.

ADAPTATION BIOCLIMATIQUE

Une lecture strictement administrative des qualités énergétiques de ces constructions, sur la base des « vérités acquises » de nos normes, conduirait à la conclusion évidente qu'elles sont énergivores. Pire encore : l'utilisation des méthodes de calcul normalisées indiquerait une situation thermique inadmissible.

Pourtant, les deux sont des constructions totalement passives, parfaitement saines, sans salpêtre ni acariens ni polluants, bien plus performantes énergétiquement, compte tenu des moyens mis en œuvre, que n'importe quelle maison dite « moderne » labellisée « Haute Performance Énergétique ». Leur confort serait jugé insuffisant selon les critères normalisateurs, mais en fait il ne leur manque pas grand-chose pour largement dépasser le niveau de confort de nos propres constructions et les amener aux exigences de confort modernes. Elles ne coûteraient que peu d'énergie. Nous serions très largement dans les critères BBC (bâtiment basse consommation).



© tylerolson - iStockphoto.com

L'habitation hivernale des Inuits, qu'il s'agisse d'un simple abri temporaire ou d'une maison familiale, lorsqu'elle est conçue selon les règles traditionnelles, permet de créer un îlot de chaleur confortable dans les conditions climatiques les plus rigoureuses.



La première qualité d'une construction bioclimatique doit être l'adaptation à son environnement, par les matériaux employés et par ses formes. Ici, maison bois-paille et brique doublée de pierre à Vallabrix (30). (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

Comment les Inuits au Groenland et les Mozabites au Sahara arrivent-ils à créer des conditions climatiques confortables dans leurs habitations ouvertes à l'air, malgré des climats extrêmes, sans technologie ultra-moderne et sans brûler du pétrole ou de l'électricité à tout va ? Tout simplement, en choisissant des matériaux adaptés à leur objectif, pour construire des formes intelligemment conçues (nous aurons l'occasion de revenir plus loin sur ce problème des formes). Extraordinaire ? Non, répétons-le, juste du savoir-faire. Où qu'il ait résidé, à quelque époque qu'il ait vécu, sous quelque latitude qu'il ait été, l'être humain a su par le passé tirer parti des éléments que la nature lui offrait pour se créer un refuge confortable.

La neige possède quasiment les caractéristiques du polystyrène expansé (en plus solide, plus durable et moins polluant), et elle n'a aucune inertie thermique. Elle assure une très bonne étanchéité et renvoie vers le

volume intérieur la moindre énergie reçue. Elle régule l'hygrométrie intérieure.

La terre crue possède les caractéristiques exactement inverses, elle n'assure aucune isolation, elle est une éponge à humidité et à chaleur, et présente une très forte inertie thermique. C'est un matériau à changement de phase naturel (MCP)⁸, qui gère la migration de l'eau et de la vapeur pour transférer la chaleur au-dehors. Nous en reparlerons plus loin.

On constate avec ces deux exemples extrêmes que, selon les conditions climatiques, l'isolation et l'étanchéité à l'air ne sont pas forcément la bonne réponse. Et, dans le cas de l'igloo, on voit bien que l'étanchéité efficace n'impose pas forcément l'interdiction de toute ouverture dans les parois, mais plutôt une bonne maîtrise de la dynamique de l'air. Il reste donc à définir plus précisément ce que nous appelons étanchéité.

8. MCP : matériau à changement de phase. En changeant d'état, solide - liquide - gazeux, la matière peut accumuler ou restituer une grande quantité d'énergie. De nombreuses recherches actuelles de « très haute technologie » tentent de façon étonnante de réinventer à l'aide de produits chimiques ce que la terre crue a su si simplement apporter à l'homme depuis des millénaires.

Si la technique de l'igloo peut être adaptée aux régions froides comme la Suisse, la Suède ou l'Autriche, elle ne pourrait l'être que moyennement dans le climat tempéré français et deviendrait une erreur évidente en région chaude, comme la Provence.



Une façade principale orientée plein sud, une forte inertie des constructions grâce à l'utilisation de matériaux lourds, une protection efficace des menuiseries contre l'ardeur solaire, par l'utilisation de persiennes et de volets : tels sont les critères d'une construction méditerranéenne adaptée à son milieu climatique.

ARCHITECTURE MÉDITERRANÉENNE

La tradition architecturale en région méditerranéenne a toujours gravité autour d'une grande inertie (nous reviendrons plus longuement sur ce que signifie ce terme « inertie ») : qu'il s'agisse des pyramides égyptiennes ou des ksour et médinas nord-africains, des temples grecs ou des villas romaines, des villages fortifiés des Templiers ou des bories de Provence, on y retrouve le refrain de la construction massive et dense, jamais le chalet en bois, malgré une des forêts les plus abondantes d'Europe.

Il faut pourtant bien admettre que la performance thermique n'est pas forcément au rendez-vous, même si cette mauvaise performance tient plus à la qualité des techniques mises en œuvre, adaptées au niveau de connaissances de la période de construction concernée. Si l'on ne peut que louer leur confort en été, on peut légitimement s'interroger sur le rapport entre volonté manifeste de confort et coïncidence.

Dans ces constructions traditionnelles manquent souvent deux aspects fondamentaux de l'architecture bio-climatique telle qu'on peut la concevoir aujourd'hui : les apports de la lumière solaire et l'économie de chauffage, soit, dit autrement, la transparence et l'isolation thermique. À croire que nos anciens ne connaissaient pas l'hiver ? À leur décharge, il était dans le temps plus facile de chauffer que de climatiser. En fait, ils répondaient aux



Dans une construction bioclimatique, des aménagements extérieurs adaptés au climat, en particulier pour ce qui concerne la végétation, font partie intégrante de la performance énergétique et du confort intérieur du bâtiment.

besoins hivernaux en limitant autant qu'il était possible les ouvertures, faute de vitrage performant. Les défauts apparents tiennent donc à une cohérence du « moindre mal » face aux manques de moyens technologiques pour répondre à la contradiction climatique hiver/été.

Seule une prise en compte simultanée de ces trois composantes (fraîcheur, apports solaires, chauffage) permet d'apporter des réponses performantes énergétiquement et pertinentes en termes de thermique et de confort.

INERTIE THERMIQUE OU NON ?

À la lecture de ce qui précède, une interrogation commence à pointer : « *Mais alors, faut-il privilégier l'inertie thermique pour le confort l'été ou l'absence d'inertie en prévision de l'hiver ? L'ouverture au soleil pour l'hiver ou l'ombre pour l'été ?* »

Et c'est une interrogation légitime. La contradiction semble effectivement irréductible et conduit à se dire qu'il va falloir faire un choix. Nous savons réguler les apports solaires, donc la transparence, et l'isolation, donc le renouvellement d'air, en ouvrant et fermant une fenêtre et ses volets. Réguler l'inertie semble moins facile.

Nous verrons qu'il existe une possibilité de réponse cohérente qui supprime cette contradiction de l'inertie et qui permet d'offrir à un bâtiment une inertie variable selon la saison ou selon l'heure. Mais comme le bioclimatisme ne s'arrête pas à cette question de l'inertie, avant d'en reparler, nous allons continuer notre tour du sujet, afin de bien cerner le contexte.



L'inertie, c'est un bon équilibre entre les apports solaires et le besoin de les valoriser. L'inertie du bois offre généralement un bon compromis pour une valorisation efficace de l'irradiation solaire, en instantané comme sur la durée. (Photo Didier Nadeau – Architecte Jérôme Solari.)



DEUXIÈME PARTIE

PRINCIPES DE BIOCLIMATISME

1| L'ENVIRONNEMENT ET LE BIOCLIMATISME

Quel est donc le secret de ces constructions qui sont capables de si bien s'adapter à leur environnement ? Elles savent marier les quatre éléments, que sont :

- le feu, apporté par le soleil, qui est la source d'énergie de la construction ;
- la terre, qui sert de matériau de base à la construction et de vecteur énergétique ;
- l'air, dont la maîtrise assure la qualité de l'environnement ambiant, mais qui est également le vecteur des échanges thermiques ;
- l'eau, qui assure le confort hygrométrique et qui tient lieu également de vecteur énergétique ;

Le bioclimatisme est tout simplement le mariage du confort humain avec la nature, avec ses quatre éléments : le feu, la terre, l'air et l'eau. Nous allons les citer individuellement.

LE DROIT AU SOLEIL

À tout seigneur tout honneur, nous commencerons avec le soleil.

Nous en avons déjà parlé : le soleil fournit à la Terre une puissance égale à 18 000 fois les besoins complets actuels de l'humanité.

À quoi peut correspondre une telle puissance d'un point de vue pratique ? Pour se faire une meilleure idée, voyons quels sont les apports solaires sur un mur vertical orienté plein sud, selon la région en France :

La France semble posséder deux régimes climatiques du point de vue de l'irradiation solaire, l'un au nord, l'autre au sud et en altitude. À Marseille, l'irradiation en hiver est toujours supérieure à $2,8 \text{ kWh/m}^2.\text{jouwr}$, à Lille, dans la région la moins ensoleillée de France en hiver,

elle est encore supérieure à $0,8 \text{ kWh/m}^2.\text{jour}$. Un mur de 10 mètres de long et de 2,5 mètres de haut reçoit donc chaque jour 70 kWh à Marseille et 20 kWh à Lille. Cet apport potentiel journalier de 20 à 70 kWh est à rapprocher de la consommation annuelle d'une maison actuelle, d'environ 100 kWh/m².an, ce qui représente un besoin global journalier moyen de 50 kWh pour une maison de 100 m². Si la maison est de bonne qualité, selon les critères actuels (BBC), ses besoins seront deux fois moindres, soit 25 kWh par jour. Cet apport solaire journalier de 70 kWh sur 10 mètres de mur vertical est également à rapprocher du gain de 5 kWh/m².an qu'une étanchéité totale apporte par rapport à la simple RT 2005.

En se permettant un raccourci, certes un peu rapide, la seule façade sud d'une construction, en France, respectant seulement la RT 2005 (donc de mauvaise qualité), reçoit en moyenne en plein hiver du soleil plus que la totalité de ses besoins énergétiques. Nous nous sommes limités au mur sud, nous n'avons pas encore parlé de bioclimatisme ni d'énergie renouvelable et nous sommes restés à une construction présentant une performance énergétique qui, dès la future réglementation thermique (d'ici à 2012), sera considérée comme de qualité médiocre, en dessous du minimum acceptable. Et cette construction a une toiture et des murs à l'est et à l'ouest qui, eux aussi, reçoivent le soleil et un sol qui reçoit l'irradiation terrestre...

Comme nous le verrons plus loin, les apports solaires présentent un maximum au printemps et en automne, et non en été comme beaucoup le pensent. Un mur orienté au sud reçoit plus de chaleur en intersaison qu'en été, il peut même recevoir beaucoup plus de chaleur en hiver qu'en été s'il est équipé de protections solaires.

LES PIEDS SUR TERRE

La Terre, que nous foulons sans même nous en rendre compte, présente une caractéristique qui commence à être connue, même si la majorité a du mal à en comprendre le sens. Sa température interne, à la surface du globe, est à l'image de la température moyenne atmosphérique : environ 15 °C à nos latitudes. Et pour cause, si la température moyenne de l'atmosphère terrestre était autre, la température à la surface de la croûte terrestre suivrait le mouvement à l'identique. Mais la température de l'air varie selon les saisons et la météo. La température immédiatement sous la surface reflète donc plutôt celle de l'air ambiant et non celle de la température moyenne du climat du globe. C'est en descendant en profondeur que l'on se rapproche progressivement de cette valeur de référence de 15 °C, à environ 4 mètres sous la surface.

Or, combien de constructions utilisent cette caractéristique de la Terre, si l'on fait exception des caves en pierre de taille que l'on trouve dans les anciennes constructions ? Aujourd'hui, la règle de base de la réglementation « impose » l'isolation du plancher bas donnant sur une cave. Il y a deux mille ans, les Romains savaient utiliser l'inertie du sol pour rafraîchir leurs constructions en été et les préchauffer en hiver. Nous en reparlerons. Aurions-nous oublié des principes aussi simples ? Eh oui ! Nous les avons oubliés, depuis cinquante ans pour être précis, depuis que le pétrole règne en maître absolu sur nos bâtiments et sur notre capacité à réfléchir.



Construire bioclimatique dans le respect de l'environnement du lieu n'interdit pas la créativité architecturale, bien au contraire. Ici, maison « Toons » en Provence. (Photo Jérôme Solari, architecte DPLG.)

La surface du globe terrestre possède quelques autres particularités remarquables, qui s'appellent l'inertie thermique, l'amortissement thermique et le déphasage thermique. Nous aurons aussi l'occasion d'y revenir plus longuement, car ces propriétés offrent des opportunités majeures du point de vue bioclimatique.

LA TOURMENTE DU VENT

Nous n'entrerons que sur la pointe des pieds dans le débat qui consiste à définir la différence entre la ventilation naturelle et les infiltrations d'air. La ventilation naturelle provient de deux phénomènes combinés, dont l'importance respective peut évoluer selon les cas :

- le tirage naturel, qui apparaît dès qu'il y a des différences de température ;
- le vent, qui crée des différences de pression entre les faces d'un bâtiment.



Un bâtiment bioclimatique « aime » le soleil, y compris dans les régions les plus chaudes, comme ici ce bâtiment industriel à Aix-en-Provence. (Photo Jérôme Solari, architecte DPLG.)

Les limites de l'étanchéité

On entend de plus en plus parler de l'étanchéité à l'air, comme étant l'incontournable solution à l'amélioration de la situation énergétique des bâtiments. Incontournable, au point que la plupart des labels de bâtiments BBC (bâtiments à basse consommation), de maisons passives et autres BEPOS (bâtiments à énergie positive) se font actuellement un point d'honneur à être intransigeants sur ce point.

Cette étanchéité totale se justifie-t-elle systématiquement pour des bâtiments BBC ou passifs et, *a fortiori*, pour des constructions plus classiques lorsqu'on souhaite les rénover ? Ne serions-nous pas en train de nous convertir à une nouvelle religion de l'étanchéité à l'air, aveuglés par une solution qui serait soudainement devenue LA solution, nous faisant oublier quelques évidences bien plus importantes ?

Imaginez un vendeur de voitures vous proposant d'acheter un 4×4 avec un moteur 12 cylindres et vous expliquant qu'en conduisant fenêtres fermées vous allez économiser de l'essence. Il aurait raison ! Mais le problème est-il posé là où il doit l'être ? N'y a-t-il pas d'autres solutions plus efficaces pour économiser de l'essence que de posséder un 4×4 aux fenêtres étanches à l'air ?

Olivier Sidler, directeur du bureau d'études Enertech, expert en maîtrise de l'énergie reconnu au niveau national, dont aucune personne spécialisée dans l'énergie des bâtiments n'oserait mettre en cause la compétence exceptionnelle sur ces sujets, a parfaitement résumé¹ cette situation lors de son intervention à la Journée technique sur l'étanchéité à l'air des bâtiments de Dijon en novembre 2007, en indiquant que la surconsommation d'une étanchéité simplement conforme à la RT 2005 était de l'ordre de 50 % par rapport à la consommation d'une construction présentant une étanchéité totale.

Eh oui ! 50 % d'augmentation de la consommation, cela fait réfléchir...

Mais au fait, on parle bien de 5 kWh/m².an ? Pour un logement de 100 m², cela nous donne donc une consommation annuelle de 500 kWh supplémentaires ? C'est toujours bon à prendre, rétorqueront certains. Pas si sûr, si

on ramène cela aux efforts nécessaires pour y arriver, et au coût en travail et en énergie grise, au détriment d'autres efforts non pris en compte par ces mêmes labels. Et il peut parfois y avoir mieux à faire pour le même prix que d'essayer de grappiller ces quelques kilowattheures à grands coups d'adhésifs tous azimuts et d'euros dépensés, kilowattheures qui seront perdus à la première ouverture de porte et adhésifs dont la durée de vie est incertaine.

L'alternative des apports solaires

Rappelons-nous : sur 1 m² d'une façade verticale de bâtiment orientée au sud, l'ensoleillement hivernal (durant la période de chauffage, plus ou moins longue en fonction de la région) est de l'ordre de 350 à 400 kWh en plaine, ensoleillement par mètre carré à mettre en perspective avec l'économie majestueuse d'une étanchéité à l'air totale d'un logement. Effectivement, 1 m² de façade, disposant d'un potentiel énergétique équivalant au gain total d'un logement « étanche » par rapport à la mauvaise étanchéité de la RT 2005, cela laisse songeur. Imaginez ce qu'on pourrait faire avec 10 ou 100 m² de façade ! Dix à cent fois mieux !

Peu ou prou, en France d'un point de vue moyen, un humble petit capteur solaire de 1 m² placé sur un mur orienté au sud sans ombrage, quelle que soit par ailleurs sa technologie, pourrait produire en hiver, pour un coût nettement moindre, la même quantité d'énergie que ce qui permet d'obtenir l'étanchéité totale d'un logement, à grands renforts de joints, de colles, de rubans adhésifs et autres artefacts parfois polluants et à la durée de vie douteuse, sans oublier le coûteux test de la porte soufflante, et le tout avec des résultats pas toujours atteints.

Qu'il s'agisse d'un capteur à vecteur solide, liquide ou gazeux, on pourrait donc imaginer qu'en courant 1 ou 2 m² de façade sud, on pourrait obtenir le même résultat, et de façon beaucoup plus simple et économique. En passant à 2 ou 3 m², on pourrait produire tous les besoins énergétiques d'une « Passivhaus ». Combien de logements, combien de bureaux ne disposent pas d'une façade sud d'une surface équivalente ? Il reste bien sûr

1. Olivier Sidler a indiqué : « ...en passant seulement des valeurs par défaut de la RT 2005 pour la perméabilité à l'air à des valeurs correspondant au label allemand Passivhaus (soit 0,6 vol/h sous 50 Pa), le gain de consommation est de 5 kWh/m².an. Un logement de type Passivhaus, dont l'étanchéité à l'air ne serait pas 0,6 vol/h (sous 50 Pa) mais la valeur pas défaut de la RT 2005, verrait donc sa consommation augmenter de... 50 % ! »

quelques problèmes à régler, dont le stockage de l'énergie potentielle et le rendement de ce capteur lié à la température du fluide caloporteur, et donc de la température du système de chauffage. On sait parfaitement stocker cette énergie pour les besoins en eau chaude sanitaire, à haute température et pour des besoins quantitativement supérieurs, et l'on ne serait pas capable de stocker quelques kilowattheures par jour destinés au chauffage ?



Une construction bioclimatique se protège du vent par l'utilisation judicieuse de son environnement, beaucoup mieux que ne le ferait n'importe quelle technologie. (Architecte Jérôme Solari)



Étanchéité et raison

Il n'est bien sûr pas question de mettre en cause l'intérêt d'une « bonne étanchéité », en particulier pour le confort, mais de savoir jusqu'à quel niveau il faut essayer de la pousser, compte tenu de la complexité de la mise en œuvre d'une étanchéité totale. Et en se rappelant qu'on entre dans un logement et qu'on en sort régulièrement, que parfois on ouvre une fenêtre, même si c'est de courte durée, et donc que l'on détruit régulièrement cette étanchéité.

Un enfant dans un logement, à lui tout seul, par son besoin humain d'entrer et sortir, va consommer infiniment plus que le gain hypothétique d'une étanchéité parfaite. Quand on voit des projets d'étanchéité totale se développer pour la construction d'une école, on est en droit de s'interroger sur la finalité de cette pratique. Pour labelliser l'école en bâtiment BBC, va-t-il falloir interdire les récréations ?! Il serait tellement plus simple et plus performant d'y prévoir par exemple des sas... adaptés en taille, et une valorisation du soleil.

Les bons choix

Il existe de nombreuses techniques de valorisation de l'énergie solaire en hiver, on en reparlera. On peut commencer par les simples fenêtres, sans oublier les capteurs solaires thermiques de nos chauffe-eau. En dernier ressort, il y a aussi les modules photovoltaïques, capables de produire cette énergie. Et bien d'autres techniques encore, pour certaines passives et beaucoup plus performantes, que nous évoquerons plus loin.

Cette obsession de l'étanchéité à l'air, poussée à un niveau parfois ubuesque², sans prise en compte du fonctionnement réel d'un bâtiment et des comportements humains, et à la durée de vie incertaine, est donc assez surprenante, quand on la compare à l'ignorance persistante du simple potentiel bioclimatique des bâtiments, en particulier en région méditerranéenne ou alpine.

Pourquoi faire simple et économique quand on peut faire compliqué, cher et pas forcément efficace ? Sommes-nous donc si peu imaginatifs que nous ne sachions rien faire d'autre que de copier, par principe et sans réfléchir, des techniques complexes inventées par d'autres pour d'autres situations climatiques, à l'intérêt évident dans les pays nordiques, mais pas forcément adaptées à notre climat ?

S'il s'agit d'apprendre à tous les intervenants de l'acte de construire à mieux bâtir, en évitant les fuites inutiles, on ne peut qu'approuver cette volonté, sur le principe. S'il s'agit d'économiser de l'énergie, le résultat est déjà plus douteux. S'il s'agit de donner une note couperet qui va autoriser ou non l'accès à certaines dispositions législatives...

2. Qui n'a vécu le sourire sarcastique du contrôleur se retournant vers l'architecte avec mépris et lui annonçant « 0,61 ! Pas bon ! Il faut atteindre 0,60 » ? Quand on connaît le degré d'incertitude d'une mesure d'étanchéité à l'air, de l'ordre de 15 % dans le meilleur des cas, quand on imagine le nombre d'ouvertures de portes que va subir le bâtiment ensuite... on ne peut que rester interloqué.



En particulier dans les régions chaudes, la présence de l'eau est indispensable à une construction saine et agréable à vivre. Ici, bambouseraie de Prafrance (30). (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

La question qu'on est en droit de se poser, c'est de savoir à qui profite réellement cette technologie de l'adhésif : à ses utilisateurs futurs ou à ses promoteurs ?

L'HYGROMÉTRIE

L'être humain est une formidable machine à produire de l'eau, sous forme de vapeur. D'abord par son propre métabolisme, mais aussi parfois par ses activités, comme se laver ou faire à manger ou encore faire fonctionner des process industriels, générateurs de vapeur. L'homme ne saurait d'ailleurs survivre longtemps sans une hygrométrie acceptable de l'atmosphère ambiante. Pourtant, il ne prend que rarement en compte cette vapeur d'eau lorsqu'il construit et les matériaux employés ignorent régulièrement cet aspect, lorsqu'ils ne le combattent pas.

L'isolation, jusqu'où ?

Généralement, les matériaux « technologiques » dits « modernes », contrairement aux matériaux naturels, sont totalement étanches à la vapeur d'eau. Ils veulent recopier les matériaux traditionnels, avec parfois certaines qualités légèrement supérieures, mais sans jamais prendre en compte cet aspect de l'hygrométrie. Si un mur de béton ou de parpaing n'est pas étanche à l'eau (et peut même être comparé à une éponge), il l'est totalement à la vapeur d'eau. Pour le rendre étanche à l'eau, on lui ajoute des enduits encore plus imperméables à la vapeur. Et pour l'isoler thermiquement, on lui ajoute du polystyrène ou de la laine de verre, ce qui ne fait que renforcer encore cette étanchéité à la vapeur d'eau. Et comme ces matériaux ne supportent pas la présence de vapeur, on y ajoute, comme une cerise sur le gâteau de l'obstination dans l'erreur, un pare-vapeur. Celui-ci va alors concentrer la vapeur d'eau au niveau de ses discontinuités (interface mur-plancher, refend, liaison mur-vitre, prises de courant et interrupteurs électriques, lampes murales...), sans la réduire en aucune façon. La solution technologique proposée par les DTU (documents techniques unifiés, qui normalisent les procédés de mise en œuvre) est souvent pire que le mal. Il reste à ajouter une peinture hydrofuge³ généralement bourrée de COV latents pour parfaire la catastrophe. Difficile de faire pire sur ce sujet qu'un mur moderne.

3. Hydrofuge : « qui préserve de l'humidité », selon le dictionnaire. Dans le cas de ces peintures, c'est plutôt l'effet inverse que l'on obtient.

Entendons-nous bien : le béton n'a pas forcément que des défauts, il est généralement produit localement, avec une énergie grise modérée ; il est assez facilement recyclable, sans beaucoup de production de rejets nocifs, et il pourrait largement progresser vers un produit encore plus « écologique », pour autant que les fabricants s'y décident un jour. Son problème provient d'une monoconception étanche à l'innovation et d'une philosophie industrielle enfermant le volume du bâtiment dans une coquille sans respiration qui, par les normes énergétiques qu'on lui applique ensuite, fait perdre tous les avantages du matériau, à commencer par son inertie, sans aucun gain énergétique réel.

Signalons que la législation et la réglementation actuelles ignorent aussi cet aspect hygrométrique de la construction. En effet, si on applique textuellement les règles de la réglementation thermique à un bâtiment ancien, on constate rapidement que les résultats deviennent aberrants. Pour ceux qui en doutent, un petit test (pas si petit que cela) est intéressant à ce titre : il s'agit de simuler les conditions climatiques à l'intérieur d'une cathédrale, en statique comme en dynamique. De quoi vous donner l'envie de jeter non seulement le moteur logiciel de la réglementation à la poubelle mais également la plupart des logiciels de simulation thermique, statique comme dynamique. Et cela vaut aussi bien pour un immeuble haussmannien que pour une construction en bois, en pierre ou en pisé.

D'où peut venir cette difficulté ? Toutes ces techniques de calcul ont été établies sur une base facile : un modèle de bâtiment constitué de béton, recouvert à l'intérieur de polystyrène. Facile, car ce sont des matériaux artificiels, qui ont des propriétés simples à décrire, en contradiction avec les matériaux naturels, et qui ont amené à les considérer comme inertes, donc comme statiques face à la diffusion thermique et hygrométrique. Ces matériaux sont étanches à la vapeur d'eau, entre autres particularités néfastes. Alors que les matériaux naturels ne le sont pas. Un bâtiment ancien « vit ».

Le cycle de la vapeur d'eau

Quand de la vapeur d'eau se condense dans un matériau naturel, elle restitue au passage son énergie latente. Une fois évacuée dehors, cette vapeur d'eau aura restitué son énergie au sein même de la matière constituant la paroi, énergie qui par diffusion va freiner les déperditions, sous forme de rideau thermique, un peu comme le rideau d'air chaud des supermarchés. Et ce n'est qu'un exemple. Or aucun outil ne prend en compte ce phénomène. Autres points négligés dans les constructions traditionnelles : la qualité du liant (le ciment) et éventuellement de l'enduit externe. Ils jouent souvent un rôle important d'isolation thermique et de régulation de la migration de la vapeur et de l'eau, mais aussi de perspiration de la paroi. Autre point encore, lié aux précédents : un matériau naturel « sait » beaucoup mieux valoriser les apports solaires qu'un mur de béton. Là encore, nous aurons à revenir sur ce jeu subtil entre l'air, l'eau et la vapeur d'eau. Enfin, lorsque les fondations sont dans un milieu humide, elles aspirent l'eau du sol par capillarité. Si les parois du mur ne sont pas étanches à l'eau et à la vapeur d'eau, celle-ci pourra s'évacuer, ce qui n'est plus le cas si la paroi est étanchée. On trouve cette difficulté par exemple sur les murs en brique de terre crue. Quand les occupants croient pertinent de les isoler par l'intérieur avec du polystyrène et, pire encore, de les revêtir à l'extérieur d'une couche de ciment protecteur : le mur se délite.

À défaut de méthode d'évaluation probante, il faut donc absolument garder à l'esprit qu'un matériau naturel possède des qualités thermiques dynamiques nettement différentes de ce que le seul coefficient λ (lambda) veut bien nous faire croire. Les règles habituelles de calcul thermique sont difficiles à appliquer à des matériaux naturels, ce qui *a minima* nous prouve que certains paramètres fondamentaux sont oubliés dans les règles actuelles d'évaluation de la qualité énergétique d'une construction. C'est ce que nous allons maintenant commencer à regarder de plus près.

2| BASES DU CALCUL THERMIQUE

LA THERMODYNAMIQUE, QU'EST-CE QUE C'EST ?

Nous allons maintenant commencer à nous plonger dans la technique. Les plus allergiques aux mathématiques pourront lire cette partie en diagonale, mais nous les invitons à essayer au moins de la parcourir, afin de se faire une meilleure idée des règles générales de détermination des propriétés énergétiques d'un matériau et d'une construction.

Pour bien comprendre comment un matériau réagit face à une variation de la météorologie ambiante, il est indispensable de connaître quelques définitions techniques, et surtout de savoir à quoi elles correspondent. On entend couramment parler d'un certain nombre de notions « bizarres », autant avoir une idée un peu précise de ce qu'elles signifient.

Dans cette optique, nous n'allons pas essayer d'expliquer la thermodynamique⁴, mais seulement de mieux définir certaines grandeurs et termes qu'on rencontre souvent, et rappeler leurs relations.



La thermodynamique par l'exemple

Une grotte est un système ouvert.

Une construction bioclimatique est un système fermé.

Une construction moderne se voudrait un système isolé, mais elle a des fuites partout.

Comme on le voit, la thermodynamique s'applique parfaitement aux bâtiments...

La thermodynamique, hantise de nombreux étudiants, étudie des « systèmes ». Un système, c'est un bout d'univers, tout seul dans son coin, qui existerait même si le reste de l'univers n'existe pas. Il faut déjà avoir l'esprit assez tortueux pour arriver à travailler sur de telles bases.

Histoire de simplifier, ces systèmes sont de trois types : ils sont soit ouverts, comme l'est un pot à eau (il peut se vider dans le reste de l'univers), soit fermés, comme une bouteille bouchée (elle ne peut plus se vider ni se remplir, mais peut continuer à échanger de la chaleur par exemple, si on met la bouteille au réfrigérateur ou en plein soleil), soit isolés, comme une bouteille Thermos parfaite (elle devient sourde à tout ce qu'il se passe dans le reste de l'univers). Parfois, ils fuient... Et même, certains jours, s'évaporent...

Ces systèmes sont alors définis par des variables d'état (des valeurs qui les décrivent), qui sont soit intensives, soit extensives. La température, par exemple, est une grandeur intensive : vous mélangez deux quantités à 15 °C, le résultat n'est pas 30 °C, mais il est une quantité double, toujours à 15 °C. Une grandeur extensive, à l'inverse, va varier en fonction de la taille du système : si vous mettez deux fois plus de briques, le résultat pèsera deux fois plus lourd : la masse est une grandeur extensive.

Il y a enfin des choses, qui se déduisent des précédentes, mais qui ne sont pas des variables d'état, car elles dépendent de la manière dont le système évolue : la chaleur par exemple n'est pas une variable d'état d'un système. Suivant les transformations qu'on fait subir à ce système,

4. Une définition assez connue de la thermodynamique est la suivante : la première fois qu'on l'approche, on n'y comprend rien ; la deuxième fois qu'on y touche, on comprend tout ; les fois suivantes, on réalise que c'est définitivement incompréhensible mais qu'en appliquant les formules sans se poser trop de questions, ça marche !



sa valeur va varier. Et entre deux états différents, la quantité de chaleur mise en œuvre pourra prendre n'importe quelle valeur, suivant le chemin qu'on aura choisi pour passer d'un état à un autre.

TRAVAIL, CHALEUR ET ÉNERGIE

Petit rappel avant d'entrer dans le vif du sujet, pour éviter une confusion trop fréquente : le travail et la chaleur (et la puissance) sont des formes différentes d'une même chose, qu'on exprime en watts, ou en kilowatts. On peut produire de la chaleur avec du travail et réciproquement (même si c'est plus difficile).

L'énergie s'exprime en kilowattheures (ou en watts secondes ou encore en joules) : elle représente une quantité de travail ou de chaleur fournie durant un certain temps.

Quand vous allez au bureau, vous fournissez plus ou moins de travail suivant les moments, vous pouvez même ne plus en fournir lors de la sieste. En revanche, l'énergie que vous dépensez pour accomplir ce travail ne cesse, elle, d'augmenter. Au bout de la journée, sieste ou non, vous aurez consommé pas mal d'énergie, plus ou moins, et vous serez peut-être dans un état de fatigue avancé. Mais vous ne travaillez plus, votre état est stationnaire.

Il faut mémoriser cette différence fondamentale : la chaleur se mesure à un instant donné, l'énergie se mesure (et se cumule) au fil du temps qui passe. Dans une bouteille d'eau chaude, il y a de la chaleur. De l'énergie sort progressivement à travers sa paroi. Au final, il reste moins de chaleur disponible dans la bouteille, qui est devenue plus froide.

Vous êtes en haut d'une colline, à une certaine altitude. Vous descendez à une certaine vitesse, peu importe laquelle. Vous arrivez en bas à une autre altitude. Les altitudes de départ et d'arrivée n'ont pas de lien avec la vitesse à laquelle vous êtes descendu ni avec le chemin emprunté, mais uniquement avec la taille de la colline. Si vous allez lentement, il faudra juste un peu plus de temps. Et si vous passez par six sommets pour arriver en bas, le résultat sera le même, mais pas la quantité d'énergie fournie. Pour la chaleur et l'énergie, c'est pareil. La chaleur mesure une différence entre deux états (la différence d'altitude), l'énergie dépend du chemin parcouru et du temps passé à le parcourir.

Description de systèmes

Le produit d'une variable intensive par une variable extensive donne une variable extensive ; le quotient de deux variables extensives donne une variable intensive. Il en découle qu'en général une grandeur extensive est associée à au moins une grandeur intensive. Cette loi est assez pratique : si on connaît deux variables extensives d'un système, il suffit d'en faire le rapport pour obtenir une description de ce système qui le caractérise mais qui ne dépend plus de sa taille.

Par exemple, un bâtiment consomme des kilowattheures (extensif) et possède une surface (extensif) : une de ses caractéristiques intensives est une consommation par unité de surface (en kilowattheures par mètre carré). Si on modifie sa taille, on ne changera pas sa caractéristique intensive. On pourra donc comparer plusieurs bâtiments par leur valeur intensive (en kilowattheures par mètre carré) quelle que soit leur taille. A contrario, il faut éviter de comparer entre elles des valeurs extensives, car cette comparaison peut être trompeuse.

TEMPÉRATURE

Si quelqu'un vous dit « *il fait deux fois plus chaud à Madrid qu'à Londres* », en supposant qu'il fasse 10 °C à Londres, quelle est la température à Madrid ? 20 °C ? Et s'il fait 0 °C à Londres... quelle est la température à Madrid ? Deux fois 0 °C ?

La température qu'on utilise habituellement, en degrés Celsius, est purement conventionnelle, afin de simplifier les discussions : 0 °C pour geler l'eau, 100 °C pour la faire bouillir, ce sont des repères faciles, mais totalement arbitraires. La bonne échelle nous a été donnée par Lord Kelvin, qui a démontré que, quand il n'y avait plus du tout de chaleur, la température était de – 273 °C. Quand il fait 10 °C à Londres, il fait donc $273 + 10 = 283$ K (kelvins). Et si l'on faisait deux fois plus chaud à Madrid, la température serait de 566 K, soit 293 °C !

Dans les calculs mathématiques, si on utilise une différence ou une variation de température, peu importe que l'on parle en degrés Celsius ou en kelvins, cela donne autant de degrés d'écart. Mais si on doit utiliser une température seule, il devient impératif d'utiliser les kelvins, ce qui explique que les unités thermiques soient plutôt exprimées en kelvins, utilisant le symbole K.



Historique de la réglementation thermique

- 1974 : coefficient G, résidentiel
- 1976 : coefficient G1, non résidentiel
- 1980 : label Haute Isolation
- 1982 : coefficients G et B, résidentiel besoins
- 1983 : labels Haute Performance Énergétique (HPE) et solaire
- 1988 : coefficients GV, BV et C résidentiel consommation et coefficient G1 non résidentiel déperditions
- 2000 : Ubat, coefficient C (règle Th-C), ponts thermiques, risques d'inconfort en été (règle Th-E)
- 2005 : kWh/m² SHON, énergies renouvelables

- 2010⁵ :
- En résidentiel neuf : THPE 2005 = RT 2010 et 35 % de Effinergie
- En bâtiments publics et tertiaires : BBC 2005 = RT 2010
- Cmax unique en logement quelle que soit l'énergie : 80-90 kWhep/m² SHON
- Chauffage réf. : combustible condensation, électrique PaC
- Calcul ECS au pas de temps horaire selon modèle RC
- 2012 :
- En résidentiel neuf : BBC 2005 = RT 2012 (50 kWhep/m² SHON + correction selon la zone géographique)
- ECS solaire obligatoire
- Traitement complet des ponts thermiques (isolation extérieure ou rupteurs)
- Suppression du chauffage électrique direct
- 2015 : obligation des EnR ?
- 2020 : bâtiment à énergie positive (suite du label BEPOS)

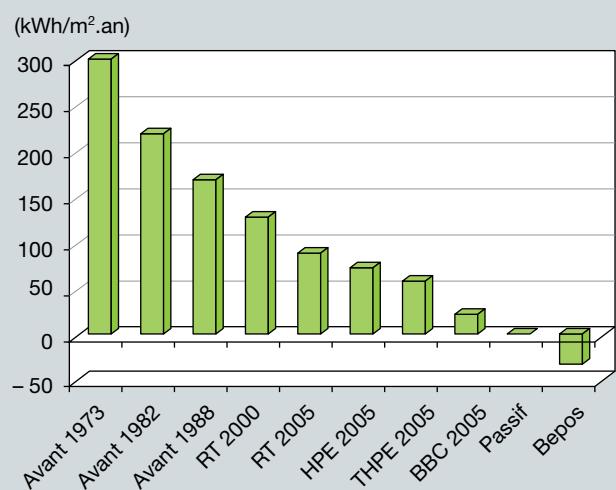
5. Sous réserve évidemment de confirmation de ces projets d'évolution.

LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, la réglementation thermique (souvent appelée « RT ») a pour objectif d'inciter les concepteurs à construire des bâtiments « économies » en énergie. En 1973, seule l'intention était là. À partir de 2012, on pourra réellement commencer à parler de bâtiments économies.

Chaque étape d'évolution de cette réglementation, aussi critiquable soit-elle, a permis de faire un progrès significatif dans la consommation des bâtiments. La future réglementation se fixe *a priori* comme objectif de définir comme minimum indispensable une performance de type « bâtiment basse consommation » (BBC).

Il est important de comprendre que ce niveau BBC (on en reparlera plus loin) de consommation est un minimum à respecter et non un objectif à atteindre. Dit autrement, un niveau de consommation BBC sera dès 2010 ou 2012 (sous réserve de validation) le bas de gamme de la construction et les bons concepteurs d'aujourd'hui le considèrent déjà ainsi.



Évolution de la réglementation thermique (besoins en chauffage).

La RT a progressivement permis d'améliorer sensiblement la qualité générale des bâtiments neufs. Il lui reste à intégrer le potentiel des principes bioclimatiques.

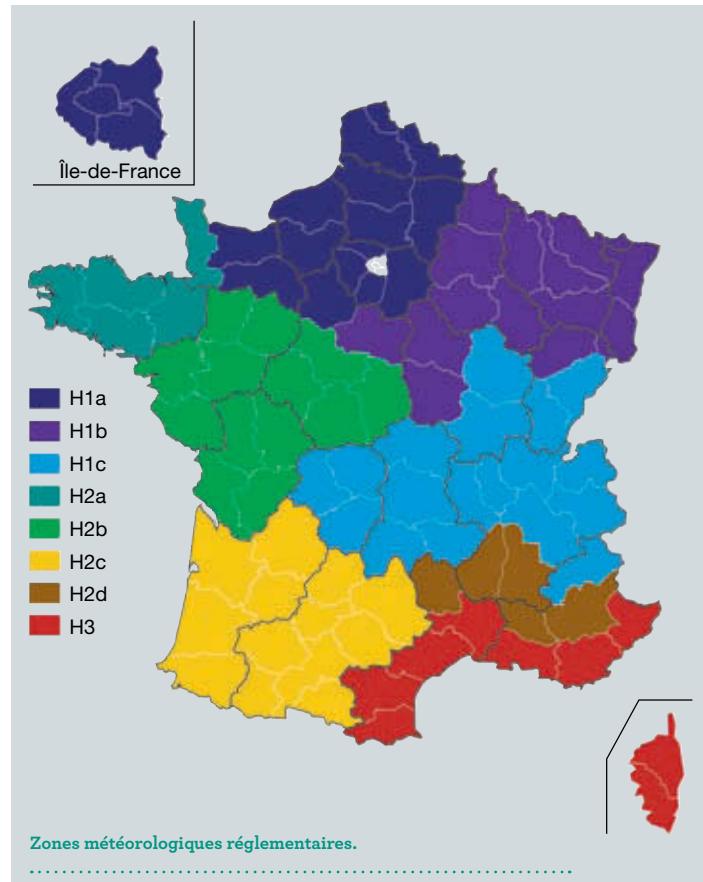
Pourtant, nombre de concepteurs se plaignent de la difficulté qu'ils ont parfois à respecter ne serait-ce que la RT 2005. Le monde du bâtiment est à l'aube d'une révolution, semblable à celle qui nous a fait passer de la machine à vapeur au TGV, qui laissera sur le pavé tous ceux, fabricants, architectes, bureaux d'études et entreprises, qui ne sauront pas prendre le virage de la performance énergétique.

Nous rappelons rapidement dans l'encadré ci-contre les grandes étapes de l'évolution de cette RT, sans entrer dans le détail des coefficients qui y sont associés. On remarque une accélération à partir de 2000, avec un rythme de révision désormais fixé à environ cinq ans.

Avancées et limites

« Que de progrès », se disent certains, qui ont du mal à suivre le rythme. Et pourtant... la réglementation actuelle, si elle a bien sûr permis d'importants progrès, ignore encore certaines données fondamentales et cependant évidentes dans la conception de bâtiments performants, à commencer bien sûr par l'existence de fenêtres recevant du soleil, en passant par les formes valorisant ces apports solaires, sans oublier la qualité énergétique et sanitaire des matériaux, ou encore la capacité ancestrale des humains à pouvoir se chauffer avec un poêle à bois. Vouloir aujourd'hui construire un bâtiment qui ne consomme pas d'énergie relève du parcours du combattant face à cette réglementation et à ses documents techniques associés, les fameux DTU, sans oublier les lois régissant l'urbanisme, qui interdisent quasiment en un magnifique concert d'incompréhension l'isolation par l'extérieur, l'usage de la paille comme isolant ou du poêle à bois comme système de chauffage⁶, sans parler de la ventilation naturelle. À force de vouloir tout réglementer, notre société moderne a construit un carcan s'opposant à l'innovation et à la simplicité. À force de vouloir expliquer « comment faire » à grand renfort de technologie, elle en a oublié l'objectif d'origine : « pour quoi faire ? ».

Construire un bâtiment qui ne consomme pas d'énergie est légalement interdit à ce jour, au prétexte que ce n'est pas possible. On voit ainsi des réalisations exemplaires s'équiper de radiateurs électriques inutiles (débranchés et démontés dès que les certificats légaux sont obtenus) pour simplement pouvoir être conformes à la législation ! On s'étonne ensuite que vouloir construire performant coûte plus cher...



Consommation en énergie primaire par zone climatique

Type de chauffage	Zone climatique	Cepmax (kWh/m ² .an)
Combustibles fossiles	H1	130
	H2	110
	H3	80
Chauffage électrique (dont PAC)	H1	250
	H2	190
	H3	130

6. Les récentes évolutions réglementaires commencent à mentionner du bout des lèvres ces aspects. Ainsi, le poêle à bois est désormais toléré, depuis juillet 2009, dans une maison individuelle, mais exclusivement si elle est d'une surface inférieure à 110 m² et à condition de mettre un chauffage électrique dans la salle de bains !

Mais ne soyons pas si catégoriques. L'évolution de la RT est positive, les progrès accomplis sont indéniables, même s'il reste une longue route à parcourir.

Chaque évolution a apporté son lot de progrès. Un des grands progrès a été de prendre en compte la déperdition thermique de l'enveloppe et de ne plus se référer au seul volume chauffé.

Un autre progrès a été par exemple d'acter le fait que la météorologie n'est pas la même partout dans ce pays jacobin qu'est la France. Le pas restant à franchir consistera à valider le fait que les critères de construction, de ventilation, d'étanchéité à l'air, d'exposition au soleil... doivent s'adapter au climat, sans oublier la prise en compte de l'énergie grise et de l'impact sanitaire et environnemental des matériaux.

La prise en compte de la localisation géographique se limite pour l'instant à la définition de trois grandes zones météorologiques, dénommées H1, H2 et H3 (subdivisées en huit sous-zones pour les températures de base), ainsi qu'à la modulation des critères pour les constructions situées à plus de 400 et plus de 800 mètres d'altitude. Mais quand on se chauffe au charbon, pardon, à l'électricité (produite à base de charbon en hiver), on a le droit de gaspiller deux fois plus. Ces valeurs de consommation comprennent désormais les consommations de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude sanitaire, mais n'intègrent pas encore tous les auxiliaires, encore moins les ascenseurs, l'équipement des communs, ou l'informatique. La température extérieure de référence, définie selon ces zones, prend également en compte désormais l'altitude à raison d'un déclassement tous les 200 mètres, mais il n'est pas pris en compte l'ensoleillement ou le vent.

Enfin, des qualités thermiques minimales sont imposées pour chacun des principaux constituants d'un bâtiment, afin de ne pas laisser la possibilité de compenser un mauvais produit par un autre.

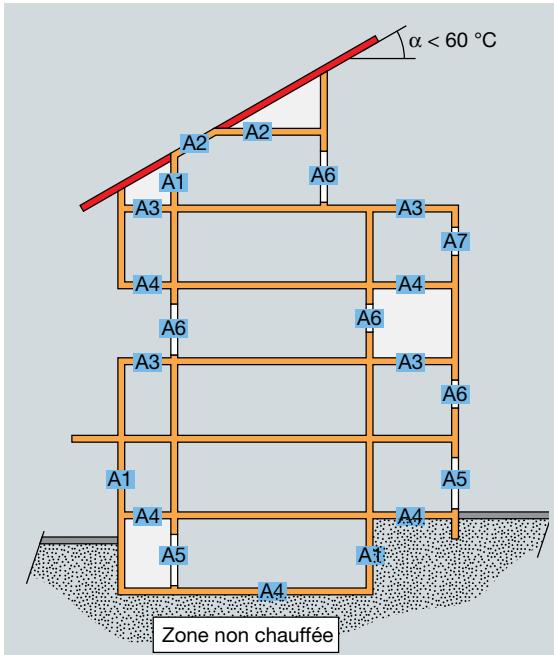
Nous n'entrerons pas dans le détail du fonctionnement de cette réglementation, un livre entier n'y suffirait pas. Nous noterons seulement qu'elle devient extrêmement lourde à appliquer, sans pourtant permettre d'aboutir toujours aux meilleurs résultats, mais en montrant parfois de plus en plus d'incohérence face à des projets réellement performants, au point d'interdire les meilleures solutions.

Trouver du sens

L'objectif de la réglementation thermique est d'être la voiture-balai de la construction, guidant les derniers du peloton pour les aider à ne pas être perdus en cours

Performances thermiques des éléments d'enveloppe des bâtiments

Coefficient Ubat	Zone climatique H1	Zone climatique H2	Zone climatique H3
		Sauf constructions au-dessus de 800 m	
a1 Surfaces des murs	0,36	0,36	0,4
a2 Surfaces des plafonds	0,2	0,2	0,25
a3 Surfaces des toitures-terrasses	0,27	0,27	0,27
a4 Surfaces des planchers	0,27	0,27	0,36
a5 Surfaces des portes	1,5	1,5	1,5
a6 Surfaces des fenêtres	2,1	2,1	2,3
a7 = a6 pour résidentiel	1,8	1,8	2,1
L8 Linéaire planchers donnant sur l'extérieur	0,4	0,4	0,4
L9 Linéaire planchers intermédiaires	0,7	0,7	0,7
L10 Linéaires des toitures-terrasses	0,7	0,7	0,7
Vitrines	5,8	5,8	5,8



Les éléments de déperdition dans la réglementation thermique. Un pont thermique est, selon la réglementation, un élément linéaire ou ponctuel de l'enveloppe d'un bâtiment présentant un défaut de résistance thermique (principalement à l'interface entre deux parois – défaut structurel – ou par rupture de l'isolant de part et d'autre d'une paroi intérieure, plancher ou cloison – défaut conceptuel). Il peut aussi s'agir, au-delà de ce que prend en compte la réglementation, d'un défaut lié à une mauvaise mise en œuvre des matériaux, par exemple entre des éléments d'isolant non joints, ou par perforation de l'isolant (canalisation, prise de courant, etc.). Avec une isolation extérieure les ponts thermiques structurels et conceptuels sont quasiment nuls, et les défauts de mise en œuvre sont plus simples à éviter.

de route dans des bilans énergétiques catastrophiques, en leur indiquant le minimum considéré comme acceptable.

Mais c'est une voiture-balai qui voudrait dire à l'échappée en tête comment avancer. Il lui reste en conséquence à redevenir plus humble, à se reconnecter avec la réalité, à se refocaliser sur les objectifs à atteindre plutôt que sur les moyens d'y parvenir, à se concentrer sur les plus mauvais, en laissant aux meilleurs la capacité d'inventer et d'innover.

Il lui reste à comprendre qu'un bâtiment n'est pas un objet statique mais une composition dynamique, il lui faut arrêter

de vouloir dire à l'architecte et à l'énergéticien « *comment faire* » et se contenter de vouloir dire « *pour quoi faire* ».

BÂTIMENT BBC

Pour en terminer avec la réglementation thermique, nous ferons un petit tour complémentaire sur le label BBC, pour « bâtiment basse consommation », ce fameux niveau BBC que certains considèrent comme le *nec plus ultra* de la construction performante (nous ne parlerons pas du label Effinergie qui permet de valider ce niveau BBC, pour ne pas jeter le bébé avec l'eau du bain, même si le bébé a une légère tendance à vouloir imposer son monopole sur le territoire français, en excluant *de facto* toutes les autres approches d'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment).



Une construction basse consommation, c'est d'abord une construction à faible énergie grise, possédant une enveloppe performante, confortable en toutes saisons, à commencer par l'été en région méditerranéenne. Une pompe à chaleur ou une chaudière à condensation n'améliorera pas une mauvaise construction, même si elle est labellisée BBC grâce à cet artifice. Ici, extension en ossature bois à Mourèze (13), avec utilisation de pin Douglas non traité, passé au sel de bore. L'isolation extérieure est composée de ouate de cellulose et les cloisons intérieures sont isolées en laine de mouton. L'extension produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme et permet de réduire sensiblement les besoins énergétiques de la construction principale. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

Afin de dresser le tableau de façon lisible, prenons un bâtiment conforme à la RT 2005. Ajoutons-lui un chauffage au bois : coefficient d'énergie primaire de 0,6 (nous reviendrons plus en détail sur cette notion d'énergie primaire). Ajoutons-y encore une VMC double flux, et hop ! le tour est joué : le bâtiment est devenu BBC par la baguette magique du législateur, sans amélioration de la qualité de l'enveloppe, sans valorisation de l'énergie solaire.

Ce simple exemple montre à quel point ce niveau BBC est inadapté à l'objectif poursuivi. Il n'est point nécessaire de construire performant, il suffit de construire conforme à la RT 2005 et de savoir utiliser quelques règles d'évaluation pour, avec un peu de scotch lors du test d'étanchéité, obtenir le label sésame qui ouvrira droit aux crédits d'impôts et autres PTZ (prêt à taux zéro) ou bonus de COS (coefficient d'occupation des sols). À cela il faudrait ajouter l'obsolescence des règles de calcul thermique de la réglementation et l'aberration des garde-fous de la même réglementation, qui interdisent de *facto* toute innovation.

Nous nous contenterons de citer quelques incohérences manifestes :

- Une construction calculée à 15 kWh en besoin de chauffage sous RT 2005 donne généralement 30 kWh en simulation thermique dynamique et une construction à 15 kWh en simulation thermique dynamique donne 60 kWh en RT 2005.
- La méthode exclut les apports internes et externes, ce qui est absurde en construction passive.
- Le label interdit de fait la construction bois-paille. Quoi qu'en pensent certains certificateurs, les maisons en paille ont des performances thermiques exceptionnelles.
- Le label ne prend pas en compte l'énergie grise des constructions. L'économie apparente de fonctionnement se fait parfois à un coût énergétique de construction illogique et indécent.
- Le label ne permet pas de prendre en compte des appoints et procédés de chauffage qui sont usuels pour de la construction à basse consommation, comme des poêles à bois, puits climatiques, VMC et ballons thermodynamiques, murs Trombe⁷...

- Un poêle à bois peut chauffer 109 m², mais à 111 m² de surface chauffée, cela ne fonctionne plus (une ruse très souvent utilisée consiste à installer des radiateurs électriques les moins chers possible, et à les revendre sur Internet dès que le label est obtenu, en les remplaçant par une prise électrique qui sera toujours utile...).
- « *Une installation de chauffage doit comporter par local desservi un ou plusieurs dispositifs d'arrêt manuel et de réglage automatique en fonction de la température intérieure.* » (référentiel BBC). Cela induit que le système de chauffage dispose d'une régulation pièce par pièce, ce qui est absurde dans une construction passive ou très performante, utilisant les flux d'air entre pièces pour maintenir le confort thermique global.
- Le confort d'été est totalement passé sous silence, ou évoqué de telle façon qu'il aurait mieux fallu ne pas en parler. Comme le constatent avec élégance nos amis allemands du Passiv Haus Institut, « *le confort d'été n'est pas toujours à la hauteur du confort d'hiver* ». On imagine ce que cela donne en Provence... C'est ainsi qu'on voit les maisons BBC s'équiper progressivement de climatiseurs, mais elles sont labellisées et consomment peu en hiver !

Nous allons arrêter là la liste, pour ne pas devenir lassant, mais on pourrait en remplir des pages. Ce label BBC, tant vanté par certains, n'est donc en rien une preuve de qualité. Les retours d'expérience sur le label BBC-Effinergie se sont multipliés et nous ne pouvons que constater que les lourdeurs et omissions du label, sans parler de la réalité des performances, sont en train de participer au discrédit à moyen terme du label et de la filière du bâtiment basse consommation. Et s'il existe sur le principe une commission (dite « du titre V ») théoriquement destinée à lever ces blocages, elle n'a dans la pratique pas d'autre fonction que d'être le gardien du temple.

Après ce constat un peu sombre de la situation réglementaire actuelle, précisons cependant qu'il ne faut pas tout condamner, cette réglementation a aussi de bons côtés. Nous allons maintenant pouvoir entrer dans le vif du sujet, et voir que tout n'est pas si noir et qu'il existe des marges de progrès considérables. Et nous allons pour cela nous pencher sur la technique.

7. Murs capteurs solaires inventés par M. Trombe. Ils seront décrits en détail lorsque nous aborderons la conception bioclimatique (voir partie 3, page 167 et suivantes).

Résistance thermique superficielle du matériau

Dans le cas particulier d'une paroi non isolée (mur de pierre nue, vitre de serre, tenture...), une autre résistance devient non négligeable : il s'agit de la résistance superficielle du matériau, celle qui correspond au contact direct entre les molécules d'air et la paroi, sur chacune de ses faces. Dans les calculs de déperditions, habitués comme nous le sommes à considérer des parois isolées, c'est une donnée que l'on oublie souvent pour analyser la performance d'une paroi. Pour se faire une idée de l'importance de cette résistance superficielle, il faut comprendre que sans elle, une serre avec 20 m² de vitrage de 4 mm, avec une température extérieure de 0 °C, nécessiterait une puissance de chauffage de 100 kW. Si c'était le

cas, il ne servirait à rien de mettre des vitrages, les fenêtres ouvertes donneraient quasiment le même résultat. Dans la réalité, les déperditions de ce vitrage de 4 mm sont environ quarante fois plus faibles, du fait des résistances superficielles, qui font appel aux phénomènes de convection et de radiation.

Un mur de pierre ou de béton aura une résistance superficielle proche de sa résistance interne, soit un quasi-doublement de sa résistance globale. Il en va de même pour un bardage en bois, sans oublier la lame d'air emprisonnée. C'est ce qui explique l'efficacité d'un espace tampon non chauffé et encore plus d'un double vitrage, qui présente quatre faces d'échange superficiel au lieu de deux, avec pour le double vitrage une lame d'air dans laquelle on interdit en plus la convection.



PRINCIPALES NOTIONS ÉNERGÉTIQUES

Pour définir l'état de chaleur d'un bâtiment, il faut d'abord connaître le point de départ (la température intérieure, supposée constante) et le point d'arrivée : la température extérieure. Mais cette dernière change tout le temps. Certaines organisations, dont Météo-France (climathèque de Météo-France : <http://climatheque.meteo.fr>), se sont données pour mission d'enregistrer à chaque instant la température extérieure (et bien d'autres informations sur la météo) et de mettre ces enregistrements à disposition de ceux qui en ont besoin. À noter qu'on parle bien ici de météorologie, ce qui n'a rien à voir avec le climat. Même si le climat doit se réchauffer inexorablement dans le siècle à venir, la météo continuera à nous offrir des hivers parfois très froids et des étés parfois caniculaires. Mais nous y reviendrons.

RÉSISTANCE THERMIQUE R

La résistance thermique « R » d'un matériau est proportionnelle à son épaisseur « e » et inversement proportionnelle à sa conductivité thermique « λ » (voir page 61).

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Pour connaître la résistance d'une paroi composite, il suffit d'additionner la résistance individuelle de ses composants. L'unité de résistance thermique s'exprime en mètres carrés et degrés par watt (m².K)/W.



Chantier bioclimatique pour le Jardin de Cocagne à La Tour-de-Salvagny (Rhône). Projet réalisé d'avril à octobre 2008. Bâtiment bioclimatique de 500 m² (SHON) à ossature bois porteuse et isolation paille, terre et chaux, avec mur Trombe à accumulation, puits canadien, photovoltaïque. Un bâtiment passif, à énergie positive, n'est pas une vue de l'esprit, mais d'abord une volonté du maître d'ouvrage.

COEFFICIENT U

Le coefficient U est tout simplement l'inverse de la somme des résistances thermiques (la résistance cumulée) des différents constituants. Pourquoi l'inverse ? Parce que cela va être plus facile à manipuler pour ce qui suit.

Le coefficient U, qu'on appelle le coefficient de transmission surfacique, qui sert à la plupart des méthodes utilisées dans la réglementation thermique, détermine d'une façon générale les déperditions d'une paroi. Il décrit la puissance thermique nécessaire pour compenser les pertes de chaleur par unité de surface de cette paroi et par degré : combien de chaleur peut fuir à travers 1 mètre carré de paroi pour chaque degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur. L'unité est le watt par mètre carré et par degré (W/m².K). Plus le U est bas, plus la paroi est isolante.

Ce coefficient U est, disons-nous, plus facile à manipuler ? Sauf qu'il n'est pas possible d'additionner les U, il faut pour cela repasser par les R.

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

PONT THERMIQUE

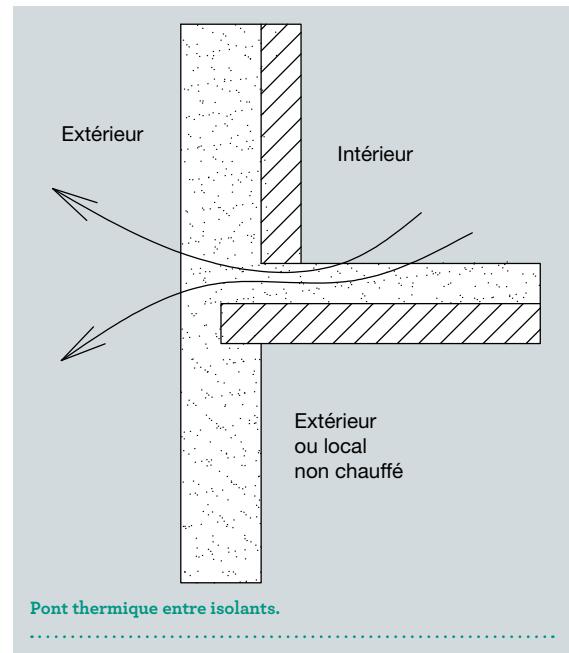
Qu'est-ce qu'un pont thermique ? C'est une partie de l'enveloppe du bâtiment où sa résistance thermique subit une modification ponctuelle notable. Celle-ci peut être liée à un défaut :

- d'exécution de l'enveloppe (par exemple des plaques d'isolant non jointives) ;
- de conception (par exemple un plancher qui traverse l'isolant du mur) ;
- structurel de l'enveloppe (par exemple la jonction entre une menuiserie et le mur qui la porte).

S'ils sont souvent négligeables sur un bâtiment non isolé, ces défauts peuvent parfois représenter jusqu'à 50 % des déperditions d'un bâtiment moderne mal conçu. Ils entraînent assez souvent une autre conséquence néfaste pour la qualité du confort intérieur : générant un point froid, ils provoquent une condensation ponctuelle source de moisissures, de détérioration des revêtements et de pollution intérieure de l'air, dangereuse pour la santé des occupants.

On distingue principalement deux types de ponts thermiques :

- les ponts thermiques linéaires, correspondant par exemple à la jonction d'un plancher avec un mur, qu'on mesure en watts par mètre et par degré ;



- les ponts thermiques ponctuels, correspondant par exemple à la jonction entre deux murs et un plancher, qu'on mesure en watts par degré.

La réglementation thermique, qui considère encore (cela va peut-être évoluer) les ponts thermiques comme quelque chose de normal et non comme des défauts de conception, ce qu'ils sont, impose des valeurs limites à ne pas dépasser, qu'il faut en conséquence traiter. Lors de la conception, il est indispensable de choisir des procédés de construction et des composants réduisant au maximum les pertes au niveau des jonctions des parois. L'isolation par l'extérieur est une méthode simple pour réduire de façon majeure les risques de ponts thermiques. L'isolation par l'intérieur est souvent le meilleur moyen pour les augmenter au maximum, mais il existe des solutions de conception (on ne parle pas des rupteurs thermiques qui ne sont qu'un pis aller technologique pour pallier un défaut de conception) pour parfois pouvoir s'affranchir de ces difficultés.

DJU – DEGRÉS-JOURS UNIFIÉS

Quand on mesure en permanence la température extérieure au long d'une journée, puis que l'on fait la moyenne de toutes les mesures, on obtient une température

moyenne journalière. Par exemple, en hiver, s'il fait -10°C la nuit et 0°C le jour, la moyenne sera vraisemblablement à environ -5°C . Par rapport à une température intérieure dans un bâtiment fixée arbitrairement à 18°C , l'écart moyen sera donc de 23°C . Cette valeur de 23°C est ce qu'on appelle les DJU₁₈, les « degrés-jours unifiés » de la journée considérée, sur une base de 18°C intérieurs⁸.

Pour obtenir les DJU d'un mois quelconque, il suffit d'additionner les DJU de chaque jour de ce mois. Et pour obtenir les DJU annuels, on additionne les DJU de tous les jours de l'année.

Bien sûr, on ne va pas retrancher les DJU négatifs, correspondant aux journées où il fait plus de 18°C dehors : dans ce cas, il n'y a plus besoin de chauffer le bâtiment pour le maintenir à 18°C . C'est pourquoi les mois d'été, donc hors période de chauffe, ont un cumul de DJU qui est nul.

Par contre, on peut procéder sur le même principe pour déterminer les DJU de rafraîchissement, qui vont permettre de compter le nombre cumulé de degrés-jours nécessitant un rafraîchissement des locaux.

Pour calculer les DJU_{T_{int}} réels en fonction de la température intérieure effective, on corrige les DJU₁₈ en fonc-

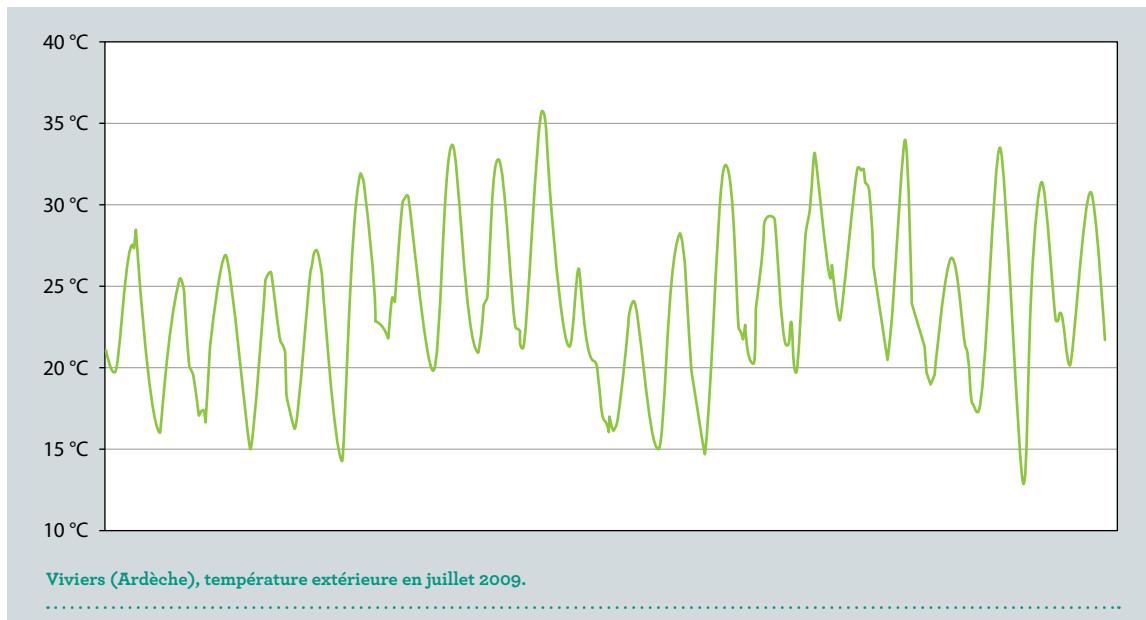
tion de la température intérieure réelle T_{int} et de la durée effective de chauffage J_{ch}, en jours (cette durée est généralement comprise en France entre 212 jours – 7 mois – et 243 jours – 8 mois –, mais peut dépasser les 300 jours dans certaines zones).

$$\text{DJU}_{T_{\text{int}}} = \text{DJU}_{18} + (T_{\text{int}} - 18) \cdot J_{\text{ch}}$$

Par exemple, pour connaître les DJU nécessaires pour chauffer à 20°C durant 212 jours, il faudra ajouter $2 \times 212 = 424$ DJU aux DJU₁₈. Sachant que les DJU₁₈ annuels en France sont en général situés entre 1 500 et 2 500 en plaine, il faudra donc 20 à 25 % d'énergie en plus pour compenser cette élévation de température de 2°C . On voit bien l'impact d'une surchauffe même minime d'un local sur la consommation globale.

TRANSFORMER LE COEFFICIENT U EN KILOWATTHEURES

Le coefficient U est une valeur un peu obscure. Nous allons voir comment le transformer en kilowattheures, donc en énergie consommée, ce qui parlera plus au profane.



8. Cette référence de 18°C a, à l'origine, pour raison d'être l'inertie thermique des bâtiments et les apports internes au bâtiment. En général, à partir d'une température extérieure moyenne de 18°C , il n'est théoriquement plus nécessaire de chauffer pour obtenir une ambiance de 21°C .

En additionnant chaque jour les DJU, on obtient sur toute une saison de chauffe un cumul annuel de DJU. Rassurez-vous, vous n'aurez pas à faire ces mesures, Météo-France par exemple les fait pour vous. La valeur obtenue varie de 1 500 environ aux bords de la Méditerranée à plus de 2 500 en région froide, voire plus de 4 000 en altitude. Comme nous l'avons vu, si l'on veut savoir ce qu'il se passe dans un logement chauffé à 20 °C au lieu de 18 °C, il faut ajouter 2 °C par jour, à multiplier par le nombre de jours de la saison de chauffe. Ce sont des degrés-jours, en multipliant par 24, on obtient des degrés-heures annuels.

Si l'on multiplie notre coefficient U, en watts par mètre carré et par degré Celsius, par nos DJU, en degrés Celsius par heure, on obtient des wattheures par mètre carré. En divisant le résultat par 1 000, on a alors des kilowattheures par mètre carré. Il reste à multiplier par la surface de la paroi déperditive pour obtenir des kilowattheures consommés durant la saison de chauffe par cette paroi.

$$E = \frac{24}{1000} \cdot DJU_{Tint} \cdot \sum_1^n (U_i \cdot S_i)$$

Avec :

- E = énergie totale consommée, en kilowattheures ;
- $DJU_{Tint} = DJU_{18} + \text{écart de température par rapport à } 18^\circ\text{C} \times \text{nombre de jours de chauffage} ;$
- $S_i = \text{surface de chaque paroi déperditive, en mètres carrés} ;$
- $U_i = \text{coefficient U de la paroi } S_i, \text{ en watts par mètre carré par degré Celsius.}$

Pour être précis, il faut inclure les ponts thermiques dans la somme $\Sigma(U \cdot S)$. On peut alors déterminer un coefficient U général du bâtiment, appelé U_{bat} , qui se calcule par rapport à la surface totale des parois déperditives du bâtiment :

$$U_{bat} = \frac{\sum_1^n (U_i \cdot S_i) + \sum_1^n (\psi_i \cdot L_i)}{\sum S_i}$$

Pour estimer les besoins globaux en énergie de chauffage d'un bâtiment, il reste à ajouter à ce résultat les pertes par ventilation, que nous verrons un peu plus loin. Les ponts thermiques représentent entre moins de 5 % des besoins dans un bâtiment peu isolé et plus de 15 % dans un bâtiment moyennement isolé. Dans un bâtiment de

haute performance énergétique, ces ponts thermiques devraient être quasi nuls, mais peuvent représenter 30 %, voire plus, des déperditions en cas de mauvaise conception (isolation par l'intérieur par exemple).

$$E_{chauffage} = \left(0,024 \cdot DJU_{Tint} \cdot U_{bat} \cdot \sum_1^n S_i \right) + E_{ventilation}$$

Pour connaître la consommation d'énergie globale du bâtiment, il faudra ajouter aux besoins de chauffage ceux en climatisation, en eau chaude sanitaire et en éclairage.

Arrivé à ce point, on peut enfin retrancher les apports internes et externes éventuels. Il reste pourtant un dernier point, loin d'être négligeable, qui est le rendement de l'ensemble du système de production d'énergie, lié à l'efficacité des équipements. Entre le système de production et l'enveloppe qui consomme, il y a :

- des émetteurs de chaleur, qui perdent à travers les murs surchauffés ;
- un système de distribution de l'énergie, qui n'est pas forcément bien isolé ;
- une régulation de l'ensemble, qui ne fonctionne pas toujours idéalement ;
- un système de production d'énergie, qui laisse par exemple partir par sa cheminée une part de l'énergie du combustible.

Le besoin en combustible, quel qu'il soit, doit donc prendre en compte le produit des rendements de tous ces systèmes. La perte globale peut représenter, suivant le système de production d'énergie, entre 10 et 25 % de la consommation de combustible, parfois plus de 50 %.

Le calcul du besoin en rafraîchissement reprend les mêmes principes, en partant des DJU d'été. Le calcul est toutefois complexifié par les apports internes (utilisateurs, équipements électriques...) et externes (apports solaires) qui peuvent facilement devenir majeurs par moments.

TRANSFORMER LE COEFFICIENT U EN KILOWATTS

Il nous manque encore une information à déterminer, qui est la puissance thermique du système de production de chaleur (ou de froid, mais là aussi, c'est un peu plus compliqué, à cause des apports solaires) ou, dit plus sim-

lement, la puissance du système de chauffage à utiliser. Une fois de plus, le fameux U va permettre de déterminer cette valeur.

Nous avons parlé des zones météorologiques H1, H2 et H3 de la réglementation thermique. Ces zones sont elles-mêmes subdivisées en sous-zones, notées de A à I. Ces neuf sous-zones correspondent à des géographies variées, présentant des altitudes différentes. En fonction de la zone et de l'altitude du site accueillant le bâtiment à chauffer, la réglementation définit une « température de base », qui correspond au minimum de température constaté durant une période d'au moins cinq jours consécutifs dans l'année, sur une période de trente ans.

À partir de la température de base, on peut calculer un différentiel de température de base dT_{base} , en faisant la différence entre cette température de base et celle de chauffage des locaux, ce qui va nous permettre de déterminer la puissance utile maximale P_{max} , en kilowatts, nécessaire pour compenser les pertes de l'enveloppe dans les pires conditions météorologiques, de deux manières différentes :

- soit à partir de l'énergie annuelle consommée (relevée sur les factures d'énergie) :

$$P_{max} = \frac{E \cdot (T_{base} - T_{int})}{24 \cdot DJU_{Tint}}$$

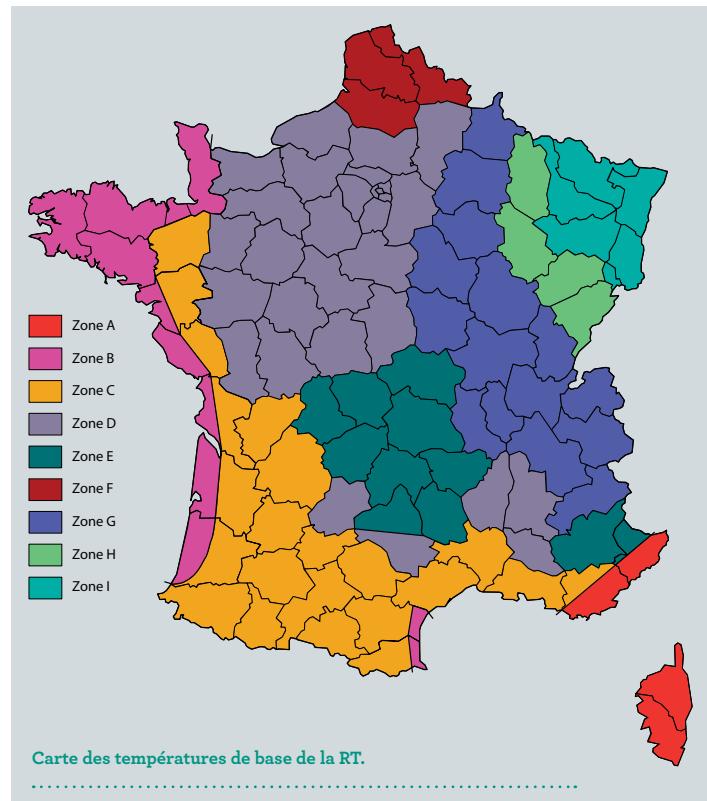
- soit tout simplement à partir des coefficients U :

$$P_{max} = \frac{(T_{base} - T_{int}) \cdot \sum (U_i \cdot S_i)}{1000}$$

La formule est simplifiée. En fait, pour être précis, il faut prendre aussi en compte les ponts thermiques. Il est alors plus pratique de se référer au coefficient U_{bat} et à la surface des parois du bâtiment :

$$P_{max} = \frac{(T_{base} - T_{int}) \cdot U_{bat} \cdot \sum S_i}{1000}$$

Mais tout serait trop simple si la puissance du système de production d'énergie pouvait se déterminer ainsi. Il faut ensuite, comme pour le besoin en énergie, prendre en compte les rendements du système complet, à l'exclusion du système de production, dont la puissance est toujours indiquée « nette », après pertes internes.



Ensuite, il faut se garder une double marge de sécurité, la première pour avoir une réserve de puissance pour les nuits les plus froides, la seconde pour permettre une

Températures de base en fonction de l'altitude et de la zone

Altitude (m)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
0 à 200	1	-2	-4	-5	-7	-8	-9	-10	-12	-15
201 à 400	2	-4	-5	-6	-8	-9	-10	-11	-13	-15
401 à 600	3	-6	-6	-7	-9	-11	-11	-13	-15	-19
601 à 800	4	-8	-7	-8	-11	-13	-12	-14	-17	-21
801 à 1 000	5	-10	-8	-9	-13	-15	-13	-17	-19	-23
1 001 à 1 200	6	-12	-9	-10	-14	-17		-19	-21	-24
1 201 à 1 400	7	-14	-10	-11	-15	-19		-21	-23	-25
1 401 à 1 600	8	-16		-12		-21		-23	-24	
1 601 à 1 800	9	-18		-13		-23		-24		
1 801 à 2 000	10	-20		-14		-25		-25		
2 001 à 2 200	11			-15		-27		-29		

relance du chauffage rapide en cas de chute brutale du thermomètre extérieur.

L'ensemble de ces rendements et de ces marges de sécurité fait qu'en pratique un système sera généralement dimensionné à environ le double du besoin utile de l'enveloppe du bâtiment. C'est une des raisons pour lesquelles, dans les bâtiments de taille conséquente, on prévoit normalement un double système de production permettant de moduler la puissance disponible, afin de ne pas fonctionner à trop bas régime et donc avec un mauvais rendement, sur un unique système trop surdimensionné.

CALCUL DU C_{EP} – ÉTIQUETTE ÉNERGIE

L'énergie est une grandeur extensive, elle n'est donc pas pertinente pour évaluer correctement une construction. Afin de la rendre intensive, donc indépendante du bâtiment, il faut la diviser par une autre grandeur extensive. Le bon choix est la surface chauffée. Par commodité avec les réglementations existantes, on utilise pour l'instant la SHON, surface hors œuvre nette.

Le calcul est tout simple, il suffit d'additionner les besoins annuels (en kilowattheures par an) en chauffage, refroidissement, ventilation, ECS et éclairage,

puis de diviser ce besoin total en énergie par la surface habitable, ou plutôt par la SHON, pour obtenir le coefficient de consommation d'énergie finale du bâtiment (en kilowattheures par mètre carré et par an). Mais pour ne pas oublier l'impact environnemental des différents types d'énergies employés, on l'affecte d'un « coefficient d'énergie primaire ». Nous reparlerons un peu plus loin de cette notion d'énergie primaire. On obtient ainsi le célèbre coefficient de consommation du bâtiment qui permet d'établir l'étiquette énergie.

$$C_{EP} = \frac{E_{totale} \cdot k_{EP}}{S_{SHON}}$$

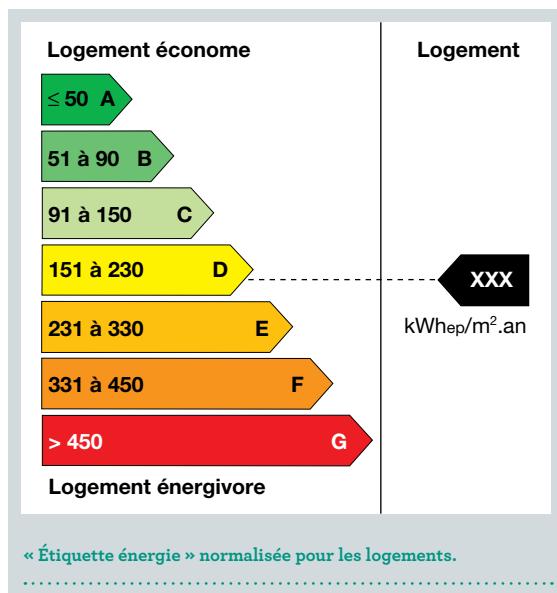
Et voici comment, à partir du coefficient U de la réglementation thermique, on en arrive à la consommation théorique d'un bâtiment et à l'étiquette énergie.

Nota : on fait souvent l'oubli des parenthèses quand on écrit l'unité kWh/(m².an), et même parfois de l'indication, qui est évidente, qu'il s'agit d'une mesure sur une année entière, mais il s'agit bien d'une consommation PAR mètre carré et PAR an.

Les coefficients d'énergie primaire sont actuellement en France les suivants :

Energie	Coefficient k_{EP}
Électricité	2,58
Fioul, gaz, charbon	1
Bois	0,6
Énergie solaire	0

Il y a beaucoup à dire sur ces coefficients, et il serait bien que l'Europe s'occupe d'harmoniser tout cela, afin d'éviter que certains lobbies nationaux minimisent l'impact environnemental réel de leur production énergétique. En toute logique, ce devrait plutôt être 4 pour l'électricité, 1,25 pour le fioul et le gaz, et 0,2 pour le bois, valeurs que retiennent peu ou prou de plus en plus de pays.



COEFFICIENT DE FORME

Il nous reste un point à aborder sur le sujet de l'évaluation thermique d'une construction : son coefficient de forme.

Chacun comprend assez aisément qu'une forme tarabiscotée n'est pas forcément la meilleure pour bien gérer l'énergie, puisqu'elle induit une augmentation de la surface déperditive. En fait, deux grandeurs importent :

- le volume à chauffer ;
- la surface de déperdition de l'enveloppe.

Plus la surface déperditive est faible par rapport au volume à chauffer, meilleur est la performance du bâti. La forme idéale est la sphère, offrant le maximum de volume pour le minimum de surface déperditive. Mais il n'est pas évident de construire une sphère. La seconde forme la plus efficace est le cylindre, qui est déjà plus facile à concevoir d'un point de vue architectural.

Pour déterminer la performance de la forme d'un bâtiment, on utilise classiquement le coefficient de forme C , qui est tout simplement le rapport entre la surface déperditive S_d (en mètres carrés) et le volume chauffé V (en mètres cubes), coefficient qu'on appelle en topologie mathématique la compacité. En réalité, il ne s'agit pas d'un coefficient lié uniquement à la forme, mais aussi à la densité du volume.

$$C = \frac{S_d}{v}$$

Si ce coefficient a un sens pour comparer différentes formes enveloppant un volume chauffé identique (mais on pourrait alors se contenter de comparer les valeurs S_d entre elles), il n'en a plus pour comparer entre eux différents bâtiments. Prenons un exemple, stupide mais démonstratif, avec un bâtiment cubique de 1 m^3 . Son coefficient de forme vaut 6. Mais le même bâtiment cubique, avec un côté de 10 m, soit 1000 m^3 , aura un coefficient de forme de 0,6 (6 faces de 100 m^2 chacune). Pourtant, les deux ont exactement la même performance énergétique de forme. Un grand bâtiment biscornu semble, avec un tel coefficient, meilleur qu'un petit bâtiment performant.

La bonne formule à utiliser doit donner un coefficient sans unité, indépendant de l'échelle du bâtiment, et devrait en conséquence élever la surface déperditive à la puissance 3/2. Un tel coefficient permet dans ce cas de comparer directement tous les bâtiments entre eux, indépendamment de leur taille globale, et de ne plus mélanger la forme et la densité constructive.

$$C_f = \frac{(S_d)^{3/2}}{10 \cdot v}$$



Une forme compacte permet de limiter au maximum les déperditions par les parois et n'interdit pas une valorisation optimale des apports solaires. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

La forme idéale de la sphère vaut ainsi $6 \sqrt{\pi}$, soit environ 10 (plus précisément 10,6347). Afin de simplifier les comparaisons, nous pouvons diviser la valeur obtenue par la valeur arrondie 10 : le coefficient de forme idéal vaut ainsi quasiment 1. À partir de cette référence, toutes les formes peuvent être évaluées de façon simple par rapport à cette valeur idéale du coefficient de forme de la sphère. La forme cylindrique de hauteur égale au diamètre vaut 1,30 alors qu'une forme cubique vaut 1,47 et que toutes les autres formes parallélépipédiques valent plus. Deux cubes accolés valent 1,58. Le parallélépipède d'or, dont les côtés sont dans le rapport du nombre d'or, vaut 1,65.

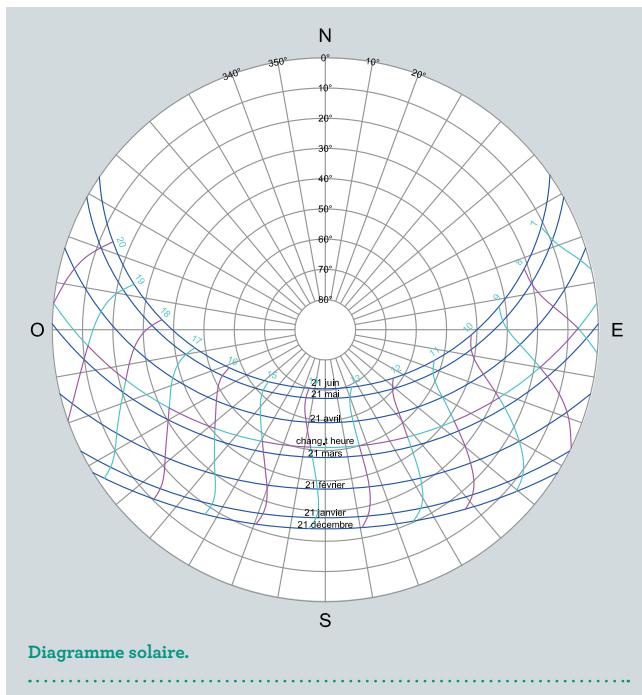
L'ÉNERGIE ET LE SOLEIL

Nous n'allons pas aborder maintenant ce qui touche aux apports solaires dans un bâtiment, nous aurons l'occasion d'y revenir longuement plus tard. Nous nous contenterons pour l'instant d'exposer quelques notions de base sur la façon d'évaluer l'influence solaire et, plus particulièrement, une représentation solaire qui en intrigue plus d'un.

Quand on souhaite prendre en compte l'impact du soleil sur une construction, il faut pouvoir savoir où il est, en fonction de l'heure et de la saison. On utilise pour ce faire un diagramme solaire.

Nous n'entrerons pas dans le détail de l'utilisation d'un tel diagramme, mais nous indiquerons seulement qu'il permet de représenter de façon très simple les ombres portées par les masques environnants (montagnes, autres bâtiments, arbres...) en fonction de l'heure et de la saison.

Le diagramme représente en fait tout simplement la voûte céleste (la demi-sphère du ciel aplatie sur un plan). Les cercles concentriques représentent l'inclinaison par rapport à l'horizon, le cercle extérieur figurant la ligne d'horizon, les lignes courbes symbolisent la trajectoire du soleil dans le ciel pour chaque mois de l'année, et donc sa position en fonction de l'heure et du mois, telle qu'on pourrait l'observer en étant allongé au sol et en regardant droit à la verticale, les pieds vers le sud. Par exemple, sur la ligne « 21 mars » (équinoxe), on voit par exemple que le soleil se lève un peu avant 8 heures et se couche un peu avant 20 heures, et qu'il est presqu'à 50° au-dessus de l'horizon à 14 heures.



ÉCLAIREMENT

Nous avons déjà eu l'occasion de dire que le soleil est une formidable source d'énergie pour la Terre, fournissant 18 000 fois les besoins totaux de l'humanité. Mais c'est aussi évidemment une source de lumière majeure.

Un éclairement se mesure comme un flux lumineux (mesuré en lumen) reçu par unité de surface. L'unité d'éclairement est le lux. En plein soleil, l'éclairement est de l'ordre de 50 à 100 000 lux. Par temps nuageux, il est encore de l'ordre de 10 à 15 000 lux. Installée à 2 mètres sous une lampe à incandescence de 75 W, une table de travail bénéficie d'un éclairement de l'ordre de 150 lux, ce qui suffit généralement pour y travailler. Par nuit de pleine lune, l'éclairement est de 0,1 lux.

Cette simple comparaison donne une idée de la capacité du soleil à nous éclairer, et de celle de l'œil humain à s'adapter. Pourtant, combien de bureaux nécessitent d'allumer la lumière, y compris en plein été et en plein jour, pour que les occupants arrivent « à y voir clair » ? N'y aurait-il pas quelque chose qui ne tourne pas rond dans notre gestion des apports de lumière naturelle, pour que nous soyons obligés d'allumer une lampe en plein jour en plein été ?

Les consommations d'éclairage dans un immeuble tertiaire peuvent facilement représenter un tiers des

Niveaux d'éclairement (en lux) conseillés par l'Association française de l'éclairage

Travaux délicats	> 1 000
Plan de travail industriel	500 à 1 000
Bricolage, couture	500
Travaux courants	300 à 500
Bureau	400
Séjour, coin écriture, salle de bains	300
Cuisine, plan de travail	300
Table de travail d'écolier	300
Salle à manger, sur la table	200
Travaux grossiers	100 à 200
Circulations intérieures	100 à 150

Il faut multiplier ces valeurs par 1,5 pour des sujets âgés de 60 à 75 ans, et par 2 au-delà de 75 ans. On reste quand même très loin de l'éclairement potentiel pouvant être fourni par le soleil.

besoins totaux en énergie, à niveau quasiment égal avec la consommation de l'équipement informatique⁹.

Il reste à trouver le moyen de valoriser l'éclairement naturel et donc de le modéliser afin de valider un plan d'architecte sur cet aspect de la qualité d'un bâtiment. Et là, la partie est encore loin d'être gagnée.

FACTEUR DE LUMIÈRE DU JOUR

Pour déterminer le niveau d'éclairement naturel obtenu dans un local, on utilise souvent, à défaut de mieux, un coefficient, le facteur de lumière du jour (FLJ).

C'est l'indicateur le plus utilisé, en particulier par tous les labels de qualité environnementale, même s'il est très incomplet. Il indique en pourcentage le rapport entre l'éclairement reçu sur un plan de travail dans un bâtiment et celui qui serait reçu par ce plan de travail s'il était situé dehors par « ciel couvert », donc sans lumière directe du soleil.

Ce qu'on appelle un ciel couvert est défini au niveau international par le modèle Moon & Spencer. C'est un ciel à luminosité symétrique dans toutes les orientations horizontales, et dont la luminance au zénith L_z (cd/m^2) est trois fois supérieure à la luminosité de l'horizon.

Sa luminance L_α vue sous un angle α quelconque se détermine alors en fonction de l'éclairement sur le plan horizontal E_h (lux) à un instant quelconque :

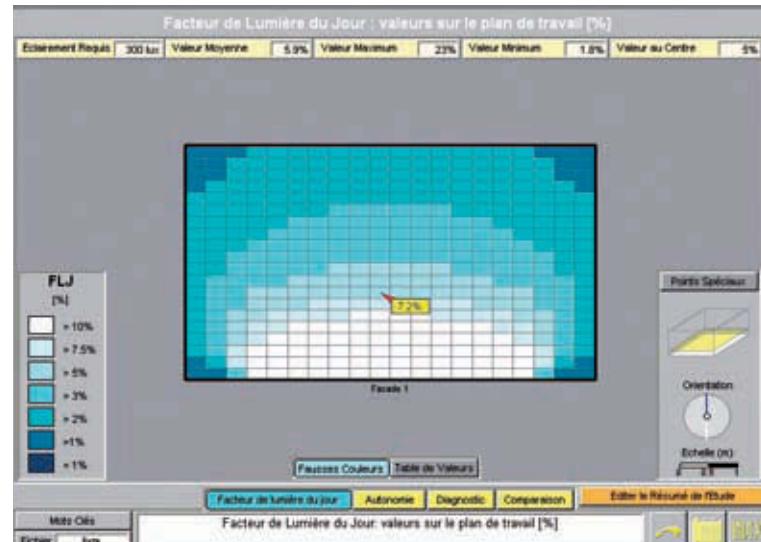
$$L_\alpha = L_z \cdot \left(\frac{1 + 2 \sin \alpha}{3} \right) = \frac{9}{7} \cdot \frac{E_h}{\pi} \cdot \left(\frac{1 + 2 \sin \alpha}{3} \right)$$

Le FLJ est calculé par une méthode de flux séparés (*split flux*) élaborée par le British Research Establishment (BRE), qui comprend trois composantes :

- une composante directe, correspondant à l'illumination directe par le ciel ;
- une composante réfléchie externe, qui correspond à la lumière solaire réfléchie par le sol, la végétation, etc. ;
- une composante réfléchie interne, qui correspond à la réflexion des parois du local éclairé.

Les défauts du FLJ

La méthode est assez complexe et nous n'entrerons pas dans ses détails. Le FLJ a pour principal défaut de ne



Affichage du résultat d'un calcul de facteur de lumière du jour (FLJ) effectué avec DIAL-Europe[®].

pas tenir compte du climat lumineux du projet, un calcul donnera le même résultat à Marseille et à Paris, à Tignes et à Brest. Les skieurs comprendront la nuance. Le FLJ ne prend pas en compte l'heure : qu'il fasse nuit ou jour quand l'utilisateur occupe le bâtiment, il restera le même. À titre d'exemple, un bureau nécessitant un éclairement de 500 lux et disposant d'un FLJ de 5 % présente, paraît-il, une autonomie de 50 %, c'est-à-dire qu'il pourra se passer de lumière artificielle 50 % du temps (méthode ASE, Association suisse d'éclairage, classiquement utilisée). Mais que signifie cette indication si l'on ne tient pas compte du taux réel d'ensoleillement du lieu géographique ni des horaires d'occupation ? À Marseille, l'autonomie sur l'année sera en réalité de 80 % entre 8 heures et 18 heures (calcul par DIAL-Europe).

Le FLJ ne tient pas compte des risques d'éblouissement, en particulier sur les écrans d'ordinateurs, sur un tableau blanc de salle de classe ou sur des documents brillants (photo, papier glacé...). Ensuite, le FLJ pénalise les dispositifs les plus performants, qui offrent une lumière diffuse homogène, par exemple en intensifiant l'éclairement des plafonds au détriment de celui des sols. Enfin et surtout, le FLJ ne permet en aucune façon de déterminer l'écono-

9. L'Éclairage naturel, J.-F. Autissier, Alto Ingénierie - ICEB 24-06-2008.

mie d'énergie réellement générée par un éclairement de qualité. Là encore, on oublie l'objectif pour se focaliser sur les moyens.

Pour donner un exemple concret, une surface vitrée, située en hauteur, offrira un meilleur FLJ qu'une fenêtre à hauteur d'homme, même si les occupants ne voient plus l'horizon et même si la position de la surface vitrée augmente l'éclairement direct ainsi que les contrastes dans la pièce éclairée et donc l'éblouissement, au détriment de l'éclairage indirect, incitant ainsi les occupants, d'abord à baisser les stores puis, par voie de conséquence, à allumer l'éclairage artificiel.

Cerise sur le gâteau, les logiciels de calcul de FLJ ne sont pas d'accord entre eux sur les résultats et il s'en faut de beaucoup, les écarts pouvant aller du simple au double. Et pourtant certains maîtres d'ouvrage se focalisent sur ce fameux FLJ et refusent des solutions à l'évidence performantes, permettant de limiter les besoins de climatisation autant que d'éclairage artificiel, au prétexte que la valeur théorique obtenue par le calcul du FLJ est inférieure à celle fournie par une solution plus classique, pourtant énergétiquement vorace et reconnue comme mauvaise par tous les usagers.

L'éclairement disponible dans un local varie suivant l'heure de la journée et le mois, en fonction des ombres extérieures portées qui elles-mêmes varient selon l'heure et la saison, par rapport à la géographie et à la météorologie du site. Il varie surtout en fonction des ombres et des lumières créées dans le local et de la réflexion des parois. L'important n'est pas seulement ce qui passe à travers une fenêtre, mais aussi et surtout la façon dont cette lumière diffuse dans le bâtiment. Et cela, la méthode actuelle de calcul du FLJ l'ignore totalement.

Appréciation de la valeur du FLJ

< 1 %	très faible
1 à 2 %	faible
2 à 4 %	modéré
4 à 7 %	moyen
7 à 12 %	élevé
> 12 %	très élevé

Vers de nouvelles méthodes

À ce jour, on ne peut que constater qu'il n'existe pas de méthode efficace d'évaluation de l'éclairement reçu dans un local, ni d'évaluation des économies d'énergie générées. Mais des études sont en cours par divers organismes de recherche¹⁰ pour définir une nouvelle méthode d'évaluation dynamique du FLJ, qui effectuera une moyenne sur l'éclairement reçu durant les 52 semaines de l'année, en prenant en compte les problèmes d'éblouissement et l'augmentation de l'éclairage naturel à excès qui amène d'autres problèmes thermiques bien connus, et en évaluant les économies d'énergie par la prise en compte des données météorologiques.

Nous reviendrons sur ce sujet en abordant les fenêtres et les apports solaires.

INFLUENCE DU BRUIT

Afin de compléter l'aspect « lumière » apportée par les fenêtres, il est utile de connaître quelques bases sur le bruit. Ouvrir une fenêtre pour rafraîchir un local n'est pas agréable dans une zone fortement sonore. Et la fenêtre laisse elle-même partiellement passer le bruit, suivant sa qualité.

C'est pourquoi la réglementation thermique prend en compte le contexte sonore extérieur d'une construction.

La notion de niveau sonore n'est pas facile à appréhender. Quand on additionne deux sons de même intensité, le résultat n'est pas un niveau sonore double, mais une addition logarithmique. En langage courant, on peut dire qu'il faut multiplier par 10 un signal sonore pour donner une sensation double sur l'oreille humaine et le multiplier par 100 pour quadrupler son intensité sensible. Un niveau sonore se mesure en bels, ou plus généralement en dixièmes de bel ou décibels (dB). L'addition de deux bruits d'intensité B1 et B2 se fait de façon logarithmique par la formule suivante (en décibels) :

$$B = 10 \cdot \log_{10} (10^{B1} + 10^{B2})$$

De même, un bruit à une distance D1 va décroître de façon logarithmique à une distance D2 :

10. En particulier l'Estia à l'EPFL de Lausanne, éditeur du logiciel DIAL-Europe®, et à l'université catholique de Louvain.

$$B_2 = B_1 + 20 \log_{10} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)$$

Enfin, dernière chose à mémoriser, la pression d'un signal sonore sur une oreille humaine ne doit pas être confondue avec la puissance acoustique d'un signal sonore à sa source. En champ libre, c'est-à-dire sans obstacle notable aux environs, la conversion utilise la loi suivante :

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \right)$$

avec :

En champ libre

L_p : pression acoustique

L_w : puissance acoustique

Q : facteur de directivité

$Q = 1$: champ libre

$Q = 2$: contre 1 cloison

$Q = 4$: dans 1 angle (2 cloisons)

$Q = 8$: dans 1 coin (3 cloisons)

d : distance entre la source et le point de mesure

En champ clos, par exemple dans une salle, la conversion est un peu plus complexe et dépend de la forme du local, et de la position de l'auditeur dans le local. Une formule

approchée permet d'évaluer la pression acoustique dans un local rectangulaire aux murs lisses :

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4} \cdot \pi \cdot d^2 + 4 \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha \cdot S} \right)$$

avec :

En salle fermée

L_p : pression acoustique

L_w : puissance acoustique

Q : facteur de directivité

$Q = 1$: champ libre

$Q = 2$: contre 1 cloison

$Q = 4$: dans 1 angle (2 cloisons)

$Q = 8$: dans 1 coin (3 cloisons)

d : distance entre la source et le point de mesure

S : somme de toutes les surfaces du local

α : facteur moyen acoustique

0,05 église, salle de sport, atelier usine

0,10 musée, chambre hôpital

0,15 salle meublée

0,20 salle meublée de forme irrégulière

0,25 local absorbant

0,35 studio enregistrement

0,50 studio enregistrement hi-fi

3| L'ÉNERGIE ET LA MATIÈRE

Maintenant que nous avons succinctement cerné la performance de la réglementation thermique et du calcul de facteur de lumière du jour, nous allons pouvoir entrer dans le vif du sujet.

Nous commencerons par trois grandeurs indispensables pour comprendre ce qui suit et qui déterminent la qualité énergétique d'un matériau :

- la masse volumique « ρ » ;
- la capacité thermique massique « C » ;
- la conductivité thermique « λ ».

Cela commence mal : la réglementation thermique ne connaît que la troisième grandeur. Pourquoi ? Les deux premières sont négligées, parce que, dans une construction conventionnelle en béton-polystyrène, isolée par l'intérieur, il y a très peu de masse active du point de vue thermique (celle du polystyrène), ce qui incite à considérer ces grandeurs comme inutiles.

MASSE VOLUMIQUE « ρ »

La masse volumique « ρ » (prononcer « rhô ») est la grandeur la plus facile à comprendre. On l'appelle encore densité, quand on la compare à celle de l'eau. Elle représente la masse contenue dans un volume de matière et s'exprime en kilogrammes par mètre cube. La densité de l'eau vaut 1 : 1 l d'eau pèse 1 kg. Mais l'unité de longueur est le mètre, et donc l'unité de volume est le mètre cube. Sa masse volumique est donc de 1 000 kg/m³.

La masse volumique du béton normal, par exemple, est de 2 380 kg/m³ (densité = 2,38), celle du chêne séché est de 715 kg/m³. On comprend facilement qu'à même

volume employé, une construction en chêne représente une masse plus faible qu'une construction en béton.

C'est une grandeur intensive (si on modifie la quantité de matière, sa densité reste constante).

CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE « C »

La capacité thermique massique « C », ou chaleur massique, encore appelée Cp , d'un matériau permet de quantifier la possibilité qu'il a d'absorber ou de restituer de l'énergie. La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température de un degré.

C'est une grandeur extensive (si on double la quantité de matière, on double la grandeur). L'unité s'exprime en joules par kilogramme et par degré : J/(kg.K). Le joule est une quantité d'énergie, fournie par une puissance de 1 watt délivrée pendant 1 seconde. Le kilowattheure, chacun connaît : 1 heure équivaut à 3 600 secondes, 1 wattheure (Wh) représente donc 3 600 joules (donc 1 kilowattheure, 3 600 000 joules). Ce n'est pas plus compliqué que cela. Le Cp peut donc aussi s'exprimer en wattheures par kilogramme et par degré : Wh/(kg.K) – donc une quantité d'énergie par kilogramme et par degré.

Quand on multiplie la masse volumique par la capacité thermique massique, on obtient la capacité thermique volumique « ρC » du matériau, qui s'exprime en wattheures par mètre cube et par degré, Wh/(m³.K). Cette grandeur détermine la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie par unité de volume, grandeur plus parlante au niveau d'un bâtiment.

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE « λ »

La conductivité thermique « λ » (prononcer « lambda ») commence à être connue de tous ceux qui s'intéressent aux déperditions d'un bâtiment. Cette grandeur représente d'une certaine façon la facilité avec laquelle la chaleur peut traverser un corps.

Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de longueur et par unité de temps sous un gradient de température, et s'exprime en watts par mètre par kelvin : $W/(m.K)$.

Cette grandeur n'est pas stable pour une matière donnée et peut varier en fonction de plusieurs paramètres. Et c'est là qu'on commence à distinguer quelques difficultés par rapport aux modèles thermiques actuellement utilisés. Par exemple, la conductivité varie en fonction de l'humidité du matériau, par la relation suivante, qu'on emploie généralement de manière simplifiée pour les matériaux de construction :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot e^{0,08H}$$

Où « λ_0 » est la conductivité du matériau sec et « H » représente en pourcentage l'humidité relative du corps.

Elle varie aussi par exemple en fonction de la température :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + a\theta)$$

« a » est un coefficient caractéristique de chaque matériau, positif pour les isolants thermiques et négatifs pour les conducteurs thermiques. « θ » est la température en kelvins, et « λ_0 » est la conductivité du matériau à 0 kelvin.

Il y a d'autres paramètres influençant la conductivité thermique, qui n'est donc pas une grandeur aussi simple que l'on voudrait nous le faire croire.

La conductivité thermique est de l'ordre de 0,03 à 0,04 pour les isolants, de l'ordre de 0,3 à 0,5 pour les matériaux légers (plâtre, béton léger, feutre de bitume...) et de 1 à 3 pour les matériaux lourds, mais atteint 52 pour l'acier et 230 pour l'aluminium.

Maintenant que nous avons vu le plus facile, nous allons commencer à parler des caractéristiques découlant des trois grandeurs précédentes. Eh oui ! Comme ces trois

grandeur (« λ », « p » et « C ») sont indépendantes les unes des autres, mais se combinent dans un matériau, elles lui procurent des propriétés particulières de propagation de l'énergie.

CHALEUR ET MATERIAUX

La réglementation thermique nous informe que la quantité de chaleur qui circule à travers une paroi répond à la formule simple ci-dessous, qui signifie que la chaleur Q est proportionnelle à la conductivité λ de la paroi, à sa surface S et à l'écart de température ΔT .

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T$$

C'est ce qu'on appelle le flux statique de chaleur unidirectionnel (à travers la surface). C'est sur cette base que fonctionne la réglementation thermique. Or un matériau, quel qu'il soit, est tridimensionnel. Cette simple citation de formule montre que l'approche conventionnelle et réglementaire de l'énergie ignore des choses pourtant évidentes. Et la bonne formule est un peu plus complexe. Par exemple, dans le cas d'une paroi de surface infinie limitée par deux plans à température constante, la température en un point quelconque de la paroi se décrit par la formule suivante (nous reviendrons plus longuement sur cette formulation lorsque nous parlerons de l'inertie du sol) :

$$T = \frac{4T_o}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{D(2n+1)n^2 t}{L^2}\right)$$

Sachant que la chaleur s'injecte en tout point des parois, que le niveau de cette injection varie, que cette paroi n'est pas infinie et qu'elle présente des conditions de température différentes et variables aux bords... cela peut donner une idée de la complexité de la modélisation des flux de chaleur à travers cette paroi.

Nous n'allons pas entrer tout de suite dans le détail de ces formules que même les ordinateurs modernes ont du mal à digérer. L'objectif ici est de montrer la simplification outrancière des modèles actuels. Nous allons donc voir un peu plus en détail les facteurs « oubliés » par la réglementation thermique et les modèles thermiques statiques actuels.

DÉFINITION DE LA DIFFUSIVITÉ

$$D = \frac{\lambda}{\rho C}$$

La diffusivité thermique « D » est parfois désignée par la lettre grecque α (alpha).

Elle représente la vitesse de pénétration et d'atténuation d'une « onde » thermique dans un matériau. En gros, à quelle vitesse la chaleur diffuse à travers un corps. En effet, la chaleur ne se propage pas comme une onde simple, elle diffuse. À chaque instant, de chaque point de l'onde thermique repartent une infinité d'ondes dans toutes les directions, phénomène que l'on peut décrire par les équations de Fourier. Si vous ne savez pas ce que c'est, tant mieux pour vous : pour simplifier, disons que c'est compliqué à décrire. Pour vous permettre d'imaginer un peu ce qu'il se passe, versez une goutte de Pastis dans un verre d'eau et regardez ce que devient cette goutte. Le même phénomène se produit à peu de chose près pour chaque goutte de chaleur que l'on verse sur une paroi. Au bout d'un certain nombre de gouttes, ce n'est plus très limpide à comprendre, et encore moins à expliquer.

Ce qui est intéressant en fait, ce n'est pas de savoir comment la diffusion se fait, mais de noter la relation entre la diffusivité et les trois grandeurs vues précédemment. Plus le « λ » est grand, plus la diffusivité augmente, plus la chaleur diffuse vite. À l'inverse, elle baisse en proportion de la chaleur massique et de la densité du matériau. Si on souhaite qu'un matériau transmette rapidement la chaleur, par exemple à travers une paroi chauffée, il faut que la diffusivité soit importante. Si au contraire on souhaite stocker cette chaleur et créer un déphasage, il faut une diffusivité plus faible.

DÉFINITION DE L'EFFUSIVITÉ

L'effusivité thermique « E » d'un matériau est sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. C'est la sœur jumelle de la diffusivité.

$$E = \sqrt{\lambda \rho C}$$

Prenez un bureau en fer avec un plateau en bois. Il est dans une pièce à 20 °C, ses pieds en fer comme son plateau en bois sont, en conséquence, à la même tempé-

rature. Mais si vous posez la main sur le pied en fer, il vous semblera plus froid que le bois. Cet effet bizarre est dû à l'effusivité.

Le bois a une effusivité à peu près égale à celle de la peau de la main (environ 400). Les échanges se font de la même façon et si la main est, disons, à 36 °C (bien chaude), le contact entre les deux va générer une température de contact de 28 °C (la moyenne), avant que votre main ne commence à réchauffer le bois.

Le fer a une effusivité nettement plus grande, de l'ordre de 14 000. Il va fournir à la main 35 fois plus d'énergie que la main ne va lui en donner, et la température de contact va s'établir à environ 20,4 °C : le fer semble plus froid que le bois.

S'il s'agit d'un mur, le même phénomène aura lieu. Si le matériau du mur est très effusif, le mur semblera beaucoup plus froid au contact de votre main, mais également au contact de la molécule d'air ou de vapeur d'eau. Dit autrement, en hiver, un mur froid en bois cédera en quelque sorte moins de froid à l'air de la pièce qu'un mur en béton nettement plus chaud. Il faudra donc moins d'énergie pour amener la température de la pièce à un niveau confortable avec un mur froid en bois qu'avec un mur tiède en béton, et cela indépendamment de la qualité de l'isolation. Le bois est plus « confortable » en hiver que le béton ou la pierre. Demandez à un trappeur canadien, il vous confirmera cette évidence.

Contrairement à la diffusivité, l'effusivité détermine la vitesse à laquelle un matériau absorbe la chaleur, sans s'échauffer. Une bonne effusivité permet en conséquence, par exemple, d'absorber un rayonnement solaire sans échauffement de la paroi, et une faible effusivité permet à l'inverse un réchauffement rapide de la paroi. Le bois se réchauffe en surface beaucoup plus rapidement que la pierre, et donc sa température de rayonnement monte plus vite dès qu'on chauffe, donnant ainsi en peu de temps une température ressentie agréable : c'est un matériau « chaleureux », apprécié dans les régions froides. La pierre est un matériau « frais », apprécié dans les régions chaudes.

L'effusivité varie dans le même sens que nos trois grandeurs « λ », « ρ » et « C ». En jouant sur les valeurs de « ρ » et de « C », on peut donc modifier la relation entre l'effusivité et la diffusivité, en fonction de l'effet recherché.

4 | L'ÉNERGIE ET LA TERRE

L'ÉNERGIE DE L'EAU

L'énergie nécessaire pour éléver la température d'un matériau quelconque est proportionnelle à la masse de matériau en jeu, à sa chaleur massique et à la variation de température constatée, avec :

- ΔQ = l'énergie, en joules
- m = la masse en kilogrammes
- C_p = la chaleur massique du matériau, en J/kg.K
- $\Delta\theta$ = la variation de température, en degrés

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot \Delta\theta$$

L'eau est l'un des matériaux ayant la plus forte capacité thermique. Autrement dit, c'est l'un des matériaux qui absorbe le plus d'énergie pour chauffer et qui en restitue le plus lorsqu'il se refroidit. C'est ce qui explique la fantastique capacité des océans à réguler la température terrestre. Mais une fois qu'ils seront réchauffés ne serait-ce que d'un degré, il va falloir beaucoup d'efforts pour les ramener à leur température initiale, d'où la problématique du réchauffement climatique...

Revenons à notre sujet : l'eau a une autre particularité par rapport aux matériaux de construction. C'est un liquide à température ambiante, qui peut, selon les conditions, changer de phase : s'évaporer sous forme gazeuse ou geler (se solidifier). Et ce changement de phase met en jeu des quantités impressionnantes d'énergie :

- pour chauffer 1 kg d'eau de 0 à 100 °C, il faut 418,6 kJ (0,116 kWh) ;
- pour faire fondre 1 kg de glace à 0 °C, il faut 330 kJ (0,092 kWh) ;

- pour faire évaporer 1 kg d'eau à 100 °C, il faut 2 257 kJ (0,627 kWh).

Pour faire passer 1 l d'eau de l'état liquide à l'état gazeux, il faut cinquante fois plus d'énergie que pour chauffer ce même litre d'eau de 10 °C.

On comprend à la lecture de ces quelques chiffres la quantité majeure d'énergie mise en jeu dans les phénomènes de condensation et d'évaporation au sein d'un bâtiment et l'importance qu'il y a à comprendre et à maîtriser le cycle de l'eau... ce que ne fait pas la réglementation thermique.

L'ÉNERGIE DE L'AIR

S'il faut 4,18 kJ pour chauffer 1 l d'eau de 1 °C, il faut 1,005 kJ pour chauffer 1 kg d'air de 1 °C (soit environ 0,83 m³ d'air à pression et hygrométrie normale). Il faudra donc en gros la même quantité d'énergie pour éléver dans une même proportion la température de 1 l d'eau et de 4 m³ d'air.

Pour calculer en kilowattheures la quantité « Q » d'énergie nécessaire pour chauffer l'air, on utilise aussi une autre formule, qui fait appel à son volume (en mètres cubes), ce qui est plus facile à manipuler que son poids, et à la variation ΔT de température recherchée :

$$Q = 0,34V \cdot \frac{\Delta T}{1000}$$

Pour chauffer 1 000 m³ d'air de 1 °C, il faudra fournir 0,34 kWh¹¹. La formule ne prend pas en compte l'hygro-

11. 1 kWh = 1 000 Wh ; 1 Wh = 3 600 Ws ; 1 Ws = 1 J ; 1 kWh = 3 600 kJ.

métrie variable de l'air ni la pression atmosphérique, mais connaissant l'imprécision sur les volumes d'air à prendre en compte dans un bâtiment, cette omission est généralement négligeable (en dehors des saunas et des piscines).

Si l'on souhaite connaître l'énergie nécessaire (en kilowattheures) au réchauffage d'un volume de renouvellement horaire de l'air sur une saison de chauffe, on utilise alors tout simplement la formule suivante :

$$E = 0,34V_h \cdot \frac{24 \cdot DJU_{Tint}}{1000}$$

V_h étant le volume horaire (en mètres cubes par heure) du renouvellement à assurer. On peut aussi corriger les DJU en fonction de la température intérieure réelle.

Quand au coefficient U (en watts par kelvin) lié à la ventilation, il se détermine tout simplement par la formule suivante :

$$U_{air} = 0,34V_h$$

L'ÉNERGIE DE LA TERRE

La propagation de la chaleur au sein de la terre est assez complexe à maîtriser, et de nombreuses équipes scientifiques travaillent actuellement à essayer de modéliser, d'une manière exploitable, les phénomènes qui s'y produisent. Expliquer d'un point de vue théorique un échange thermique au sein du sol est « relativement » facile. Décrire de façon concrète et surtout prédire ce qui va se passer (par exemple autour d'un puits climatique) est autrement plus difficile, car on ne maîtrise correctement ni les caractéristiques du sol, non homogène par essence, ni les flux hydrauliques, et encore moins la météo locale : température et hygrométrie de l'air. Mais on peut faire des prédictions statistiques.

La capacité d'échange thermique de la terre dépend principalement de sa température. Or comme nous l'avons vu, cette température dépend d'abord de la profondeur à laquelle on se situe, et également de la saison.

AMORTISSEMENT THERMIQUE TERRESTRE

Le modèle de propagation de la chaleur par conduction dans un massif semi-infini propose une solution analytique lorsque la température en surface du massif est

sinusoïdale, comme l'est plus ou moins la température au long de l'année. Il s'agit en fait tout bêtement de l'équation d'une courbe sinusoïdale.

La température ϑ s'exprime en fonction du temps comme une fonction sinusoïdale axée sur la moyenne des températures de surface, avec une amplitude A et un déphasage φ , selon une période ω :

$$\vartheta(t) = \vartheta_{moy} + A \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

La chaleur diffuse dans le sol en formant comme une demi-sphère dont le rayon croît avec le temps, à une vitesse inversement proportionnelle à la surface de cette sphère. La surface de cette demi-sphère est égale à $2\pi r^2$. Elle progresse en fonction inverse de la diffusivité du sol. L'avancement dans le temps de cette pénétration, pour un demi-cycle thermique (six mois) est donc proportionnel à la profondeur de pénétration, soit le rayon de la sphère $- \sqrt{(\pi r^2)} = r\sqrt{\pi}$ –, corrigé du temps (plus on avance dans le temps, plus cette expansion de la sphère se fait lentement, la surface d'étalement étant plus grande) et de l'inverse de la diffusivité. Pour doubler la profondeur de pénétration, il faut multiplier la surface par 4, et donc le temps par 4. Comme nous le confirmerons plus loin, pour une diffusivité habituelle, il faudra douze heures pour que la « bulle » de chaleur pénètre le sol de 20 cm, et six mois pour le pénétrer de 4 m.

Nous allons donc commencer par définir « un coefficient de profondeur géothermique » proportionnel à la profondeur, déterminant le déphasage dans le temps, noté « ξ » (prononcer « xi »), avec :

- P = profondeur du point concerné
- t_0 = durée du cycle thermique, en secondes. (Dans le cas présent le cycle thermique correspond à une année entière, soit $31,536 \cdot 10^6$ secondes.)
- D_{sol} = diffusivité du sol

$$\xi = P \cdot \sqrt{\frac{\pi}{t_0 \cdot D_{sol}}}$$

Ce coefficient de déphasage ξ est sans dimension (il n'a pas d'unité pour le définir). Les plus attentifs auront remarqué dans cette formule la présence d'une référence (d'un asservissement) à la pulsation (le cycle complet) au travers de la valeur $\omega = \pi/t_0$.

Pour la diffusivité du sol, on pourra considérer en première approche qu'elle est égale à la moyenne pondérée de la

diffusivité de chacun de ses constituants, en proportion χ_i de leur volume, en m^3 de matière/ m^3 de sol (ne pas oublier de prendre en compte l'humidité moyenne du sol) :

$$D_{\text{sol}} = \sum \chi_i \frac{p_i \cdot C_i}{\lambda_i}$$

Il nous reste à déterminer l'amplitude du signal thermique. Si une grandeur croît ou décroît en fonction d'un terme et que la vitesse de « sa course » est proportionnelle à « sa taille », alors cette grandeur peut être exprimée comme une fonction exponentielle du terme en question.

L'amplitude A de la variation thermique est, en conséquence, égale à la différence, en valeur absolue, entre la température moyenne annuelle et la température du mois, agrémentée d'une décroissance exponentielle, due à l'amortissement produit par la diffusion de la chaleur dans le sol. Cet amortissement s'exprime sous forme de l'inverse de l'exponentielle du coefficient de profondeur géothermique ξ . On constatera un lien très fort entre le déphasage ξ et l'amortissement $\exp(-\xi)$, l'un déterminant l'autre.

La température (théorique) ϑ du sol au point considéré peut alors se déterminer, en fonction de l'instant t dans l'année, par la formule suivante (le symbole de température ϑ se prononce « théta ») :

$$\vartheta(t) = \vartheta_a + |\vartheta_m - \vartheta_a| \cdot e^{-\xi} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi\right)$$

avec :

- $\vartheta(t)$ = température théorique du sol au point considéré, à l'instant t, en °C
- ϑ_a = température annuelle moyenne de l'air extérieur, en °C
- $\vartheta_m - \vartheta_a$ = amplitude (en valeur absolue) de la variation de température mensuelle de l'air extérieur par rapport à la moyenne annuelle, en °C
- t = temps en secondes (t = 0 correspond au mois le plus chaud de l'année)

La formule¹² semble un peu compliquée. Elle est pourtant simplifiée, pour ne pas alourdir les calculs. Elle ne considère que la température de l'air, et ne tient pas compte de l'irradiation directe du soleil, qui pourrait s'exprimer avec la même formule, en remplaçant la température de l'air par le flux solaire. Dans une région fortement ensoleillée, l'amplitude annuelle va être augmentée, ainsi que la température moyenne apparente. Elle fait aussi abstraction des fluctuations journalières de la température, et n'est donc pas pertinente à proximité immédiate de la surface du sol (*a contrario*, dès qu'on approche les 40 cm de profondeur, la fluctuation journalière est totalement amortie, donc négligeable). Là aussi, la même formule pourrait être appliquée aux fluctuations journalières. Elle fait encore abstraction de la nature de la surface du sol, de l'humidité de l'air et du sol, du vent, des flux hydrauliques dans le sol... Enfin, on néglige à ce niveau l'influence de la chaleur provenant des entrailles de la terre.

La température extérieure varie dans l'année grossièrement comme une sinusoïde. On considère alors un temps t_0 qui correspond à la pointe annuelle de cette température. Afin de prendre en compte l'effet d'amortissement thermique journalier de la terre (dès qu'on s'éloigne un peu de la surface, au-delà d'un mètre de profondeur, les fluctuations jour-nuit sont effacées), on ne considère que les fluctuations mensuelles et donc la moyenne mensuelle maximale dans l'année ϑ_a (le mois le plus chaud) comme point de départ du temps.

À partir de cet instant t_0 « à température maximale », le temps est décompté en secondes (pour rester dans les unités normalisées) sur un cycle annuel, et on peut à l'aide de la formule déterminer la température théorique du sol à une profondeur P à n'importe quel moment.

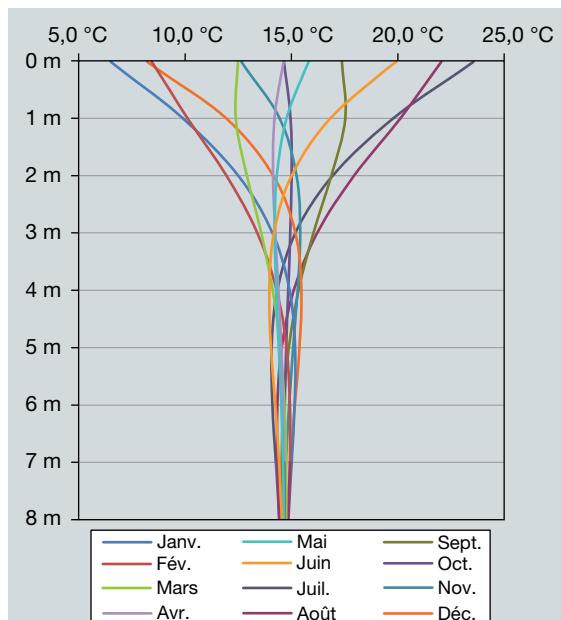
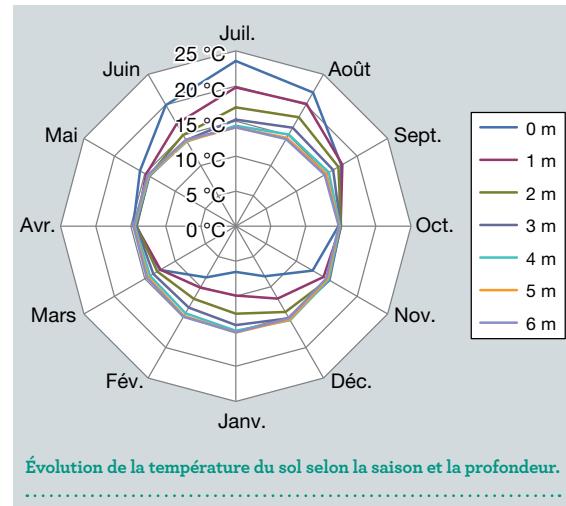
La température du sol à l'ombre varie autour de la valeur de la température annuelle moyenne de l'air extérieur, comme l'inverse de l'exponentielle du coefficient ξ , qui est lui-même élevé. Cette fonction indique une atténuation très forte de la sinusoïde annuelle, de sorte que, en pratique, à partir d'environ 4 mètres de profondeur,

12. Cette formule a été validée en particulier par le département de Physique du bâtiment et de l'énergie solaire de l'université de Siegen en Allemagne.

la fluctuation est quasiment totalement amortie et la température devient constante, égale à la température extérieure annuelle moyenne, soit de 10 à 15 °C en France selon la région.

En faisant varier la profondeur P pour un instant t quelconque, on peut ainsi définir des courbes de température « iso-temporelles » en fonction du mois de l'année et de la profondeur du sol, pour un terrain à l'ombre.

Nous n'évoquerons pas pour l'instant d'autres phénomènes qui pourraient modifier cette température d'équilibre du sol, et qui nous permettront d'envisager de modifier cette température d'équilibre afin de l'utiliser comme source de chaleur ou de froid dans un bâtiment. Nous y reviendrons ultérieurement plus en détail. Nous pourrons toutefois déjà remarquer que les puits climatiques enterrés à une profondeur de 40 à 80 cm ne présentent



pas un grand intérêt (à peine quelques degrés de gain en plein hiver ou plein été) et que la bonne profondeur, là où se produit l'inversion thermique, qui permettrait un vrai réchauffement en hiver et un vrai rafraîchissement en été, se situe plutôt à partir de 3 mètres¹³. On remarquera aussi qu'à partir de 4 mètres, la température est quasi-uniforme, quelle que soit la saison.

Un dernier effet anecdotique est intéressant à noter. En mi-saison, on pourrait croire que le sol possède la mémoire de la saison passée, et donc qu'il sera plus froid que l'air ambiant au printemps, restituant la fraîcheur accumulée durant l'hiver, et plus chaud que l'air en automne, restituant la chaleur accumulée durant l'été. Or c'est l'inverse qui se produit. La mémoire thermique vient du sol (de par son inertie) et non de l'extérieur, si bien que le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère en septembre et en octobre, à un moment où le soleil n'arrive plus à compenser la fraîcheur des profondeurs, calée sur la température annuelle moyenne.

C'est ce phénomène qui déclenche les brumes matinales d'automne, par condensation de l'air : c'est la terre qui refroidit l'atmosphère au niveau du sol en automne, et la réchauffe au printemps, et non le temps qu'il fait

13. Pour des raisons de sécurité des travaux et de surcoût engendré, les tranchées de plus de 2 mètres de profondeur sont à réservé à des projets importants impliquant de nombreux puits, sauf en cas de création d'une cave, dont les opérations d'excavation pourront être mises à profit, en veillant à ne pas pomper avec le puits climatique l'énergie du bâtiment.

Principe du déphasage thermique

On peut appliquer les lois physiques de la variation annuelle à la fluctuation journalière de l'onde thermique pour voir ce qu'il se passe entre le jour et la nuit. Le coefficient de profondeur géothermique noté « ξ » varie comme l'inverse de la racine carrée du temps. En passant de 365 jours à 1 jour, on a donc une réduction d'échelle d'un rapport d'environ 20 (précisément 19,10).

L'inversion thermique constatée à 4 mètres dans la fluctuation annuelle se produit en conséquence à 20 cm de profondeur pour la fluctuation journalière, s'il n'y a aucune couche de terre arable en surface modifiant la constitution du sol.

On voit ainsi que le déphasage à travers un matériau mi-lourd, de 20 cm d'épaisseur, est d'environ 12 heures (pour être plus exact, il faudrait connaître avec précision l'épaisseur de terre arable).

À 40 cm de profondeur, la fluctuation thermique journalière est totalement amortie, et on y trouve alors la température moyenne de la saison en cours, avec un petit mois de retard. En été, elle va donc se situer entre 20 °C et 30 °C, en hiver aux environs de 0 °C et, à cette profondeur, elle ne va quasiment rien apporter ni à un puits climatique ni à une géothermie de surface.

On aura le même phénomène à travers un mur de 40 cm, mais perturbé par la fluctuation de la température intérieure de la construction liée aux vitrages et au renouvellement d'air. Sans apport solaire et sans renouvellement d'air, la température dans une telle construction (bâtiment ancien en pierre de taille) est donc plus ou moins l'image très stable de la température moyenne du mois précédent. En jouant sur l'ensoleillement accepté et le renouvellement d'air autorisé, on peut décaler à volonté cette température vers le haut ou le bas.



dehors. Et c'est ce même phénomène qui explique l'efficacité du paillage des plantations en hiver et au printemps, le sol se réchauffant plus vite que l'atmosphère. La même chose se produit en été et en hiver, mais on le réalise encore moins facilement, la météorologie dissimulant à nos sens ce phénomène. Par contre, si on isole le sol de l'air extérieur, il sera frais en été et chaud en

hiver. L'inversion de variation thermique entre le sol et l'air se produit grossièrement aux équinoxes. En profondeur, compte tenu du déphasage, cette inversion thermique (le moment où la température cesse de croître pour décroître et réciproquement) est décalée dans le temps, ce qui va nous intéresser quand nous aborderons les concepts constructifs bioclimatiques.

5| VENTILATION NATURELLE

Il faudrait, là aussi, un livre entier pour décrire l'ensemble des phénomènes entrant en jeu dans un système de ventilation naturelle. Nous effleurerons donc le sujet.

À l'origine, il y a le vent. Celui-ci provient de directions variables dans le temps mais, dans la plupart des régions, il existe des vents dominants, qui créent sur une construction une surpression du côté de leur origine et une dépression sur la face opposée. Ce différentiel de pression dépend du vent, mais également de la nature des surfaces environnantes. Entre une surface d'eau, dont la rugosité au vent est de 0,0005, et un centre de métropole, offrant une rugosité supérieure à 4, en passant par les campagnes avec une rugosité de 0,25, tous les niveaux de résistance au vent peuvent être rencontrés

en fonction de l'urbanisation, de la végétation et de la géographie alentour.

Cette différence de pression, pour peu qu'il existe des ouvertures dans le bâtiment, va générer des flux d'air non négligeables. Au vent peut s'ajouter dans un bâtiment un autre phénomène qui s'appelle le tirage thermique. Quand on ouvre une fenêtre et s'il fait moins chaud dehors que dedans, l'air chaud a tendance à s'échapper par le haut de l'ouverture, tandis que l'air froid du vent entre par le bas.

VENTILATION PAR SIMPLE OUVERTURE

Un modèle empirique, permettant l'évaluation des débits de renouvellement d'air dans la configuration d'une simple exposition au vent d'une fenêtre, sans flux traversant, a été proposé par De Gidds et Phaff en 1982. La vitesse effective du vent est donnée par la formule :

$$V_{\text{eff}} = \left(c_1 \cdot v_r^2 + c_2 H \cdot \Delta T + c_3 \right)^{\frac{1}{2}}$$

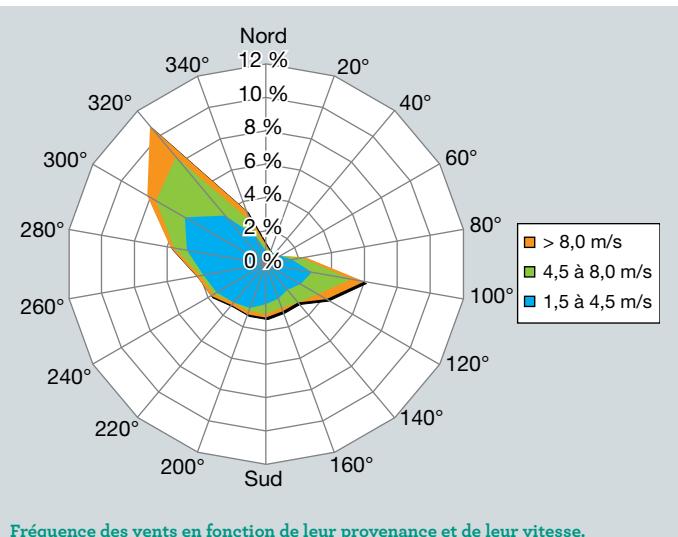
avec :

- v_r = vitesse moyenne réelle du vent (m/s)
- H = hauteur de l'ouvrant (m)
- ΔT = écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur ($^{\circ}$ C)

Le coefficient $c_1 = 0,001$ est fonction du type d'ouvrant, $c_2 = 0,0035$ affecte le tirage thermique et $c_3 = 0,01$ affecte l'effet du vent.

Le débit volumique d'air (en mètres cubes/seconde) à travers l'ouvrant est alors égal au produit de la vitesse efficace du vent par la moitié de la surface A_w (en mètres carrés) de l'ouvrant (l'autre moitié servant à la sortie de l'air).

$$Q = \frac{A_w}{2} \cdot V_{\text{eff}}$$



Pour être réellement efficace, une telle ventilation naturelle implique une surface d'ouvrant correspondant à environ 1/20 de la surface du plancher à ventiler, une hauteur d'ouvrant d'au moins 1,5 m et une profondeur maximum de la pièce à ventiler de 2,5 fois la hauteur sous plafond. La ventilation à simple exposition est, comme on peut le voir, une technique peu dépendante du vent moyen et elle ne sera pas très efficace si l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur demeure limité, en mi-saison, sauf à avoir de très grandes surfaces d'ouvrants.

Renouvellement d'air

Les retours d'expérience (voir à ce sujet ceux publiés sur le site EnviroBat-méditerranée) montrent que, d'un point de vue pratique en région méditerranéenne, le renouvellement d'air atteint est de l'ordre de 2 volumes par heure en ventilation mono-orientée (simple ouverture) et de l'ordre de 20 volumes par heure en ventilation traversante.



VENTILATION TRAVERSANTE

Une meilleure stratégie de ventilation naturelle est d'avoir recours à une ventilation traversante. Les débits d'air deviennent principalement dépendants de la vitesse du vent et donc très variables suivant le climat local, sachant qu'il faut limiter la vitesse du flux d'air traversant pour ne pas générer de gêne (fenêtres et portes qui battent, papiers qui s'envolent, sensation de froid...) ni de gaspillages thermiques en hiver. De nombreux autres facteurs rendent quasiment impossible une modélisation simple de ce type de ventilation : formes intérieures, obstacles... Il faut globalement réguler le flux traversant souhaité en fonction de la saison par une perte de charge devant s'adapter aux conditions climatiques et avoir des constructions de profondeur limitée dans l'axe du vent. Dans la configuration la plus simple, avec deux ouvrants de mêmes dimensions, positionnés en vis-à-vis sur les deux faces traversantes, le débit d'air sera proportionnel à la vitesse du vent, multipliée par la section des ouvrants, affectée d'un coefficient de perte de charge.

D'un point de vue pratique, on peut reprendre la même formule que pour la ventilation non traversante, mais avec comme coefficient $c_1 = 0,01$ soit un coefficient décuplé sur l'effet du vent :

$$V_{\text{eff}} = \left(0,01 \cdot v_r + 0,0035 \cdot H \cdot \Delta T + 0,01 \right)^{\frac{1}{2}}$$

VENTILATION PAR CONVECTION

En l'absence totale de vent, ou pour éviter les inconvénients de la ventilation traversante, il reste le dernier principe de ventilation : par tirage thermique naturel.

Comme Archimède l'a expliqué, l'air chaud a tendance à monter et l'air froid à descendre. À condition d'offrir au flux d'air un orifice de renouvellement par le bas et un orifice d'échappement par le haut, ce système est de loin le plus efficace, car il ne nécessite aucun vent, il ne dépend donc ni des variations locales de la météo ni des obstacles environnants au vent.

La poussée d'Archimède de l'air, soit la poussée thermique différentielle ΔP , en pascals (Pa), se définit par la formule ci-dessous, où T_o et T_i , en kelvins (K), sont les températures respectivement extérieure et intérieure, et ΔH la hauteur de tirage thermique (la différence de niveau entre l'entrée et la sortie d'air, en mètres). Les valeurs ρ_o et ρ_i représentent la masse volumique de l'air intérieur et extérieur, et g est l'accélération terrestre.

À titre d'exemple, une cheminée de 10 m de haut, présentant un écart de température de 10 °C entre sa base (air entrant) et son sommet (air sortant), générera une pression différentielle de 4 pascals (le pascal correspond à une force de 1 newton – symbole N : 1 N = 1 kg·m/s² – exercée sur une surface de 1 m², soit 1 kg/s²·m – la pression atmosphérique moyenne est de 1 013 Pa).

$$\Delta P = (\rho_o - \rho_i)g \cdot \Delta H = \left(\frac{352 \cdot 6}{T_o} - \frac{352 \cdot 6}{T_i} \right) \cdot g \cdot \Delta H$$

À partir de cette poussée d'Archimède, on peut estimer les débits en fonction des sections d'entrée et de sortie d'air, et des pertes de charge, ce qui est déjà plus compliqué. On utilise généralement l'analogie avec les systèmes de conduits aérauliques pour estimer les débits obtenus, selon la configuration du cheminement de l'air. Pour une première estimation, on peut se contenter de la formule



La simple poussée d'Archimède dans des tubes correctement positionnés permet de générer des flux de ventilation passive suffisants pour assurer la qualité sanitaire de l'air intérieur, sans électricité. (Architecte Raphaël Bobeda.)

simplifiée de calcul de la vitesse¹⁴, où V est la vitesse de l'air en mètres par seconde (m/s), ρ la masse volumique de l'air et ΔP_d la pression différentielle. Le débit s'obtient en multipliant la vitesse par la section, tout simplement.

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}}$$

Évidemment, si l'entrée d'air se trouve face au vent, donc en surpression, et la sortie d'air du côté opposé au vent, en dépression, on peut combiner les effets, et les différentiels de pressions s'additionnent, ce qui est une chance quand le vent vient du nord, le soleil chauffant la face d'échappement au sud :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{intérieure}} + (\Delta P_{\text{entrée}} - \Delta P_{\text{sortie}})$$

C'est sur ce principe que fonctionnent par exemple les cheminées solaires ou encore les *bagdirs*, dont nous parlerons plus loin. La contrepartie est une moindre maîtrise des débits, qui varient en fonction du vent. On pourra, en conséquence, préférer l'entrée d'air au sud en hiver et au nord en été, la sortie se faisant toujours par le sud, un jeu de conduites permettra le contrôle de ces flux.

14. Il y a une analogie évidente, et qui n'est pas fortuite, avec la formule de calcul de l'accélération : $\Gamma = 1/2 mv^2$.

6| DYNAMIQUE DE L'ÉNERGIE DANS LES MATERIAUX

À évoquer les quatre éléments fondateurs du climat, nous en arrivons naturellement à aborder les matériaux de construction qui interagissent avec ce climat. Ces matériaux ont des propriétés énergétiques plus ou moins bien connues aujourd’hui et dont le sens échappe souvent au profane.

L'énergie a ceci de désagréable qu'on ne la voit pas. Il n'est donc pas toujours facile de comprendre comment elle se manifeste et encore moins à quoi correspondent les caractéristiques des matériaux. Une analogie avec l'eau permet de mieux comprendre certains principes de base.

LA PARABOLE DU POT DE FLEURS

Afin de mieux comprendre l'énergie et ses règles, nous allons quitter les formules mathématiques et faire un petit comparatif sous la forme ludique d'une construction bioclimatique et d'une construction utilisant les technologies dites « modernes », par l'intermédiaire d'un parallèle entre deux jardiniers : l'un bio et l'autre utilisant des produits ordinaires.

Le jardinier et l'eau		La maison et l'énergie	
Le jardinier biologique	Le jardinier technologique	La maison bioclimatique	La maison technologique
Le jardinier souhaite planter une fleur.		Une maison va être occupée par des humains.	
Il se procure un pot en terre cuite.	Il se procure un pot en plastique.	Il s'agit d'une maison ancienne, utilisant des méthodes de construction traditionnelles.	Il s'agit d'une maison moderne, conforme aux normes.
Comme terre de rempotage, il utilise un mélange de glaise, de sable et de tourbe.	Comme terre de rempotage, il se procure un mélange de sable synthétique et de billes de polystyrène auquel il ajoute un engrais.	Les murs sont en pierre ou en terre crue, et non isolés.	Les murs sont en béton ou parpaing, avec une isolation intérieure en polystyrène.
Juste après la plantation, le contenu du pot de fleurs est totalement sec, il va donc falloir arroser la plante. Que va-t-il se passer ?		Juste après la livraison de la maison, l'intérieur est froid, il va donc falloir la chauffer. Que va-t-il se passer ?	
Le jardinier va commencer à verser de l'eau. Mais la terre agit comme une véritable éponge, il faut donc au départ apporter beaucoup d'eau.	Dès qu'on commence à verser de l'eau, le haut du pot se remplit d'eau. La terre吸t très peu d'eau.	Le chauffage au bois est allumé. Il faut beaucoup de temps et de bois pour arriver à faire monter la température intérieure.	La chaudière au fioul est allumée. La température intérieure monte très vite, on arrive rapidement à la température souhaitée.

Le jardinier et l'eau		La maison et l'énergie	
Le jardinier biologique	Le jardinier technologique	La maison bioclimatique	La maison technologique
La terre se sature au bout d'un moment, et l'eau pénètre plus lentement.	La terre se sature rapidement, et l'eau ne pénètre plus que très lentement.	Une fois enfin arrivé à température ambiante, on peut réduire la puissance de chauffage.	Une fois arrivé à la température ambiante, il faut peu de chauffage pour tenir la température ambiante.
Puis elle se met à couler rapidement dans la coupelle. On peut alors continuer à arroser en quantité, tout ce qu'on rajoute passe à travers le pot et sort par en dessous.	Puis elle se met à couler dans la coupelle, mais avec un faible débit ; si on continue à arroser, il faut finement doser pour obtenir un petit débit par le bas, mais sans faire déborder par le haut.	Il faut maintenir un chauffage régulier pour compenser les pertes par les murs.	Les besoins en chauffage sont réduits, du fait de la bonne isolation. Il faut limiter le chauffage sous peine de surchauffe.
Le jardinier arrête d'arroser et part se coucher.	La nuit tombe et le thermomètre chute brutalement dehors.		
Ce n'est pas un problème, la terre a emmagasiné une réserve suffisante d'eau pour maintenir les besoins en eau de la plante.	Le pot n'ayant retenu que très peu d'eau, les racines de la plante se retrouvent rapidement à sec.	Les murs restituent une partie de l'énergie emmagasinée. Les occupants apprécient la température douce et homogène de leur intérieur.	La température intérieure chute progressivement comme la température extérieure. Des moisissures se développent sur les murs. Les occupants doivent remonter la consigne de chauffage et surchauffer l'intérieur.
Le jardinier continue à dormir.	Le jardinier installe un goutte-à-goutte, avec régulateur de débit asservi à une mesure en continu de l'hygrométrie.	Les occupants continuent à dormir.	Les occupants installent une régulation avec programmeur électronique asservi à la température extérieure, permettant d'anticiper les fluctuations du climat.
La saison sèche arrive.	L'hiver arrive.		
Le jardinier biologique paille l'extérieur de son pot et pose en surface de celui-ci et dans la coupelle du dessous un mulch (paillis) afin de maintenir le plus longtemps possible l'hygrométrie naturelle du pot.	Le jardinier technologique rigole. Avec sa technologie performante, il ne craint pas la sécheresse. Son goutte-à-goutte continue à débiter régulièrement, quoi qu'il arrive.	Les murs sont protégés par une isolation extérieure en matériaux naturels laissant passer la vapeur d'eau, protégés par un revêtement étanche à l'eau.	La maison technologique rigole. Avec son chauffage au fioul et sa régulation performante, elle ne craint rien.
Une sympathique pluie se déclenche.	Une belle journée ensoleillée s'installe.		

Le jardinier et l'eau		La maison et l'énergie	
Le jardinier biologique	Le jardinier technologique	La maison bioclimatique	La maison technologique
La terre du pot absorbe avec bonheur cette pluie salvatrice. Une fois rechargée en eau, elle se draine dans sa coupelle inférieure et par la respiration de sa paroi.	La terre du pot se sature à nouveau instantanément, la pluie, inutile, déborde du pot et est rejetée à l'extérieur, tout en laissant la plante baigner dans l'inondation subite. Des moisissures envahissent le pot. Le jardinier vide le trop-plein d'eau.	Les murs absorbent cette chaleur bienfaisante, qu'ils pourront restituer la nuit prochaine.	La lumière solaire se transforme en chaleur dans le logement. Ne pouvant s'échapper, la température intérieure augmente très rapidement à un niveau inconfortable. Les occupants ouvrent les fenêtres.
Le jardinier apprécie cet arrosage gratuit.	Le jardinier installe une protection étanche sur le pot pour empêcher la pluie de nuire à sa plante et de perturber le débit de son goutte-à-goutte automatique.	Les occupants apprécient ce chauffage gratuit.	Les occupants installent une climatisation réversible, qui va leur permettre de réguler la température, quelles que soient les conditions climatiques extérieures.
De violents orages se succèdent.		Une forte canicule se déclenche.	
La terre du pot absorbe tout ce qu'elle peut à chaque orage, puis se draine quand ils s'interrompent.	La terre synthétique, incapable de résister aux torrents d'eau, est un peu plus emportée à chaque débordement du pot.	Les murs absorbent le maximum de chaleur la journée et la restituent la nuit, lorsque la température redevient plus clémente.	La climatisation arrive difficilement à compenser les apports solaires, malgré une facture d'énergie qui s'envole.
Une grave crise énergétique atteint la planète.		Une grave crise énergétique atteint la planète.	
Le jardinier biologique se réconforte à la vue de ses plantes.	Le jardinier technologique s'achète des fleurs en plastique.	La maison bioclimatique continue à assurer à ses occupants un confort acceptable en été comme en hiver.	La maison technologique s'achète des occupants en plastique.

Dans le tableau que nous venons d'esquisser, le trait est, bien sûr, caricatural, mais il permet de mieux comprendre que la technologie n'est pas forcément la meilleure réponse à des problèmes simples *a priori*. Plus nous ajoutons de la technologie, plus nous devons en rajouter, ce qui n'a d'autre effet que de déplacer le problème sans le régler, voire de l'aggraver, et nous fait oublier certains avantages naturels, ou même nous interdit d'en profiter. Quand cette technologie vient améliorer des règles simples, elle peut procurer un avantage, mais quand elle se targue de vouloir se substituer à toute chose, elle peut se transformer en échec.

LE CYCLE DE LA VAPEUR D'EAU

Nous terminerons donc ce premier tour sur la dynamique énergétique des matériaux en rappelant le cycle de l'eau et de la vapeur d'eau à travers des matériaux. Commençons par la vapeur.

Dans tout bâtiment, il existe généralement une différence de pression de vapeur (quantité de vapeur) entre l'intérieur et l'extérieur, qui génère une diffusion à travers les parois, pour peu que ces dernières laissent passer la vapeur d'eau. Cette vapeur migre donc à travers la paroi, en voyant progressivement sa pression chuter. Arrivée à



Vapeur d'eau et étanchéité

Dans les bâtiments, ce n'est pas la vapeur d'eau qui est insalubre, c'est l'étanchéité de l'enveloppe à cette vapeur. Pourquoi les matériaux modernes n'aiment-ils pas la vapeur ? À cause de la condensation. En revanche, la quasi-totalité des matériaux naturels laissent passer la vapeur d'eau, et ne s'en portent pas plus mal.

un certain point, cette baisse de pression peut provoquer la condensation, c'est-à-dire le passage de l'état gazeux à l'état liquide. On appelle cela un changement de phase.

La condensation peut être très intéressante car, quand l'eau condense, elle restitue l'énergie qui a été nécessaire à sa vaporisation. Mais elle peut aussi être une contrainte, tout dépend de la façon dont on l'aborde. Comme déjà signalé sur d'autres sujets, toute la question est de savoir

si l'on considère notre environnement comme une opportunité de confort ou comme un phénomène hostile.

Les matériaux artificiels, qui « luttent » contre l'environnement, ne supportent pas cette vapeur d'eau, en particulier le béton, et les isolants qui, soit sont étanches à l'eau (polystyrène, par exemple), soit perdent toute propriété isolante (laine de verre ou de roche, par exemple). Pour y remédier, on rajoute une couche technologique supplémentaire, sous la forme d'un pare-vapeur et d'enduits synthétiques. Et on déplace ainsi le problème, en emprisonnant la vapeur à l'intérieur, qu'il faut évacuer en surveillant le bâtiment, ce qui génère des pertes thermiques qui imposent d'augmenter la quantité d'isolant mise en œuvre, et en gaspillant au passage pas mal d'énergie. Le combat contre la nature est perdu d'avance.

Pour évaluer comment la vapeur diffuse à travers un matériau, on utilise son coefficient de résistance à la diffusion de vapeur « μ », qui indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air. Ce coefficient est toujours supérieur à 1. Pour compliquer les choses, il dépend du taux d'humidité contenu dans le matériau. En présence d'humidité, la résistance à la diffusion de vapeur peut chuter pour certains matériaux de façon drastique, aggravant le pompage de vapeur et le phénomène de condensation. À titre d'exemple, dans un béton lourd, le coefficient μ peut varier de 200 à 35 selon son taux d'humidité interne (rappelons-le : le béton est une magnifique pompe à eau, arrosez un béton nu, vous comprendrez). Pour d'autres matériaux, comme la pierre, ce coefficient n'est quasiment pas affecté par le taux d'humidité. Les données disponibles à ce jour sur ce sujet restent malheureusement très partielles et souvent sujettes à caution.

Généralement, une paroi se compose de plus d'une couche. La résistance à la diffusion totale d'une paroi composite s'obtient en faisant la somme des résistances à la diffusion des couches constitutantes (c'est une valeur extensive). Si, dans le trajet de la vapeur, un changement de matériau entraîne une augmentation soudaine de la résistance à la diffusion, la concentration de vapeur va augmenter et rapidement approcher, voire dépasser, le seuil de condensation. C'est comme un rétrécissement sur la route : la circulation est soudainement ralentie. Si le matériau n'aime pas l'eau, c'est la catastrophe : développement de moisissures, pourriture, perte du pouvoir isolant, dégradation du matériau lui-même...



Un logement social en construction passive en bois isolée avec de la paille ne se distingue pas forcément d'une construction traditionnelle en parpaing et polystyrène... sauf si l'on compare la performance énergétique ou la qualité de l'air intérieur. (Photo Vincent Pierré, énergéticien BET Terranergie dans les Vosges.)

En régime stationnaire statique théorique, en laboratoire, face à un matériau homogène, on arrive relativement bien à simuler ce qu'il se passe. La question est de savoir si le régime normal d'un mur est stationnaire et statique, et si le matériau est si homogène que cela : teneur en eau variable selon la profondeur, influence des mortiers jointoyant les composants du mur...

Pour compliquer encore les choses, le point de rosée (la condensation) peut se déplacer dans la paroi ou hors de celle-ci, lorsque la température ou l'hygrométrie extérieure varie, mais avec un retard lié au déphasage du mur. On peut donc se trouver face à une condensation temporaire de nuit qui disparaît en milieu de journée, lorsque la température extérieure remonte, ou en présence d'une condensation qui reprend à cause d'une modification de l'hygrométrie extérieure.

LE CYCLE DE L'EAU DANS LES MÉTÉRIAUX

Chacun connaît les trois états fondamentaux de l'eau : la glace, l'eau liquide, la vapeur d'eau. On croit savoir que la glace apparaît en dessous de 0 °C et la vapeur au-dessus de 100 °C. Et à force de le savoir, on finit par oublier que ces limites n'en sont pas.

Sublimation

Les Norvégiens connaissent bien ce principe et vous pouvez faire l'expérience vous-même au prochain hiver, quand il fera – 10 °C ou – 15 °C dehors. Prenez un linge mouillé, pas trop pour que l'expérience ne soit pas trop longue. Suspendez-le dehors. Il va rapidement geler et se couvrir de glace. Mais attendez 24 ou 48 heures (moins longtemps s'il y a du vent, plus longtemps s'il neige), et revenez le prendre : il est totalement sec. Étonnant ? Pas tant que cela. L'eau, après avoir gelé, s'est progressivement « sublimée ». Elle s'est transformée en vapeur d'eau et a été absorbée par l'atmosphère desséchée de l'hiver : l'eau peut se vaporiser à une température négative.

Mais on ne parle jamais du phénomène de sublimation ou d'évaporation pour un mur. On estime qu'il est seulement



La condensation génère de nombreux désordres, qui peuvent entraîner des conséquences néfastes pour le bâtiment et la santé des occupants. Ici, on peut constater les effets de la condensation sur un pont thermique au niveau du plafond.

sujet à la condensation. Serait-ce un produit si particulier qu'il n'obéirait pas aux lois de la nature ?

Condensation et migration

Dans l'atmosphère intérieure d'un bâtiment, comme nous l'avons vu, il y a en permanence une quantité non négligeable d'eau sous forme de vapeur, bien qu'on soit loin des 100 °C. Si les murs sont étanches à la vapeur d'eau (isolés par du polystyrène, par exemple), celle-ci condensera en hiver sur leur paroi froide ou, pire, parce que la pose de l'isolant n'est jamais parfaitement jointive, à l'interface entre l'isolant et le mur porteur, générant des moisissures. Et si l'isolant est artificiel de type laine de verre ou de roche, il perdra très probablement toutes ses qualités isolantes¹⁵, aggravant les problèmes de condensation.

15. Selon l'Institut de physique du bâtiment de Stuttgart, une laine minérale présentant un interstice de 1 mm entre plaques voit sa performance isolante divisée par 5 par la migration de la vapeur d'eau et les phénomènes de condensation. 15 cm de laine minérale mal posée donnent, en conséquence, le même résultat que 3 cm du même isolant parfaitement jointif.



Seuls les matériaux naturels laissent les lois physiques s'exprimer librement sans risque pour une construction. L'utilisation de bardage en bois et d'isolants naturels permet une libre circulation de la vapeur d'eau à travers les parois. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

Mais si les murs ne sont pas étanches à la vapeur d'eau, cas général des matériaux naturels qui nous intéressent ici, ils vont régulièrement l'absorber. Puis celle-ci va migrer par diffusion dans la matière, jusqu'à atteindre l'extérieur du bâtiment. Elle migre, parce qu'une partie de l'eau contenue dans le matériau s'évapore à l'extérieur, de sorte que la partie externe du matériau est plus « sèche »

que la partie interne. Il y a un phénomène permanent de « pompage » de la vapeur par différence de pression de vapeur.

Le plus intéressant est ce qu'il peut se passer entre la pénétration de la vapeur dans le matériau et son évacuation dehors. Dans un matériau naturel, qu'il s'agisse de bois, de terre crue ou de pierre (et en particulier au niveau des joints), il y a toujours de l'eau, aucun de ces matériaux ne présente une hygrométrie nulle. Et on sait que la vapeur d'eau les traverse. Toute la difficulté tient à l'inhomogénéité du taux d'humidité interne d'un mur, que ne reflètent pas les modèles utilisés par la quasi-totalité des logiciels de simulation. Le taux d'humidité varie fortement entre les faces externes aérées, là où il peut y avoir évaporation, et le cœur du matériau. Or le taux d'humidité impacte la pression de vapeur saturante, qui détermine elle-même le seuil de condensation. Si le cœur du matériau est plus humide, la vapeur va pouvoir éventuellement condenser au passage, puis se vaporiser de nouveau un peu plus loin.

Double changement de phase

Si cette vapeur se condense au sein du matériau, il y a changement de phase, sans perturbation de l'état normal de la matière. Il s'agit d'un flux continu : absorption de vapeur par le matériau, condensation interne avec restitution de l'énergie latente, migration par capillarité à travers la paroi sous forme de diffusion d'eau en phase liquide, évaporation sur la face externe avec absorption d'énergie provenant de l'extérieur.

Ce cycle ne modifie pas la teneur en eau du matériau, il n'y a donc aucune raison de craindre une quelconque dégradation en régime normal. Le double changement de phase durant la migration à travers la paroi joue au final, dans son bilan thermique, le rôle d'une (petite ?) pompe à chaleur transférant à l'intérieur la chaleur captée par évaporation sur la face externe (ou l'inverse en été). Le point de condensation correspond à un point d'élévation de température, lié au dégagement d'énergie de cette condensation. Le gradient de température à l'intérieur du matériau, qui n'est plus constant, remplit alors en quelque sorte une fonction de « rideau thermique », ce qui revient à augmenter le pouvoir d'isolation du matériau. Mais comme tous les essais thermiques théoriques réalisés à ce niveau sont menés selon une vision artificielle et

technologique, dans un four, sur un matériau totalement sec et sans échange hydraulique... on persiste à vouloir trouver de mauvaises propriétés thermiques aux matériaux naturels, ce que l'on constate quand on simule en RT 2005 ou autre un bâtiment ancien. Or le bilan théorique n'a parfois pas grand-chose à voir avec la réalité, sans que, paraît-il, l'on sache bien se l'expliquer. Ce que l'on peut en revanche expliquer très facilement, c'est l'inadéquation des outils actuels par rapport à la réalité, dont nous allons montrer un exemple.

Quelques modèles

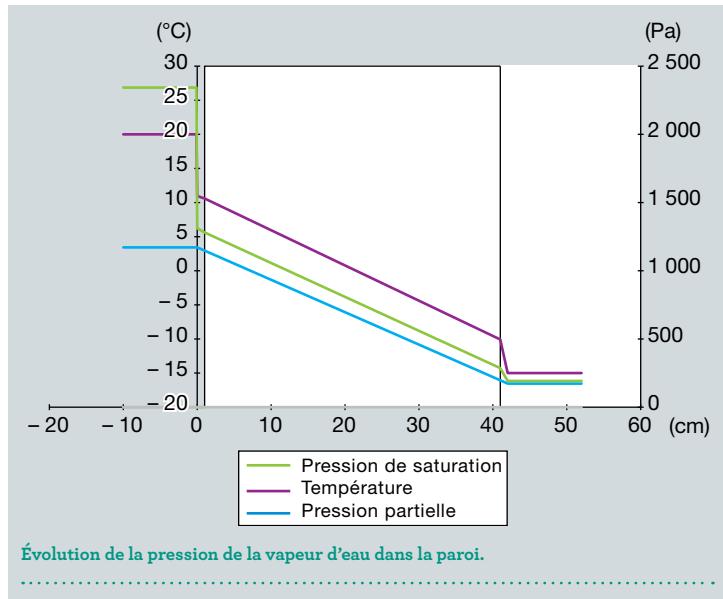
Afin de ne pas prêter le flanc à la critique, le modèle de calcul retenu est accepté couramment et fourni, par exemple, sur feuille de tableur par l'excellent site Énergie Wallonie de l'État belge (<http://energie.wallonie.be/fr/>) – qu'il ne s'agit sûrement pas de critiquer ici, ce site étant une référence dans le monde francophone par la richesse et la précision de son contenu.

Nous allons simuler la diffusion de vapeur dans un mur de pierre de 40 cm d'épaisseur. Le modèle considère un bloc de matière comme un ensemble unique, possédant des propriétés linéaires.

Données du calcul

Ri	Ti	HRi	pi	Re	Te	HRe	pe
0,125	20	50	1 171	0,04	- 15	90	173

On obtient alors un graphique d'évolution de la pression de vapeur d'eau (ci-dessus) dans la paroi tout à fait classique : la pression partielle de vapeur d'eau (en bleu) reste sous la limite de condensation (en vert), tout va bien.



Nous allons maintenant torturer un peu le modèle et considérer que notre bloc de pierre de 40 cm est en fait constitué de 8 couches de pierre de 5 cm parfaitement jointives (tableau page suivante). Chacun admettra qu'il n'y a dans la pratique aucune raison de voir ce mur réagir différemment d'un mur d'une seule couche de même épaisseur. En fait, on pourrait pousser le raisonnement au bout et saucissonner notre mur en une infinité de couches de pierre d'épaisseur infiniment petite, constituées chacune d'un atome d'épaisseur, cela resterait de la pierre quand même. On appelle ce type de simulation une analyse par éléments finis et cette méthode permet de mieux représenter ce qu'il se passe précisément au sein de la matière.

Simulation en un seul tenant

Intérieur	ép.	λ	Rx	Rtot	mu	Zx	Ztot	T°x	p _{vx}	p _{sx}	HR
	(m)	(W/mK)	(m ² K/W)	(m ² K/W)		x5,4.10 ⁹	x5,4.10 ⁹	(°C)	(Pa)	(Pa)	(%)
Ri			0,13	0,13				20	1 171	2 343	50 %
Revêtement	0,01	2	0,01	0,13	100	1	1	11	1 171	1 312	89 %
Pierre	0,40	1,4	0,29	0,42	100	40	41	10,6	1 148	1 281	90 %
Crépi	0,01	0,4	0,03	0,44	100	1	42	- 10,1	197	286	69 %
Re			0,04	0,48				- 11,9	173	248	70 %
Extérieur	0,42							- 15	173	192	90 %

Simulation par éléments finis

Intérieur	ép.	λ	R_x	R_{tot}	μ_u	Z_x	Z_{tot}	T^o_x	p_{vx}	p_{sx}	HR
	(m)	(W/mK)	(m ² .K/W)	(m ² .K/W)		$\times 5.4.10^9$	$\times 5.4.10^9$	(°C)	(Pa)	(Pa)	(%)
Ri			0,13	0,13				20	1 171	2 343	50 %
Revêtement	0,01	2	0,01	0,13	100	1	1	11	1 171	1 312	89 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,17	100	5	6	10,6	1 148	1 281	90 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,20	100	5	11	8	1 029	1 076	96 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,24	100	5	16	5,4	910	901	101 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,27	100	5	21	2,8	791	752	105 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,31	100	5	26	0,3	672	625	108 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,34	100	5	31	- 2,3	553	517	107 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,38	100	5	36	- 4,9	435	426	102 %
Pierre	0,05	1,4	0,04	0,42	100	5	41	- 7,5	316	350	90 %
Crépis	0,01	0,4	0,03	0,44	100	1	42	- 10,1	197	286	69 %
Re			0,04	0,48				- 11,9	173	248	70 %
Extérieur	0,42							- 15	173	192	90 %

Oh ! surprise ! Dans le modèle standard de calcul de la pression de vapeur saturante, en utilisant strictement le même outil de simulation, le résultat change, cette pression n'est plus une fonction linéaire.

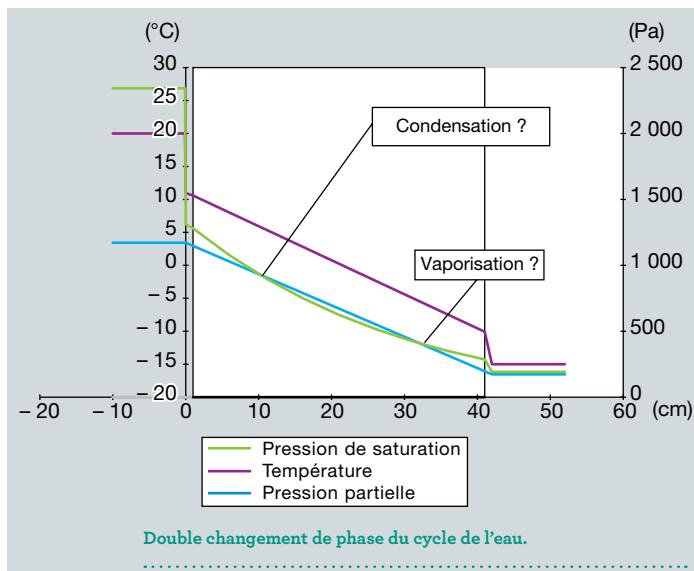
Au cœur de la pierre, on rencontre alors deux points singuliers, nous dit l'outil de simulation, le premier semblant faire se condenser la vapeur, le second semblant la faire

repasser à l'état de vapeur. Pas très sympathique, ce modèle de simulation. Nous cacherait-il des choses ?

Nous pouvons en tirer au moins une conclusion : si on se contente de regarder ce qu'il se passe au niveau des faces de la paroi, les deux manières d'utiliser le modèle donnent un résultat strictement identique : la vapeur est passée au travers. Mais la représentation de l'évolution interne est très intéressante. Le modèle se contredit lui-même et semble montrer un double changement de phase au sein de la matière.

Est-ce une représentation fidèle de ce qu'il se passe dans le mur ? Sûrement pas, puisque chaque changement de phase va engendrer un flux thermique modifiant la température locale, ce que le modèle ne connaît pas. Nous en déduisons au moins une certitude, c'est que les modèles actuellement utilisés pour simuler la dynamique du cycle de l'eau au sein des matériaux de construction sont incohérents et donc inadaptés.

Si les « formules magiques » des outils actuels ne prennent pas en compte le cycle de l'eau, c'est parce que ce cycle n'existe pas dans le béton/polystyrène, couple étanche servant de référence à la plupart des recherches sur le sujet. Les matériaux naturels perspirants sont des matériaux à changement de phase, connus depuis l'Égypte ancienne. Si la laine de verre humide n'isole plus rien, la pierre tendre ou la terre crue humide pré-





L'exemple mozabite

Si, dans le ksar mozabite, les occupants déposent une jarre d'eau devant les entrées d'air basses, ce n'est pas pour abreuver les mouches ! Et si la température intérieure de leurs maisons chute de 15 °C par rapport à l'air brûlant du Sahara, ces mêmes jarres ont probablement quelque chose à y voir, en permettant aux murs d'absorber la vapeur d'eau créée et donc le supplément de chaleur par condensation, laquelle sera restituée à l'air extérieur par évaporation sur la face extérieure le jour, et par la ventilation nocturne. Notez au passage que lors des violents orages, leurs murs et toitures en terre crue s'imbibent et se saturent d'eau, et ne se détériorent pas. Ils absorbent l'eau sans problème.

Alors, s'agit-il aujourd'hui de « lutter » contre la vapeur d'eau ou, plus simplement, contre les murs qui ne la supportent pas, en remédiant à des erreurs basiques dans la conception des bâtiments modernes ?

sente des qualités thermiques au moins équivalentes, si ce n'est parfois meilleures. Et il en va de même avec les isolants naturels. Quand un mur absorbe de la vapeur et la condense, il se réchauffe. Quand le soleil séche un mur humide, il le refroidit. Et même le bois supporte très bien l'eau : ce qu'on appelle le bois sec contient environ 20 % d'eau, ne l'oubliions pas. En revanche, ce que le bois n'aime pas et qui le fait en général pourrir, ce n'est pas tant la vapeur d'eau que le polystyrène ou la laine de verre qu'on applique dessus.

REMONTÉES CAPILLAIRES

Pour continuer sur les flux hydrauliques, décrivons rapidement le phénomène connu des remontées capillaires dans les murs. En dehors des désordres qu'elles génèrent et des risques sanitaires qu'elles engendrent, elles sont une véritable plaie du point de vue énergétique. En augmentant sensiblement l'hygrométrie ambiante et dans les murs, elles accélèrent les échanges thermiques avec l'extérieur des parois atteintes et peuvent contribuer de façon sensible au coût énergétique global d'un bâtiment.

Nous n'insisterons pas trop sur le fait qu'il est préférable de ne pas construire en zone inondable ou sur des terrains dont la nappe phréatique affleure. Un terrain trop humide est bon pour l'agriculture, pas pour y vivre, nos ancêtres le savaient, qui ne construisaient jamais sur ces zones, qu'on s'est empressé dans les dernières décennies de lotir à tout-va, en goudronnant ce qui n'était pas construit.

Nous n'insisterons pas non plus sur le fait qu'il est préférable de construire sur un terrain en pente et nous aborderons plus tard ce sujet en parlant de l'inertie thermique et de l'amortissement saisonnier des températures. Si les villages provençaux sont généralement situés en hauteur, ce n'est peut-être pas uniquement une coïncidence. La pente, en plus de permettre de valoriser de façon simple la chaleur solaire et la fraîcheur terrestre, favorise également le drainage rapide du sol lors des périodes pluvieuses.

Nous ne parlerons pas non plus de la problématique de la protection des parois externes contre les infiltrations d'eau directement par pluie battante, qui relèvent du bon sens, ni de la manie actuelle de certains architectes de « décroûter » les murs anciens en supprimant les enduits qui protégeaient systématiquement dans le passé tous les murs en pierre. Un mur en pierre est destiné à être

apprécié de l'intérieur par les occupants du site, il n'est pas la « signature » architecturale d'une prétendue « sauvegarde », destructrice du patrimoine.

Les désordres liés aux remontées capillaires

Malgré ces précautions, qui devraient être évidentes, il peut arriver qu'une construction, même avec un bon drainage, présente des remontées capillaires dans les murs. L'eau est un excellent conducteur thermique : un mur qui devient trop humide perd tout simplement son pouvoir d'isolation. Ainsi que nous l'avons déjà évoqué et comme nous l'étudierons encore plus en détail ultérieurement, de l'eau dans un mur permet un transfert puissant d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur, via le cycle de condensation/évaporation ; si cela peut être appréciable en été en région chaude, cela l'est nettement moins en hiver.

Le diagnostic visible d'une remontée capillaire est la présence de taches brunes et de traces d'efflorescences blanchâtres, telles que le salpêtre (du latin médiéval *salpetrae*, littéralement : sel de pierre). L'erreur consiste souvent à « traiter » les parois des murs, sous la forme d'un cache-misère, en appliquant divers produits étanches ou hydrofuges (trop souvent à base de pétrole, même s'il existe des hydrofuges naturels), parfois avant même que les murs ne soient secs et surtout sans avoir réglé le problème. Dès lors, l'eau piégée ne peut plus s'évacuer à travers les surfaces traitées : elle migre donc



Principe de l'électro-osmose et électrophorèse

- L'électro-osmose désigne le mouvement d'eau entraîné par l'application d'un champ électrique dans un milieu solide poreux dont le squelette solide est chargé électriquement. Elle concerne le mouvement de cette eau, sous l'influence du champ électrique, allant du pôle + vers le pôle -.
- L'électrophorèse est le mouvement de particules en suspension dans un liquide, sous l'action d'un champ électrique, là aussi du pôle + vers le pôle -. Ces deux phénomènes peuvent être mis à profit en géotechnique pour assécher et consolider les sols, et lutter contre les remontées capillaires.

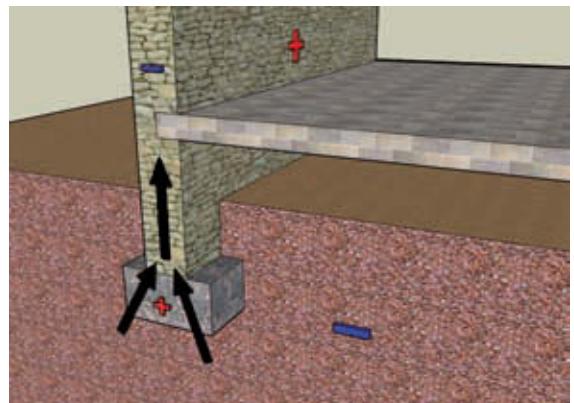


Les remontées capillaires dans les matériaux, comme ici à travers le dallage de sol d'une cathédrale, engendrent l'apparition de salpêtre, des taches peu esthétiques.

vers d'autres parties de la maçonnerie, engendrant de nouveaux désordres un peu plus loin.

Une remontée capillaire est un phénomène physique moléculaire, qui met en œuvre l'ionisation de l'eau. L'eau dissout les sels de la terre, qui se dissocient en ions acides et basiques, électriquement polarisés. Les phénomènes des courants « telluriques », générés par les flux de sels dissous dans l'eau, s'ils ne sont pas encore tous bien maîtrisés et si le mot, souvent utilisé à tort et à travers, fait encore peur à de nombreux scientifiques, commencent quand même à en intéresser certains.

La présence de sels hygroscopiques dans le sol favorise la création d'une électrolyse qui polarise localement le mur et ainsi active l'ascension de l'eau dans le mur. L'ensemble fonctionne comme une pile dont le sol serait l'anode (pôle +) et le mur, la cathode (pôle -). L'eau est chargée de sels : nitrates, sulfates, etc. (l'électrolyte). En présence d'eau de pluie, plus pure, une osmose se produit à travers la paroi poreuse du sol, générant un champ électrique. L'eau, se déplaçant toujours du pôle positif vers le pôle négatif, subit l'influence de ce champ électrique et remonte dans les capillaires. Le phénomène est accéléré par les épisodes orageux, non par l'eau de l'orage, mais par les champs électriques des nuages. Dans la plupart des cas, si les fondations ne baignent pas dans une mare à moustiques, les murs peuvent être traités en empêchant tout simplement cette osmose de



Électro-osmose dans un mur. La variation de composition de l'eau dans une fondation par rapport à celle du sol environnant génère une polarisation par ionisation des sels dissous. Cette polarisation engendre un champ électrostatique faisant migrer l'eau vers le haut.

s'y produire par des techniques électrolytiques plus ou moins simples (voir encadré ci-contre) : si un conducteur électrique force l'équipotentialité sur l'ensemble du mur, d'une part, et sur l'ensemble des fondations, d'autre part, il y a rupture du potentiel osmotique ; il ne peut plus se créer d'inversion de champ électrique local et les ions polarisés ne peuvent plus migrer.

Le traitement des murs par électrolyse

Nos ancêtres, s'ils n'en connaissaient pas l'explication scientifique, en maîtrisaient parfaitement le traitement. Les enduits et les mortiers à base de chaux, avec inclusion de chanvre, deviennent conducteurs et repoussent les eaux de pluie tout en facilitant l'expulsion de l'humidité excédentaire contenue dans les murs. La chênevotte, issue du broyage du bois de chanvre, très appréciée pour sa légèreté, sa teneur élevée en silice végétale et son caractère isolant thermique, est en effet structurée en de nombreux canaux formant des cavités qui régulent l'humidité et la chaleur. Restait à expliquer rationnellement son efficacité par le principe de l'électro-osmose.

Sur un mur existant, la solution pour traiter la capillarité est de contrecarrer la ionisation des molécules d'eau, en créant une ionisation contraire dans le mur ou en l'empêchant. Un remède classique passif consiste à tendre un fil de cuivre à l'horizontale sur les deux faces du mur, à le mettre régulièrement en contact avec le mur par des pointes enfichées dans des trous régulièrement espacés et rebouchés à la chaux hydraulique, et à le raccorder à une petite prise de terre. Il faut commencer la mise en place au-dessus du niveau haut des remontées capillaires, puis progressivement descendre le fil au fur et à mesure que l'emprise de la zone capillaire redescend vers le sol (l'opération peut prendre quelques mois suivant l'importance du problème à traiter). Lorsque cette emprise est redescendue au niveau du sol, le fil tendu juste au-dessus du sol bloque définitivement toute remontée capillaire. Idéalement, le fil conducteur est directement noyé dans une saignée faite dans le mur, qu'il faut reboucher à la chaux grasse. Une fois le mur

traité, un mortier de chaux et chanvre complète efficacement l'ensemble.

Plusieurs procédés plus ou moins sophistiqués sont aujourd'hui reconnus par les professionnels pour traiter les problèmes sur des constructions existantes, Murtronic, Humi-Stop, Wagner... Ces méthodes forcent globalement la polarisation positive du mur pour empêcher les remontées d'humidité. Le système Murtronic contient des circuits électroniques passifs (donc sans besoin d'alimentation) ; il agit par résonance avec les champs telluriques présents dans le sous-sol, en déphasant les fréquences qui alimentent la force électromotrice au niveau des murs et donc en les contrecarrant. On notera que, si les chiens ignorent superbement l'appareil, les chats semblent le détecter, probablement par la grande sensibilité électrostatique de leur pelage, et s'en éloignent au maximum. Le système Wagner, lui, consiste à exploiter les deux principes physiques de l'électro-osmose et de l'électrophorèse, en appliquant une barrière électronique au bas des murs à traiter.

Pour les constructions neuves, un lit de mortier de chaux additionné de chanvre posé en écran entre les murs et les fondations, juste au-dessus du sol, crée une barrière très efficace contre les remontées capillaires, en plus de casser le pont thermique à ce niveau. Une ligne électriquement conductrice (fil de cuivre), noyée dans cette barrière capillaire et correctement mise à la terre, permet de casser la polarisation du mur et complète l'efficacité de l'ensemble.

Pourquoi utiliser des produits chimiques coûteux et mal-sains pour vous et l'environnement, alors que des solutions simples et efficaces existent ? Pourquoi vouloir lutter contre les phénomènes naturels plutôt que d'apprendre à les apprivoiser ? L'utilisation de produits chimiques pour régler un problème de capillarité, en dehors du fait qu'elle ne résout rien, démontre surtout que notre société est plus intéressée par la surconsommation de produits inutiles et nocifs que par le traitement rationnel et scientifique des problèmes.

7| LA TRIPLE RÈGLE DU BIOCLIMATISME



Le bois massif est un très bon accumulateur thermique, offrant une effusivité idéale, car égale à celle de la peau humaine. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

Si l'on souhaite qu'une construction offre de façon simple un confort thermique acceptable en hiver comme en été, il faut qu'elle puisse se mettre en symbiose et en cohérence maîtrisée avec les quatre éléments. Pour ce faire, elle doit présenter certaines performances, dont les trois principales sont :

- accumuler l'énergie, afin de valoriser de façon permanente les apports aléatoires de la météorologie, qu'il s'agisse de chaud ou de froid ;
- amortir les fluctuations de la météorologie, en isolant l'intérieur de l'extérieur, et en lissant les variations des apports thermiques ;
- déphasier les variations météorologiques, afin de bénéficier au bon moment des apports de cette météorologie.

Coïncidence étrange, nous retrouvons ici les caractéristiques de la croûte terrestre. Nous aurons à revenir sur cette symétrie entre les besoins d'un bâtiment et les propriétés du sol terrestre.

Nous allons commencer par mieux définir ces caractéristiques d'accumulation, d'amortissement et de déphasage.

ACCUMULER L'ÉNERGIE : L'INERTIE THERMIQUE

Décidément, on y revient toujours, à cette inertie. Mais qu'est-ce que l'inertie d'un bâtiment, au juste ? Dans l'esprit de beaucoup de personnes, l'inertie est un mot associé de façon négative à la lenteur. Pourtant, l'inertie n'a pas que des défauts. C'est elle qui fait tenir une toupie ou un vélo debout, les satellites sur leur trajectoire (*via* des volants inertIELS) et aussi la Terre sur son axe. C'est l'inertie électrique qui permet aux transformateurs

électriques de fonctionner, et c'est l'inertie de l'eau qui permet au Gulf Stream de perdurer. Enfin, c'est l'inertie climatique de la Terre qui fait qu'on ne cuit pas en été et qu'on ne gèle pas en hiver.

Explications

Le solstice d'été a lieu le 21 juin. C'est le moment où le soleil est au plus haut dans le ciel. Pourtant, il est facile de vérifier que le moment le plus chaud de l'année ne se situe pas en juin, mais plutôt début août. De même en hiver, la période la plus froide est marquée par le début du mois de février et non par le solstice d'hiver. Et la fonte maximale de la calotte polaire nordique a lieu vers le 20 septembre, alors que son emprise maximale se situe mi-mars, soi carrément en mi-saison. La Terre, son atmosphère et ses océans nécessitent du temps pour accumuler la chaleur solaire et pour la restituer, car il y a d'immenses masses « inertes » de matière à réchauffer, et cette matière agit avec l'énergie un peu comme une éponge. Tant qu'elle n'est pas saturée, la matière absorbe l'énergie. Sans l'inertie de la Terre, nous connaîtrions des canicules en juin et des glaciations en décembre telles qu'elles rendraient la vie impossible sur la pla-

nète. Si Mars disposait d'une atmosphère et d'océans suffisants, la vie y serait probablement possible. Et s'il fait en moyenne 465 °C à la surface de Vénus, avec une fluctuation maximale de 20 °C environ, ce n'est pas dû à sa plus grande proximité avec le soleil, mais à la très forte inertie thermique de son imposante atmosphère (et à l'effet de serre).

Dans une échelle de temps beaucoup plus courte, on constate le même phénomène. Deux heures après le lever du soleil, le rayonnement est le même que deux heures avant son coucher. Mais les températures extérieures n'ont rien à voir : en fin d'après-midi, il fait nettement plus chaud en général qu'en début de matinée.

Dans une échelle de temps encore plus courte, ce phénomène existe toujours. Partant en pique-nique, il ne viendrait à personne l'idée d'utiliser du polystyrène pour accumuler du froid dans une glacière ; pour cela on se sert d'accumulateurs à forte inertie, longs à congeler, mais qui vont pouvoir emmagasiner beaucoup de froid. Il faudra beaucoup de chaleur pour les décongeler, ce qui empêchera la glacière de se réchauffer trop vite. Le bloc de glace dans la glacière, ce n'est rien d'autre que de l'inertie ajoutée.

Valeurs comparatives de l'inertie thermique des matériaux

Inertie thermique volumique pc	Wh/m ³ .K	Inertie thermique volumique pc	Wh/m ³ .K
Eau	1 131	Béton terre-paille 600 kg/m ³	208
Granite	722	Monomur	206
Meulière	611	Béton cellulaire 400 kg/m ³	111
Bois lourd (hêtre, chêne)	600	Béton chaux-chanvre 450 kg/m ³	85
Béton plein	597	Liège expansé	54
Pierre ferme	526	Perlite expansée 200 kg/m ³	50
Brique pleine (cuite)	514	Ouate de cellulose (panneaux)	37
Brique de terre comprimée	461	Paille	31
Pisé (2 000 kg/m ³)	444	Laine de roche 70 kg/m ³	20
Pierre très tendre	442	Laine de chanvre, lin, coton	18
Bois léger	360	Laine de mouton et autres fibres animales	16
Sol de terre (1 600 kg/m ³)	355	Ouate de cellulose soufflée	12
Bloc béton (parpaing de ciment)	306	Laine de verre 35 kg/m ³	10
Carreau de plâtre	266	Polystyrène expansé	7
Panneau particules agglo	250	Air	0,35

Application

Quand le soleil transperce les nuages et éclaire l'intérieur d'un bâtiment à travers une fenêtre, cette lumière se transforme instantanément en chaleur pour sa plus grande part. Si les parois intérieures présentent une forte inertie, elles absorberont cette chaleur, avec deux effets annexes :

- le supplément d'énergie ne se transformera pas en surchauffe obligeant à ouvrir les fenêtres, mais s'acumulera dans les parois ;
- quand le soleil disparaîtra de nouveau, ces mêmes parois restitueront lentement cette énergie, participant à la limitation des besoins de chauffage.

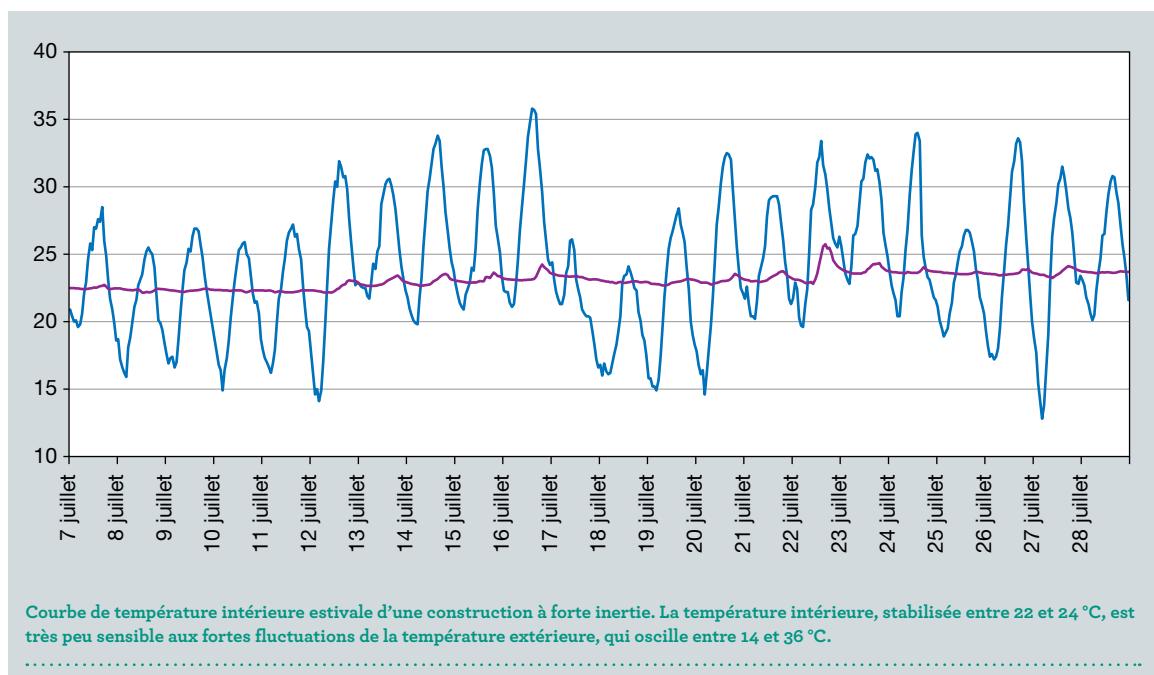
En été, le phénomène inverse produira les mêmes effets et la fraîcheur de la nuit, sous réserve d'une bonne ventilation nocturne, pourra être restituée le jour. Or, avoir la température la plus stable possible entre le jour et la nuit est la première condition du confort intérieur.

La courbe de la construction à forte inertie (voir ci-dessous) montre l'enregistrement de l'évolution de la température intérieure d'un bâtiment à forte inertie en été. On peut remarquer qu'entre le 7 et le 12 juillet, la température intérieure semble « verrouillée », comme par enchantement. Et alors que, entre la nuit du 12 au

13 juillet et l'après-midi du 16 juillet, la température extérieure affiche une amplitude de plus de 20 °C, à l'intérieur de la construction l'oscillation thermique se limite à 2 °C. Le 22 juillet, l'ouverture volontairement permanente d'une menuiserie génère une hausse de température de 3 °C dans le bâtiment, immédiatement effacée par l'inertie une fois cette ouverture sur l'air extérieur refermée. Dans un tel bâtiment, nul besoin de climatisation, seule une bonne gestion du renouvellement d'air et des apports solaires suffit à assurer un confort thermique en toute saison.

S'il requiert plus de matière à la construction, le surcoût est en partie compensé par l'absence de besoin de haute technologie de refroidissement. Et quelle économie financière et environnementale ensuite, durant toute la durée de vie du bâtiment !

L'inertie d'une paroi traduit sa capacité à stocker de l'énergie. Elle se calcule en multipliant la capacité thermique volumique par l'épaisseur du matériau, et se mesure en wattheures par mètre carré et par degré (Wh/m².K). En multipliant par la surface de la paroi, on détermine la quantité d'énergie pouvant être stockée pour chaque degré d'élévation de la température du matériau.



On pourra noter au passage que, contrairement à quelques idées bien ancrées, le chêne a la même inertie que le béton, et que le parpaing en a moins que du bois léger comme le pin (mais on parle bien ici en volume de matériau, on ne va pas comparer un fin panneau de bois avec un mur de parpaing). Et la meilleure inertie reste l'eau. Un mur humide offre donc, accessoirement, une meilleure inertie que le même mur sec.

Pour calculer l'inertie totale d'un bâtiment, on additionne les inerties intérieures à l'isolation ; pour les isolations réparties, on ne prend en compte que 50 % de l'épaisseur¹⁶.

Inertie et matériaux de construction

Comment reconnaître un matériau à forte inertie ? Même si le lien n'est pas exactement celui-ci, on peut dire que plus un matériau est dense, plus grande est son inertie : la pierre, le bois dense et le béton présentent une très forte inertie, le bois léger et le parpaing une inertie moyenne, le polystyrène et la laine de verre n'en ont quasiment aucune. Tous les éléments lourds d'une construction, dès lors qu'ils sont du côté intérieur de l'isolant, contribuent à cette inertie interne.

Dans les constructions actuelles, en France, on isole généralement par l'intérieur, supprimant ainsi toute inertie intérieure aux bâtiments, en la déplaçant à l'extérieur, donc en maximisant la capacité de leur paroi extérieure à accumuler de la chaleur en été et du froid en hiver. Est-ce grave ? Oui, c'est même catastrophique dans la plupart des cas : avec un isolant intérieur et de la masse dehors, on chauffe en été et on refroidit en hiver. Sauf dans quelques cas particuliers, cette méthode va à l'encontre du principe d'économie d'énergie et du maintien du confort intérieur.

Mais rappelons-nous l'igloo : s'il fait très froid, l'inertie est une plaie. Comment concilier en hiver le besoin diurne d'inertie et le souci nocturne d'absence d'inertie ? Nous aborderons ce sujet dans la partie 4.

VALORISER LE CLIMAT : LE DÉPHASAGE THERMIQUE

Cette inertie qui accumule de l'énergie, nous venons de le voir, présente un effet induit moins bien connu, mais fon-

Absorption et transmission

On peut distinguer deux formes d'inertie :

- l'inertie d'absorption, qui correspond à la capacité de la surface du matériau à absorber l'énergie qu'il reçoit par contact et qui fait appel à son effusivité. C'est elle qui va rapidement absorber les effets d'un courant d'air frais lié à l'ouverture d'une fenêtre, par exemple ;
- l'inertie de transmission, qui dépend de la diffusivité du matériau et qui va générer les phénomènes de déphasage et d'amortissement. C'est elle qui va absorber l'énergie solaire rayonnante.



damental. Comme il faut du temps pour « accumuler », il se produit un décalage entre le moment où l'énergie est fournie et celui où elle peut être restituée. Ce décalage, en termes techniques, s'appelle un déphasage : l'effet n'est pas en phase avec l'origine de l'effet. Comme nous l'avons vu, la température de la Terre est à son maximum deux mois après le solstice d'été. Le déphasage du climat terrestre est donc d'environ deux mois.

Un mur à forte inertie va agir exactement de la même façon. Si le mur est correctement dimensionné, un déphasage de douze heures peut être obtenu : on restitue alors la nuit la chaleur du jour, et le jour la fraîcheur de la nuit. En été comme en hiver, ce déphasage est fondamental pour obtenir un confort optimal et un maximum d'économies d'énergies. Comme on commence à le comprendre, l'inertie seule n'est pas suffisante pour qualifier thermiquement une paroi. Selon sa constitution, son épaisseur et quelques autres critères, elle présentera un déphasage variable, qu'il sera judicieux d'adapter à l'effet recherché. En poussant le raisonnement à l'extrême, si le déphasage était surdimensionné et se situait à vingt-quatre heures, on aurait tout perdu ; un trop fort déphasage, donc une trop grande inertie, peut être contre-productif.

Nous reviendrons à double titre plus en détail sur ce sujet majeur du déphasage thermique :

- une façade orientée au sud en Provence reçoit en hiver environ 3 kWh/m² par jour. S'il est possible d'accumuler

16. Si l'on veut être précis, on détermine le point où se trouve la température médiane entre l'intérieur et l'extérieur, et on prend en compte la matière située du côté intérieur à ce point. Dans la pratique, l'inertie de l'isolant est négligeable.

- cette énergie et de la restituer avec douze heures de décalage (au hasard : un mur de pierre de 40 cm par exemple), le phénomène du déphasage commence à présenter un intérêt évident ;
- si on arrive à pousser ce déphasage à six mois, il est alors possible de bénéficier en été du froid de l'hiver et en hiver de la chaleur de l'été, et là, cela commence vraiment à devenir plus intéressant.

Reste à trouver comment faire. Nous y allons doucement...

RÉGULER LE CLIMAT : L'AMORTISSEMENT THERMIQUE

L'inertie thermique présente un autre aspect intéressant, qui s'appelle l'amortissement thermique.

Le phénomène de diffusion de la chaleur à travers la matière est quelque chose de très complexe à décrire rationnellement. Comme nous l'avons déjà dit, si vous n'avez jamais entendu parler de décomposition en série de Fourier, laissez tomber l'explication mathématique. Contrairement à une idée couramment répandue, la chaleur ne se déplace pas comme une onde. Imaginons un « grain » de chaleur en un point quelconque d'un matériau. Il va rayonner son énergie dans toutes les directions, comme une onde créée par un caillou jeté dans l'eau. Mais à chaque instant qui suit, chaque point de l'onde crée un nouveau grain de chaleur un peu plus petit, une nouvelle onde de chaleur part à son tour de chaque grain de l'onde précédente, et ainsi dans toutes les directions. Le résultat de ce rayonnement progressif dans toutes les directions d'une infinité d'ondes de chaleur s'appelle la diffusion. Chauffez en un point quelconque un bloc de pierre avec une flamme : au bout d'un moment, la chaleur, donc l'énergie, a diffusé dans tout le bloc. Le bloc entier se retrouve un peu plus chaud, mais nettement moins que le point qui a été chauffé. La chaleur s'est, en quelque sorte, « étalée » dans toute la matière environnante.

Prenons un autre exemple, la surface de la Terre. En hiver, il fait par exemple 0 °C dehors, la surface du sol est à 0 °C. En été, s'il fait 30 °C dehors, la surface du sol est à 30 °C. Entre l'été et l'hiver, à 2 mètres de profondeur, la température ne va plus varier qu'entre 10 et 20 °C. Et à 6 mètres de profondeur, la température restera quasiment constante, à environ 15 °C \pm 1 °C. Cette température de 15 °C est ce qu'on appelle la température moyenne

de la planète en surface. La météorologie peut varier d'un jour à l'autre comme elle veut, cette température moyenne qui détermine le climat est extrêmement stable. Qu'on soit aux pôles ou à l'équateur, on la retrouve partout à partir d'une certaine profondeur, à une petite fluctuation près liée à la latitude. À la fin de la dernière glaciation, il y a vingt mille ans, la température moyenne de la Terre était seulement de 5 °C inférieure à celle que l'on connaît aujourd'hui, et il a fallu dix mille ans pour la faire monter de 5 °C. C'est dire l'effort qu'il faut pour vaincre une telle inertie au changement.

Les scientifiques du GIEC nous annoncent un réchauffement possible de 5 °C d'ici à l'an 2100. Cela donne une petite idée de ce que la société moderne est en train d'enclencher et de l'urgence qu'il y a à réagir, car une fois la machine lancée, avec son inertie... Mais c'est un autre sujet.

Ce phénomène de stabilisation de la température au sein d'une masse de matière est ce que l'on appelle l'amortissement thermique. Les fortes fluctuations de température en surface, par l'effet de la diffusion thermique, s'atténuent en fonction de l'éloignement par rapport à la surface dont la température est modifiée.

Or, le premier problème du confort dans un bâtiment est, comme nous l'avons déjà dit, la fluctuation thermique. Si on peut atténuer cette fluctuation, on améliore le confort. Si en pleine canicule d'été on peut totalement amortir la fluctuation jour/nuit entre 20 °C et 40 °C, on se retrouve à une moyenne de 30 °C, ce qui est beaucoup plus confortable à supporter que les 40 °C de l'après-midi. Il en va de même en plein hiver par rapport aux nuits glaciales.

ÉCONOMISER L'ÉNERGIE : L'ISOLATION THERMIQUE

L'isolation thermique, chacun ou presque sait aujourd'hui de quoi il s'agit : panser la fuite avant de penser la suite. En bref, limiter les échanges thermiques avant de chauffer ou de climatiser.

Mais, au regard de ce que nous venons de montrer, l'isolation thermique n'est plus une fin en soi ni même un objectif à atteindre. Elle devient un simple moyen, parmi d'autres, pour valoriser l'inertie, le déphasage et l'amortissement thermique. Dans un grand nombre de cas, elle sera l'outil idéal pour atteindre nos objectifs sous-jacents

aux contraintes réelles de notre triple règle de bioclimatisme : accumuler, amortir, déphaser, à la condition expresse de ne pas venir contredire la mise en valeur simultanée de l'inertie, du déphasage et de l'amortissement thermique du bâtiment.

Répétons-le : l'isolation n'est pas un objectif, mais un simple moyen, parmi un certain nombre d'autres. Isoler en oubliant le reste, c'est perdre son temps et son argent, et parfois obtenir un résultat contraire à l'objectif recherché.

Vous en doutez ? Prenez le cas d'une fenêtre : l'isoler au maximum en hiver inciterait à la remplacer par une bonne épaisseur d'isolant. Mais on perdrat alors toute possibilité de valorisation de l'apport thermique par la lumière solaire. Isoler complètement la fenêtre n'est donc peut-être pas le meilleur choix. Encore moins s'il s'agit d'une serre froide sur la façade sud du bâtiment.

Un autre exemple : la RT 2005 nous impose d'isoler le plancher bas. Mais cette isolation nous fait perdre tout le potentiel de l'inertie du sol. La question est alors de savoir si le gain procuré par l'isolation d'un plancher bas est une réponse universelle pour limiter les besoins énergétiques et assurer le meilleur confort à l'intérieur d'un bâtiment. Dans certains cas, surtout en Provence, c'est loin d'être évident, et il existe parfois de meilleures solutions.

Et si l'on tient absolument à isoler le sol du bâtiment, il faut alors se poser la question : par quoi le remplacer ?

VITESSE DE TRANSFERT THERMIQUE

À la question rituelle : « *Combien de temps la chaleur met-elle pour traverser un mur ?* », la réponse serait (presque) facile si nous étions face à un système adiabatique, donc totalement isolé entre l'entrée et la sortie. On prend une fine barre de cuivre, on l'isole sur toute sa longueur, on la chauffe à un bout et on mesure combien de temps la chaleur prend pour arriver à l'autre bout. C'est facile à faire en laboratoire.

Mais malheureusement, dans un bâtiment, ce n'est jamais de cette façon que le cas se présente. Comme on l'a vu, la chaleur se diffuse de manière multidirectionnelle. Donc une partie de ce qui avance finit par reculer. Et ce qui recule finit par se remettre à avancer. De plus, cela part vers la gauche, vers la droite, vers le haut, vers le bas. Alors, allez calculer une vitesse ! Imaginons un

« impact » thermique très violent et très court sur une face de la paroi. L'effet, sur l'autre face de cette paroi, sera en courbe de Gauss, avec une montée progressive, un maximum, puis une redescente progressive de la température. La progressivité de l'effet sera inversement proportionnelle à la diffusivité (ou à sa racine carrée, pour être plus précis). Et on peut poser la question déjà plus pertinente : « *Quand aura lieu le pic d'effet ?* »

Supposons un mur avec une température à 0 °C des deux côtés, puis portons très brutalement la température intérieure à 20 °C. On peut se demander quand la chaleur intérieure commencera à se faire sentir sérieusement dehors, donc à se perdre (ou réciproquement en été, quand la chaleur solaire va commencer à pénétrer dans la construction).

Il est admis que, dans un matériau de construction, la vitesse de transfert thermique peut être donnée, en centimètres par heure (cm/h) par la formule approximative suivante :

$$\gamma = 72,5 \cdot \sqrt{D}$$



Voûte en BTC réalisée sur le modèle de la voûte nubienne. Recouverte d'une toiture en tuiles, fortement ventilée, elle assure à ses occupants un grand confort d'été. (HLM Vaucluse Logement.)

La vitesse varie comme la racine carrée de la diffusivité.

Le temps de transfert T estimatif (en heures, « e » étant l'épaisseur du matériau en mètres) est donc environ égal à :

$$T = 1,38 \cdot e \cdot \sqrt{D} = 1,38 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c}{\lambda}}$$

Si les chiffres obtenus ne permettent en aucune façon de savoir avec précision quand un rayon de soleil frappant un mur va terminer dans une pièce sous forme de chaleur, ils permettent des comparaisons intéressantes entre différents matériaux, et une estimation du déphasage moyen entre une production intense d'énergie, d'un côté, et sa perception moyenne, de l'autre.

En jonglant un peu avec les formules, on arrive à la relation estimative suivante donnant l'épaisseur (en centimètres) nécessaire à un déphasage de douze heures :

$$e = 870\sqrt{D}$$

Pour les matériaux de construction les plus courants, cela nous donne, du plus lent au plus rapide, en termes de conductivité :

Matériau	$\Phi = 12 \text{ h}$
Bois massif	17 cm
Monomur type Biomur	21 cm
Bloc pierre ponce type Cogetherm	24 cm
Béton terre-paille 600 kg/m ³	25 cm
Ponces naturelles	29 cm
Béton cellulaire	31 cm
Paille	35 cm
Brique de terre comprimée (BTC)	38 cm
Pierre très tendre	38 cm
Briques pleines (cuites)	38 cm
Béton de chaux-chanvre 450 kg/m ³	40 cm
Pierre ferme et demi-ferme	45 cm
Pisé	45 cm
Béton plein	46 cm
Meulière	47 cm
Bloc béton (parpaing de ciment)	49 cm
Ouate de cellulose soufflée	51 cm
Granite	54 cm

Bien que la méthode de calcul reste très empirique, qu'elle ne soit applicable que pour de faibles épaisseurs¹⁷ et qu'elle ne prenne pas en compte un certain nombre de phénomènes pour obtenir le déphasage jour-nuit que nous recherchons, on voit qu'il est plus facile de travailler avec des matériaux semi-isolants qu'avec de la pierre dense ou du béton, à condition que leur épaisseur soit en adéquation avec d'autres caractéristiques recherchées. Et c'est là que le bât blesse. Pour le confort d'été :

- un mur de BTC de 38 cm est idéal, mais n'isole pas suffisamment ($\lambda = 0,87$). Le temps de déphasage est de 12 heures ;
- un Monomur de 37,5 cm isole moyennement et surtout déphase quasiment de vingt-quatre heures ! Il est donc catastrophique sur cet aspect : en été il restituera à midi la chaleur de la veille à la même heure (en revanche il amortira fortement) ;
- un mur de pierre à l'ancienne, de 40 cm, devient déjà nettement plus intéressant (mais qui en doutait ?) ; comme le BTC 38 cm, il déphase de 12 heures ;
- un mur de béton ou de parpaing de 20 cm non isolé déphase de cinq à six heures seulement, et vous fera donc bien cuire le soir.

En revanche, si le même mur de BTC, de pierre ou de béton, de 20 cm d'épaisseur, est correctement isolé par l'extérieur, le temps de l'aller-retour via l'isolant sera d'environ douze heures... ce qui devient là aussi très intéressant.

Ces quelques remarques répondent, à elles seules, à la question de savoir pourquoi il faut isoler par l'extérieur, même si ce n'est pas la seule raison.

On voit que prendre en compte la valeur de ce déphasage, et de l'amortissement qui va souvent avec, est primordial pour le confort d'été en particulier. Or c'est une donnée qui n'est quasiment jamais considérée quand on détermine les propriétés d'un mur, en tout cas par la réglementation thermique. Dans le meilleur des cas, l'on se demande après-coup, lorsque survient le problème, quelle est la valeur du déphasage obtenu.

DÉPHASAGE THERMIQUE TERRESTRE

Déphaser dans un mur, c'est intéressant, mais on reste, par la force des choses, cantonné à un déphasage de

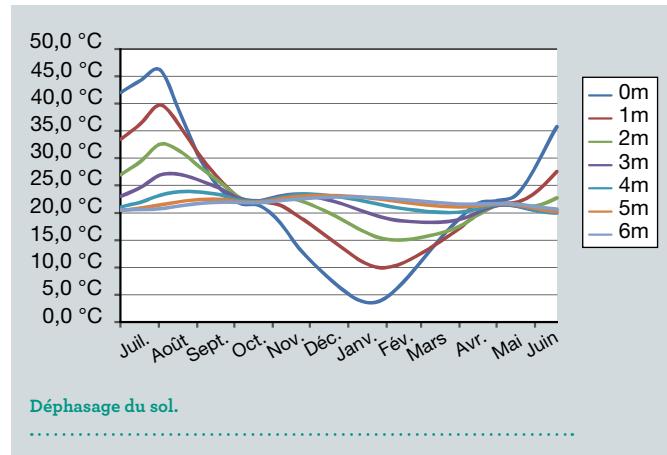
17. Au-delà de 20 cm, cette formule simplifiée commence déjà à être fausse, mais permet des comparaisons utiles. Pour être plus précis, il faudrait appliquer la formule complète de déphasage et d'amortissement ondulatoire vue à la page 65 pour le sol terrestre.

quelques heures. Nous avons vu plus tôt comment la température variait dans le sol en fonction de la profondeur et de la saison, en appliquant l'équation :

$$\vartheta(t) = \vartheta_a + |\vartheta_m - \vartheta_a| \cdot e^{-\xi} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi\right)$$

La même équation nous fournit une autre information intéressante, relative au déphasage et à l'amortissement du sol en fonction de la profondeur. Il suffit pour cela d'inverser nos références et de placer en abscisse le temps comme sur le graphique ci-contre. On peut remarquer que le déphasage s'accentue avec la profondeur, pour atteindre jusqu'à six mois à environ 8 m de profondeur. Et comme nous l'avons vu, l'amortissement est, par ailleurs, quasiment total à cette profondeur.

Que se passerait-il si on injectait en été une certaine quantité de chaleur en profondeur ? Le point de référence de la température d'équilibre du sol en profondeur serait décalé vers le haut de façon importante. La chaleur diffusant progressivement vers la surface, l'ensemble des courbes de niveaux se retrouverait ponctuellement décalé vers le haut, avec un déphasage proportionnel à la distance par rapport au point d'injection de chaleur et, bien sûr, un amortissement en conséquence. Et le phénomène serait inverse pour une injection de froid en



hiver. La surface du sol serait alors réchauffée en hiver et rafraîchie en été.

Une dernière question se pose alors : si nous protégeons la surface du sol des variations météorologiques, par exemple en y construisant un bâtiment qui va par défaut imposer une température théorique constante de 20 °C à cette surface toute l'année, que se passera-t-il si nous injectons en profondeur de la chaleur en été et du froid en hiver ? Il nous reste cependant beaucoup de choses à voir avant de pouvoir développer cette solution bioclimatique.

8| LES MATÉRIAUX, L'ÉNERGIE ET LE BIOCLIMATISME

Nous venons de faire un tour non exhaustif des raisons incitant à construire de façon bioclimatique et des critères nécessaires pour qualifier une construction de bioclimatique, confortable au corps humain. Nous avons aussi rappelé les principes théoriques et les caractéristiques fondamentales des matériaux.

Avant d'envisager les solutions du bioclimatisme, il nous reste à répondre aux nombreux critères évoqués et, en conséquence, à déterminer « comment » faire.

Quels moyens pour construire bioclimatique ? Pour traiter cette question, nous allons commencer par parler des matériaux de construction et de la façon dont ils peuvent répondre, d'une part, au besoin de confort du corps humain, d'autre part, aux aléas climatiques, les deux contraintes citées préalablement. Puis enfin, nous pourrons aborder le vaste sujet de leur mise en forme, le terme « forme » étant ici volontairement utilisé dans son sens premier.

LE PRINCIPE DE SÉLECTION DES MATÉRIAUX

L'étude des matériaux peut sembler, au premier abord, complexe. En fait, elle sollicite principalement le bon sens. On peut entrer dans des démonstrations techniques et mathématiques compliquées, mais qui présentent généralement peu d'intérêt pour expliquer les raisons incitant à privilégier tel matériau plutôt qu'un autre. Nous laisserons donc les chiffres à la simulation thermique dynamique, aux calculs de structure et aux analyses de cycle de vie. Nous oublierons les quantités pour nous concentrer sur les qualités.

Rappelons à nouveau les conditions climatiques qui influencent le confort humain et qui fixent les contraintes d'une construction :

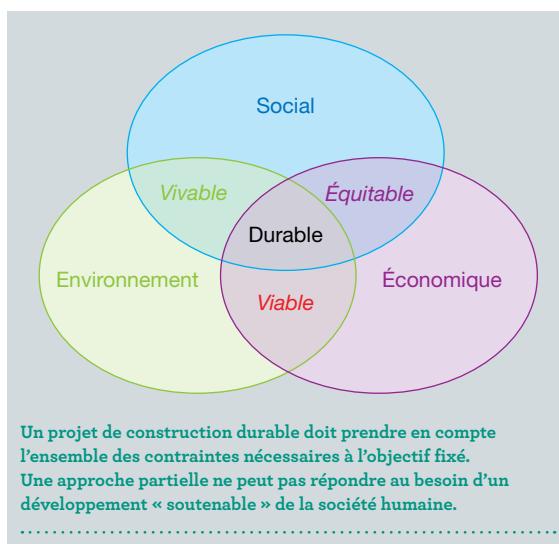
- la température ambiante ;
- l'hygrométrie ;
- le vent ;
- le rayonnement thermique ambiant.

Il faut nous protéger de la pluie et donc utiliser une construction étanche à l'eau, mais qui laisse passer la vapeur afin de maintenir une hygrométrie constante et confortable. Cette construction doit nous abriter au maximum du vent en hiver, mais le laisser librement circuler en été. Elle doit présenter un minimum de prise au vent et un minimum de surface déperditive en hiver et d'exposition au soleil en été. Elle doit valoriser au mieux les rayons solaires hivernaux et laisser entrer leur lumière, ni trop ni trop peu, en nous gardant de leur ardeur réchauffante l'été. La matière employée à l'intérieur doit assurer un rayonnement thermique adapté, homogène, élevé en hiver, faible en été. Enfin, l'ensemble doit être assez solide pour résister aux intempéries et suffisamment souple pour permettre éventuellement des mouvements de terrain (sol instable, risque sismique).

Ce cahier des charges, déjà complexe, ne serait pourtant pas complet si nous omettions le principal. De façon idéale, le bâtiment doit être « durable », afin de pouvoir être légué à nos descendants, sans que sa construction ne détériore leur environnement. Chacun admire la longévité des ponts romains et les œuvres majestueuses des bâtisseurs de cathédrales, sans parler des pyramides égyptiennes. Le plus étonnant, ce n'est pas que des hommes aient su bâtir, sans grandes connaissances technologiques, de telles constructions qui persistent aujourd'hui, c'est que nous soyons nous-mêmes incapables de construire quelque chose qui tienne debout plus de quelques décennies. Lorsque nos ancêtres bâtissaient, ils mesuraient l'effort nécessaire et ambi-



tionnaient de construire pour l'éternité. Idéalement, la totalité de l'énergie nécessaire à une construction devrait pouvoir être remboursée, ou amortie, en l'espace d'une génération au maximum et, en tout état de cause, cette construction devrait durer beaucoup plus que le temps nécessaire à son remboursement énergétique. C'est la condition indispensable pour qu'elle puisse être considérée comme une création « soutenable » (*sustainable* disent les anglophones) et non comme une destruction de l'environnement.



L'ensemble de ces contraintes va nous autoriser à qualifier les matériaux, selon la façon dont ils permettent de répondre à tout ou partie du cahier des charges adapté à leur fonction, au site et à la région concernée. Si en Bretagne il pleut régulièrement un petit peu, en Provence, il pleut autant, mais en quelques jours par an. Si une toiture provençale doit résister à la canicule, un toit savoyard doit supporter le poids de la neige. Et si une fenêtre du bord de mer doit résister à la tempête, une fenêtre à Paris doit d'abord protéger du bruit.

On comprend assez facilement qu'appliquer les mêmes règles constructives partout en France est totalement inadapté. Nul besoin de chiffres pour cela, juste d'un peu de bon sens. Pourtant, il n'existe à ce jour nulle norme, nul règlement de construction, ou même label dit « de qualité énergétique » ou « environnementale » qui s'adapte à la

Les différentes formes de propagation thermique de la matière

- Le **rayonnement** est un phénomène que l'on connaît sous différents aspects. La lumière, les infrarouges et les ultraviolets, les rayons X, les ondes radio... sont autant de phénomènes qui ne sont qu'une variation de fréquence de la même chose : une onde électromagnétique.
- La **conduction** correspond à l'excitation des molécules de matière entre elles.
- La **convection** est l'application du principe d'Archimède : un gaz (ou un liquide) chauffé se dilate, devient plus léger par unité de volume et tend à monter, tandis que le gaz ou liquide environnant, plus froid, va descendre pour remplacer celui qui monte. Il s'ensuit généralement un brassage vertical du fluide.

région de la construction autrement qu'« à la marge ». C'est tout juste si ceux-ci évoquent la température météorologique en moyenne annuelle, quand ils ne sont pas importés aveuglément d'autres régions climatiques, d'autres pays. Face à la liste des contraintes que nous venons de mentionner, c'est tout à fait insuffisant.

CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX

Avant de parler des matériaux eux-mêmes, nous allons rappeler leurs caractéristiques, au regard de notre cahier des charges.

La première d'entre elles qui nous intéresse est leur comportement par rapport à la chaleur, puisque c'est une de nos premières contraintes : assurer une ambiance chaude en hiver et nous protéger du chaud en été.

La chaleur se propage de plusieurs façons. Imaginons une casserole d'eau en train de bouillir. Si nous approchons la main, nous ressentons la chaleur avant même de la toucher : cela correspond à un transfert d'énergie par rayonnement. Si nous trempons le doigt dans l'eau, nous allons nous brûler : cela correspond à un transfert par conduction. Enfin, si nous regardons l'eau de près, nous constatons des turbulences, liées à l'eau chaude qui remonte vers la surface, et même de la vapeur d'eau qui s'échappe : cela correspond à un transfert d'énergie par

convection. Seuls les fluides (gaz, liquide) permettent la convection par déplacement de la matière.

La conduction a ceci de particulier que la chaleur ne se déplace pas de bas en haut comme avec la convection, ni en ligne droite comme avec le rayonnement, mais de l'endroit le plus chaud vers l'endroit le plus froid, à une vitesse qui dépend du matériau traversé. Cette façon de se déplacer est normalement considérée comme un défaut majeur, car la chaleur fuit en hiver à travers les murs ; cela peut pourtant devenir un avantage si on sait tirer parti de cette propriété.



Pose d'une isolation en liège. Le parement doit rester respirant, laissant la vapeur d'eau circuler librement.

Il existe un quatrième mode de propagation de la chaleur, souvent oublié, qui correspond au déplacement de matière fluide. Nous en reparlerons plus tard, puisqu'il concerne en particulier l'eau et la vapeur, sans oublier l'air, *via* le vent.

Maintenant, attrapons la casserole par son manche. Si ce dernier est en fer, il y a un gros risque que nous nous brûlions. Par contre, s'il est en bois, le risque est faible. Surprenant ? Nous avons déjà évoqué cette propriété liée à la diffusivité et à l'effusivité de la matière.

Imaginons un feu de bois et positionnons, par-dessus les braises, pendant un bon moment, un tisonnier en fer, un morceau de bois et une brique. Si nous éloignons au bout du compte ces trois objets du foyer, nous allons pouvoir constater que le tisonnier refroidit vite, le bois moyennement vite, et que la brique, elle, va rester brûlante très longtemps. Le fer, avec lequel on se brûle si facilement, est celui qui refroidit le plus vite. Nous avons mis en évidence une autre caractéristique des matériaux : certains sont capables d'accumuler une très grande quantité d'énergie (comme la brique) alors que d'autres en sont incapables (le fer). C'est ce qu'on appelle l'inertie thermique, qui correspond à la capacité des matériaux à stocker l'énergie.

Par ailleurs, il n'est peut-être pas besoin de démonstration pour rappeler que le verre est plus cassant que le fer, qui lui-même est plus souple que le ciment. La solidité et l'élasticité d'un matériau sont deux autres de ses caractéristiques.

Enfin, une fenêtre en verre est plus transparente qu'un panneau de plâtre, qui lui-même est plus éblouissant qu'une poutre en bois brut. Le pouvoir de réflexion de la lumière d'un matériau traduit son incapacité à absorber la lumière et donc à la convertir en énergie thermique, en chaleur. On notera à ce sujet qu'un revêtement comme une simple peinture ou un léger enduit peut modifier radicalement le comportement d'un matériau sur ce point.

Les matériaux possèdent bien d'autres caractéristiques, mais nous retiendrons les deux principales familles qui nous intéressent pour l'instant : celle qui réunit des caractéristiques comportementales vis-à-vis de la chaleur (rayonnement, conduction et convection) et celle qui définit la matière elle-même (inertie thermique, solidité, élasticité, pouvoir de réflexion).

En fonction des objectifs poursuivis, certains matériaux seront plus aptes à les satisfaire que d'autres. Le choix d'un matériau n'est donc pas une affaire de goût, mais d'abord d'adaptation de ce matériau à la mission qui lui est confiée. Pourtant, combien d'architectes ou de maîtres d'ouvrages choisissent les matériaux utilisés dans une construction sur de purs critères esthétiques, ou par effet de mode !

INADÉQUATION DES MATERIAUX NATURELS ?

Après la crise pétrolière de 1973, pour apporter une réponse au besoin d'isoler thermiquement les bâtiments, les industriels ont développé des produits isolants (à base de pétrole, bien sûr) qui empêchent la chaleur produite de s'échapper. Les travaux de recherche sur des matériaux de plus en plus sophistiqués¹⁸ se sont focalisés sur les seules performances thermiques et ont abouti à des isolants à base de matières plastiques alvéolaires et autres produits synthétiques de revêtement, ou à base de fibre minérale ou de verre fondu à très haute température, qui ont entraîné une totale étanchéité des parois des bâtiments. L'argument maître était la stabilité des composants et leur stérilité totale, par opposition à d'autres matériaux, d'origine naturelle, accusés de tous les vices.

Pour répondre très rapidement à un certain nombre de certitudes bien ancrées dans l'imaginaire sur les matériaux naturels, nous allons citer quelques exemples simples.

Le liège

Ah ! le liège ! Un matériau inutile dans le bâtiment, putrescible, qui ne résiste pas au temps, qui moisit en présence d'humidité, qui n'assure pas d'étanchéité, qui se détériore rapidement. Une horreur, quoi ! Chacun le sait.

C'est sans doute pour cela que depuis plus de quatre millénaires on l'utilise pour fermer les amphores d'huile et de vin, que l'on retrouve encore aujourd'hui au fond de la mer, étanches, ou, plus récemment, pour étancher les tonneaux et les bouteilles. Cela dit, il faut reconnaître que le mode de production actuel du liège, en monoculture intensive, n'en fait pas toujours le produit environnemental idéal, comme on le verra plus loin en traitant l'énergie grise.

Le bois

Le bois est un matériau fragile, paraît-il, peu résistant au temps, qui craint l'humidité et pourrit, qui offre une mauvaise protection contre la pluie et se fait manger par les insectes si on ne le traite pas avec quantité de produits chimiques destinés à le stériliser. C'est un matériau qui brûle et qui est donc dangereux.

Comment expliquer, alors, que des navires en bois aient pu passer le cap Horn sans se disloquer et qu'on puisse encore admirer en Alsace ces maisons à colombages construites il y a cinq cents ans, ou dans la Forêt-Noire ces châteaux encore plus vieux, mariant le bois et la pierre ? On oublie aussi que les ponts romains, bâtis sur fondations en bois noyées au fond des rivières, comme la plupart des vieux ponts de Paris d'ailleurs, sont encore debout, quand les ouvrages modernes se font emporter par la première crue. Si le bois commence à être à nouveau admis pour la construction individuelle, ou comme parement, construire un bâtiment de logements ou de bureaux de 5 ou 10 étages sur une ossature en bois fait encore peur à la plupart des maîtres d'ouvrage.



Une maison en bois peut affirmer un caractère indéniable. Mais elle apporte surtout à ses propriétaires une garantie de longévité et de résistance aux agressions du temps, ainsi qu'une facilité évidente d'entretien à un coût très réduit. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

18. Rappelons qu'un produit industriel a également pour objectif de pouvoir être « protégé » intellectuellement, donc de ne pas pouvoir être fabriqué par les concurrents. Il faut donc qu'il soit le plus artificiel possible et le plus sophistiqué possible aussi, pour limiter le risque de « copie ».



Chanvre et autres fibres végétales

Les utilisations des fibres végétales dans le secteur industriel constituent un axe important de travail pour l'Ademe, qui apporte son soutien à la recherche et au développement dans ce domaine. L'Ordre des architectes vient également de publier un DVD-Rom, *Architecture responsable et développement durable*, qui s'appuie sur l'exemple de trois constructions neuves et d'une rénovation. Pour cette dernière, le choix de l'Ordre des architectes s'est porté sur la rénovation de la maison diocésaine Odette-Prévost à Châlons-en-Champagne, connue pour l'utilisation d'enduits en chanvre et pour ses performances énergétiques, qui ont déjà valu le prix Observ'ER 2006 à l'atelier d'architecture Méandre.

Voir au sujet du chanvre le site de l'association CenC : www.construction-chanvre.asso.fr/index.php

Saviez-vous que les arsenaux de Colbert faisaient sécher et durcir le chêne des navires de guerre en le noyant dans la mer sous des blocs de roche ? Mais le chêne pourrit, dit-on, en présence d'un peu d'humidité.

Le chanvre

Isoler avec du chanvre serait une pure hérésie, c'est un produit sans aucune qualité et qui se détériore très rapidement, c'est bien connu.

C'était pourtant dès le Moyen Âge le produit de base de l'industrie textile, en particulier pour la fabrication des cordages et des voiles de navires en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles et de sa résistance à l'humidité. Les constructeurs automobiles commencent d'ailleurs à l'incorporer dans leurs matériaux composites, parce qu'il allie une légèreté et une robustesse bien supérieures à celles des fibres minérales.

Combattre les idées reçues

La question n'est pas de savoir si le bois ou le chanvre pourrit, mais de savoir pourquoi il pourrit dans une construction moderne, alors qu'un tonneau, construit en bois brut non traité, est étanche, ne pourrit pas et n'attire pas la vermine, de même qu'une voile en chanvre résiste à (presque) toutes les tempêtes et, en tout cas, bien mieux que la plupart des fibres synthétiques. Le bois est un matériau rapide à mettre en œuvre, facile à tra-

vailleur et à modeler. Le bois, à poids égal, est nettement plus résistant que l'acier, sensiblement plus durable que le béton, c'est un bon isolant, qui ne rouille pas et ne se délite pas en poussière, il laisse passer la vapeur d'eau et il est nettement plus léger et pourtant plus résistant au feu que l'acier et le béton. Ce qui brûle dans un immeuble en bois, ce n'est pas le bâtiment lui-même, c'est ce qui est à l'intérieur, comme dans n'importe quel bâtiment. Le bois est le matériau le plus résistant au feu. Il suffit pour s'en convaincre de faire un grand feu dehors et d'y placer en travers, côté à côté, une poutre en bois, une autre en béton armé et une troisième en acier, toutes de même résistance constructive, puis de regarder celle qui résistera le plus longtemps au feu, sans se fendre ni se tordre.

Observez les blockhaus allemands sur les côtes normandes : soixante ans après leur construction, leurs murs de 1 mètre d'épaisseur sont en état de dislocation avancée et ne tiennent que par les quantités astronomiques de fer qui y sont noyées. Admirez les HLM des années 1960 : ce sont souvent des épaves au niveau de leur structure béton, se désagrégant de toute part si elles ne sont pas recouvertes de force quantité de produits de protection, au point que la dynamite est parfois la seule voie de rénovation envisageable pour nombre d'entre eux. Admirez un entrepôt en acier d'une cinquantaine d'années : sauf à utiliser chaque année des tonnes de produits chimiques et peintures destinés à isoler le métal de l'environnement, il serait probablement à terre. Le même, en bois, restera debout sans problème plusieurs siècles. Et nous éviterons de rappeler les effets des incendies dans un collège de type Pailleron ou dans les Twin Towers de New York. *A contrario*, durant l'incendie gigantesque de Chicago, il n'y eut que très peu de morts dans les bâtiments.

Nous avons parlé du bois, mais le même type de démonstration pourrait être tenu et encore mieux, pour la pierre, la chaux, le chanvre, la terre crue, la paille...

Si tout cela vous étonne, c'est que les fabricants de béton, de parpaing, de polystyrène et de laine de verre ont largement relayé ces idées reçues depuis cinquante ans, nous faisant perdre la mémoire de la connaissance que nos ancêtres avaient des matériaux produits localement, afin de nous inculquer les qualités extraordinaires des matériaux « modernes ». Et aujourd'hui, cela reprend de plus belle avec de savantes démonstrations sur l'aspect écologique et environnemental du bloc de béton (le parpaing) et de la laine de verre faite à partir de simple sable...

Robuste et résistante au feu : la paille

Un brin de paille semble brûler facilement ? Oui, mais essayez de faire brûler une botte de paille... Nous vous conseillons de vous armer de patience. Même avec un chalumeau, c'est une entreprise ardue, la paille refuse de brûler à cœur et s'éteint toute seule, s'étouffant sous ses propres cendres.

Montez maintenant sur une botte de paille, ou frappez-la fort, avec une masse si vous ne voulez pas

vous faire mal, et posez-vous seulement ensuite la question de sa robustesse.

On ne le sait pas assez : la paille est plus résistante que le bois à la traction et fournit un liant des plus résistants pour les mortiers.

Quant au syndrome industriel des Trois Petits Cochons, qui veulent nous faire croire qu'une construction en brique est plus robuste que son équivalent en paille, mieux vaut éviter un tremblement de terre pour prouver le contraire.



La construction en paille peut s'appliquer à tous les types de bâtiments, y compris les plus grands. Ici, chantier du Jardin de Cocagne à La Tour de Salvagny (69).



Le béton se détériore au fil du temps, d'autant plus vite s'il a été mal mis en œuvre. À titre d'exemple, les différences de dilatation entre le fer et le béton font parfois éclater ce dernier.



Études et tests

Afin d'encourager la diffusion de l'utilisation des matériaux naturels, le CEBTP a réalisé des études sur ces produits.

L'une d'elles a par exemple mesuré la résistance thermique de la paille. Bien que celle-ci ait d'abord été retaillée dans l'épaisseur pour convenir aux dimensions de la machine de test, le résultat donne un λ de 0,095 W/m.K, plus du double de ce qui est admis au niveau international ($\lambda = 0,052$ dans le sens transversal d'après l'agrément de l'Association

19. Consulter à ce sujet l'ouvrage de André de Bouter et Bruce King, *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*, La Maison en Paille, Eyrrolles, 2009, page 219 et suivantes.

professionnelle de la construction en bottes de paille Allemagne)... La mesure a pourtant été faite avec une ossature bois interne, laissant un vide d'air sur la totalité de l'épaisseur de la paroi test entre chaque rang de bottes. En plus de ces ponts thermiques internes ajoutés, on constate aussi sur les photos que les bottes de paille ne sont ni croisées ni même serrées contre les montants verticaux, ce qui augmente encore les ponts thermiques¹⁹. (Source : rapport « Utilisation de la paille en parois de maisons individuelles à ossature bois », CEBTP, juillet 2004.)

ÉCO-MATÉRIAUX

Pour être apte à recevoir le qualificatif d'éco-matériaux, un produit doit pouvoir satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- environnementale : une bonne qualité isolante, une faible énergie grise, un bilan carbone favorable, être issu d'une filière renouvelable et soutenable, être recyclable donc réutilisable ;
- socialement équitable : respectueux de son territoire, produit localement et mis en œuvre par un savoir-faire de proximité, donc enrichissant l'économie locale, incitant au travail bien fait, être financièrement accessible à tous ;
- sain : respecter la santé de l'artisan et de l'occupant, ne pas émettre de COV, être insensible à la vapeur d'eau, ne pas présenter de risque de dégradation *in situ*.

CLASSIFICATION DES CONSTRUCTIONS BOIS

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie a été votée en décembre 1996 et l'un de ses articles (21-V) stipule : « pour répondre aux objectifs de la présente loi, un décret en Conseil d'État fixe les conditions dans lesquel-



Principe constructif d'un mur en bois et paille avec enduit chaux ; échantillon démonstratif de la structure interne d'un mur bois-paille sur un chantier bioclimatique. (Architecte Stéphane Peignier.)

les certaines constructions nouvelles devront comporter une quantité minimale de matériaux en bois ». Il reste malheureusement du chemin de la coupe aux lèvres, ou plutôt du principe à sa mise en œuvre efficace.

Un classement des ouvrages a été établi à partir du taux de pénétration actuel du bois dans douze typologies d'ouvrages correspondant à différents marchés et permettant de mesurer la progression du bois dans chacune d'entre elles. En effet, l'objectif est de faire progresser la part de bois dans chaque typologie mais en tenant compte de ce taux actuel de pénétration du marché. Par exemple, aujourd'hui le bois est beaucoup plus présent dans la maison individuelle que dans les hôpitaux.

Trois classes ont été définies en fonction du taux de bois mis en œuvre.

- Classe 1 : le volume de bois est compris entre la moyenne et + 25 % par rapport à cette moyenne.
- Classe 2 : le volume de bois est situé entre + 50 % et + 100 % par rapport à la moyenne.
- Classe 3 : le volume de bois est supérieur à 100 % par rapport à la moyenne.

Afin que cette procédure soit simple à gérer, une méthode de calcul forfaitaire par ratio a été établie, à partir d'une étude sur la consommation moyenne de bois par élément d'ouvrage.

Dans le tableau ci-dessus, les ratios « bois » expriment, en dm^3/m^2 de SHON, les quantités minimales requises pour appartenir à une classe donnée.

Dans le tableau ci-contre et page suivante, les quantités forfaitaires par élément d'ouvrage « bois » évaluent le volume de bois contenu dans les principaux éléments d'ouvrage de construction mettant en œuvre ce matériau. Ils sont exprimés en $\text{dm}^3/\text{unité}$ dans une nomenclature de 23 ouvrages.

Il suffit d'additionner les volumes totaux de bois mis en œuvre, de diviser le résultat par la surface (SHON) puis de ramener ce dernier résultat au tableau des catégories pour obtenir la classe du bâtiment.

On pourra regretter que dans ce tableau n'apparaissent pas à ce jour les isolants végétaux.

Il reste encore aujourd'hui à la loi à imposer une classification « bois » minimale pour toute construction neuve...

Réf.	Catégorie de construction	Classe	Classe	Classe
		1	2	3
1	Logements individuels	60	75	100
2	Logements collectifs	35	45	70
3	Bureaux	20	25	40
4	Commerce	35	45	70
5	Garages, parkings, transport	10	15	20
6	Bâtiments à caractère hôtelier	35	45	70
7	Bâtiments résidentiels pour collectivités	25	30	50
8	Bâtiments pour enseignement et recherche	30	40	60
9	Bâtiments sanitaires et sociaux	25	30	50
10	Bâtiments sportifs, de loisirs, culturels et religieux	25	30	50
11	Bâtiments agricoles	15	20	30
12	Bâtiments industriels et de stockage	15	20	30

Réf.	Type d'ouvrage	Unité	Valeur
1	Plancher bois porteur	m^2	50
2	Pan d'ossature bois porteur	m^2	30
3	Ossature poteaux-poutres	ml	25
4	Charpente traditionnelle et lamellé-collé	m^2	40
5	Charpente industrielle	m^2	30
6	Couverture à support discontinu	m^2	5
7	Couverture à support continu	m^2	20
8	Sous-face de débord	m^2	15
9	Bardage en lames de bois	m^2	25
10	Bardage en panneaux dérivés du bois	m^2	15
11	Portes extérieures pleines	m^2	35
12	Fenêtres, portes-fenêtres et châssis divers	m^2	25
13	Occultations en bois	m^2	30
14	Ossature bois non porteuse	m^2	15

Réf.	Type d'ouvrage	Unité	Valeur
15	Lambris	m ²	15
16	Huisseries en bois	U	20
17	Portes intérieures en bois	U	25
18	Escalier en bois	ml	60
19	Parquet massif rapporté	m ²	30
20	Autres parquets rapportés	m ²	15
21	Plinthes en bois	m ²	2
22	Garde-corps en bois	ml	30
23	Divers	m ²	2



L'accident de Seveso

En 1976, près de Seveso en Lombardie (Italie), un accident industriel dans une usine chimique libère dans l'atmosphère - par la combustion de produits d'origine pétrolière - entre 1 et 5 kg de dioxine (la quantité exacte n'a jamais pu être établie avec précision). Au bout de quelques jours les feuilles d'arbres jaunissent et les animaux domestiques commencent à mourir en grande quantité (environ 3 300 décès recensés). Il faudra après cet accident abattre 70 000 têtes de bétail. Quand à l'incidence de l'accident sur les humains, l'enquête conclura à l'absence d'effet tangible !

Cet accident a toutefois donné son nom en Europe à une réglementation s'appliquant aux sites chimiques industriels les plus dangereux pour la santé humaine, dont environ 1 250 ainsi classifiés « Seveso » en France.

En raison de la stabilité de la dioxine, sa demi-vie (temps au bout duquel il n'en reste que la moitié) dans l'organisme est estimée à environ sept ans. L'homme n'a pas de moyen pour éliminer la dioxine, mais la femme peut l'éliminer par transfert dans le placenta et le lait maternel.

Les personnes les plus à risque sont donc le fœtus et le jeune enfant : atteinte possible du cerveau, de la thyroïde, de l'immunité et des dents de lait.

(Source : Inserm.)

MATÉRIAUX ET SANTÉ

Nombre de matériaux modernes présentent un aspect très original : mis en œuvre dans un bâtiment, ils sont considérés comme ce qu'il y a de mieux, mais si vous prenez les mêmes produits et que vous les posez en vrac dans un champ, ils deviennent soudainement un danger majeur pour la santé et l'environnement. Ils passent souvent pour hautement toxiques et polluants, imposant une mise en décharge contrôlée ou plus souvent encore un retraitement très complexe afin d'essayer de neutraliser plus ou moins leur danger majeur pour l'environnement et l'être humain.

La peinture

Prenez, par exemple, un pot de peinture « moderne » : renversez ce pot de peinture sur le trottoir, devant une préfecture, ou dans une rivière, on vous verbalisera pour atteinte à l'environnement et mise en danger d'autrui. D'ailleurs, il est souvent indiqué sur l'emballage : « *danger de mort ; ne pas inhaler ; ne pas ingérer...* ». Mais si la même peinture est appliquée sur le mur de la chambre de vos enfants... aucun problème, vous pouvez en mettre deux couches !

La protection de la charpente

Un autre exemple : on vous incite à protéger régulièrement les poutres de la charpente de votre maison avec des produits de haute technologie, tout en précisant aux ouvriers qui les posent qu'il faut porter une combinaison spéciale et un masque à gaz pour les mettre en œuvre. Mais lorsque votre charpente est bien imbibée, personne ne vous indique qu'il faut vous munir d'une combinaison spéciale pour continuer à vivre dans votre maison. Une fois répandu chez vous, ce produit semble devenu inoffensif. En revanche, si vous apportez en décharge la même poutre en bois, elle sera considérée comme hautement toxique, et il est d'ailleurs interdit de déposer de telles poutres en pleine nature, encore moins de les brûler, sous peine d'émettre des dioxines (voir l'encadré ci-contre).

Le polystyrène

Un dernier exemple : la fabrication du polystyrène relève d'usines classées « Seveso ». Mais dans une construction, c'est un produit totalement inoffensif, inerte, présentant des propriétés extraordinaires, destinées à maîtriser l'énergie et à protéger l'environnement. Par contre, si vous démolissez un bâtiment, ce même polystyrène redevient

instantanément un produit toxique, à manipuler avec précaution, qu'il est interdit de brûler ou d'entreposer sans un contrôle strict des autorités sanitaires. Et n'espérez pas pouvoir le recycler : dans l'état où il se retrouve au bout de vingt ans, il y a peu de chances d'en faire quoi que ce soit, à part polluer les décharges.

Si l'isolant avait été du chanvre ou de la paille, il aurait pu finir en compost ou pailler sans risque des plantations de légumes, il aurait pu être brûlé, sans précaution particulière, pour chauffer un bâtiment, ou tout simplement recyclé pour une nouvelle construction, tout cela sans aucun risque ni pour l'environnement ni pour la santé humaine.

Catastrophes sanitaires

Chacun a en mémoire le scandale des peintures au plomb, suivi de la catastrophe de l'amiante (une laine de roche isolante, obligatoire il y a encore peu dans nombre d'applications), avant d'en arriver à la prolifération de la légionellose dans les systèmes de climatisation. Nous n'en sommes qu'au début et nous n'avons pas fini d'aller de catastrophes sanitaires en intoxications épidémiques. À chaque fois, la réponse apportée est d'ajouter une couche supplémentaire de technologie, plutôt que de se poser la question de fond : la voie empruntée est-elle la bonne ? Il n'y a pas besoin de plomb pour protéger le bois de l'humidité, il n'y a pas besoin d'amiante pour protéger le bois ou la pierre du feu, et il n'y a pas besoin de climatiseurs dans un bâtiment bioclimatique.

ÉNERGIE FINALE – ÉNERGIE PRIMAIRE

Il nous reste un dernier aspect à mentionner sur les caractéristiques des matériaux, que l'on appelle l'énergie grise. Mais avant d'évoquer celle-ci, il est nécessaire de dire un mot sur ce qu'on entend par « énergie ». On parle souvent d'énergie finale et d'énergie primaire, ainsi que, plus rarement, d'énergie fatale.

Énergie finale

L'énergie finale est celle que l'on consomme directement. C'est par exemple l'énergie contenue dans le litre de fioul qui brûle dans une chaudière, ou celle mesurée par un compteur électrique.

Mais pour fournir ce litre de fioul (ou ce kilowattheure d'uranium), il a fallu l'extraire des profondeurs de la terre,

le pomper, le filtrer, le transporter, le raffiner, le transporter de nouveau.

Qui oserait prétendre que 1 litre de pétrole au fond de son puits donne 1 litre de fioul dans une chaudière ? Aujourd'hui, pour produire 4 barils de pétrole utilisables, il faut en extraire 5. C'est ce qu'on appelle la rentabilité énergétique d'une ressource en énergie : aujourd'hui, on consomme 1 pour produire 4. Quand les riches puits du Moyen-Orient commenceront à péricliter, on valorisera les schistes bitumineux d'Alaska. Leur rentabilité énergétique, pour les meilleurs d'entre eux, est de 2. Il faut donc brûler 1 baril de pétrole pour en extraire 2. Quand la rentabilité tombera à 1, on arrêtera d'en produire pour faire de l'énergie, même s'il en reste des quantités astronomiques, parce qu'il faudra brûler 1 baril de pétrole pour en extraire 1.

Le raisonnement pour le fioul vaut autant pour le gaz, qu'il faut purifier, refroidir, transporter, ou pour l'uranium, qu'il faut extraire, enrichir, transporter.

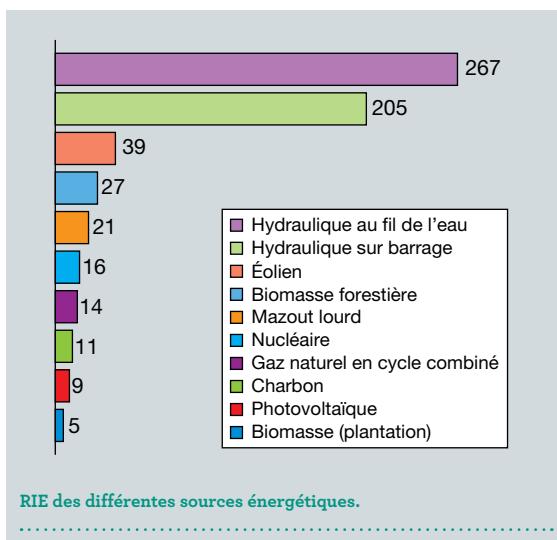
Énergie primaire

L'énergie primaire est justement liée, en théorie, à cette rentabilité énergétique. Elle fait appel à un coefficient de conversion qui permet de passer de l'énergie finale à l'énergie réellement nécessaire pour fournir cette énergie. Le problème, c'est qu'actuellement, en France, elle n'intègre pas les coûts amont de la production d'énergie, qui sont relatifs à l'extraction et à la transformation de la matière première. On considère toujours que 1 litre de fioul livré dans une chaudière est équivalent à 1 litre de pétrole enfoui à 8 000 mètres de profondeur en Arabie Saoudite. Et on considère que 1 kg d'uranium au fond de sa mine en Afrique vaut 1 kg d'uranium dans le réacteur nucléaire. Comme si son extraction, son transport, sa purification et son enrichissement s'étaient produits sans débourser une goutte d'énergie.

Coûts énergétiques

À cet aspect, pour être exhaustif, il faut en ajouter un autre, d'importance, qui est le coût énergétique de la construction des équipements de production. Une approche intéressante est celle du retour sur investissement énergétique (RIE) des installations destinées à produire l'énergie utilisable. Pour fabriquer du fioul, il faut construire des raffineries, pour fabriquer de l'électricité, il faut construire

des centrales nucléaires ou autres... Par exemple, pour une centrale de production d'électricité, le rendement de l'investissement énergétique est le rapport entre la quantité totale d'électricité produite pendant sa vie normale et la quantité d'énergie requise pour la construire, l'entretenir et l'alimenter en combustible. Selon une étude réalisée par Hydro-Québec, le RIE des différentes sources énergétiques est actuellement le suivant :



On ressent évidemment l'envie d'Hydro-Québec de valoriser sa propre fourniture d'énergie, mais les données ont été compilées dans le cadre d'un programme de l'Agence internationale de l'énergie et ne sont donc pas trop suspectes de parti pris. L'oubli des coûts énergétiques réels des moyens de production de l'énergie fausse l'appréciation que l'on peut en avoir. Si on incorpore à ce RIE les coûts énergétiques de l'extraction des matières premières (qui n'existent pas pour les énergies renouvelables) et le coût environnemental des pollutions et déchets générés, on commence à avoir une vision plus réaliste de la situation.

C'est sur cette base de raisonnement très biaisé et incomplet que le coefficient d'énergie primaire du fioul vaut 1 en France et que le coefficient d'énergie primaire de l'électricité vaut officiellement, en France uniquement, 2,58, tandis que le coefficient applicable à l'énergie photovoltaïque vaut 0. Dans nombre de

pays d'Europe, le coefficient pour l'électricité est plutôt considéré comme proche de 4. Dans une centrale électrique, qu'elle soit nucléaire ou au charbon, il faut, après avoir extrait et produit la matière première, consommer environ 3 unités d'énergie source pour produire 1 unité d'énergie électrique, les 2 autres unités s'échappant en pure perte sous forme de vapeur dans l'atmosphère. Puis cette électricité va parcourir des centaines, voire des milliers de kilomètres, passer à travers une bonne dizaine de transformateurs, et tout cela ne se fait pas sans perte. Rien qu'entre votre compteur électrique et la prise de courant, la perte d'énergie se situe entre 2 et 5 %. La perte de distribution totale est d'environ 30 % de ce qui sort de la centrale électrique. Quant au photovoltaïque, il faudra bien un jour ou l'autre jouer cartes sur table et faire un bilan ACV précis de la fabrication des modules, même s'il n'y a ensuite plus aucune émission durant toute leur durée de vie.

Le jour où nous comprendrons que l'énergie fossile que nous consommons, qu'il s'agisse de fioul, d'uranium ou de gaz, et cela indépendamment de leurs disponibilités très limitées, a coûté beaucoup plus à la planète pour sa production que ce que nous considérons aujourd'hui à travers les compteurs d'énergie, nous découvrirons que les énergies renouvelables sont réellement rentables.

CONTENU ÉNERGÉTIQUE DES COMBUSTIBLES

Les combustibles fossiles sont aujourd'hui les principales sources d'énergie utilisées par la civilisation humaine. Leur pouvoir énergétique est variable et dépend de leur constitution chimique, de leur masse volumique et, à l'exception de l'uranium qui utilise d'autres principes pas plus valeureux, de leur teneur en carbone oxydable permettant de produire du CO₂ avec émission de chaleur.

Une caractéristique importante de ces combustibles concerne leur pouvoir calorifique. On distingue deux valeurs du pouvoir calorifique, le PCI (pouvoir calorifique supérieur) et le PCS (pouvoir calorifique supérieur).

PCI et PCS

Le PCI est la quantité d'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible. Mais cette combustion produit de l'eau qui est évaporée et qui absorbe une partie de l'énergie fournie.



Le PCS contient la quantité d'énergie définie par le PCI, à laquelle on ajoute l'énergie latente contenue dans la vapeur d'eau produite. En condensant cette vapeur d'eau, on peut récupérer cette énergie latente.

Le rendement des systèmes de combustion est généralement calculé à partir du PCI, ce qui permet d'affirmer des rendements supérieurs à 100 % dans les chaudières à condensation. Ceci n'a aucun sens du point de vue scientifique. Quand un fournisseur vous vend de l'énergie fossile, la facture est toujours affichée en PCS, on vous vend la vapeur d'eau produite par la combustion au même prix que la chaleur que vous pourrez réellement consommer.

Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique ou chaleur de combustion (noté Δc_{Ho} , en anglais *heating value*) d'un matériau combustible est l'enthalpie de la réaction de combustion par unité de masse. C'est plus simplement la quantité d'énergie dégagée par la réaction de combustion, qui correspond à l'oxydation d'un constituant carboné, produisant du CO_2 et de la chaleur.

Caractéristiques thermiques des principaux combustibles

	Massé volumique	PCI massique (enthalpie)	PCI volumique		PCS	PCS PCI
	kg/m ³	kJ/kg	kWh/kg	kWh/l	kWh/Nm ³	kWh/Nm ³
Fioul domestique	840	42 810	11,89	9,99	9 989	10 738
Fioul lourd n° 1	940	41 500	11,53	10,84	10 836	11 432
Propane commercial (C_3H_8)	530	45 043	12,51		25,1	27,3
Butane (C_4H_{10})	580	45 700	12,69		34,4	37,2
Méthane (CH_4)	550	50 000	13,89		10,0	11,1

Source : www.industrie.gouv.fr - Ademe.

Confondre PCI et PCS pour le pétrole ou le gaz, c'est comme affirmer que le bois humide chauffe aussi bien que le bois sec. Chacun sait, sans avoir de connaissance en chimie thermique, que ce n'est pas le cas.

La puissance calorifique du bois dépend de sa qualité mais aussi de son humidité. Si celle-ci est oubliée pour le gaz et le pétrole, il est, par contre, obligatoire de la mentionner pour le bois...

Cela dépend, en fait, de la façon dont on utilise cette électricité. La consommation en dehors des périodes de forte demande permet de faire appel, à coup sûr, à la production nucléaire, faible en émission de CO_2 , de l'ordre de 40 g de CO_2 par kilowattheure d'énergie (avec l'augmentation des demandes en climatisation, cette valeur est vouée à évoluer dans le mauvais sens). Mais utiliser cette électricité pour produire du chauffage en hiver pose un autre problème.

Comme les centrales nucléaires offrent une capacité de 54 GW, pour une demande qui frôle aujourd'hui les 100 GW, il faut bien produire l'électricité manquante autrement, sauf à multiplier par 2 le nombre de centrales nucléaires en France. Chaque radiateur électrique supplémentaire installé aujourd'hui en France fait donc appel à de l'électricité produite en Allemagne ou en Pologne, à partir du charbon, à raison de 3 kWh de charbon brûlé pour produire 1 kWh d'électricité, dans le meilleur des cas, et plutôt 4 pour 1 actuellement, compte tenu

CONTENU EN CO_2 DES ÉNERGIES

La détermination du contenu en CO_2 des énergies est un vaste sujet à controverse. Il est en effet primordial de préciser de quoi l'on parle car, selon les interlocuteurs et selon leurs intérêts, l'approche sera sensiblement différente. La controverse est particulièrement sensible en France pour ce qui concerne l'électricité. On entend partout affirmer avec force que l'électricité nucléaire française ne produit pas de CO_2 . C'est vrai, et c'est faux également.

Caractéristiques thermiques des principaux types de bois

	Hygrométrie	PCI massique (enthalpie)	Masse volumique	PCI volumique
Essence de bois		kWh/t	tep/t	kg/m ³
Bois tendre (résineux)	0 %	5 000	0,43	450
	20 %	3 900	0,33	560
	50 %	2 200	0,19	900
Bois moyen	0 %	5 000	0,43	550
	20 %	3 900	0,33	690
	50 %	2 200	0,19	1 100
Bois dur (feuillus)	0 %	5 000	0,43	650
	20 %	3 900	0,33	810
	50 %	2 200	0,19	1 300
Plaquettes (bois déchiqueté)	25 %	3 500	0,30	250
Granulés (bois reconstitué)	10 %	4 600	0,39	660
				3 036

Source : www.industrie.gouv.fr - Ademe.

des pertes en ligne pour transporter cette énergie sur plusieurs milliers de kilomètres. Si bien qu'au bout du compte, le coût marginal en CO₂ de ces radiateurs électriques représente une émission qui est plus proche des 500 à 600 g/kWh que des 40 g annoncés.

Les valeurs relevées dans le tableau ci-contre sont des estimations émises par l'Ademe et RTE, filiale d'EDF responsable du transport de l'électricité en France : « ... le contenu marginal en CO₂ par classes d'usages ressort à :

- pour les usages en base : 450 à 550 g ;
- pour le chauffage électrique : de l'ordre de 500 à 600 g ;
- pour les usages intermittents et l'éclairage : 600 à 700 g ».

(Extraits de : « Le contenu en CO₂ du kilowattheure électrique : avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usage sur la base de l'historique », document RTE du 08/10/2007.)

Le chauffage électrique polluerait deux fois plus qu'une chaudière à charbon... Le même document de RTE explique que l'éolien permettra à terme de réduire fortement le coût marginal en CO₂ de l'électricité : « D'autre part,

Coefficient d'énergie primaire des sources d'énergie

Source d'énergie	Coefficient d'énergie primaire	Émission CO ₂ (en kg eq CO ₂ /kWh)
Solaire	0	0,000
Bois	0,6	0,013
Électricité été	2,58	0,040
Électricité éclairage	2,58	0,100
Électricité chauffage en moyenne	2,58	0,180
Gaz naturel	1	0,206
Fioul domestique	1	0,300
Autres	1	0,320
Charbon	1	0,384
Électricité chauffage en coût marginal	2,58	0,550

Source : RTE 08/10/2007

la poursuite du développement des énergies renouvelables (en particulier l'éolien) à un rythme plus élevé que la croissance de la demande sera de nature à augmenter la durée de marginalité sans CO₂. L'impact des politiques

de maîtrise de la demande d'électricité pourra amplifier ce phénomène. Ces deux éléments sont de nature à diminuer le contenu marginal en CO_2 de l'électricité, qui pourrait être de l'ordre de 400 g/kWh à l'horizon 2020 pour un usage en base. »

Cela restera supérieur aux émissions d'une chaudière à charbon, mais on progressera en France vers une électricité moins polluante grâce à la maîtrise de l'énergie et aux éoliennes, telle est la conclusion de RTE.

ÉNERGIE FATALE

Un dernier mot sur l'énergie dans les bâtiments, avant de passer à l'énergie grise. Quand on consomme une unité d'énergie, cela ne veut pas dire pour autant que l'on en utilise la totalité. Une partie de la chaleur d'une chaudière, par exemple, s'échappe à travers la cheminée. L'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire part en grande partie dans les égouts. En bref, une partie de l'énergie est gaspillée. Cette part non valorisée, alors qu'elle pourrait être utilisée, s'appelle l'énergie fatale.

Pour bien mesurer à quel point cette notion est importante et nécessiterait d'être mieux prise en compte, nous allons examiner d'un peu plus près, à titre d'exemple, le cas d'une piscine publique.

Une piscine présente trois sources principales de consommation d'énergie :

- le maintien en température des locaux ;
- le maintien en température de l'eau des bassins ;
- la production d'eau chaude pour les douches (ECS).

Le graphique ci-contre représente un profil typique de consommation pour une piscine.

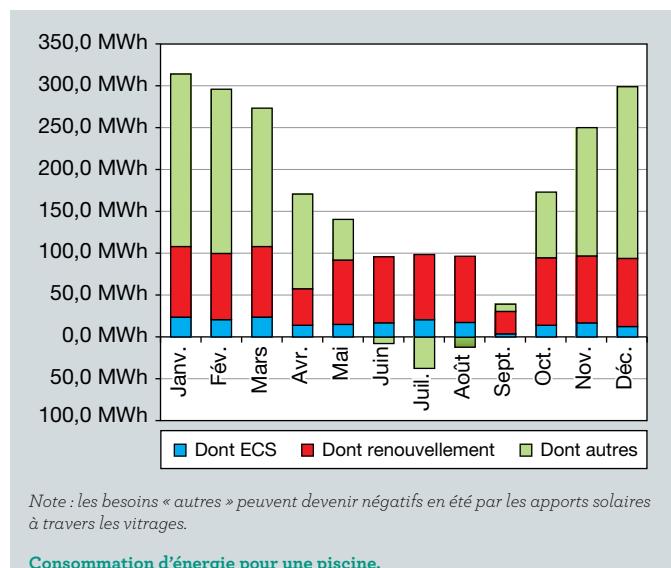
Quand un responsable ou un élus souhaite envisager des énergies renouvelables pour sa piscine, il pense immédiatement à l'ECS. Comme on le voit en partie basse des barres, ce poste de dépense n'est pourtant pas prioritaire.

Nous allons nous intéresser au deuxième poste, au centre des barres, relatif à l'eau de renouvellement des bassins. Pour des raisons sanitaires, une piscine publique a l'obligation de procéder chaque jour au renouvellement d'environ 5 % du volume des bassins (en fonction plus précisément du nombre de baigneurs accueillis). Ce

renouvellement implique de rejeter à l'égout l'eau qui est remplacée. Comme on le voit sur le graphique, ce besoin est relativement constant sur l'année, il ne dépend pas du climat, mais de la fréquentation du public.

Comme on rejette de l'eau à 30 °C et qu'il faut la remplacer par de l'eau qui arrive entre 8 et 12 °C, il y a un besoin constant d'apport en énergie, qui peut représenter entre un tiers et la moitié de la consommation totale d'énergie de la piscine, parfois plus en région chaude comme dans le midi de la France, les besoins « autres » (chauffage des locaux en particulier) étant proportionnellement beaucoup plus faibles. Cette énergie jetée sans être valorisée s'appelle de l'énergie fatale.

On peut bien sûr se demander s'il ne serait pas possible de réchauffer l'eau entrante avec l'eau sortante, par un système à double flux hydraulique, comme pour les VMC. C'est en effet très simple à faire, beaucoup plus facile qu'avec une VMC. Mais environ 0,00001 % des piscines sont équipées d'un tel système. Pourquoi ? On peut invoquer la méconnaissance du sujet de l'énergie, le conformisme, le refus de remettre en cause les habitudes, le cloisonnement entre ceux qui construisent et ceux qui exploitent, l'indifférence des constructeurs de piscine... Pourtant, une telle valorisation d'énergie fatale marche suffisamment bien pour que la quasi-totalité des industries utilisent ce type de procédé.



Un récupérateur d'énergie fatale sur les rejets d'une piscine coûte quelques milliers d'euros. Il peut faire économiser à une collectivité publique 30 % des coûts de chauffage de cette piscine et se rentabilise en quelques mois.

Pour rester dans l'exemple des piscines, on installe volontiers des capteurs solaires pour produire de l'eau chaude sanitaire à 60 °C, qui s'amortissent très difficilement en vingt à trente ans, mais on envisage plus rarement de produire de l'eau chaude solaire à 30 °C pour les bassins, ce qui serait beaucoup plus performant. Des capteurs couplés à un récupérateur sur les eaux de rejets peuvent se rentabiliser en moins de cinq ans.

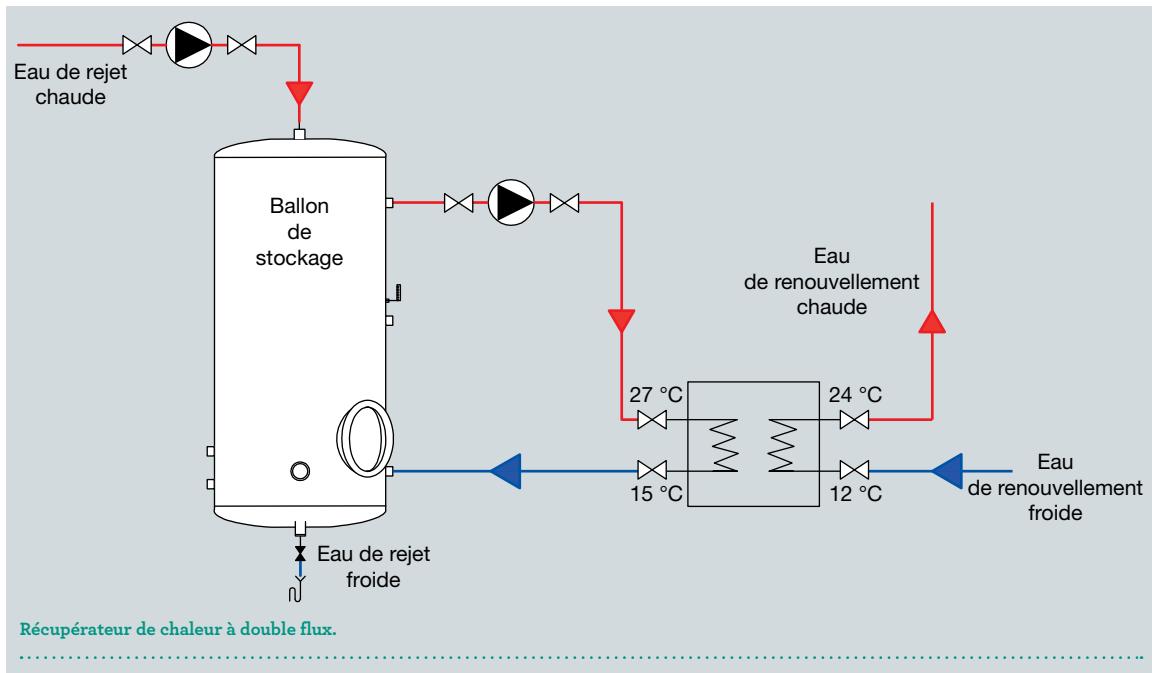
Il existe dans les bâtiments des quantités impressionnantes d'exemples de ce type, où l'énergie fatale n'est pas valorisée. Nous citerons juste pour mémoire ces bien trop nombreux immeubles de bureaux où, en mi-saison, on fait fonctionner le chauffage sur la façade nord pendant qu'on met en route la climatisation côté sud, alors qu'un simple échange d'énergie par flux d'air entre les deux

façades suffirait souvent à assurer les besoins de tout le bâtiment !

Pour le particulier et plus encore pour le logement collectif, un tel système de récupération sur les eaux chaudes existe tout prêt dans le commerce et il peut être mis en œuvre très facilement dans le neuf, un peu moins simplement dans l'ancien (il faut maintenir séparées les eaux chaudes des eaux-vannes avant le récupérateur thermique).

ÉNERGIE GRISE DES CONSTRUCTIONS

Il nous reste un dernier aspect à exposer sur les caractéristiques des matériaux, que l'on appelle l'énergie grise, soit l'énergie qu'il faut consommer pour produire, utiliser, entretenir, puis recycler un matériau. De la mine à la décharge, entend-on parfois dire. C'est tout simplement l'énergie nécessaire à la vie d'un produit, depuis sa fabrication jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par sa maintenance.



Comme le remarque à juste titre Jean Carassus du CSTB²⁰ : « ... nous ne sommes qu'au début d'un long processus d'innovation. À moyen terme, les différents modèles devront combiner la consommation mesurée avec l'analyse du cycle de vie des matériaux et du bâtiment et le coût global intégrant la démolition et les externalités ». Selon une étude très complète du WWF, à laquelle ont même participé des acteurs comme les Ciments Lafarge, la production mondiale de ciment contribue à elle seule à 8 % des émissions mondiales de CO₂.

Il ne viendrait à l'esprit d'aucune personne censée de demander à ses enfants de rembourser la maison qu'elle se construit. Et pourtant... s'il faut consommer 100 en énergie pour fabriquer et utiliser un produit qui va permettre d'économiser 1 par an, il faudra cent ans pour rembourser ne serait-ce que l'énergie utilisée durant la fabrication dudit produit. En admettant que vous habitez la maison mettant en œuvre ce matériau durant cinquante ans, vous ferez porter à vos enfants 50 % de son coût énergétique, donc de son coût environnemental. Il semble primordial de calculer, non seulement la qualité thermique d'un bâtiment, mais aussi le coût énergétique de sa construction. Or c'est un sujet encore tabou aujourd'hui. Aucun des labels énergétiques existant à ce jour ne se pose cette question si simple : combien coûtent en énergie de fabrication et d'entretien, sans oublier le traitement en fin de vie, les moyens mis en œuvre pour réduire la consommation d'énergie ?

Au fur et à mesure que les normes thermiques se renforcent, la quantité de matériau mis en œuvre croît exponentiellement. Il arrive forcément un moment où la non prise en compte de cette énergie grise fausse le résultat.

Prenons l'exemple simple d'un isolant de 20 cm d'épaisseur utilisé sur un mur. 1 m² de cette isolation à base de polystyrène coûte 100 kWh à fabriquer, 1 m² en polyuréthane coûte 170 kWh et 1 m² de fibre de cellulose coûte 26 kWh²¹. Sachant que ce mètre carré d'isolant va permettre d'économiser environ 7,5 kWh/an de chauffage (base 1 750 DJU), il faudra trois ans et demi pour rembourser la fibre de cellulose par l'économie réalisée, alors qu'il faudra de treize à vingt-trois ans pour rembourser un isolant synthétique. Ce simple exemple montre l'intérêt de la prise en compte de l'énergie grise dans le calcul énergétique d'une opération d'isolation. Mais le raisonnement vaut pour tous les matériaux.

Une construction classique en parpaing et polystyrène – si on souhaite amortir son coût énergétique sur cinquante ans – « coûte » de l'ordre de 25 kWh/m².an de surface habitable (voir le tableau page 107), si on ne prend en compte que son enveloppe extérieure, sans tenir compte d'aucun élément intérieur (cloisons, peintures, revêtement de sol...) ni d'aucun équipement technique complémentaire, tels que les VMC double flux par exemple. Dans une construction consommant 150 kWh/m².an, on peut admettre à la rigueur que ce coût soit négligé. Dans une construction dite « passive », il n'en va plus du tout de même, car le coût énergétique de la construction peut représenter alors le double de sa consommation de chauffage, d'autant plus si ses sources d'énergie sont renouvelables. Et cela relativise encore un peu plus certaines obsessions, comme celle d'une étanchéité poussée à l'outrance, par rapport à



Utiliser des matériaux naturels, comme ici la paille, en plus de procurer des performances thermiques de haut niveau, permet de réduire fortement le contenu énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment. (Photo Stéphane Peignier, architecte.)

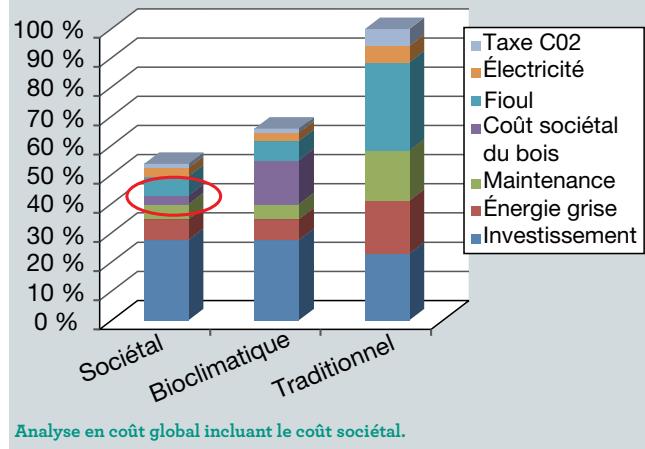
20. PREBAT – Comparaison internationale bâtiment et énergie, décembre 2007, Ademe – PUCA – CSTB.

21. Source KBOB – Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics.



Retrouver de la cohérence

Si un projet de construction vise un objectif de type BBC ou mieux, le poids énergétique des matériaux mis en œuvre n'est plus du tout dans une fourchette négligeable, et peut devenir prépondérant par rapport à la consommation de fonctionnement. On mesure mieux sur l'exemple précédent le coût des efforts qui vont être déployés pour gagner quelques petits kilowattheures supplémentaires grâce à une étanchéité à l'air extrême, alors qu'aucune prescription n'incite à intégrer ni la valorisation de l'ensoleillement ni la réduction de l'énergie grise mise en œuvre. Il y a une cohérence à retrouver dans l'ordre des priorités, par rapport aux pratiques actuelles, y compris et même surtout dans les projets de très haute performance énergétique.



une approche bioclimatique limitant l'énergie grise et valorisant tout simplement les apports gratuits en énergie, en particulier solaires, qu'il s'agisse de chaleur en hiver ou de fraîcheur en été.

Les promoteurs des labels énergétiques actuels ont jusqu'à présent oublié le principal : le coût énergétique de ce qu'ils veulent promouvoir. Et il est certain que le jour où ils tiendront compte de ce coût en énergie de la construction, la façon de construire « passif » devra être revue de fond en comble.

Nous donnons dans le graphique ci-contre à titre démonstratif le calcul détaillé d'une simulation pour une maison moyenne de 100 m², construite avec des matériaux classiques, pour ceux qui douteraient de la pertinence de cet aspect énergétique. On peut, bien sûr, refaire le même calcul pour n'importe quel type de construction, les résultats ne seront pas très différents. Dans le cas d'un bâtiment en structure métallique isolé par laine de roche et polyuréthane, l'écart sera même beaucoup plus marqué.

La variable la plus importante est celle représentant la durée sur laquelle on accepte d'amortir la construc-

tion. Deux critères sont à retenir. Le premier concerne la durée de vie prévisible d'un matériau, le deuxième, la durée maximale que l'on s'autorise pour amortir l'investissement énergétique.

La simulation qui suit part du principe d'un amortissement du bâtiment sur cinquante ans : c'est une approche qui minimise le coût de l'amortissement annuel en énergie que l'on devrait s'autoriser, puisqu'elle dépasse la durée d'une génération, qu'on devrait estimer à trente ans, mais qui correspond à une durée de vie admissible pour un bâtiment de bonne qualité, selon les critères actuels, avant qu'il ne soit indispensable d'envisager une réhabilitation complète.

Certains matériaux sont toutefois pris en compte avec une durée de vie plus courte, liée à leur vieillissement plus rapide, en particulier les isolants. Certaines études montrent en effet qu'une réhabilitation profonde doit intervenir tous les vingt-cinq à trente ans en moyenne, avec un coût en énergie grise sensiblement égal à celui de la construction, ce qui est considéré ici avec une durée de vie réduite pour ces matériaux.

Le détail de la maison en question est le suivant :

Maison de 105 m ²		Matériaux	Énergie grise	Durée de vie
Fondations	Longueur	15 m		
	Largeur	7 m		
	Surface	105 m		
Dalle de sol	Matériaux	Béton armé	1 850 kWh/m ³	50 ans
	Longueur	44 m		
	Volume (40 × 50)	8,8 m ³	16 280 kWh	325,6 kWh/an
Isolant sol	Matériaux	Béton armé	1 850 kWh/m ³	50 ans
	Épaisseur	0,2 m		
	Volume	21 m ³	38 850 kWh	777 kWh/an
Murs extérieurs	Matériaux	Polystyrène	27,78 kWh/kg	30 ans
	Épaisseur	0,1 m		
	Volume	10,5 m ³		
Isolant murs	Masse (18 kg/m ³)	189 kg	5 250 kWh	175 kWh/an
	Matériaux	Parpaing	0,273 kWh/kg	50 ans
	Longueur	44 m		
Menuiseries	Hauteur	3 m		
	Surface	132 m ²		
	Épaisseur	0,2 m		
Toiture	Volume	26,4 m ³		
	Masse (1 500 kg/m ³)	39 600 kg	10 811 kWh	216,2 kWh/an
	Matériaux	Polystyrène	27,78 kWh/kg	30 ans
Isolant toiture	Épaisseur	0,2 m		
	Volume	26,4 m ³		
	Masse (18 kg/m ³)	475,6 kg	13 201 kWh	440 kWh/an
Toiture	Matériaux	Double vitrage PVC	400 kWh/m ²	30 ans
	Surface	15 m ²	6 000 kWh	200 kWh/an
Isolant toiture	Matériaux	Tuiles terre cuite		
	Pente toiture	30°		
	Surface toiture	121,25 m ²	1,142 kWh/kg	50 ans
Isolant toiture	Masse (1 600 kg/m ³)	3 879,9 kg	4 431 kWh	88,6 kWh/an
	Matériaux	Laine de verre	13,444 kWh/kg	30 ans
	Épaisseur	0,25 m		
Isolant toiture	Volume	30,31 m ³		
	Masse (30 kg/m ³)	909,4 kg	12 225 kWh	407,5 kWh/an

Le récapitulatif nous donne :

Fondations	Volume (40 × 50)	9 m ³	16 280 kWh	325,6 kWh/an
Dalle de sol	Volume	21 m ³	38 850 kWh	777,0 kWh/an
Isolant sol	Masse (18 kg/m ³)	189 kg	5 250 kWh	175,0 kWh/an
Murs extérieurs	Masse (1 500 kg/m ³)	39 600 kg	10 811 kWh	216,2 kWh/an
Isolant murs	Masse (18 kg/m ³)	475 kg	13 201 kWh	440 kWh/an
Menuiseries	Surface	15 m ²	6 000 kWh	200 kWh/an
Toiture	Surface toiture	121 m ²	4 431 kWh	88,62 kWh/an
Isolant toiture	Masse (30 kg/m ³)	909 kg	12 225 kWh	407,5 kWh/an
			Total 107 048 kWh	2 630 kWh/an

Soit une consommation par m² SHON :

Fondations	3,10	kWh/m ² .an
Dalle de sol	7,40	kWh/m ² .an
Isolant sol	1,67	kWh/m ² .an
Murs extérieurs	2,06	kWh/m ² .an
Isolant murs	4,19	kWh/m ² .an
Menuiseries	1,90	kWh/m ² .an
Toiture	0,84	kWh/m ² .an
Isolant toiture	3,88	kWh/m ² .an
Total	25	kWh/m².an
Dont isolation	11,6	kWh/m ² .an

Le modèle étudié est très classique dans sa conception ; il s'agit de ce que l'on appelle à tort une construction « traditionnelle », qu'on devrait plutôt nommer modèle conventionnel, car elle n'a de tradition que celle qu'on veut bien lui accorder depuis une trentaine d'années. Nous avons fait abstraction de nombre d'autres sources d'énergie grise, comme les systèmes de ventilation, de chauffage (et éventuellement de climatisation), les revêtements intérieurs indispensables (carrelage, peintures...), les volets, les cloisons intérieures, l'électricité, la plomberie, une éventuelle terrasse extérieure, une cave... Si nous le faisions, nous approcherions facilement les 50 kWh/m².an, parfois moins, parfois beaucoup plus.

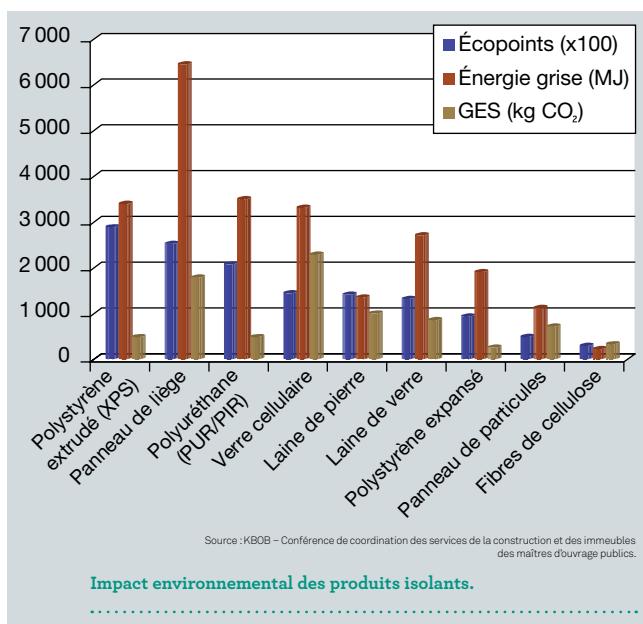
FDES (FICHES DE DÉCLARATIONS ENVIRONNEMENTALES)

La détermination du coût global environnemental de la vie d'un produit est faite suivant la norme NF P01-010. C'est ce qu'on appelle l'analyse du cycle de vie (ACV, voir page 145). On commence à trouver un certain nombre de fiches d'ACV sur les produits, en particulier sur le site de l'Inies²², avec le défaut principal d'un coût prohibitif pour la réalisation de ces fiches par les producteurs artisanaux ou locaux de produits d'origine naturelle. Mais d'autres sources à l'étranger commencent à éditer des listes très complètes de l'impact environnemental des matériaux et produits de construction.

22. Inies, la base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction : www.inies.fr.

Le graphique ci-dessous indique pour quelques isolants leur impact environnemental en éco-points (en centaines), leur énergie grise (en MJ) et leur contribution en GES (en kilos de CO₂), le tout par unité de volume en mètres cubes, les produits étant classés en fonction décroissante de leur bilan en éco-points.

L'évolution prochaine de la réglementation thermique va devoir lui imposer de prendre en compte cette énergie grise si elle souhaite conserver un minimum de cohérence.



Un vrai projet bioclimatique doit impérativement inclure une approche énergétique et un bilan carbone en coût global. Pourquoi un bilan carbone ? Parce qu'il est la meilleure approche de l'énergie, qui peut provenir du pétrole comme du soleil : ce qui importe finalement, ce n'est pas uniquement le bilan énergétique, c'est surtout la masse de carbone ou d'équivalent carbone (méthane, dioxyde de soufre...) rejetée dans l'environnement, ainsi que la masse de déchets générés au final et le coût de leur traitement.

Et il ne faut pas oublier dans ce bilan carbone les émissions liées aux transports induits par la localisation du bâtiment. Construire un bâtiment passif en rase campagne, obligeant ses utilisateurs à parcourir des distances inconsidérées pour s'y rendre, n'est pas une solution durable et encore moins environnementale...

Il reste à déterminer sur quelle durée de vie se fait le calcul de l'énergie grise et donc comment on détermine la durée de vie prévisible d'un matériau. C'est une des aberrations des Fiches de déclarations environnementales (FDES) selon la norme XP P 01-010 : les valeurs sont indiquées en durée de vie totale (DVT). En lisant bien dans les recoins, on y trouve parfois écrit en tout petit comment a été évaluée cette durée de vie et on constate alors qu'elle est parfois très optimiste : par défaut, elle est de cinquante ans, ce qui semble vraiment optimiste pour les laines de verre ou le polystyrène, par exemple. Cette évaluation minimise en fait fortement l'impact de l'énergie grise en quantité annuelle, laisse croire que le matériau en question contient peu d'énergie grise et, en conséquence, que son apport en économie d'énergie d'usage est nettement favorable.

Le problème de la méthodologie française des FDES est multiple.

- Elles ne garantissent pas l'indépendance et l'objectivité des résultats.
- C'est par l'industriel ou par l'organisation de son secteur professionnel à l'initiative de l'étude ACV de la FDES que les frontières du système sont définies : chacun ne considère que ce qui l'intéresse et omet ce qui le gêne.
- Compte tenu de leur coût de réalisation, elles sont réservées aux grands industriels et restent hors de portée des filières locales de matériaux naturels et sains.
- Nombre de fiches sont génériques et ne prennent pas en compte l'origine des matériaux : une menuiserie bois construite à partir de bois d'Amazonie, ayant parcouru 8 000 km en détruisant le poumon terrestre, aura la même valeur ACV qu'une menuiserie fabriquée avec du bois produit localement, issu de filières garantissant le renouvellement des forêts.
- Les fiches se définissent parfois sur la partie minoritaire des matériaux employés, ce qui diminue l'impact de ce matériau : dans une menuiserie, le châssis ne représente que 40 % de la masse totale, le PVC n'impacterait que 40 % de son bilan global, encore moins dans un triple vitrage.
- Elles intègrent, par une interprétation plus que douteuse de la norme, dans leur bilan d'énergie grise la quantité d'énergie solaire nécessaire à la photosynthèse des matériaux végétaux. On croit rêver. (Par contre, l'inter-

- prétation française de la norme fait qu'elle ne comptabilise pas l'énergie solaire nécessaire à la photosynthèse des végétaux s'ils sont brûlés en fin de vie !)
- La fiche d'un matériau fait abstraction de l'utilisation obligatoire d'autres matériaux pour sa mise en œuvre, alors que les DTU l'imposent (Il n'y a pas de béton armé pour linteau, chaînage... dans les murs en parpaing qu'examinent les FDES et pourtant dans les DTU, il y en a).
 - Le coût énergétique d'exploitation des matériaux naturels est calculé, mais le coût énergétique de production des produits pétroliers, non : pour la ouate de cellulose, il faut couper des plantes, les traiter et les transporter, mais le pétrole arrive comme par miracle raffiné dans l'usine du fabricant.
 - Le coût énergétique du recyclage d'un matériau est pris en compte dans la FDES, mais le coût environnemental de sa mise en décharge ne l'est pas : un matériau recyclable ou biodégradable présente un moins bon bilan

ACV qu'un matériau destiné à la décharge et encore moins bon qu'un matériau pétrolier incinéré. Au final, le recyclage est pénalisé.

- La nocivité pour l'environnement d'un produit en fin de vie n'est pas retenue, mais sa biodégradabilité l'est par le retour à l'environnement de son carbone : le chanvre « pollue » en se compostant, mais l'amiante présenterait une ACV idéale si une fiche FDES en était faite !
- Les critères sociaux sont absents des FDES : un matériau consommant de l'énergie humaine plutôt que de l'énergie fossile pour être fabriqué et recyclé n'est pas valorisé. Il pourrait pourtant être très instructif pour un décideur de savoir quelle « intensité sociale » en emploi ou en usage est contenue dans une unité fonctionnelle d'un produit décrit par les FDES.

Il est intéressant de comparer les résultats des FDES françaises avec les analyses gouvernementales suisses, reproduites dans le tableau ci-dessous.

		Énergie primaire totale en MJ pour la durée de vie totale de 1 m ²	Émission de CO ₂ en kg eq CO ₂ /m ²
Parpaing seul	FDES	174 MJ	15,3 kg eq CO ₂
	Oekenbilanzdata	242 MJ	30,1 kg eq CO ₂
Variation Oekenbilanzdata/FDES		139 %	192 %
Parpaing + PSE + placo	FDES	318 MJ	30,46 kg eq CO ₂
	Oekenbilanzdata	397 MJ	50,3 kg eq CO ₂
Variation Oekenbilanzdata/FDES		125 %	165 %

À noter :

- Quand on double les parpaings avec du PSE (polystyrène expansé), dans les FDES on économise 18 % du mortier (55 kg dans la fiche sans PSE et 45 kg dans la fiche avec PSE).
- Monter 1 m² de parpaing de 20 cm avec 55 kg de mortier, en considérant qu'il s'agit du poids sec, est du grand art. En effet, cela fait 23 litres au mètre carré, on est donc à 2,3 litres de mortier par parpaing pour le joint vertical et pour l'horizontal (0,14 m² de surface à garnir) soit une épaisseur moyenne de 16,4 mm...

y compris ce qui reste collé dans la gamatte, ce qui tombe par terre, les 5 % de chute et les gros joints pour finir les longueurs de murs. Passer à 45 kg de mortier au mètre carré quand on y colle du PSE nécessite bien sûr un maçon virtuose...

Les écarts entre les résultats des FDES et les résultats suisses sur les complexes isolants à base de laine de verre peuvent atteindre 273 % (panneau Glasswool 20/M00021 de 100 mm : 19,5 MJ/m² selon les FDES, 53,24 MJ/m² selon l'Oekenbilanzdata). Qui se trompe : le fabricant, ou l'organisme indépendant ?

Une bonne méthode pour contourner ces difficultés est d'évaluer également le ratio « énergie grise totale/économie annuelle en énergie d'usage », ce qui nous donne un temps de retour sur investissement : combien d'années faut-il pour récupérer l'investissement fait ? À ce niveau, la comparaison entre un mur en parpaing-polystyrène et un mur en bois-paille devient très instructive.

Une autre aberration de la méthodologie française est d'inclure dans le coût énergétique des éco-matériaux la quantité d'énergie renouvelable nécessaire à leur cycle de vie, et en ne comptant pas les énergies fossiles à leur vrai coût énergétique, comme on l'a vu. Tant que la méthode d'évaluation de l'énergie grise ne sera pas normée au niveau européen, une évaluation objective de la réalité sera difficile à faire admettre en France.



Situé dans les Alpes de haute Provence au cœur de la vallée de l'Ubaye, ce centre d'activités a pour objectif de mieux faire connaître toutes les ressources des forêts alpines et les qualités du matériau bois. L'idée d'une Maison du Bois sur la commune de Méolans remonte aux années 1990, alors que les petites scieries locales disparaissent, malgré un très fort potentiel de production des forêts de mélèze. Il s'agit d'un bâtiment à l'architecture originale et ambitieuse dessiné par l'architecte Jérôme Voutier. La charpente en bois de la nef est habillée d'un bardage et recouverte de tuiles en mélèze, l'ensemble est chauffé par une chufferie au bois utilisant des plaquettes de production locale. À l'extérieur, un micro-barrage de l'ONF complète l'approche durable du site.

9| CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Constater que ce qui est fait actuellement n'est pas toujours empreint de beaucoup de logique est une chose, trouver la bonne réponse en est une autre. Avant d'aborder la construction proprement dite, il faut déjà savoir avec quoi l'on peut construire. Nous allons donc examiner de plus près les caractéristiques des matériaux, afin de mieux comprendre à quoi ils peuvent, ou ne peuvent pas, servir.



La pierre, en plus d'apporter une durabilité et une robustesse exceptionnelle aux constructions, permet de répondre à tous les besoins, y compris à l'étanchéité à la pluie des toitures, tout en offrant l'inertie indispensable à un confort d'été agréable dans les régions fortement ensoleillées. Ici, trulli d'Alberobello dans les Pouilles (Italie), construits en pierre sèche au XVI^e siècle. (Photo Claire Cornu.)

Nous avons évoqué les trois modes de propagation de la chaleur : par rayonnement, par conduction et par convection. Nous laisserons de côté pour l'instant le sujet de la convection, qui ne concerne pas directement les matériaux solides (en dehors d'éventuels phénomènes de convection par transfert d'eau et de vapeur, par exemple, encore qu'il s'agisse plus fréquemment de capillarité dans ces cas-là). Selon leur capacité à rayonner et à conduire la chaleur, les matériaux se classent en trois catégories : ceux qui isolent (les isolants), ceux qui accumulent la chaleur (les matériaux à inertie) et ceux qui font un peu les deux.

Les isolants sont en général souples, mais plus ou moins résistants. Les accumulateurs sont en général robustes, mais plus ou moins cassants.

Enfin, les matériaux vont laisser plus ou moins l'eau les pénétrer et la vapeur d'eau les traverser, et cela à une vitesse plus ou moins grande. La laine de verre, par exemple, n'est absolument pas étanche à l'eau, ne supporte pas la vapeur d'eau et perd toutes ses caractéristiques isolantes si elle contient de l'eau. Le liège, pour prendre un contre-exemple, même s'il est gorgé d'eau, reste un parfait isolant. Il faudra donc étanchéifier la laine de verre, autant à l'eau qu'à la vapeur d'eau, pour lui conserver ses propriétés, problème que l'on n'aura pas avec le liège.

Le dernier point concerne l'énergie grise des matériaux, qu'il a fallu collecter, transformer, transporter et façonner avant de pouvoir les utiliser. La terre cuite par exemple se distingue de la terre crue, car il a fallu la cuire à haute température et donc utiliser une bonne quantité de chaleur pour lui donner ses caractéristiques, plus que pour fabriquer un parpaing, alors que la terre crue pourra être



Le cas des métaux

Les métaux sont un cas particulier. Ils n'isolent rien et n'accumulent rien. En réalité, les métaux peuvent accumuler beaucoup de chaleur mais ils sont incapables de la conserver. C'est pour cela qu'en touchant un objet métallique chaud, on se brûle : il restitue instantanément toute la chaleur accumulée. En revanche il se refroidit très vite. Avec un isolant, il est quasiment impossible

de se brûler, même s'il a été monté à haute température, car la quantité d'énergie qu'il contient reste très faible. Un bon accumulateur, comme la pierre, brûlera moins au contact que le fer, car s'il contient beaucoup d'énergie, il la restituera lentement ; par contre il restera chaud très longtemps. Les métaux ont quand même quelques qualités, en particulier mécaniques, qui parfois peuvent être utiles. Ils sont robustes et élastiques à la fois, si on ne les chauffe pas trop.

durcie par simple exposition au soleil, y compris après la construction.

Et la liste sera complète en ajoutant la durabilité du matériau, donc sa capacité à vieillir, à résister à l'usure du temps.

Les matériaux peuvent être caractérisés par les grandes propriétés suivantes :

- aptitude thermique, permettant d'isoler, ou au contraire d'accumuler la chaleur ;
- solidité, donc capacité à porter la structure d'un bâtiment ;
- élasticité, qui entraîne une compatibilité plus ou moins grande avec d'autres matériaux travaillant différemment ;
- étanchéité à l'eau, donc capacité à protéger de la pluie ;
- perméabilité à la vapeur d'eau, donc capacité à réguler l'hygrométrie intérieure ;

- énergie grise ou quantité d'énergie nécessaire pour les extraire, les façonner et les mettre en œuvre ;
- durabilité, afin d'assurer la longévité de la construction.

Nous allons parcourir les principaux matériaux utilisés dans la construction des bâtiments, sous l'angle de ces caractéristiques.

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Béton de ciment

Ce matériau est le roi de la construction moderne malgré ses très nombreux défauts. C'est sa rentabilité économique immédiate et sa facilité de mise en forme qui le font utiliser, au détriment de la durabilité et de la qualité des constructions. Il ne peut être mis en œuvre sans y ajouter une armature métallique noyée dans sa masse, afin de lui donner un minimum de solidité.

Caractéristiques du béton de ciment

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur puissant Aucun pouvoir isolant	Une de ses rares qualités notables : apporter une forte inertie, à condition de ne pas la détruire par une isolation intérieure.
Solidité	Fragile Robuste s'il est suffisamment épais et armé de renforts en fer	Le béton non armé est un matériau très cassant, qui ne supporte pas le moindre effort, sauf en compression.
Élasticité	Élasticité très faible	Pratiquement aucun matériau n'est compatible avec le béton, ce qui entraîne de nombreuses difficultés pour parfaire son étanchéité.

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Étanchéité à l'air	Bonne	Matériau étanche à l'air, mais difficile à étancher aux jonctions avec d'autres matériaux.
Étanchéité à l'eau	Faible	Son pouvoir absorbant est très fort, même lorsqu'il semble sec, il reste gorgé d'eau.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Aucune	Il a cette particularité unique d'absorber la vapeur et de la transformer en eau plus rapidement qu'il ne se débarrasse de son eau.
Énergie grise	0,225 kWh/kg - 536 kWh/m ³	Pas si mauvais que ce que l'on prétend souvent, du fait d'un approvisionnement généralement local du gravier le constituant.
Durabilité	Faible	Se désagrège progressivement, en devenant friable et poreux, selon un processus mal compris encore aujourd'hui. Environ un siècle de durée de vie, beaucoup moins si le ferraillage a été mal fait.

Parpaing

Dérivé du béton, le parpaing ou moellon a pour seul avantage sa légèreté, avec des caractéristiques détériorées. Il ne présente aucune résistance mécanique s'il n'est pas renforcé par des poutres et des linteaux en béton

armé, et n'offre aucune étanchéité ni à l'eau ni à l'air. Bref, il présente tous les inconvénients du béton en plus léger, sans les avantages, si ce n'est qu'il est relativement économique.

Caractéristiques du parpaing

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur moyen Aucun pouvoir isolant	
Solidité	Fragile	
Élasticité	Cassant	Seul matériau compatible avec le béton.
Étanchéité à l'air	Mauvaise	
Étanchéité à l'eau	Aucune	Impose un revêtement de protection.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Aucune	Mêmes inconvénients que le béton.
Énergie grise	0,273 kWh/kg - 409 kWh/m ³	
Durabilité	Faible	Aussi peu durable que le béton.

Métal

Le métal (fer, acier, aluminium...), couramment utilisé en construction comme structure porteuse (charpentes métalliques) et en bardage (tôles), est un des pires maté-

riaux constructifs qui soit. À part sa résistance mécanique, il ne présente pas beaucoup d'intérêt. Il ne possède aucune caractéristique thermique valorisable, il ne supporte pas le feu, se détériore extrêmement rapidement

s'il n'est pas protégé de l'air, et il est doté d'une résistance assez moyenne en compression. C'est une catastrophe du point de vue environnemental (ne serait-ce que par son énergie grise), dont l'usage disparaîtra avec l'augmenta-

tion du prix des énergies ou même avec une simple taxation carbone. Son seul intérêt consiste à l'utiliser pour renforcer mécaniquement d'autres matériaux fragiles, comme le béton et le parpaing.

Caractéristiques du métal

Caractéristiques	Qualités	Commentaires	
Aptitude thermique	Aucune accumulation thermique Aucune capacité d'isolation	Le métal est une passoire énergétique.	
Solidité	Faible à forte, selon la manière dont il est employé	Le fer est très sensible à la rouille, il nécessite obligatoirement un revêtement complémentaire, généralement de type chimique. Il ne résiste pas au moindre incendie.	
Élasticité	Très résistant à la traction, peu résistant à la torsion		
Étanchéité à l'air	Totale	Sauf aux jonctions des plaques, difficiles à étancher.	
Étanchéité à l'eau	Correcte s'il est bien mis en œuvre	Se dégrade très rapidement dans le temps.	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Totale		
Énergie grise	Acier d'armature Tôle d'acier nue Tôle d'acier zinguée Tôle d'aluminium nue Tôle d'acier nickel-chrome 18/8	6,694 kWh/kg 52 551 kWh/m ³ 8,50 kWh/kg 66 725 kWh/m ³ 9,86 kWh/kg 77 410 kWh/m ³ 42,22 kWh/kg 114 000 kWh/m ³ 27,36 kWh/kg 214 785 kWh/m ³	Les métaux sont une catastrophe énergétique et environnementale. L'énergie grise indiquée ne tient pas compte des vernis, laques ou peintures indispensables à leur protection (compter de 15 à 30 kWh/kg de peinture, à renouveler régulièrement, ou 30 à 100 kWh/kg de peinture métallisée).
Durabilité	Faible	La tour Eiffel coûte une fortune en entretien (peinture totale tous les sept ans), et certaines parties présentent une épaisseur de peinture supérieure à celle de l'acier qu'elle est censée protéger.	

Béton de chaux

Le mortier de chaux est un matériau connu depuis l'Antiquité. Il se marie parfaitement avec la pierre et la terre cuite ou crue.

La chaux possède d'autres propriétés remarquables. La technique marocaine du tadelakt est utilisée dans les hammams et les salles de bains des ryads marocains.

Caractéristiques du béton de chaux

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur puissant Aucun pouvoir isolant	Peut être mélangé avec des fibres végétales pour améliorer son pouvoir isolant.
Solidité	Robuste	A l'avantage de pouvoir être utilisé sous forme de pâte avant de durcir comme de la pierre et donc d'être employé en couche protectrice mince ou d'être modelé.
Élasticité	Cassant	
Étanchéité à l'air	Forte	Se marie parfaitement avec les produits végétaux.
Étanchéité à l'eau	Forte	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Moyenne	
Énergie grise	1 kWh/kg - 1 490 kWh/m ³	Noter que la chaux, en se recalcifiant, réabsorbe progressivement le CO ₂ qui a été émis par sa fabrication.
Durabilité	Très grande	Matériau entièrement recyclable, il suffit de recuire la chaux, contrairement au mortier de ciment, dont le procédé de fabrication n'est pas réversible.

C'est un enduit à base de chaux, longuement « ferré » à l'aide d'un galet lisse, puis frotté au savon noir. Cette technique lui donne un aspect brillant et très doux au toucher, mais surtout une étanchéité exceptionnelle. Cette mise en œuvre de la chaux permet une imperméabilité totale à l'eau, au point de pouvoir être utilisée à la finition intérieure des baignoires.

Béton cellulaire

Moyennement connu, le béton cellulaire est un béton de chaux rendu isolant en provoquant une réaction chimique avec de l'aluminium, qui entraîne une expansion du matériau pendant sa prise. Il a l'avantage de pouvoir être travaillé très facilement à la scie et poncé, comme du bois. Il fait partie des matériaux à isolation « dans la masse ».

Caractéristiques du béton cellulaire

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur correct Bon pouvoir isolant	
Solidité	Moyenne	Peut servir de remplissage de murs porteurs, à condition d'être régulièrement renforcé par une structure armée.
Élasticité	Aucune	Matériau fragile et cassant, ne supporte aucune contrainte autrement qu'en compression.
Étanchéité à l'air	Bonne s'il est correctement mis en œuvre	
Étanchéité à l'eau	Faible	C'est une véritable éponge capable de se surcharger d'eau, nécessite en extérieur un revêtement.
Perméabilité à la vapeur d'eau	De moyenne à faible	Le fait de devoir le protéger de la pluie dégrade généralement sa perméabilité s'il est employé seul.
Énergie grise	1 kWh/kg - 600 kWh/m ³	
Durabilité	Mal connue - <i>a priori</i> importante	

Terre crue

L'argile est un des plus anciens matériaux de construction, apprécié pour sa facilité d'utilisation et ses excellentes performances constructives, en particulier dans les régions chaudes et sèches. Qu'il s'agisse de pisé, de torchis ou

d'adobe (en fonction de sa mise en œuvre), que ce soit dans les Andes, au Sahara ou au Yémen, on retrouve partout les couleurs chaudes de ce matériau universel et l'aspect massif de ces constructions qui sont les plus robustes, les plus durables et les plus confortables qui soient.

Caractéristiques de la terre crue

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur très puissant Pouvoir isolant moyen	Le pouvoir isolant peut être renforcé en mélangeant l'argile à des fibres végétales.
Solidité	Forte pour le matériau sec, faible s'il est gorgé d'eau	Se durcit et cimente toute seule sous l'action du soleil. Peut être renforcée par l'inclusion de bois (torchis) ou de fibres végétales.
Élasticité	Inverse de la solidité	Peut être renforcée par l'inclusion de bois (torchis) ou de fibres végétales.
Étanchéité à l'air	Forte	
Étanchéité à l'eau	Forte	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Très forte	
Énergie grise	0,040 kWh/kg - 72 kWh/m ³	Tient principalement aux coûts d'exploitation et de transport.
Durabilité	Maximale	Matériau éternel, entièrement recyclable.

Terre cuite

Tirée de la terre crue, après cuisson à haute température, la brique pleine est préférée dans les régions froides et humides, pour sa tenue mécanique. La cuisson

permet d'accélérer le durcissement naturel, voire de le supplanter dans les régions insuffisamment ensoleillées, au détriment notable du bilan en énergie grise.

Caractéristiques de la terre cuite

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur très puissant Pouvoir isolant faible	Pouvoir isolant renforcé par création d'alvéoles d'air. Le Monomur en terre cuite présente un pouvoir isolant proche du béton cellulaire.
Solidité	Forte	
Élasticité	Cassant	
Étanchéité à l'air	Forte	Sauf défaut de cuisson et si correctement mise en œuvre.
Étanchéité à l'eau	Forte	Si correctement mise en œuvre.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Peu perméable à la vapeur d'eau	Augmente avec le temps, au fur et à mesure que le matériau se détériore.
Énergie grise	0,783 kWh/kg - 783 kWh/m ³	
Durabilité	Moyenne	Se désagrège avec le temps comme le béton, devenant poreuse et perdant son étanchéité.

Tuile en terre cuite

La tuile possède les mêmes qualités que la brique en terre cuite, mais elle est généralement fabriquée à

partir d'une terre plus pure et plus fine, améliorant ses qualités.

Caractéristiques de la tuile en terre cuite

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur très puissant Pouvoir isolant faible	
Solidité	Forte	
Élasticité	Cassant	
Étanchéité à l'air	Faible	Faible étanchéité du fait du simple emboîtement mécanique, sans lien. Les toitures fixées au ciment ou à la chaux offrent une bonne étanchéité à l'air.
Étanchéité à l'eau	Très forte	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Peu perméable à la vapeur d'eau	
Énergie grise	1,142 kWh/kg - 1 827 kWh/m ³	
Durabilité	Moyenne à forte (plusieurs siècles)	Se désagrège avec le temps, mais moins rapidement que la brique, la terre étant plus fine et compacte.

Grès

Le grès est une roche issue de l'agrégation et la cimentation naturelle de grains de sable, aux caractéristiques variables selon la composition du sable d'origine. C'est

un matériau ancien en construction, car relativement facile à tailler et sculpter. La cathédrale de Strasbourg est construite entièrement en grès des Vosges.

Caractéristiques du grès

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur très puissant Pouvoir isolant faible	
Solidité	Forte	
Élasticité	Faible	
Étanchéité à l'air	Forte	
Étanchéité à l'eau	Forte	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Moyennement perméable à la vapeur d'eau	
Énergie grise	0,425 kWh/kg - 637 kWh/m ³	Dépend fortement du lieu d'extraction et de la dureté, ainsi que de l'épaisseur des tailles.
Durabilité	Très élevée	Certains grès sont sensibles à l'érosion à la pluie et au vent (comme les fortifications d'Avignon).

Bois d'œuvre massif

Le bois d'œuvre possède globalement des caractéristiques relativement constantes, idéales pour la construction. Les variations se feront sur la robustesse et la durabilité, les résineux étant moins bons de ce point de vue que les feuillus à pousse lente, mais isolant mieux.

Le bois est beaucoup plus résistant à masse égale que l'acier. Sa souplesse permet de l'utiliser en zone sismique beaucoup plus facilement que le béton ou la pierre.

C'est l'un des matériaux les plus résistants au feu lorsqu'il est utilisé pour la structure porteuse d'un bâtiment.

Il brûle lentement, à une vitesse connue, et conserve longtemps ses propriétés mécaniques, quelle que soit l'intensité de l'incendie, laissant le temps aux occupants de sortir. Enfin, il ne dégage aucun gaz毒ique. Il peut

circonscrire une zone en feu, tout en restant intact sur son autre face, sans risque de brûlure par contact. Il offre accessoirement l'avantage environnemental d'être un puits à carbone.

Caractéristiques du bois d'œuvre massif

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur moyen à faible Pouvoir isolant moyen à fort	C'est un matériau composite, dont le rapport entre la capacité thermique et la capacité isolante varie selon sa densité. Les plus lourds offrent une bonne inertie, les plus légers sont de bons isolants.
Solidité	Très robuste dans le sens de la fibre	Matériau nécessitant de surveiller le sens de pose, en fonction du type de contrainte.
Élasticité	Très élastique dans le sens de la fibre	
Étanchéité à l'air	Forte	
Étanchéité à l'eau	Forte	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Très perméable	Le matériau idéal comme paroi extérieure, totalement étanche aux intempéries, il laisse parfaitement passer la vapeur.
Énergie grise bois brut séché à l'air	Épicéa, sapin, 0,614 kWh/kg mélèze 331 kWh/m ³ Hêtre, chêne 0,464 kWh/kg 362 kWh/m ³	L'énergie grise peut fortement varier en fonction de la provenance, les coûts énergétiques du transport n'étant pas négligeables. Les bois modernes, séchés en étuve et travaillés (lamellé-collé, panneau de particules...) présentent une énergie grise non négligeable, à comparer avec celle du plâtre : 865 kWh/m ³ .
Énergie grise bois brut séché à l'étuve	Épicéa, sapin, 1,405 kWh/kg mélèze 695 kWh/m ³ Hêtre, chêne 0,694 kWh/kg 496 kWh/m ³	
Énergie grise bois raboté séché à l'air	Épicéa, sapin, 0,906 kWh/kg mélèze 489 kWh/m ³ Hêtre, chêne 0,800 kWh/kg 572 kWh/m ³	
Énergie grise bois raboté séché à l'étuve	Épicéa, sapin, 1,219 kWh/kg mélèze 604 kWh/m ³ Hêtre, chêne 0,800 kWh/kg 572 kWh/m ³	
Lamellé-collé	2,447 kWh/kg - 1 211 kWh/m ³	
Bois lamellé/multiplex, résistant à l'eau	4,917 kWh/kg - 3 835 kWh/m ³	
Panneau d'aggloméré type OSB	5,028 kWh/kg - 2 378 kWh/m ³	
Panneau de particules dur	3,722 kWh/kg - 3 350 kWh/m ³	
Durabilité	De très grande à faible, selon la densité et la pureté.	Très grande (plusieurs siècles) pour le bois brut, nettement moins bonne pour les matériaux travaillés industriellement.



Le bois massif, matériau idéal pour construire en respectant la capacité des générations futures à en faire de même.
(Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

COMPLEXES À BASE DE MATERIAUX NATURELS

Il serait un peu long de faire le tour de tous les produits actuellement sur le marché, offrant simultanément des qualités structurelles et d'isolation. Nous allons donc nous arrêter sur un exemple, le bloc de chanvre, afin de confirmer que les solutions à base de matériaux naturels existent.

Il s'agit d'un matériau « Monomur » naturel, non toxique, à isolation répartie dans toute l'épaisseur du mur, perméable à la vapeur d'eau. Il est constitué de chanvre et de chaux hydrauliques naturelles. Il peut être utilisé pour la construction sur ossature bois, béton ou métal, mais également en rénovation, comme isolant à forte inertie, posé en intérieur comme en extérieur. Son utilisation ressemble à celle du béton cellulaire. Les faces apparentes des murs et cloisons peuvent être enduites de mortier sable-chaux, de terre crue ou de plâtre et, bien sûr, être habillées de bois.

La pose s'effectue à joints minces de mortier de sable et de chaux, selon le DTU 20.1.

Caractéristiques du bloc de chanvre

Épaisseur en cm	10	15	20	30
Dimension en cm	60 x 30	60 x 30	60 x 30	60 x 20
Densité en kg/m ³	330	300	300	300
Résistance thermique en m ² K/W	1,33	2,14	2,85	4,28
Indice d'affaiblissement acoustique en dB	50	50	54	59
Réaction au feu avec enduit	M1	M1	M1	M1
Résistance au feu en heures (CSTB)				2
Énergie grise MJ/m ²	100	150	200	300

MATERIAUX D'ISOLATION

Nous avons fait un premier tour des matériaux permettant de construire la structure du bâtiment. Nous allons regarder ce qu'il en est des isolants thermiques et des produits d'étanchéité.

Fibres synthétiques

Elles présentent généralement un excellent pouvoir isolant, au prix de quelques contraintes supplémentaires de mise en œuvre. Mais elles ont pour particularité commune de perdre tout pouvoir isolant en présence d'eau, même en quantité très faible. Il faudra donc leur garantir une étanchéité totale à la pluie, ce qui imposera d'y ajouter une protection étanche. Elles sont également pour la majorité non étanches à l'air. La plupart sont imperméables à la vapeur d'eau, la condensant rapidement, ce qui impose de les rendre totalement étanches à la vapeur par une protection supplémentaire sous peine de leur voir perdre leur pouvoir isolant. Or cette étanchéité totale est quasiment impossible à réaliser en pratique, car il faut pouvoir fixer l'isolant. Enfin, elles ne sont pas recyclables, se dégradent rapidement (en dix à vingt ans) et posent quantité de problèmes d'ordre sanitaire, par les émissions de COV qu'elles génèrent. Ces propriétés les rendent totalement inadaptées à une utilisation en construction.

Fibres minérales

Les fibres minérales comprennent principalement la laine de verre et la laine de roche, même si elles n'ont pas grand-chose à voir avec la vraie laine, celle de mouton. Il existe des doutes sérieux sur leur impact sur la santé, car avec le temps, elles se transforment en poussières non dégradables, dangereuses (cancérogènes) pour les muqueuses pulmonaires, au point d'imposer aujourd'hui des précautions particulières de manipulation aux

ouvriers du bâtiment les mettant en œuvre – l'amiante n'est rien d'autre qu'une laine minérale isolante. Leur pouvoir isolant disparaît complètement en présence d'humidité. Elles condensent la vapeur d'eau et doivent donc impérativement être rendues étanches, afin d'interdire à la vapeur d'eau de les atteindre (pare-vapeur). La laine de verre a une fâcheuse tendance à fluer lorsqu'elle est posée à la verticale et présente une durée de vie assez réduite, devenant poussiéreuse avec le temps.

Caractéristiques des fibres minérales

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur faible Pouvoir isolant très fort	
Solidité	Faible résistance mécanique	La laine de verre ne doit pas être employée verticalement, à cause du fluage immanquable à terme, même avec de nombreux artifices de maintien.
Élasticité	Importante	
Étanchéité à l'air	Faible	
Étanchéité à l'eau	Faible	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Aucune	
Énergie grise	Laine de verre 6,167 kWh/kg 616,7 kWh/m ³ Laine de roche 13,444 kWh/kg 403,3 kWh/m ³	
Durabilité	Faible	La durée de vie est mal connue. La laine de verre se tasse et se désagrège rapidement. Les deux se transforment progressivement en poussière, les fibres se disloquant.

Fibres naturelles

Les fibres naturelles possèdent une variété très grande, avec des particularités pouvant amener, selon les conditions particulières de leur mise en œuvre, à privilégier une source plutôt qu'une autre. On peut citer de façon non exhaustive : les copeaux, la paille (consulter à ce sujet l'ouvrage de André de Bouter et Bruce King précédemment cité, *Concevoir des bâtiments en botte de paille*), le chanvre, la fibre de bois (cellulose), le liège... On peut y ajouter la laine de mouton, qui présente des caractéristiques particulières.

Elles offrent les mêmes qualités d'isolation que les fibres et matériaux synthétiques, avec quelques avantages secondaires. Leur pouvoir isolant n'est pas modifié si elles sont dans une ambiance fortement humide. Elles laissent parfaitement passer la vapeur d'eau et sont entièrement recyclables et biodégradables. Elles représentent un fort potentiel de stockage de carbone. Enfin, leur production peut être locale et crée de l'emploi contrairement au pétrole qui est importé et qui génère de la pollution.

Caractéristiques des fibres naturelles

Caractéristiques	Qualité	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur faible Pouvoir isolant très fort	
Solidité	Faible résistance mécanique	Les ballots de paille présentent toutefois des qualités de solidité particulières s'ils sont correctement mis en œuvre.
Élasticité	Importante	
Étanchéité à l'air	Faible à moyenne	Étanche à l'air et à l'eau si les fibres sont fortement comprimées.
Étanchéité à l'eau	Faible à moyenne (le liège présente des propriétés particulières selon sa présentation)	Peut être fortement améliorée par un traitement hydrofuge à base de résines végétales.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Totale	Le matériau idéal pour réguler l'hygrométrie d'une construction.
Énergie grise	Fibre cellulosique soufflée	2,17 kWh/kg 130 kWh/m ³
	Panneau de liège	7,31 kWh/kg 876 kWh/m ³
	Panneau de bois léger à base de bois lié par du ciment	1,156 kWh/kg 520 kWh/m ³
Durabilité	Moyenne à longue	La durabilité dépend fortement de la mise en œuvre. Les fibres naturelles peuvent tenir longtemps si leur perméabilité à la vapeur n'est pas détruite par une autre matière.



Mousses synthétiques

Elles comprennent les polystyrènes et les mousses de polyuréthane. Présentant les mêmes caractéristiques d'isolation que les fibres synthétiques, elles ont les avantages apparents d'une certaine rigidité et d'une étanchéité à l'air et à l'eau, quand elles sont neuves. Elles sont donc couramment employées pour l'isolation des parois verticales. Leur durée de vie moyenne est de l'ordre de vingt-cinq ans, temps au bout duquel elles se délitent et tombent en petits morceaux non solidaires ou en poussière. Comme elles sont généralement emprisonnées dans les murs, il est impossible de les remplacer de

Travaux d'isolation d'une toiture par de la ouate de cellulose par remplissage manuel de l'ossature. L'isolation en ouate de cellulose, en plus d'une grande facilité de mise en œuvre et d'une parfaite régulation de l'humidité, permet à l'aide d'un matériau naturel d'obtenir d'excellentes performances thermiques, stables dans le temps. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

façon simple. Elles sont totalement étanches à la vapeur d'eau, mais le moindre défaut de jonction entre éléments entraîne une forte condensation sur la paroi froide.

Il existe des doutes sérieux quant à leur impact sur la santé (émissions de COV – composés organiques volatils).

Généralement fournies en panneaux prêts à l'emploi, on les trouve également en bombe, non encore polymérisées. En oubliant leur faible durabilité, surtout si elles sont soumises à des efforts, on les utilise alors comme produit de calfeutrement, voire de fixation. Fixer une porte avec de la mousse de polyuréthane, c'est se garantir des soucis à court terme.

Caractéristiques des mousses synthétiques

Caractéristiques	Qualités	Commentaires
Aptitude thermique	Accumulateur nul – Pouvoir isolant très fort	
Solidité	Faible résistance mécanique	
Élasticité	Moyenne	
Étanchéité à l'air	Moyenne	Dépend du type de pose.
Étanchéité à l'eau	Moyenne	Dépend du type de pose.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Aucune	
Énergie grise	Polystyrène expansé (EPS)	27,78 kWh/kg 500 kWh/m ³
	Polystyrène extrudé (XPS)	23,39 kWh/kg 421 kWh/m ³
	Mousse rigide de polyuréthane (PUR)	28,33 kWh/kg 850 kWh/m ³
Durabilité	Faible	

PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ ET DE PAREMENT

Généralement peu utiles pour l'étanchéité dans le cas d'emploi de matériaux naturels (bois, pierre, terre crue), ils sont indispensables pour les matériaux artificiels (béton, parpaing, brique creuse, métaux). Certains d'entre eux permettent par ailleurs de protéger des intempéries et de l'érosion et de réaliser un parement esthétique. Ils présentent globalement les mêmes caractéristiques thermiques et hydrauliques. Les produits à base minérale sont logiquement plus résistants et plus durables que les versions synthétiques. Nous donnons leurs valeurs en énergie grise, qui doit être le critère principal de choix.

Attention, pour les mortiers et crépis, la masse à mettre en œuvre par mètre carré n'est pas forcément la même selon le produit. Par exemple, un enduit à la chaux pourra être utilisé avec une faible épaisseur, ce qui n'est pas le cas d'un enduit ciment pour obtenir les mêmes performances d'étanchéité.

Caractéristiques des mortiers et crépis

Produits	kWh/kg	kWh/m ³
Enduit de glaise	0,178	320,5
Chape de ciment	0,356	604,4
Mortier à base d'anhydrite	0,392	665,8
Mortier de ciment + sable	0,444	755,6
Plâtre	0,481	865,0
Enduit à la chaux (sans adjonction de fibre ou de sable)	0,992	1 487,5
Enduit en matière synthétique	1,483	2 521,7
Mortier adhésif à base synthétique	6,944	11 111,1

Caractéristiques des lés d'étanchéité et feuilles de protection

Produits	kWh/kg	kWh/m ³
Papier kraft	9,167	5 958,3
Lé de bitume V60	12,417	14 403,3
Lé de bitume polymère EP4 flam	12,667	14 693,3
Lé d'étanchéité en bitume GV2	14,139	16 401,1
Lé de bitume VA4	15,083	17 496,7
Lé de bitume Alu80	15,278	17 722,2
Feuille de polyéthylène (LDPE)	25,417	23 891,7
Barrière de vapeur PE	25,444	23 917,8
Lé d'étanchéité EPDM	25,500	21 930,0
Voile de polyéthylène	27,083	25 187,5
Lé d'étanchéité aluminium	45,278	122 250,0

Nous terminerons par les revêtements de sol, afin d'évoquer aussi leur énergie grise et de remettre en place certaines certitudes. Du point de vue énergie grise, un plancher de chêne vaut mieux qu'un sol en pierre « polie ». Aussi, nous ferons abstraction des revêtements synthétiques et isolants, qui sont à proscrire, ne serait-ce que pour utiliser l'inertie des planchers.

Caractéristiques des revêtements de sol

Produits	kWh/kg	kWh/m ³
Bois massif épicéa/sapin/mélèze, séché à l'air, raboté	0,906	489
Bois massif hêtre, chêne, séché à l'air/en cellule, raboté	0,800	572
Bois massif épicéa/sapin/mélèze, séché en cellule, raboté	1,219	604
Dalle de pierre artificielle	0,419	734
Brique de terre cuite	0,783	783
Bois lamellé-collé	2,447	1 211
Bois lamellé-collé, résistant à l'eau	2,653	1 313
Panneau de bois massif 3 couches	3,028	1 635
Panneau de particules V20, pour l'intérieur	2,631	1 789
Panneau de particules V20, pour l'intérieur, enduit	3,000	2 040
Panneau d'aggloméré type OSB	5,028	2 378
Couche de couverture en asphalte	1,228	2 578
Panneau de particules V100, pour l'extérieur	3,833	2 607
Bois lamellé/multiplex	4,000	3 120
Panneau de particules dur	3,722	3 350
Bois lamellé/multiplex, résistant à l'eau	4,917	3 835
Asphalte coulé	2,094	4 817
Dalle de pierre naturelle coupée	2,331	6 409
Dalle de céramique	4,111	7 811
Verre plat	3,583	8 958
Dalle de pierre naturelle rectifiée	3,333	9 167
Dalle de pierre naturelle polie	4,167	11 458

10| PERFORMANCE DES VITRAGES

Il peut sembler surprenant d'accorder une telle importance au vitrage. Pourtant, dans une approche bioclimatique cherchant à valoriser au mieux les apports gratuits, le vitrage est la clé de tout, ce qui nous incite à nous y arrêter plus longuement.

On entend un peu tout et n'importe quoi au sujet des fenêtres double et triple vitrage. Le triple vitrage est-il la panacée en termes d'économies d'énergie ? Est-il adapté à la France métropolitaine ?

Afin de se forger l'opinion la plus objective possible, il est nécessaire d'entrer un peu dans la technique. Nous allons parler des menuiseries d'une façon générale, qu'il s'agisse de fenêtres, de baies vitrées ou de portes, que nous appellerons « fenêtres » pour simplifier.



Un vitrage est une source d'énergie avant d'être une surface de déperdition, pour peu que son intégration architecturale soit étudiée en conséquence. (Photo Philippe Buffard.)

LES COEFFICIENTS U

La performance énergétique d'une fenêtre est définie par un certain nombre de caractéristiques, dont la principale est la conductance thermique, le fameux coefficient U_w (« *w* » pour *window* – « fenêtre », en anglais). Le coefficient U_w est la caractéristique principale, mais c'est loin d'être la seule, et nombre de confusions sont créées par l'oubli des autres propriétés. Nous allons commencer par expliquer ce qu'est ce coefficient U_w , avant de nous intéresser aux autres caractéristiques.

Nous avons vu ce qu'est le coefficient U d'une paroi. Dans le cas d'une fenêtre, les choses se compliquent un peu, car plusieurs matériaux sont présents : le verre de la fenêtre, mais aussi le châssis lui-même, qui peut être en bois, en aluminium, en PVC, ou en un mélange de ces matériaux ou d'autres encore. Il y a aussi les joints entre vitres, les joints entre ouvrant et dormant, et ceux entre le vitrage et le châssis. La qualité de la jonction, entre la menuiserie et le mur qui la porte, a aussi une importance, de même que la qualité du gaz emprisonné entre les vitrages.

Les déperditions du verre s'expriment par le coefficient U_g (« *g* » pour *glass* – « verre », en anglais). Mais il faut y ajouter les pertes de la menuiserie U_f (« *f* » pour *frame* – « cadre », en anglais) ainsi que les pertes au niveau du contact entre ces deux composants (pertes linéaires Ψ_g). Le coefficient global U_w de la fenêtre découle de ces valeurs par une formule un peu complexe (somme des déperditions surfaciques et linéaires, divisée par la somme des surfaces). On constate déjà que les déperditions d'une fenêtre ne sont pas uniquement liées à la qualité du verre utilisé.

Cette fenêtre peut de plus être équipée de rideaux et de volets, ou d'un système équivalent, ce qui complique

encore le calcul. En fonction du type de volets employés, de leur qualité thermique et de leur étanchéité à l'air, de leur position ouverte ou fermée, ils vont limiter plus ou moins les déperditions (parfois les agraver s'ils sont mal dimensionnés ou mal installés, dans des coffres non isolés, par exemple). On calcule alors un nouveau coefficient U_{jn} , qui est la moyenne des coefficients U_w (volets ouverts) et U_{wn} (volets fermés). On s'éloigne encore un peu du simple coefficient U_g du verre.

FACTEUR SOLAIRE

Le facteur solaire (anciennement « S », maintenant « g ») d'un vitrage, avec ou sans protection, représente la proportion du « flux énergétique » (de la quantité de lumière solaire) que le vitrage et sa protection laissent passer, par rapport au flux énergétique incident. Le facteur solaire est la somme de la partie transmise du flux énergétique et de la partie absorbée réémise vers l'intérieur du local.

La partie réémise vers l'intérieur comprend deux éléments : une émission radiative (grande longueur d'onde), directement liée à la température de la surface intérieure de la vitre, et une émission convective, du fait des échanges thermiques (qui peuvent être déperditifs) entre l'air

de la pièce et la vitre. Ceux-ci sont plus importants si un effet de cheminée est créé avec la circulation naturelle de l'air entre un rideau, par exemple, et un vitrage.

Le calcul du facteur solaire d'une vitre est déterminé par la norme NF EN 13363.

Pour ne pas être en reste avec le coefficient U , la fenêtre, et surtout son vitrage, est dotée, en conséquence, d'une certaine capacité à laisser passer la lumière solaire. Dit autrement, vue de dehors, elle possède un effet miroir, qui renvoie au loin une partie de la lumière solaire reçue. Cet effet s'appelle le facteur solaire, noté « g ».

Le facteur solaire peut être corrigé en été ou en cas d'éblouissement par une protection solaire amovible :

Valeur moyenne de facteur solaire

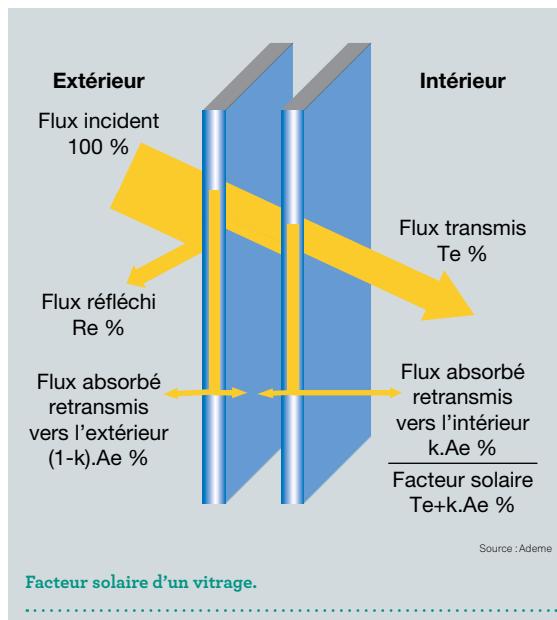
Type de protection solaire	Facteur solaire g
Vitrage seul standard	0,72
Tissu blanc	0,20
Avec lamelles orientables	0,13
Avec rideau déroulant	0,06

QUALITÉ THERMIQUE DE LA FENÊTRE

Enfin, pour compléter l'ensemble, la fenêtre est généralement plus ou moins encastrée dans les murs (vue de dehors), ce qui limite les apports solaires, en créant un ombrage partiel. Cet encastrement peut réduire de 0 à 20 % les apports solaires (environ 10 % pour un retrait de 20 cm). Il peut aussi agraver les pertes de chaleur s'il crée un pont thermique au niveau de l'isolation du mur.

Quel est l'effet de ces apports solaires ? Le premier est d'avoir une influence, surtout le matin et le soir, sur les besoins d'éclairage artificiel et donc de consommation électrique. Le deuxième est de permettre ou non à la lumière solaire de se convertir en chaleur dans la pièce éclairée.

Avant de revenir plus en détail sur les apports solaires, nous compléterons la liste par les influences externes de la performance énergétique de la fenêtre que sont son orientation (nord, sud, est, ouest), qui influence l'intensité de l'apport solaire, et son exposition à la pluie et au vent.



Notons que quand on parle d'apport solaire, on tient compte du rayonnement direct, mais aussi du rayonnement diffus. Par exemple, les nuages réfléchissent le rayonnement. C'est ce qui explique qu'une fenêtre au nord reçoit de la lumière et donc des apports solaires, y compris en hiver, contrairement à une (fausse) idée bien ancrée.

Et nous terminerons par un aspect trop souvent négligé, qui concerne la qualité de pose de la menuiserie, en particulier pour l'étanchéité à l'air ainsi que les ponts thermiques entre le dormant et le mur. Une pose mal faite peut, à elle seule, générer beaucoup plus de pertes que la menuiserie elle-même. Un interstice moyen de 1/10 de millimètre entre le mur et une fenêtre standard ($1 \times 1,3 \text{ m}^2$) crée l'équivalent d'un trou de 5 cm^2 dans le mur. Multipliez par le nombre de fenêtres de la construction et vous aurez une idée de l'effet d'une mauvaise mise en œuvre des menuiseries.

En résumé, les caractéristiques énergétiques d'une fenêtre sont déterminées par ses sources de déperditions :

- le vitrage : U_g ;
- la menuiserie : U_f ;
- la fenêtre complète : U_w ;
- les volets : U_{jn} ;
- le facteur solaire : S_w ;
- la transmission lumineuse : T_{lw} ;
- l'orientation ;
- les influences climatiques : vent, pluie, soleil ;
- la qualité de pose – étanchéité à l'air, ponts thermiques, encastrement ;
- la présence de voilage ou de rideaux, la propreté du verre...

Dans quelle proportion ces autres éléments vont-ils influer sur la performance globale ? C'est ce que nous allons examiner maintenant.

CALCUL DES APPORTS SOLAIRES

Hypothèses de base

L'analyse qui suit est une approche très partielle, sur le seul aspect d'un transfert théorique « statique » d'énergie, les aspects dynamiques des apports solaires seront abordés dans la partie suivante de l'ouvrage. Elle a pour seul objectif d'ouvrir des pistes de réflexion et d'éviter la

griserie de la technologie à outrance. Ne portant que sur l'aspect statique hivernal de la fenêtre, les calculs sont réalisés pour donner une meilleure idée de la puissance des apports solaires en comparaison avec l'isolation d'un vitrage. Il s'agit d'un calcul théorique, qui ne peut pas tenir compte de toutes les spécificités de chaque



La qualité d'une menuiserie tient principalement à celle de sa mise en œuvre : étanchéité à l'air, finition de la jonction avec le tableau, etc. Quant à la profondeur d'encastrement, elle devra être adaptée aux conditions climatiques et à la recherche ou non d'une protection solaire en été.

cas particulier, le but étant de donner des ordres d'idées pour une situation « normale ».

Nous listons ci-dessous l'ensemble des « critères » non pris en compte dans les calculs, et qui peuvent modifier les résultats. En particulier, dans le cas de maisons passives, une simulation thermique dynamique est indispensable, pour vérifier au cas par cas l'intérêt ou non d'une solution plutôt que d'une autre. Il y a de nombreuses limites dans l'étude, qu'il faut bien cerner pour ne pas aboutir à des généralisations trop rapides.

- Les résultats précis dépendent de la qualité de la menuiserie : il y a double vitrage et double vitrage, comme il y a triple vitrage et triple vitrage, de qualités très variables. L'étude prend en considération des menuiseries DV et TV de bonne qualité (du même fabricant).
- L'inertie thermique de la construction située derrière la fenêtre n'est pas considérée, car tous les apports solaires ne sont pas toujours récupérables. En particulier en région méditerranéenne, on ne va pas récupérer toute l'énergie solaire, parce que en journée en mi-saison les fenêtres seront souvent ouvertes... pour parfois remettre le chauffage en route le soir (problème d'inertie des bâtiments). Cette particularité est partiellement prise en compte en considérant uniquement les mois les plus froids de l'hiver.
- L'aspect confort thermique, lié aux températures de parois, et la baisse de température d'air envisageable si la température de paroi augmente, ne sont pas examinés : un simple vitrage (généralement installé sur une menuiserie ancienne peu étanche de surcroît) présente un effet de paroi froide, qui incite à remonter le thermostat ; les menuiseries sont souvent équipées de voilages ou de rideaux intérieurs.
- La perception du bruit à travers un vitrage n'est pas évoquée.
- L'énergie grise des menuiseries, des vitrages et des gaz rares d'isolation (argon, krypton...) n'est pas prise en compte dans le bilan énergétique.
- Il n'est pas fait de différenciation entre l'est et l'ouest, en particulier pour le confort, mais aussi en termes de luminosité le matin (brumes matinales).
- L'effet d'augmentation du U_w lié à la surface du cadre n'est pas non plus inclus dans l'étude puisque le raisonnement est basé sur le seul vitrage interne au châssis ; en réhabilitation, on change rarement le trou disponible ; un châssis plus gros implique donc moins de vitrage.

- La puissance thermique à fournir pour le chauffage n'est pas non plus évaluée (en BBC, des baies vitrées à triple vitrage permettent-elles de réduire suffisamment les pertes pour se passer d'un système de chauffage classique ?).
- Enfin, les comportements ne sont pas ou peu mentionnés, comme l'effet des volets qui restent en hiver fermés le jour ou, au contraire, ouverts la nuit.

Il y aura des cas particuliers où un triple vitrage sera intéressant, mais ce ne sera pas sur la base du « toujours plus ».

Les apports solaires sont principalement fonction de l'ensoleillement, de la surface de vitrage, du facteur d'ensoleillement et de l'orientation du vitrage.

Ils sont calculés par la formule suivante : $As = Sse \times E$, avec :

- As = apports solaires (en kWh)
- Sse = surface transparente sud équivalente en m^2 (nous allons revenir sur cette définition)
- E = ensoleillement reçu par une paroi vitrée verticale orientée au sud (en kWh/ m^2)

Nota : l'ensoleillement n'est pas uniquement la proportion de soleil visible directement ; même en présence de gros nuages, il reste de l'ensoleillement (de la lumière), sinon il ferait noir.

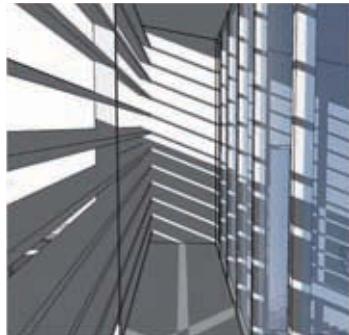
La surface transparente sud équivalente Sse est égale à $N \times A \times Sw \times Fe \times C1$,

où :

- N = nombre de parois vitrées identiques
- A = surface unitaire de la paroi en m^2 (A pour aire)
- Sw = facteur de transmission solaire de la paroi
- Fe = facteur d'ensoleillement (proportion d'ombrage créé par des obstacles liés au bâtiment et à l'environnement)
- $C1$ = coefficient d'orientation (sud = 1, est/ouest = 0,54, nord = 0,22)

Pour simplifier, une fenêtre se comporte par rapport au soleil comme si elle possédait une surface orientée au sud, réduite en fonction de ses caractéristiques. Elle est équivalente à une fenêtre parfaite, orientée plein sud, de plus petite taille.

Nous avons vu précédemment que l'on peut passer d'un coefficient U à la consommation en kilowattheures, en



Les apports solaires ne sont pas uniquement des calculs mathématiques, ce sont avant tout des caractéristiques architecturales parfaitement étudiées. (Architecte Jérôme Solari.)



utilisant les DJU. De la même façon, on peut calculer un coefficient U solaire à partir de ces DJU et du total des apports solaires As ; le coefficient U sera négatif, puisqu'apportant de l'énergie, et viendra en déduction du U du vitrage.

Caractéristiques climatiques

Nous allons faire des simulations pour différents lieux géographiques et diverses orientations des baies vitrées.

Nous avons retenu les grandes villes situées aux quatre points cardinaux de la métropole, représentatives des différents climats, en y ajoutant la station de Tignes, située à 2 100 mètres d'altitude dans les Alpes.

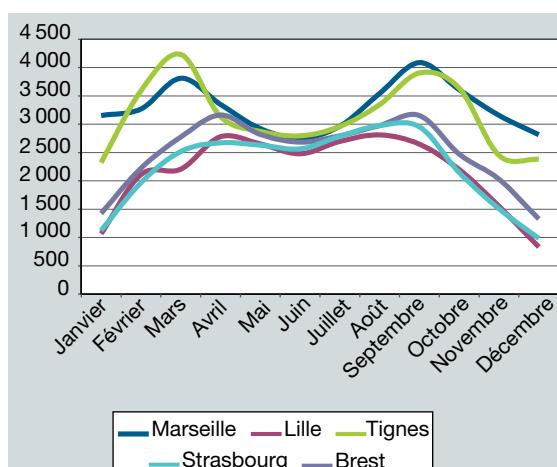
Les valeurs d'irradiation solaire et les températures (DJU) proviennent du site PVGIS de la Communauté européenne, que chacun peut consulter.

On constate que l'ensoleillement maximal se situe en mi-saison, avec des pics particulièrement marqués à Marseille et à Tignes. Cette courbe en double bosse peut surprendre, mais il faut se rappeler que le soleil est plus bas sur l'horizon en mi-saison, alors qu'il continue à briller fortement. Une fenêtre verticale recevra en conséquence plus de lumière, et donc de chaleur, aux équinoxes qu'au moment du solstice d'été. Et cela tombe bien. En été, l'ensoleillement est quasiment identique partout. En plein hiver, l'irradiation solaire est évidemment beaucoup plus forte en Provence et en altitude dans les Alpes.

Irradiation solaire annuelle

Mois	Irradiation cumulée (kWh/m ² .an)				
	Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Janvier	98	33	72	44	35
Février	92	59	100	62	55
Mars	118	68	131	86	78
Avril	101	83	94	95	80
Mai	91	82	89	87	81
Juin	83	74	84	81	77
Juillet	92	84	92	87	86
Août	110	87	104	92	92
Septembre	123	79	117	95	89
Octobre	112	68	113	77	67
Novembre	95	47	74	61	45
Décembre	87	26	74	41	31
Irradiation durant la saison de chauffe²³	371	385	864	389	310

23. La saison de chauffe est la saison durant laquelle un système de chauffage doit être mis en service (zones non grisées : périodes de chauffage prises en compte dans les calculs).



Irradiation journalière sur une surface verticale plein sud (Wh/m²).

Globalement, pour ce qui concerne l'ensoleillement, il y a très peu de différence entre Brest, Strasbourg et Lille. Mais ce qui est intéressant à noter, c'est qu'il y en a aussi très peu entre Marseille et Tignes. Nous allons là aussi y revenir.

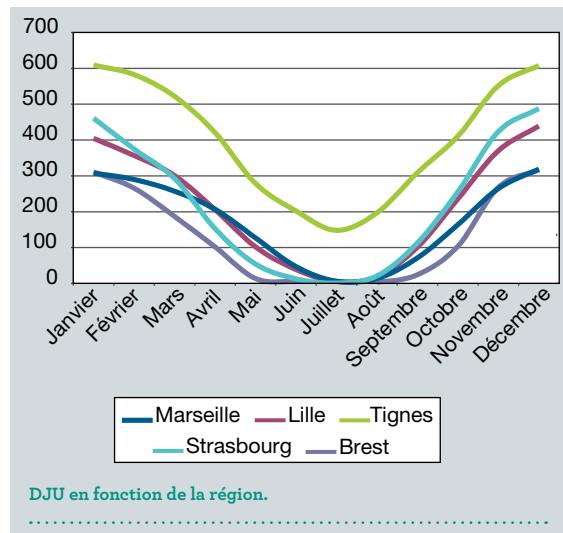
Pour ce qui concerne les températures, ou plutôt les écarts par rapport à une température de 18 °C (DJU), la station de Tignes ressort sans surprise du lot, comme le montre le graphique ci-contre.

Pour effectuer les simulations, nous avons pris comme principe (afin de ne pas favoriser l'ensoleillement) de limiter la saison de valorisation des apports solaires – saison de chauffe – aux mois présentant un cumul de DJU supérieur à 200, soit une température extérieure moyenne inférieure à 11 °C. Les mois non pris en compte dans le calcul sont grisés dans le tableau récapitulatif des DJU ci-dessous. En effet, en mi-saison, il n'est pas toujours facile de valoriser la totalité des apports si l'inertie est insuffisante, nous considérons donc qu'en mi-saison aucune valorisation n'est faite.

DJU mensuels par région

Degrés-jours base 18 °C

Mois	Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Janvier	311	405	609	308	461
Février	266	357	583	290	375
Mars	187	301	522	257	293
Avril	102	206	421	207	153
Mai	14	102	279	127	54
Juin	5	39	202	47	13
Juillet	2	5	148	6	1
Août	4	19	197	14	21
Septembre	24	101	309	71	113
Octobre	104	236	411	164	256
Novembre	268	370	552	265	424
Décembre	317	439	608	319	488
DJU chauffage	1 555	2 415	4 294	1 881	2 563



DJU en fonction de la région.

Consommation – simulation théorique

Une fois ces bases théoriques posées, il est possible d'aborder de façon objective les qualités d'une fenêtre et de s'interroger sur les *a priori* et les certitudes énoncées par certains fabricants et autres lobbies.

Nous allons passer à l'exercice pratique. Prenons des fenêtres de qualité variable, en simple, double et triple vitrage.

Nous ferons abstraction des polémiques relatives au(x) matériau(x) employé(s) pour le châssis, que nous allons régler rapidement. Le coefficient Uf (s'il s'agit d'une menuiserie de bonne qualité) intervient pour environ 10 % dans la qualité globale d'une fenêtre, donnée par son Uw (et deux à trois fois moins s'il s'agit d'une baie vitrée). En fonction du matériau employé, le Uf, spécifique au cadre, peut varier d'environ 10 % à 30 % selon la taille du vitrage concerné. Sur le Uw global, cela ne représente plus que 1 à 3 % environ de variabilité, ce qui est inférieur à la précision de la mesure du Ug, et complètement négligeable par rapport aux pertes pouvant être générées par une mauvaise pose, par exemple. Il faut donc se préoccuper de la jonction entre la menuiserie et le mur, pas de la menuiserie elle-même.

La valeur « S » est le facteur solaire du verre, c'est-à-dire sa capacité à laisser passer la lumière.

Les valeurs des DV et TV sont celles d'un fabricant réputé de menuiseries de qualité. Nous avons volontairement pris une fenêtre simple vitrage de très mauvaise qualité.

Coefficients moyens des différents types de vitrages

	Ug	S _o
Simple vitrage	5,7	0,9
DV simple	3	0,75
DV argon de base	1,5	0,7
DV argon haute qualité	1,2	0,7
TV argon haute qualité	0,5	0,5

Pour simplifier, nous ferons dans un premier temps les simulations avec un unique vitrage de 1 m², sans ombages portés, dont les vitres sont parfaitement propres. Nous parlons bien d'une surface unitaire de « vitrage », pas d'une surface de fenêtre. Peu importe donc l'épaisseur du châssis (dans la pratique, si on remplace un double vitrage par un triple, on perd un peu en surface vitrée, cette méthode favorise donc le triple vitrage). Les résultats comparatifs travaillant sur une surface standard de 1 m² seront strictement identiques, quelle que soit la surface de vitrage réellement installée. Nous considérons pour l'instant que le vitrage est posé à fleur de la surface extérieure des murs et donc qu'il n'y a pas de masque lié au tableau de la fenêtre (fenêtre théorique parfaite). Nous prenons un facteur de transmission solaire réduit

à 85 % afin d'intégrer les pertes liées à l'incidence et de défavoriser clairement les apports solaires.

Hypothèses de base

N = nombre de parois vitrées identiques	1
À = surface unitaire de la paroi	m ²
S ₁ = facteur de transmission solaire (propreté)	0,85
Fe = facteur d'ensoleillement (obstacles)	1
C ₁ = coefficient d'orientation (nord = 0,22 - est/ouest = 0,54)	règles TH-BV 2.1.2
S _{se} = N × À × S × Fe × C ₁	
C ₁ : règles TH-BV 2.1.2	

Le coefficient d'orientation C₁ est pris sur la base des règles TH-BV 2.1.2. Il représente l'équivalent plein sud de la lumière reçue en fonction de l'orientation. Nous le ferons varier selon l'orientation du vitrage.

Nous donnons ci-dessous le principe et les résultats de calcul pour une orientation plein sud pour un simple vitrage. Chacun pourra, s'il le souhaite, refaire les calculs et vérifier les résultats dans chaque autre situation.

Détail du calcul pour un simple vitrage

	Ug simul	S _o	Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	5,7	0,9					
Orientation sud							
Apports solaires théoriques	kWh/m ²	371,5	384,7	864,3	389,2	310,3	
Surface apparente S _{se} = N × À × S × Fe × C ₁	m ²	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	
Apports solaires réels	kWh/m ²	284,2	294,3	661,2	297,7	237,4	
Nombre d'heures de chauffe	h	5 000	5 800	6 550	5 800	5 800	
DJU base 18°	°DJU	1 162,0	2 314,0	4 294,0	1 646,0	2 297,0	
DJU base 19°	°DJU	1 370,3	2 555,7	4 566,9	1 887,7	2 538,7	
Coefficient U solaire apparent	W/m ² .K	- 8,64	- 4,80	- 6,03	- 6,57	- 3,90	
Coefficient Ug vitrage	W/m ² .K	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	
Coefficient U résultant (pertes - apports)	W/m ² .K	- 2,94	0,90	- 0,33	- 0,87	1,80	
Apports solaires réels	kWh/m ²	- 284,2	- 294,3	- 661,2	- 297,7	- 237,4	
Déperditions vitrage	kWh/m ²	187,5	349,6	624,8	258,2	347,3	
Consommation vitrage	kWh/m²	- 96,7	55,3	- 36,4	- 39,5	109,9	

Voyons maintenant comment réagit ce vitrage, simple, double ou triple, avec ou sans argon (ou krypton ou autre gaz rare), en fonction de sa qualité, de sa situation géographique et de son orientation, dans une maison chauffée à 19 °C (on pourrait prendre une autre température de chauffage, mais cela ne changerait pas grand-chose aux conclusions). Les matheux pourront s'amuser à vérifier les résultats, sur la base de ce qui a été expliqué ci-dessus.

Premier constat, immédiat, servant de rappel : en France, à l'exception des régions nord et est, un vitrage orienté au sud sans masques, même simple, présente un bilan énergétique positif : il fait pénétrer dans le bâtiment plus

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au sud

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	– 96,7	55,3	– 36,4	– 39,5	109,9
DV simple	kWh/m ²	– 138,2	– 61,2	– 222,1	– 112,2	– 15,1
DV argon de base	kWh/m ²	– 171,7	– 136,9	– 349,8	– 163,6	– 93,3
DV argon haute qualité	kWh/m ²	– 181,6	– 155,3	– 382,7	– 177,2	– 111,5
TV argon haute qualité	kWh/m ²	– 141,4	– 132,8	– 312,5	– 142,7	– 101,4

Consommation de 1 m² de vitrage orienté est ou ouest

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	34,0	190,7	267,7	97,5	219,1
DV simple	kWh/m ²	– 29,2	51,6	31,3	1,9	75,9
DV argon de base	kWh/m ²	– 70,0	– 31,6	– 113,3	– 57,1	– 8,3
DV argon haute qualité	kWh/m ²	– 79,9	– 50,0	– 146,2	– 70,7	– 26,6
TV argon	kWh/m ²	– 68,8	– 57,6	– 143,5	– 66,7	– 40,8

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au nord

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	124,9	284,9	479,3	192,7	295,1
DV simple	kWh/m ²	46,6	130,1	207,6	81,3	139,3
DV argon de base	kWh/m ²	0,7	41,6	51,3	17,0	50,8
DV argon haute qualité	kWh/m ²	– 9,2	23,2	18,4	3,4	32,5
TV argon	kWh/m ²	– 18,3	– 5,3	– 26,0	– 13,7	1,4

d'énergie qu'il n'en perd (évidemment, on fait beaucoup mieux avec un double vitrage).

Deuxième constat : pour une orientation comprise entre l'est et l'ouest, en passant par le sud, toujours à l'exception des régions nord et est, le triple vitrage détériore la situation par rapport à un double vitrage de haute qualité. Et notre regard interrogateur s'oriente aussitôt vers les pays germaniques et nordiques qui mettent en avant l'avantage du triple vitrage. En France, en dehors du quart nord-est du pays, il y a souvent trop de soleil pour justifier un triple vitrage (sans masque) ailleurs que vers le nord.

On notera qu'à Marseille un triple vitrage sans masque orienté au sud totalise en hiver un bilan énergétique à peine meilleur qu'un double vitrage de type ancien.

Seule une orientation plein nord donne un bilan énergétique favorable pour le triple vitrage. En région méditerranéenne, le triple vitrage n'offre pas de réel intérêt

énergétique et peut même s'avérer défavorable pour les fenêtres au sud.

Nous allons nous répéter : il s'agit d'une fenêtre parfaite, alignée sur la face extérieure du mur, sans aucun masque, mais très sale.

Consommation – simulation en situation classique

Dans une construction de style français, la plupart du temps, les fenêtres sont encastrées dans leur tableau (en retrait par rapport au mur), ce qui crée des masques solaires. Elles sont équipées de volets (à condition de les utiliser évidemment), et pour ne pas favoriser le soleil encore une fois, nous estimerons qu'elles sont sales.

Nous considérons que le facteur jour-nuit est de 80 % (volets de qualité moyenne), celui de propreté de 85 % (vitres très sales), et celui d'ensoleillement (masques) de 80 %. Puis nous relançons les mêmes calculs :

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au sud

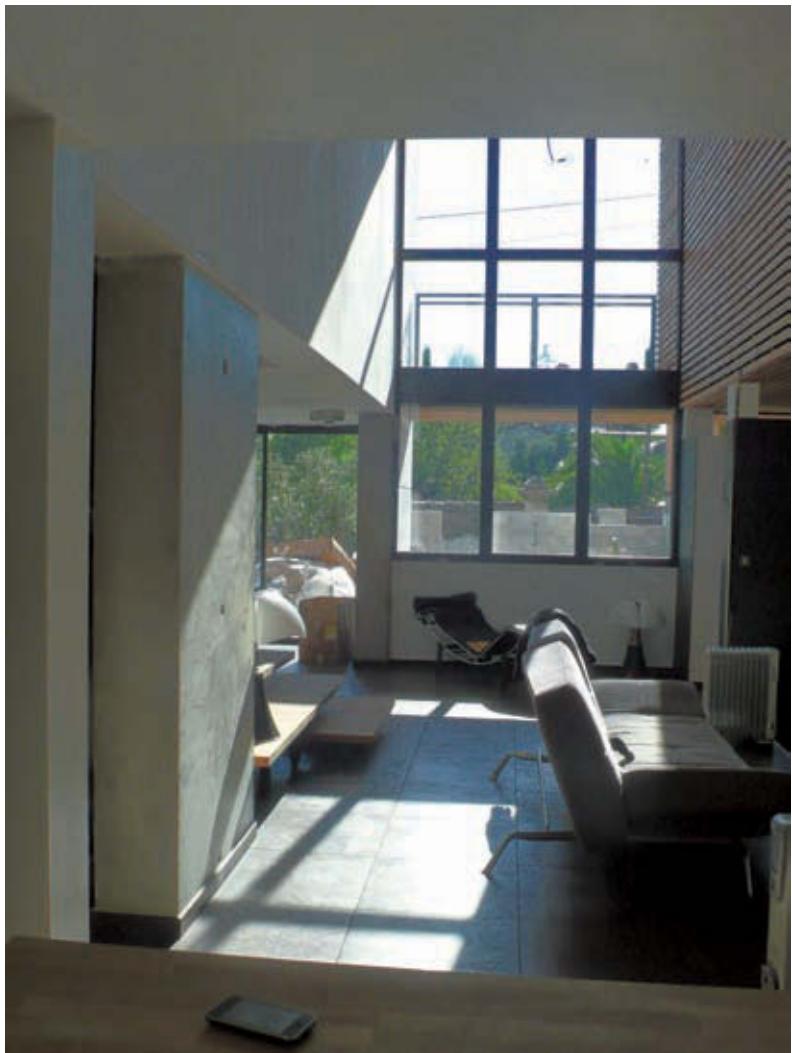
		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	- 77,4	44,3	- 29,1	- 31,6	87,9
DV simple	kWh/m ²	- 110,5	- 49,0	- 177,7	- 89,7	- 12,0
DV argon de base	kWh/m ²	- 137,4	- 109,5	- 279,9	- 130,9	- 74,6
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 145,3	- 124,2	- 306,2	- 141,7	- 89,2
TV argon	kWh/m ²	- 113,2	- 106,3	- 250,0	- 114,2	- 81,1

Consommation de 1 m² de vitrage orienté est ou ouest

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	27,2	152,6	214,2	78,0	175,3
DV simple	kWh/m ²	- 23,4	41,3	25,0	1,6	60,8
DV argon de base	kWh/m ²	- 56,0	- 25,3	- 90,6	- 45,7	- 6,7
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 63,9	- 40,0	- 116,9	- 56,5	- 21,3
TV argon	kWh/m ²	- 55,1	- 46,1	- 114,8	- 53,3	- 32,6

Consommation 1 m² de vitrage orienté au nord

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	100,0	227,9	383,4	154,2	236,0
DV simple	kWh/m ²	37,2	104,0	166,1	65,1	111,4
DV argon de base	kWh/m ²	0,6	33,3	41,0	13,6	40,6
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 7,3	18,6	14,7	2,7	26,0
TV argon	kWh/m ²	- 14,6	- 4,2	- 20,8	- 11,0	1,2



Un vitrage doit être envisagé comme une source de lumière et d'énergie, pas comme une source de déperdition. Dans cette construction, le puits de lumière reliant les deux niveaux est conçu pour apporter lumière intense et chaleur en hiver. En avançant vers la saison chaude, les masques solaires vont progressivement atténuer ces apports directs, ne laissant plus pénétrer qu'une lumière indirecte diffusant dans les différents volumes.

(Architecte Jérôme Solari.)

Dans cette nouvelle situation, moins favorable aux apports solaires, plus proche d'une situation type logement, on retrouve les mêmes conclusions : quel que soit le lieu géographique, seule une orientation au nord peut

réellement justifier un triple vitrage. Pourquoi ? Le gain apporté par les volets la nuit suffit à compenser les pertes par les masques et la saleté. On notera au passage qu'une fenêtre double vitrage à l'argon, orientée plein nord à Marseille, si elle reçoit bien la lumière, peut encore présenter un bilan énergétique positif (si elle ne reçoit pas la lumière, mieux vaut la mure).

La mise en œuvre de volets de bonne qualité et/ou des vitres propres peuvent très largement compenser un triple vitrage. La recherche sur la qualité thermique des volets serait beaucoup plus efficace que celle sur les triples vitrages, vu la marge de progrès possible sur ce sujet : un bon volet devrait agir comme un isolant.

On peut étendre la simulation en tenant compte avec précision des masques du tableau, de la qualité de la menuiserie et de celle de la pose. Les conclusions resteront globalement les mêmes : compte tenu du surcoût important d'un triple vitrage, mieux vaut investir d'abord dans d'autres actions qui auront facilement un meilleur impact sur la consommation globale de la construction.

Par exemple, équiper les immeubles de bureaux de volets automatiques est beaucoup plus performant que de les munir de triples vitrages, d'autant qu'ils peuvent aussi servir pour réduire, voire annuler les besoins de climatisation en été. Supprimer les fenêtres au nord et les augmenter au sud l'est également. Baisser de 1 °C la température de chauffage et mettre un pull réduit les besoins globaux en chauffage de 7 %.

Pourquoi aller chercher un gain aléatoire, minime s'il existe, avec des triples vitrages, alors qu'il y a tant à faire de manière efficace ailleurs ?

Consommation – simulation en situation fortement masquée

Le bâtiment peut se situer en ville, dans une ruelle étroite, ou faire face à une montagne, ou avoir des arbres feuillus en hiver devant ses fenêtres. Nous allons donc faire une dernière simulation extrême, en gardant notre fenêtre encastrée dans le mur, avec un vitrage sale, mais en considérant que les masques solaires sont de 50 % : en clair, cela veut dire que le vitrage sera dans un noir quasi absolu la moitié de la journée ou qu'il ne recevra que la moitié de la lumière disponible. Serait-il encore utile de parler de développement durable et de confort dans une situation qui serait pire que celle-là ?

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au sud

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	7,9	132,6	169,2	57,7	159,1
DV simple	kWh/m ²	- 39,5	24,6	- 12,4	- 15,3	47,3
DV argon de base	kWh/m ²	- 71,1	- 40,8	- 125,6	- 61,4	- 19,2
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 78,9	- 55,6	- 151,9	- 72,3	- 33,8
TV argon	kWh/m ²	- 65,8	- 57,2	- 139,8	- 64,6	- 41,6

Consommation de 1 m² de vitrage orienté est ou ouest

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	73,2	200,2	321,3	126,2	213,7
DV simple	kWh/m ²	15,0	81,0	114,3	41,7	92,8
DV argon de base	kWh/m ²	- 20,2	11,8	- 7,3	- 8,2	23,3
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 28,1	- 2,9	- 33,6	- 19,0	8,6
TV argon	kWh/m ²	- 29,5	- 19,6	- 55,3	- 26,5	- 11,2

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au nord

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	118,7	247,3	427,1	173,8	251,7
DV simple	kWh/m ²	52,9	120,2	202,4	81,4	124,5
DV argon de base	kWh/m ²	15,2	48,4	75,0	28,9	52,8
DV argon haute qualité	kWh/m ²	7,3	33,7	48,7	18,0	38,2
TV argon	kWh/m ²	- 4,2	6,6	3,4	- 0,1	9,9

Même dans une situation extrême, où le vitrage ne reçoit que très peu de soleil, le triple vitrage présente très peu d'intérêt à Marseille, sauf peut-être plein nord. Quitte à se répéter : une fenêtre plein nord masquée à 50 %, mieux vaut la murer !

Ailleurs, le triple vitrage présente un certain intérêt pour les orientations autres qu'au sud, pour peu que le reste de la construction soit à l'avenant en termes de qualité. Mais même en BBC, il y aura peut-être, pour le même prix, mieux à faire dans un premier temps pour obtenir des gains énergétiques.

C'est lorsqu'on commence à parler de construction passive qu'on peut envisager un éventuel triple vitrage. Mais vouloir construire avec un objectif « passif », quand la

construction subit 50 % de masque solaire sur ses fenêtres, est-ce bien raisonnable ? Sur-isoler parce qu'on est incapable de valoriser le soleil, c'est chercher une réponse technologique à une incohérence de fond. Le résultat pourra peut-être, en y mettant le prix, être passif, mais il sera beaucoup plus difficilement « durable ».

Comparaison avec un mur

Nous avons parlé de vitrages plus ou moins transparents à la lumière. Poussons le raisonnement au bout et voyons ce qu'il arrive avec un mur.

Un mur reçoit également du soleil. S'il ne parvient pas aussi bien qu'une vitre à convertir l'énergie reçue en chaleur (nous n'évoquerons pas pour l'instant le cas du mur

Trombe), il reste intéressant de regarder ce qu'il se passe quand on remplace une fenêtre par un mur.

La comparaison, tout en étant hasardeuse, n'est pas dénuée d'intérêt. Mais un mur, encore plus qu'une fenêtre, est un objet dynamique, avec une inertie. Le calcul qui suit fait totalement abstraction de cet aspect, il n'a pour objectif que de donner des ordres de grandeur de comparaison.

Selon toujours les mêmes règles TH-BV 2.1.2, un mur convertit l'énergie solaire reçue à hauteur de 1 à 2 %²⁴. Cette valeur se traduit par un coefficient solaire S compris entre 0,01 et 0,02, qui dépend principalement de la teinte du mur. C'est très faible par rapport à une fenêtre, bien sûr. Nous choisirons un facteur solaire moyen de 0,015.

Nous ferons la simulation pour différents types d'isolation posée sur un mur béton de 20 cm (c'est quasiment la même chose pour toute paroi lourde : moellon, pierre...):

Coefficients moyens des différents types de mur

	U	S_o
Mur béton nu de 20 cm	8,75	0,015
Mur béton 20 cm + isolant 5 cm	0,61	0,015
Mur béton 20 cm + isolant 10 cm	0,32	0,015
Mur béton 20 cm + isolant 15 cm	0,21	0,015
Mur béton 20 cm + isolant 20 cm	0,16	0,015

Étudions d'abord le cas d'un mur orienté plein sud, avec un faible ombrage ($Fe = 0,8$):

Consommation de 1 m² de mur orienté au sud

	Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Mur béton nu de 20 cm	kWh/m ²	282,2	530,9	946,1	390,6
Mur béton 20 cm + isolant 5 cm	kWh/m ²	14,6	31,9	54,3	22,0
Mur béton 20 cm + isolant 10 cm	kWh/m ²	4,9	13,7	21,9	8,6
Mur béton 20 cm + isolant 15 cm	kWh/m ²	1,5	7,4	10,6	3,9
Mur béton 20 cm + isolant 20 cm	kWh/m ²	- 0,2	4,2	4,8	1,5
					5,2

On observe qu'à Marseille et même à Brest à la limite, un mur orienté au sud, sans ombrage, correctement isolé (20 cm d'isolant) présente un bilan énergétique relativement neutre. Comment cela est-il possible ? Il ne faut pas oublier que les déperditions d'un mur sont proportionnelles à la différence de température entre ses deux faces. Dès que le soleil arrive à chauffer la surface du mur au-dessus de la température intérieure, l'échange thermique s'inverse et le mur « injecte » de la chaleur dans le bâtiment, ou à tout le moins arrête

d'en perdre. Pour améliorer cet effet, il faudrait utiliser une teinte de mur foncée (du bois, par exemple). Mais attention au revers de la médaille en été ! Un mur sombre devra être parfaitement protégé du soleil à la saison chaude, y compris de la lumière diffuse. C'est un autre sujet, à traiter séparément en profondeur, mais ce court aperçu montre que l'on peut imaginer, en utilisant quelques techniques adaptées, créer des murs non déperditifs, et même générateurs d'énergie totalement gratuite.

24. On peut avec raison discuter de ces coefficients TH-BV, mais en l'absence d'autre référence pertinente en la matière, nous en resterons dans l'immédiat à ces valeurs admises. Il serait sûrement intéressant de pouvoir un jour relever des mesures réelles de conversion en instrumentant un mur, et il est étonnant que personne ne l'ait encore fait.

Nous rappelons qu'il n'est pas pris en compte à ce niveau l'aspect de l'inertie du mur, ni les flux hydrauliques en son sein, qui impliquent des calculs et des résultats bien plus complexes.

Pour en revenir à nos fenêtres, voyons ce qu'il se passe cette fois avec un mur orienté au nord, toujours avec un faible ombrage, par rapport à une menuiserie sur ce même mur :

Consommation de 1 m² de mur orienté au nord

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Mur béton nu de 20 cm	kWh/m ²	286,5	535,4	956,2	395,1	532,1
Mur béton 20 cm + isolant 5 cm	kWh/m ²	19,0	36,4	64,4	26,5	36,4
Mur béton 20 cm + isolant 10 cm	kWh/m ²	9,2	18,2	32,0	13,1	18,4
Mur béton 20 cm + isolant 15 cm	kWh/m ²	5,8	11,9	20,7	8,4	12,1
Mur béton 20 cm + isolant 20 cm	kWh/m ²	4,1	8,7	14,9	6,1	8,8

Consommation de 1 m² de vitrage orienté au nord

		Marseille	Lille	Tignes	Brest	Strasbourg
Simple vitrage	kWh/m ²	100,0	227,9	383,4	154,2	236,0
DV simple	kWh/m ²	37,2	104,0	166,1	65,1	111,4
DV argon de base	kWh/m ²	0,6	33,3	41,0	13,6	40,6
DV argon haute qualité	kWh/m ²	- 7,3	18,6	14,7	2,7	26,0
TV argon	kWh/m ²	- 14,6	- 4,2	- 20,8	- 11,0	1,2
Mur béton nu de 20 cm	kWh/m ²	286,5	535,4	956,2	395,1	532,1
Mur béton 20 cm + isolant 5 cm	kWh/m ²	19,0	36,4	64,4	26,5	36,4

Même à Tignes, un simple vitrage au nord, sans ombrage, consomme trois fois moins qu'un mur de béton nu. Pour faire mieux qu'un simple vitrage, il faut isoler le mur. Partout, pour peu qu'il n'y ait pas d'ombrage ou qu'il y en ait peu, il est infinitement plus efficace d'isoler les murs que de changer les menuiseries. Pourtant, depuis trente ans, on incite chacun à changer ses menuiseries, mais on ne parle toujours pas (ou si peu) du besoin impératif d'isoler les murs dans 75 % de l'existant. On explique que les menuiseries représentent le principal poste de déperdition, alors que, si l'on tient compte des apports solaires, cela peu rapidement devenir totalement faux. Combien de logements aujourd'hui ont des doubles vitrages mais des murs en béton sans isolant !

Certes, toutes les fenêtres ne bénéficient pas d'un ensoleillement complet à longueur de journée, surtout en ville.

Il n'y a pas de solution universelle, et il faut faire avec nos villes et leurs nombreux défauts urbanistiques, et surtout bioclimatiques. Mais il y a du soleil, partout en France, beaucoup plus qu'on ne le croit.

Énergie grise

Nous avons déjà évoqué cette notion d'énergie grise au sujet des matériaux de construction.

Le coût énergétique d'une menuiserie double vitrage faiblement émissive, rapportée à une surface unitaire de 1 m², est compris entre 330 (bois de pin), 400 (PVC) et 415 (chêne) kWh/an, pour une durée de vie estimée à trente ans, soit de 11 à 14 kWh/m².an. Il n'y a pas à ce jour de données disponibles relatives aux menuiseries aluminium en France. Selon l'office suisse KBOB, leur bilan en

énergie grise est environ le double de celui d'une menuiserie PVC, soit dans les 27 kWh/m².an.

Il n'existe pas encore non plus d'évaluation sur les menuiseries triple vitrage, du fait de leur apparition récente. En première approximation, on peut considérer qu'elle sera d'environ 50 % supérieure (un verre de plus, double isolant entre verres, châssis plus large...).

Pour mener une comparaison pertinente entre double et triple vitrage, il faudrait en conséquence, et en toute logique, déduire de l'écart d'énergie des tableaux ci-avant cette énergie grise annuelle, soit un gain de consommation annuel inférieur de 5 à 13 kWh/m² de vitrage, suivant le matériau de la menuiserie, ce qui réduirait d'autant l'intérêt du triple vitrage.

CONCLUSIONS

La démonstration qui précède n'est pas applicable telle quelle à une maison passive, car elle fait trop abstraction de phénomènes négligeables sur une construction ancienne (voir RT 2005) mais qui deviennent prépondérants en passif. Il faut alors faire des études au cas par cas. La situation pourra parfois inciter au triple vitrage, comme elle pourra à un autre moment le déconseiller complètement :

- On doit adapter la qualité de la menuiserie à la qualité générale du bâtiment. Le triple vitrage ne peut être envisagé que dans des projets de très haute qualité énergétique, lorsqu'ont déjà été pris en compte tous les autres aspects d'inertie, de gestion des apports



Une menuiserie ne vaut que par l'adaptation de sa forme, de son orientation, de sa protection solaire en été et de sa capacité en hiver à laisser pénétrer le soleil en fonction de l'usage du local qu'elle éclaire. Dans cette construction s'adaptant aux saisons, si la pièce en hauteur a été conçue pour recevoir lumière et chaleur le soir par sa porte-fenêtre, les pièces du bas sont amplement protégées par des protections solaires denses pour assurer leur fraîcheur estivale. En saison froide, la partie haute assurera une chaleur confortable, en saison chaude, c'est au rez-de-chaussée que sera maintenue une fraîcheur recherchée. Adossée à une restanque naturelle, la construction est protégée du mistral en toute saison. Des arbres persistants protègent le côté nord, tandis qu'au sud des arbres à feuillage caduc assurent l'ombrage estival et la clarté hivernale.

solaires, de ventilation, d'énergie grise, en bref les autres aspects d'un projet « durable ».

- En région méditerranéenne, le triple vitrage, technologie de pays froids, ne présente en général que peu d'intérêt énergétique, même pour des vitres très sales, quelles que soient les conditions de pose. Son utilisation a de fortes chances de détériorer les qualités énergétiques de la construction, même si elle est mal conçue.
- Ailleurs qu'en région méditerranéenne, le triple vitrage pourrait éventuellement se justifier pour des projets de construction neuve, sur les menuiseries orientées au nord.

Mais avant d'investir dans un triple vitrage plein d'énergie grise, il peut être utile de se poser la question de solutions alternatives plus efficaces :

- La bonne gestion des apports solaires en hiver a un impact beaucoup plus fort que la qualité du vitrage. L'intelligence architecturale (bioclimatique) primera toujours sur la qualité technique des matériaux.
- Une construction bien conçue doit prévoir au moins 50 % de vitrage au sud, 20 % à l'est, autant à l'ouest, et au plus 10 % au nord. Les calculs ci-dessus expliquent pourquoi. La suppression des vitrages au nord et leur augmentation au sud est LE choix à faire.
- En France métropolitaine, en dehors du quart nord-est, un simple vitrage orienté plein sud et sans ombrage majeur présente toujours un bilan énergétique positif, pour peu qu'on valorise les apports solaires (un double vitrage aura bien sûr un meilleur bilan). Ce n'est quasiment jamais le cas d'un mur, même isolé. Dit autrement, un vitrage avec volets (utilisés), même en simple

vitrage, orienté entre le sud-est et le sud-ouest, sans ombrages, « ne consomme pas d'énergie » en hiver si le bâtiment est bien conçu.

- En zone méditerranéenne, un double vitrage de qualité, avec volets (fermés la nuit évidemment), sans ombrage, présente un bilan énergétique positif, quelle que soit son orientation.
- Construire une façade sud totalement vitrée, sans ombrages, est un bon choix énergétique pour l'hiver, y compris en très haute altitude (il faudra s'assurer, surtout près de la Méditerranée, que la surface vitrée est entièrement ombrée en été).
- Dans une construction de bonne performance énergétique, ce vitrage au sud peut suffire à lui seul pour fournir la totalité des besoins énergétiques de la construction, pour peu que l'on sache gérer son inertie.
- Dans l'ancien, plutôt que de mettre des triples vitrages, il faut commencer par améliorer la qualité des volets permettant de renforcer l'isolation de nuit et surtout donner la priorité aux murs.
- Dans le neuf, il faut impérativement chercher la valorisation des apports solaires d'hiver par l'orientation des vitrages, par la gestion des masques solaires et la prise en compte des apports d'été, et (sauf cas particulier) par l'inertie intérieure permettant de stocker sans surchauffe les apports de la journée en hiver et la fraîcheur de la nuit en été.

Les économies d'énergie passent par les formes architecturales et les comportements humains avant de se faire par les matériaux. Un bâtiment bioclimatique ne se construit pas avec de la technologie, mais avec le soleil.



TROISIÈME PARTIE

SOLUTIONS DE BIOCLIMATISME

1| LES OUTILS DU BIOCLIMATISME

Il est, somme toute, assez facile de construire un bâtiment zéro énergie, les techniques existent et sont parfaitement maîtrisées pour la plupart. Ce qui manque surtout aujourd’hui, c’est la volonté d’y parvenir.

Vouloir construire bioclimatique est une décision forte ; encore faut-il s’en donner les moyens. Aussi, avant de



Verbatim

On aime ou on n'aime pas Rudy Ricciotti, architecte décalé amoureux du béton. Mais l'homme a la qualité de ne pas se laisser enfermer dans les styles normatifs, et il n'a pas la langue dans sa poche : « *Il y a lieu en urgence d'engager une réflexion critique autour de la question environnementale et des conséquences de la doctrine HQE et des normes sur les économies d'énergie. Chaque professionnel peut témoigner tristement d'inepties et de paradoxes sur la règle et la lettre. Aucune expertise sérieuse n'a été faite sur l'application aveugle de celles-ci au point d'ignorer l'essentiel, c'est-à-dire les bilans carbone et bilans énergie grise.* » Il poursuit : « ... Qui se préoccupe du prix environnemental à payer ? Le bilan carbone, énergie grise ou consommation d'eau du suréquipement technologique, utile à la gadgetisation des réponses, montre alors des résultats critiquables. Un processus global d'escroquerie intellectuelle est en place sans contre-expertise. » Et de conclure : « *Est-il possible de protester sans paraître outrancier avant fermeture définitive de la raison ?* »

parler de solutions, nous allons commencer par faire le tour des outils à notre disposition.

LA DÉMARCHE ENVIRONNEMENTALE

Pour mener à bien un projet bioclimatique, il ne suffit pas de se fixer deux ou trois cibles prioritaires qui vont permettre de croire que l'on peut se passer du reste. Un projet cohérent doit être en mesure d'aborder l'ensemble des sujets relatifs à la performance environnementale d'un bâtiment, et qui sont :

- le confort et la santé des futurs occupants, sans lesquels le bâtiment n'a plus de sens. Croire que l'architecture se résume à la signature extérieure de la construction est faire preuve d'un profond mépris pour ceux qui vont utiliser le bâtiment ;
- les économies et la sobriété d'usage, qui incluent l'énergie grise de la construction, la couverture de ses besoins en énergie et en eau tout au long de sa vie. La réponse se trouve dans la valorisation de ce que nous offre la nature, la pluie et le soleil en particulier, qui ne doivent pas être considérés comme des contraintes à vaincre, mais comme des atouts à valoriser avec intelligence ;
- les matériaux et le chantier : utiliser avec parcimonie la matière disponible localement, sans détruire l'écologie des sites, valoriser le recyclage de ce qui peut l'être, tout concourt à ce que la construction d'un bâtiment ne soit plus une nuisance, mais un apport à l'économie (par la création de richesse locale), à la vie sociale (par la création de travail) et à l'environnement (par la création de puits de carbone et la protection de la biodiversité) ;

- enfin, à ces moyens, il ne faut pas oublier d'ajourner en préalable une méthode de conception adaptée, qui ne place pas la charrue avant les bœufs, et donne à l'architecte les moyens de concevoir sa création dans un cadre respectueux de la société humaine.



L'ensemble doit pouvoir se faire sans surcoût inutile et en laissant un maximum de liberté à l'équipe de conception et à ses capacités d'innovation. Il ne s'agit donc en aucun cas de travailler sur la base d'un référentiel qui se transformera en carcan coûteux et paralysant, mais de bénéficier d'un guide de progrès permettant toutes les libertés dans la traduction des objectifs proposés.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONDUITE DE PROJETS

En matière de décision dans un objectif de bioclimatisme, « le plus tôt, c'est le mieux ». Cela signifie que les bonnes questions doivent être posées largement avant que l'architecte n'attrape son crayon, avant la rédaction du programme fonctionnel, avant même le choix du terrain, lorsque c'est envisageable. Plus tôt sera rédigé le cahier des charges environnemental du futur bâtiment, plus grandes seront les chances d'aboutir à un résultat performant sans surcoût inutile. Il faut impérativement être persuadé que dès que l'architecte commence à dessiner

L'union fait la force

En région PACA, l'ensemble des acteurs du bâtiment, collectivités publiques, maîtres d'ouvrage publics et privés, architectes, ingénieurs, fédérations de professionnels, entreprises, organismes de formation... se sont réunis au sein de l'association Bâtiments durables méditerranéens (qui est un PRIDES – pôle régional d'innovation et de développement économique solidaire) afin de construire et progressivement de perfectionner un outil, la « démarche BDM » : <http://polebdm.eu>.



le projet, il est trop tard pour revenir sur des oubliés. Or si on confie classiquement à l'architecte, à travers son esquisse, le rôle préalable, on peut être en droit de se demander si cela relève de sa seule compétence et de sa mission. Lui demander d'intégrer l'approche énergétique et environnementale en amont de son esquisse, sans lui donner les moyens complémentaires, financiers en particulier, pour lui permettre de se faire accompagner par un spécialiste, ne peut qu'amener à des résultats décevants, soit pour l'architecte qui « ajoutera gratuitement », soit pour le maître d'ouvrage qui n'aura pas le résultat attendu. L'esthétique architecturale doit venir en conclusion d'une réflexion bioclimatique, pas en contradiction avec l'intelligence d'un bâtiment, encore moins en préalable à toute réflexion.

Un projet bioclimatique le plus élaboré possible, conduisant à des déplacements prohibitifs pour les occupants, parce que sa localisation n'a pas été réfléchie, n'a pas beaucoup de sens et présentera au final un bilan énergétique et environnemental très mitigé, si ce n'est pire que celui d'une construction « classique » bien positionnée. Construire un bâtiment le plus performant possible hors de la ville, obligeant ses utilisateurs à parcourir 15 km de voiture matin et soir pour aller travailler et revenir est plus consommateur d'énergie que de se limiter au strict respect du minimum obligatoire par la loi, mais à proximité immédiate des utilisateurs ou des transports en commun. Le bioclimatisme en « zone d'activité commerciale » ou « zone industrielle » n'a pas de sens. Il faut commencer par repenser l'urbanisme : une « passoire énergétique » en pleine ville est plus économique en énergie qu'un centre commercial excentré prétendument de haute performance énergétique.

Émissions de CO₂ selon le mode de transport

Type de transport (données indicatives moyennes)	Émissions (g _{CO2} /km)
En ville	
Vélo, marche, roller	0
Tramway	20
Bus	80
Voiture en ville (par personne avec 3 voyageurs)	103
Voiture en ville (personne seule)	310
Grandes distances	
Train	25
Autocar	30
Avion	160
Voiture sur route (personne seule)	180
Marchandises	
Train complet	20
Transport combiné : rail/route	40
Poids lourd > 25 tonnes de charge utile	50
Poids lourd 15 tonnes de charge utile	70
Poids lourd 3 tonnes de charge utile	180
Véhicule utilitaire en ville	1 210

Source : « Maîtriser le changement climatique : le mémento des décideurs », MIES 1999.

Construire performant dans un environnement insupportable aboutira à un site invivable. Vouloir utiliser des énergies renouvelables en oubliant de prendre en considération les apports solaires dans le bâtiment est illogique.

Le site

La première question à se poser concerne, par conséquent, le choix du site et son adaptation aux futures activités du bâtiment, celui de l'implantation et de l'orientation, et leur adéquation du point de vue bioclimatique. Pourquoi continuer d'aligner un bâtiment sur la route plutôt que sur le soleil ? Est-ce au bâtiment de s'adapter à la dictature de la voiture ? Immédiatement derrière viennent les questions de respect du site, de sa biodiversité, de ses qualités environnementales, afin de ne pas bouleverser un lieu qui possède peut-être un équilibre fragile. Savoir s'adapter à la configuration du terrain, ne pas perturber les régimes hydrologiques, ne pas tout goudronner et bétonner, permettre de favoriser le milieu naturel, respecter l'environ-

nement tout simplement sont autant de contraintes qui vont venir en amont des autres choix.

Les matériaux

La deuxième question à traiter concerne les formes et les matériaux à privilégier. Comme nous l'avons vu au chapitre « Caractéristiques des matériaux », page 112, ce ne sont pas les matériaux qui doivent s'adapter aux formes du bâtiment, mais l'inverse. Choisir des matériaux produits localement avec une faible énergie grise, permettant si possible de recycler des ressources déjà existantes, sera fondamental pour aboutir à un bilan en énergie grise le plus faible possible. Mais cela implique d'avoir déjà la capacité à répondre aux contraintes des matériaux : inertie, hygrométrie... et donc au mode de fonctionnement futur de la construction. Quant au choix des formes, il ne peut être conduit autrement qu'en plaçant en tête des préoccupations la valorisation passive des apports solaires, autant en hiver qu'en été.

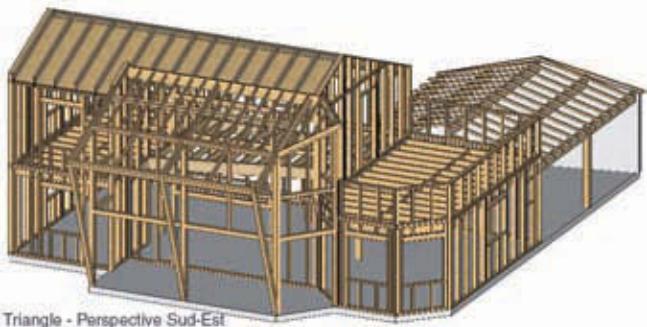
Les objectifs énergétiques

Enfin, la troisième question préalable à se poser concerne les objectifs que l'on se fixe, en termes de performances énergétiques, de consommation d'eau, en gestion des déchets d'activité et en maîtrise des besoins énergétiques. C'est cette question qui va guider toute la suite des opérations et le choix des solutions.

Programmation et évaluation

Ces trois questions ne sont pas évidentes à résoudre et se faire assister par un spécialiste du bioclimatisme est généralement très utile, qu'il s'agisse d'un architecte, d'un énergéticien ou plus généralement d'un intervenant spécialisé en construction durable. Ce n'est qu'ensuite que pourra commencer le dessin. On a coutume de dire qu'une bonne programmation peut permettre une économie de 10 à 20 % sur le coût global d'un projet. Et pourtant, n'est-ce pas la règle habituelle d'éviter l'assistance d'un professionnel compétent et la réflexion en amont, au prétexte illusoire de vouloir économiser 1 ou 2 % ?

Une fois ces choix arrêtés et les premières esquisses établies, il faut immédiatement passer à l'évaluation du projet, en réalisant l'analyse de son cycle de vie et en simulant sa réactivité interne par une simulation thermique dynamique. Tant qu'on en est à l'esquisse, il est



Triangle - Perspective Sud-Est

Esquisse d'une maison solaire construite dans les Bouches-du-Rhône, en bois-paille, bioclimatique et passive. L'isolation en ouate de cellulose est renforcée par des panneaux de laine de bois, la couverture est en tuiles romanes. Le chauffage solaire passif de la véranda solaire s'accompagne d'un poêle mixte bûches et granulés. L'eau chaude solaire, un puits climatique et une citerne de récupération des eaux de pluie complètent l'ensemble. Le mur intérieur de la véranda est un mur Trombe équipé d'ouïes hautes et basses pour chauffer le salon et la mezzanine par circulation naturelle de l'air. (Image Philippe Buffard.)

encore possible d'ajuster certains paramètres. Ensuite, il sera trop tard. Pourtant, combien de projets ne se posent la question de l'énergie qu'une fois en phase APS (avant-projet sommaire), voire carrément en phase APD (avant-projet détaillé) dans les pires cas ?

L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Cela a déjà été dit lorsque nous avons évoqué l'énergie grise et les FDES (voir partie 2, pages 108) mais nous y revenons plus en détail : l'analyse du cycle de vie (ACV) d'un bâtiment permet de dépasser la vision simplifiée de la réglementation thermique, en intégrant dans le coût énergétique et environnemental du projet l'ensemble des dépenses de création et de fabrication des matériaux, de leur construction et de leur mise en œuvre, et enfin de leur élimination ou recyclage en fin de vie.

L'ACV dépasse le strict aspect énergétique pour aborder l'ensemble des contraintes environnementales, c'est un outil utilisé pour évaluer l'impact environnemental potentiel d'un produit tout au long de son cycle de vie. Le principe est de quantifier toutes les ressources nécessaires (matières premières, énergie, eau...) et toutes les émissions environnementales (rejets dans l'air, le sol et l'eau) liées au produit, depuis l'extraction des matières premières dans la nature jusqu'à son élimination finale en fin de vie. Pour un bâtiment, cette analyse inclut, bien sûr, ses rejets et déchets de fonctionnement tout au long de sa vie.



Coefficient d'énergie primaire : des valeurs à revoir

On entend souvent dire que le coefficient d'énergie primaire du gaz de ville vaut 1. Pourtant, pour fournir ce gaz, il a fallu l'extraire, le purifier (ce qui produit quantité de CO₂ et de méthane), le transporter sur des milliers de kilomètres *via* des méthaniers ou des gazoducs plus ou moins étanches, le refroidir régulièrement pour pouvoir l'acheminer, créer des réseaux de distribution... Le même raisonnement est tout aussi valable pour le pétrole ou l'uranium de nos centrales nucléaires (et nous ne parlerons pas du coût énergétique du stockage durant des dizaines de milliers d'années des déchets produits par les centrales nucléaires, et encore moins du coût humain des émissions de CO₂).

Les valeurs d'énergie primaire utilisées aujourd'hui ne prennent pas en compte ce coût de production. Il faudra bien y venir un jour, si l'on veut calculer l'impact réel de la consommation d'énergie fossile. Les estimations actuelles évoquent un retour sur investissement de 4, soit 1 unité consommée pour en produire 5. Le coefficient d'énergie primaire des énergies fossiles serait donc plutôt de 1,25 et non de 1.

L'ACV est une méthode scientifique globale qui présente un certain nombre d'avantages. Pour l'énergie en particulier, elle permet de calculer le retour sur investissement, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'il a fallu consommer pour produire, ou économiser, une unité utile.

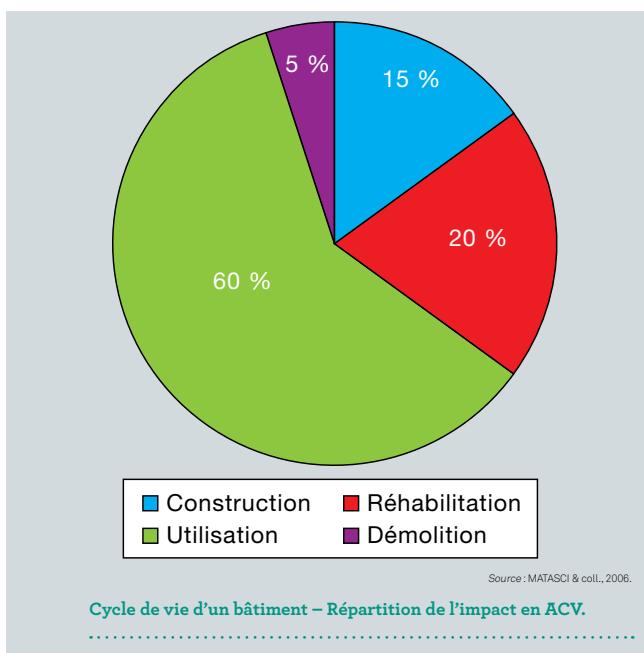


Le traitement phytosanitaire des eaux de rejet d'un bâtiment est une des réponses à apporter pour réduire son impact global sur l'environnement. (Photo Philippe Buffard.)

Dans le registre des matériaux, on entend beaucoup parler des prétendues qualités du bloc béton, en évoquant son ACV. Mais si l'on fait l'ACV complet de ce matériau, et de tout ce qu'il implique indirectement (poutrelles en béton armé de fer ou d'acier pour le soutenir, isolant, revêtement externe étanche, habillage intérieur, pare-vapeur, ventilation renforcée indispensable...), le bilan est nettement moins rose.

L'ACV correctement menée implique une vision globale de tout l'environnement d'un produit.

Dans un bâtiment, le coût environnemental se mesure globalement par un éco-indicateur incluant l'ensemble des impacts sur l'environnement de sa construction, de sa réhabilitation à mi-vie, de son exploitation et de sa démolition. La répartition moyenne de ce coût environnemental est généralement la suivante :



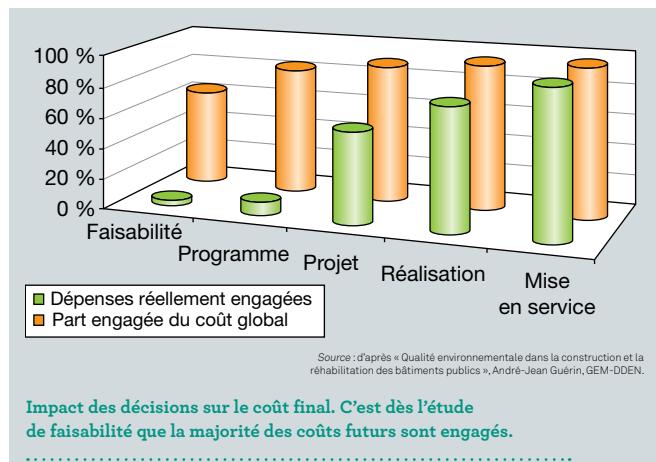
Comme on peut le constater, l'impact d'un bâtiment se situe fondamentalement au cours de son exploitation. Augmenter légèrement le coût financier de la construction afin de réduire fortement le coût d'usage, financier et environnemental, est la bonne réponse. Mais rares sont les maîtres d'ouvrage aujourd'hui qui possèdent cette capacité de se projeter dans l'avenir, de prendre en

compte le coût futur de l'usage. On limite au maximum le coût de l'investissement, généralement au détriment du coût d'usage, parfois par interdiction légale de placer dans le calcul d'investissement le coût de fonctionnement, que subissent par exemple les organismes HLM.

Les deux composantes du coût global d'une opération de construction n'ont pas le même poids économique. S'il s'agit d'un bâtiment tertiaire, le coût de fonctionnement peut représenter, même après actualisation, trois à quatre fois celui de l'investissement si on exclut du calcul celui du foncier et des frais financiers. Ainsi, du point de vue du calcul économique, l'approche habituelle, qui consiste à rechercher exclusivement le coût des travaux le plus bas possible, ne correspond pas, dans le cas d'un marché public, à une « bonne utilisation des deniers publics ». Une économie de quelques points à ce stade risque, en effet, de se traduire par une augmentation du coût de fonctionnement comme, par exemple, lorsqu'une isolation de piètre qualité augmente les frais de chauffage.

Si les dépenses engagées au niveau des études de faisabilité sont très faibles, les choix effectués déterminent déjà majoritairement le coût global futur du bâtiment. Économiser à ce moment, c'est s'interdire de maîtriser les coûts futurs. Il y a une disproportion trompeuse entre les dépenses engagées et les engagements financiers correspondants.

Avec la prise en compte de l'ACV, on peut enfin prendre conscience qu'une conception bioclimatique, des matériaux naturels et des énergies renouvelables sont, sur le long terme, sans comparaison possible, beau-



coup plus rentables aux plans économique, social et environnemental.

On commence à trouver quelques logiciels d'évaluation actuellement en cours de développement, comme Elodie, par le CSTB en France, LISA (LCA in Sustainable Architecture) en Australie, la Minnesota Building Materials Database du CSBR, ou encore un logiciel comme TEAM de PriceWaterhouseCoopers.

La difficulté actuelle, en dehors du coût et de la complexité de la plupart de ces logiciels applicatifs, tient surtout à la disponibilité de la base d'informations relative aux matériaux et produits, qui reste à construire. À ce niveau, tant que les fiches ACV ne seront pas rendues obligatoires auprès des constructeurs et fabricants, contrôlées par des organismes indépendants ou, mieux encore, fournies par des organismes publics d'évaluation pour les produits génériques comme le développé en Suisse la KBOB, on avancera très lentement. Fournir de la part d'un fabricant une fiche ACV, basée sur une durée de vie de cinquante ans, pour un matériau dont la durée de vie est, de notoriété publique, inférieure à vingt ans, ne peut que dissuader les concepteurs d'y voir un outil pertinent.

On pourra aussi noter l'initiative très intéressante de l'architecte Luc Floissac, « pape » de la construction paille, avec son logiciel COCON (COmparaisons de solutions CONstructives, de niveaux de CONFORT et d'émissions de CO₂) qui permet de concevoir et de comparer simultanément des bâtiments du point de vue :

- des exigences thermiques de différents labels (RT 2005, HPE, THPE, BBC, Maison 3 litres, Passiv'Hauss, Minergie, Minergie-P) ;
- du confort, notamment en ce qui concerne l'inertie thermique ;
- de l'impact environnemental de l'ensemble du cycle de vie (fabrication des matériaux, construction, entretien, fin de vie, usages).

D'autres projets du même type sont en cours de développement, afin de proposer aux professionnels comme au grand public, à un coût abordable, des outils simples, faciles à utiliser et fournissant une évaluation pertinente de l'ensemble des paramètres d'une construction sur leur impact environnemental.

L'ANALYSE EN COÛT GLOBAL

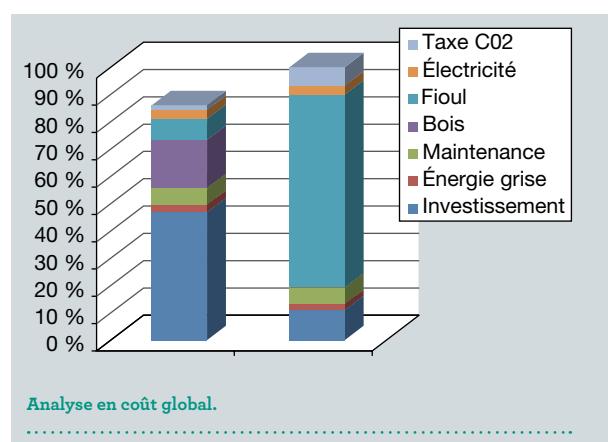
La notion de coût global a déjà été évoquée à plusieurs reprises. La plus grande difficulté rencontrée pour appréhender cette notion vient souvent de l'unité de mesure employée.

Utiliser la monnaie comme unité paraît évident et permet de parler de coût financier global. C'est une indication très pertinente, qui est indispensable pour évaluer le coût global d'une construction, mais qui ne suffit pas pour évaluer l'ensemble des coûts induits et pour parfois comprendre certaines valeurs comprises dans le coût global.

Nous allons pour cela prendre en exemple l'évaluation en coût global d'une chaufferie au bois, afin de le comparer à celui d'une chaufferie au fioul.

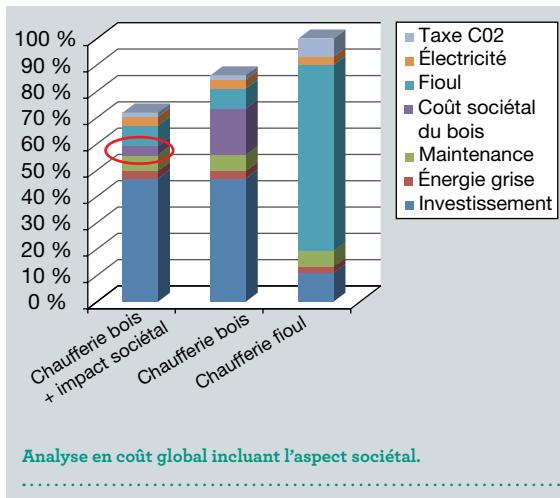
Cette analyse en coût financier global incorpore au bilan final le coût d'investissement, ainsi que tous les coûts de fonctionnement durant vingt ans. L'installation au bois semble intéressante, puisque malgré un coût d'investissement plus élevé, le seul surcoût du fioul sur vingt ans montre qu'au final l'investissement bois sera plus rentable. Elle inclut également un coût environnemental, à travers une taxe carbone.

Mais une notion importante semble absente de cette analyse. Dans le cas de l'énergie fioul, importée, le retour sur investissement sera nul. Dans le cas du bois, les frais engagés pour acheter une production locale vont être totalement réinvestis dans de la main-d'œuvre chargée de couper le bois, de le broyer en plaquettes, de le faire



sécher (de préférence dans un sécheur solaire), de le livrer, et aussi de replanter la forêt, de la débroussailler, de l'entretenir et de la faire vivre. Ce qui semble ici une dépense pour l'utilisateur est en fait un investissement dans la vie sociétale, dans l'environnement naturel du consommateur et sur l'avenir. La Nation ne perd pas un centime dans l'opération, on peut même montrer qu'elle s'enrichit de cet investissement, qui se traduira à terme par moins d'impôts, plus d'emplois et une activité économique globale renforcée.

Même s'il faut consommer de l'énergie pour produire les plaquettes de bois, si on reprend le bilan financier global et qu'on le transforme en bilan sociétal global, c'est-à-dire en ne comptant pour le bois que la part non réinvestie en travail de sa production, on obtient alors plutôt ce type de résultat, qui devient nettement plus favorable à cette énergie produite localement :



On fait encore abstraction ici du coût sociétal de la combustion d'énergie fossile, qui génère de la pollution, des nuisances, des maladies... Il faudrait pour y répondre une taxe carbone nettement plus élevée, estimée actuellement à un niveau de l'ordre de 100 dollars le baril, ce qu'appliquent déjà certains pays européens, comme la Suède et le Danemark, qui ont, étonnamment, aussi les économies les plus dynamiques, alors que cette taxe y est en vigueur depuis plus de dix ans.

Le raisonnement vaut aussi bien pour les matériaux de construction que pour leur contenu en énergie, selon

que cette dernière est d'origine fossile ou plutôt d'origine humaine. Les matériaux naturels produits localement, en favorisant la création de travail humain et, de fait, en se transformant en investissement local, plutôt qu'en gaspillage d'argent envoyé à jamais à 6 000 km de distance, dans les poches de régimes politiques parfois peu recommandables, sont une solution économique d'évidence pour réduire nos impôts, enrichir les hommes et installer notre société de façon pérenne dans l'économie durable.

LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Il fut un temps où, pour réguler la température dans un bâtiment, on lançait le système de chauffage, qui marchait « à fond », puis on ouvrait les fenêtres pour limiter cette température.

Après le premier choc pétrolier en 1973, il semble soudain évident qu'il faut prendre en compte la qualité énergétique des bâtiments dans les normes de construction. C'est ainsi que naissent en 1974 la réglementation thermique et le coefficient G (pour déperditions « globales »), puis en 1976 le coefficient G1 pour les immeubles tertiaires. En 1982 apparaît à son tour le coefficient B (comme « besoin » de chauffage), innovation qui passe inaperçue dans un premier temps : les apports solaires sont pris en compte pour réduire les besoins de chauffage.

La réglementation thermique

En 1988 la première réglementation thermique digne de ce nom voit le jour, la RT 88, suivie du coefficient C (comme « consommations »). Eh oui ! Ce n'est pas tout de maîtriser les « besoins », si les systèmes de production « consomment » n'importe comment. Depuis la réglementation thermique de 1988, les travaux de normalisation européenne ont fortement amélioré les méthodes de caractérisation des constructions et de leurs performances.

En 2001 la RT 2000 envoie enfin à la retraite le bon vieux coefficient G, pour le remplacer par le coefficient U. Pourquoi un tel changement ? Tout simplement parce que le coefficient G ramenait les déperditions à la surface au sol chauffée, sans se préoccuper du volume. On arrivait ainsi à des aberrations, puisque, par exemple, un gymnase semblait, d'après son G, ne quasiment rien consommer. Le coefficient U s'intéresse, quant à lui, aux surfaces déperditives, ce qui paraît beaucoup plus logique.

Mais nous ne sommes pas encore au bout du chemin. La RT 2000 ajoute un nouveau concept, les règles Th-E (et Th-C), mentionnant du bout des lèvres la notion de confort. En effet, avec l'amélioration de l'isolation jaillit un nouveau problème, sous-estimé jusque-là : le confort d'été. C'est ainsi que la Tic (la température intérieure de confort) va s'ajouter à la panoplie de la RT 2005 – qui accessoirement découvre qu'il existe aussi des énergies renouvelables –, mais timidement, puisqu'il faudra attendre juillet 2009 pour découvrir dans la réglementation thermique une innovation technologique majeure : le poêle à bois (et encore, il ne fonctionne, d'après la RT, que pour des surfaces chauffées inférieures à 110 m²). Toutefois, le bâtiment est toujours considéré comme un objet inerte, dont les consommations sont directement liées à la température extérieure, et à elle seule. Et la réglementation thermique française, dans un travers bien hexagonal de centralisation et d'uniformisation, impose un modèle unique de conception des bâtiments, rendant extrêmement complexe, si ce n'est impossible, l'innovation.

Des outils performants

Quid des priorités en fonction du climat local, de l'humidité intérieure, de la réactivité des matériaux aux conditions climatiques ? Quid de l'inertie, des moyens alternatifs de chauffage ou de ventilation, de la gestion des apports solaires en hiver et en été ? Quid des comportements humains ? Un premier pas, immense, commence à être franchi avec des logiciels de simulation qui prennent en compte certains de ces aspects, comme en France, Comfie + Pléïades (C + P pour les connaisseurs). Les acteurs les plus motivés de la filière du bâtiment devancent largement la réglementation et les instances officielles. L'avance prise est telle que la réglementation thermique semble désormais à la traîne, essayant chaque fois de rattraper comme elle le peut son retard, et y arrivant de moins en moins bien, au point de considérer comme non conformes les projets les plus performants.

La simulation thermique dynamique (STD) n'est rien d'autre que la volonté de ne plus considérer un bâtiment comme un objet inerte, mais comme un objet dynamique, qui réagit minute après minute au soleil, à la pluie, aux nuages, à l'hygrométrie de l'air et aux comportements humains. Les premiers outils de STD sont loin d'arriver à tout prendre en compte, bien sûr, et ils doivent encore

être améliorés. Ils permettent toutefois de se faire une idée beaucoup plus précise de la température qu'il fera sans climatisation dans une pièce au mois d'août à 16 heures, là où la RT 2005 ne sait qu'indiquer vaguement ce que consommera annuellement une climatisation. Ils permettent de savoir s'il est possible de chauffer un local avec un simple poêle à bois, quand la RT 2005 n'arrive même pas à admettre qu'on puisse chauffer autrement qu'avec du fioul, du gaz ou de l'électricité et avoir un système de chauffage sans radiateur, sans plancher chauffant, sans tuyauterie, et surtout sans pompe électrique pour faire circuler l'eau. Les outils les plus en pointe étudient le cycle de la vapeur d'eau à travers les parois, quand la RT 2005 impose la ventilation à outrance comme seule méthode de gestion de cette vapeur et que les DTU ne connaissent que les produits chimiques pour régler un problème de condensation.

Dans un pays qui consacre 40 % de ses dépenses énergétiques au confort des bâtiments, on parle aujourd'hui de plus en plus ouvertement de constructions passives, n'ayant pas besoin de système de chauffage ni de climatisation. Tous les professionnels sérieux savent désormais que c'est possible, mais la RT 2005 considère comme non conforme une installation sans système de chauffage classique !

Les outils de STD permettent de dépasser la RT 2005 et de valider techniquement des projets qui ne pourront dans l'immédiat être conformes à la réglementation, parce que trop performants, qu'en utilisant quelques subterfuges.

Il reste encore, pour qu'ils deviennent vraiment efficaces, à leur adjoindre les moyens de simuler les échanges de vapeur d'eau à travers les parois, les méthodes de ventilation naturelle, les caractéristiques des parois perspirantes, les techniques de stockage inertiel de la chaleur et de la fraîcheur et les analyses de cycle de vie des matériaux employés. Mais tout cela progresse dans le bon sens, dans de nombreux pays. La réglementation, espérons-le, suivra.

LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La thermographie infrarouge ne concerne évidemment que les bâtiments existants. Comme son nom l'indique, elle est une représentation de l'état thermique de la sur-



La performance thermique d'une construction commence par son aménagement extérieur : balcons, végétation, auvents... assurent l'intimité sans couper le lien avec l'environnement. Réalisée à Nîmes dans les quartiers résidentiels au nord de la ville, cette terrasse est une extension en mélèze de la terrasse extérieure. L'ensemble de l'extension du bâtiment lui-même a mis en œuvre une ossature bois et des techniques écologiques. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

face d'un corps. Mais que signifie cette « représentation » ? Peut-on en déduire la situation thermique de la construction située sous la surface photographiée ?

La réponse de tous les spécialistes du sujet est, sans ambiguïté, négative. Ce n'est pas « *cela dépend* », ce n'est pas non plus « *cela peut aider* ». C'est un « *non* », catégorique, sans appel. On devrait plutôt parler de symptôme thermique, qui, parmi d'autres, permettra de soupçonner l'existence d'un dysfonctionnement relatif à une paroi, laquelle, selon les cas, sera représentative ou non de ce qu'il se passe derrière.

La thermographie infrarouge permet de détecter des variations thermiques locales, dans le temps et l'espace, sur une surface homogène, mais sûrement pas de déterminer l'état thermique d'une construction, et ce, ni de près ni, encore moins, à partir d'un avion (thermographie aérienne). Il faut se méfier comme de la peste de ces « commerciaux » qui, caméra thermique au poing, passent de maison en maison en prétendant « faire un bilan énergétique » gratuit de la construction, puis qui essayent de convaincre de remplacer les menuiseries ou de refaire la toiture.

Ces précautions étant prises, c'est un outil très puissant d'analyse au plus près d'un bâtiment, qui permet de visualiser ce qui ne se voit pas, en particulier pour tout ce qui touche à la qualité de mise en œuvre d'une isolation et à la qualité de l'étanchéité à l'air. Il ne faut donc pas hésiter à utiliser cet outil d'analyse durant les travaux d'une construction ou *a posteriori*, afin de valider sa qualité générale, sous réserve que l'interprétation des images soit réalisée par une personne compétente en la matière et indépendante de tout fournisseur ou installateur de produit. La qualité de la mise en œuvre, comme cela a déjà été dit, est une condition majeure de la performance d'une enveloppe de construction. C'est en montrant aux artisans et aux ouvriers du bâtiment, la plupart du temps de bonne foi et de bonne volonté, le résultat de leur travail, qu'il sera possible de faire progresser cette qualité. Quand ils voient pour la première fois une image thermographique, ils sont généralement très intéressés par les démonstrations et les explications qui peuvent en découler et modifient immédiatement leur façon de procéder, allant même souvent jusqu'à en redemander pour constater l'évolution de la qualité de leur travail.

L'INSTRUMENTATION DES BÂTIMENTS

Personne ne serait choqué d'aller régulièrement chez le médecin pour contrôler sa tension artérielle, ni de faire des bilans sanguins. Mais surveiller l'état de santé d'un bâtiment n'est pas encore entré dans les mœurs.

Vouloir construire un bâtiment très performant et en simuler *a priori* l'efficacité est une chose, vérifier que le résultat obtenu est à la hauteur des objectifs poursuivis et se maintient dans le temps en est une autre. Dans un univers en pleine mutation, et comme nous l'avons vu, avec une connaissance partielle des phénomènes en jeu et des outils de simulation imparfaits, il est indispensable de pouvoir vérifier *a posteriori* et de corriger, d'affiner ou d'adapter si besoin.

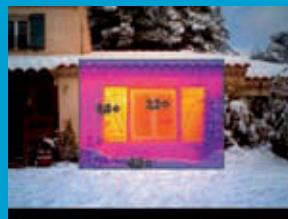
Et, pour ce faire, il n'y a pas d'autre méthode que d'« ins-trumenter » le bâtiment. Même si le mot fait encore peur, le principe commence à être mieux admis. Il ne s'agit pas de barder les murs de centaines de capteurs, mais de mesurer avec pertinence ce qui doit l'être.

La première chose à faire est de « compter » : l'eau froide et l'eau chaude séparément, l'électricité séparément

pour ses différents usages (éclairage, électroménager, besoins techniques...) ; compter poste par poste l'énergie nécessaire au chauffage, à la ventilation et au rafraîchissement. Mais il faut aussi mesurer : la température de certains lieux représentatifs, la luminosité, l'hygrométrie, les conditions climatiques extérieures. Et enfin, il faut enregistrer de façon régulière ces comptages et ces mesures. Il ne sert en effet à rien de savoir qu'un bâtiment a consommé tant dans l'année, si on n'est pas capable de mettre en relation cette consommation avec les conditions intérieures et extérieures.

L'analyse des données recueillies permet de mieux comprendre la dynamique du bâtiment concerné donc de corriger la simulation en fonction de l'expérience acquise et, de là, d'améliorer le résultat futur. Les systèmes de mesure et d'enregistrement sont aujourd'hui très économiques et ne représentent jamais plus qu'une part infime du coût d'un bâtiment (il faut prévoir, hors analyse des résultats, un investissement de départ de l'ordre de 30 à 50 euros par point mesuré et enregistré toutes les 10 minutes, avec un relevé trimestriel sur n'importe quel ordinateur courant pour ne pas saturer la mémoire de l'enregistreur).

La thermographie infrarouge



La thermographie infrarouge est un puissant outil, à condition de savoir interpréter les images. Si le volet en bois de cette maison semble chaud sous la neige, ce n'est pas parce qu'il « perd » plus d'énergie que le vitrage mais tout simplement parce que l'émissivité du bois est différente de celle de la pierre. Le rayonnement diffus de la lumière solaire est mieux « réfléchi » par le bois, qui semble alors plus chaud. L'interprétation d'une image thermographique ne peut pas se faire sur la seule appréciation d'une couleur, mais nécessite la prise en compte de nombreux facteurs influant sur les couleurs de l'image obtenue.



La thermographie permet de mettre en évidence des défauts ponctuels sur une surface homogène. Sur cet immeuble, on distingue parfaitement les ponts thermiques des planchers, ainsi que les menuiseries défaillantes.



2| PRINCIPES DE CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE MÉDITERRANÉENNE

Maintenant que nous avons posé le cahier des charges d'une construction bioclimatique, donc saine et confortable, et que nous avons arrêté un choix de principe des techniques et des matériaux, nous allons pouvoir passer aux problèmes relatifs aux principes de la construction bioclimatique.

Abraham Maslow disait que « *si le seul outil que vous avez est un marteau, vous verrez tout problème comme un clou* ». Rien ne sert en effet d'utiliser de bons matériaux si c'est à mauvais escient et dans de mauvaises conditions. Faisons de nouveau appel à l'expérience humaine.

Rappelons-nous la maison mozabite et l'igloo. Utiliser l'un des deux modèles dans le pays de l'autre serait à l'évidence d'une bêtise totale. Au même titre qu'une mai-



Construire bioclimatique, c'est avant tout savoir s'adapter à sa région, à son environnement naturel et urbain, et à son climat. La terrasse projetée permet de donner de l'intimité à la piscine existante et de mieux la protéger des vents dominants, sans interdire la vision de l'horizon côté soleil couchant. (Image Les Charpentiers d'Uzès)

son passive allemande ne sera plus du tout passive en Provence, se transformant en étuve en été.

La réponse ne sera pas la même en Bretagne, dans les Alpes, en Alsace ou en Provence. Nous allons donc nous intéresser, à titre d'exemple, à la construction méditerranéenne, qui est la plus éloignée des modèles nordiques dont on nous rebat les oreilles depuis quelques années et dont les fondements commencent à être relativement bien maîtrisés. L'idée est de montrer la nécessité d'un raisonnement adapté à la région : penser global, agir local.

Bien que le climat méditerranéen soit plus proche de celui du M'Zab que de celui du cercle polaire, nous commencerons en faisant un détour par le Grand Nord.

Les expériences vernaculaires sont toujours riches d'enseignements et d'expériences. Bien sûr il ne s'agit pas de prétendre que ces exemples sont des perfections qu'il faut reproduire, mais de montrer des réponses simples qui ont pu être apportées jadis à la rudesse des aléas climatiques.

LA CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE TRADITIONNELLE

Faisons donc un premier grand saut au-delà du cercle arctique, au nord de la Norvège, chez les Sámis. Si les Inuits utilisent l'igloo de neige, les Sámis construisent encore aujourd'hui l'igloo de terre, le *goahti* (on prononce « goarti », avec un R guttural). Ce *goahti* est leur habitat d'hiver. Il est constitué d'une voûte en bois, généralement du bouleau, recouverte d'écorce du même arbre, assurant l'étanchéité, et l'ensemble est à son tour tapissé d'une importante épaisseur de terre, une sorte de toiture végétalisée maintenant la cohérence de l'ensemble face aux intempéries. Le plafond présente un trou qui peut être obturé, permet-

tant à la fumée du feu de s'échapper. La forme globale, soit la demi-sphère comme pour l'igloo, est idéale pour offrir le moins de surface déperditive possible.

Cette constitution de forte masse peut, *a priori*, surprendre en région polaire ; elle semble en effet être en contradiction avec l'objectif d'une faible inertie nécessaire en hiver pour chauffer facilement l'intérieur. Mais il ne faut pas oublier son détail constitutif : l'intérieur est en bois, mis en œuvre de la façon la plus jointive possible. Ce matériau est lui-même recouvert d'une peau en écorce, montée comme un mille-feuille, assurant l'étanchéité à l'eau mais aussi une succession de lames d'air derrière la charpente qui garantit ainsi l'isolation et la suppression de l'inertie interne, en même temps qu'une température radiante chaude. L'inertie externe permet alors de réduire les chocs thermiques dus au climat en saison froide.

Passé l'hiver, les Sámis quittent leur igloo de terre et utilisent des tentes pour partir chasser le renne. Cette conception de l'habitation hivernale permet de valoriser au maximum la température de la terre, qui reste en hiver supérieure à celle de l'air. Le sol sert également de réservoir de chaleur, conservant l'habitat vivable même si le feu baisse ou s'éteint.

Après nous être rafraîchis en Laponie, nous allons faire un nouveau grand saut géographique pour nous rendre en Égypte.

Il y a plus de mille cinq cents ans, en Haute-Égypte, les Nubiens ont construit des habitats dont on trouve encore aujourd'hui la trace, comme, par exemple, les ruines de Ayn Asil dans l'oasis de Dakhla.

Ils utilisaient ce que l'on nomme la technique de la voûte nubienne. La forme de la voûte se détermine facilement, il suffit de laisser pendre une corde dont les deux extrémités sont fixées selon un écart déterminant une courbe douce (avec chaînette) : la voûte reprend exactement la même courbe, mais inversée. Il s'agit d'une construction autoporteuse, très simple à réaliser, ne nécessitant pas d'artefact lors du montage. Elle est édifiée en briques de terre crue, avec des murs massifs – sans toit – qui se rejoignent en voûte. Généralement, le plancher intérieur se trouve sous le niveau du sol extérieur, enterrant partiellement l'habitation.

Voûte en terre crue en cours de réalisation selon la technique ancestrale de la voûte nubienne sans coffrage. (Photo et réalisation association La Voûte Nubienne.)

© Anika Möbus - Fotolia.com



Le goahti est l'équivalent pour les Sámis de l'igloo des Inuits. Si les Inuits ne peuvent utiliser le bois et la terre absents de leur environnement, les Sámis sont entourés de forêts et valorisent en conséquence les matériaux disponibles pour bâtir des abris résistant aux rigueurs d'un climat extrême.





Dans la région d'Assouan, en Égypte, ces constructions – des logements –, qui mettent en œuvre des voûtes nubiennes, utilisent quasi exclusivement des matériaux de proximité : brique, terre, chaux, bois de palmier. La densité urbaine permet de limiter les parois exposées aux intempéries comme à la fournaise solaire. La terre crue a toujours été un matériau idéal pour assurer le confort des habitations. (Photo Claire Cornu.)



Les bories offrent, avec des moyens rudimentaires, une fraîcheur appréciée en période caniculaire. (Photo Claire Cornu.)

Quelques minuscules ouvertures au sommet des pignons assurent par convection naturelle une ventilation permanente destinée à évacuer la nuit la chaleur accumulée par les murs. Le jour, l'air intérieur, restant plus frais que celui de l'extérieur, forme un siphon thermique qui interdit à l'air chaud de pénétrer, pour peu que les autres ouvertures soient fermées. N'est-il pas merveilleux de constater que, comme pour l'entrée de l'igloo, certains principes thermodynamiques de base s'appliquaient partout lorsque les humains voulaient construire en valorisant leur milieu naturel ?

Ce qui frappe immédiatement dans ces habitations, c'est la masse imposante de matière mise en œuvre. Les constructions sont par ailleurs généralement accolées les unes aux autres, réduisant d'autant leur surface exposée au soleil. Et lorsqu'il y a des fenêtres, elles sont conçues pour ne pas laisser entrer les rayons du soleil directement : c'est seulement la lumière indirecte qui pénètre à l'intérieur. L'épaisseur des murs joue aussi le rôle de protection solaire des menuiseries.

Nous pouvons ainsi constater que du Grand Nord aux régions tropicales, l'inertie a de tout temps été prise en considération afin d'offrir un bon confort à l'habitat, l'important n'étant toutefois pas l'inertie en elle-même, mais plutôt la façon de la valoriser.

L'HABITAT PROVENÇAL TRADITIONNEL

Après ce court voyage, revenons un peu en Provence. La caractéristique de cette région est de cumuler les deux contraintes climatiques vues précédemment : le froid (relatif) en hiver et le chaud en été.

En un temps où la climatisation n'existe pas, la priorité a été donnée au confort d'été, les rrigueurs de l'hiver pouvant être combattues par le feu. À une époque où l'économie des moyens mis en œuvre avait son importance, l'architecture a su allier la simplicité à l'efficacité.

Nous commencerons par évoquer les bories. À l'origine, il s'agit, semble-t-il, d'une cabane en pierre sèche qui sert de grange, de bergerie, d'écurie ou d'habitation saisonnière à un paysan du xix^e siècle dans une parcelle trop éloignée de sa ferme, même s'il est probable que la technique soit bien plus ancienne. Cette architecture, dite « de cueillette », utilisait les pierres évacuées des champs à cultiver. On peut parler d'une véritable culture

du recyclage, où l'on valorise les déchets qui deviennent des matières premières. Le bois, pourtant fortement présent dans la région, n'est quasiment pas mis en œuvre dans les bories, sauf comme accessoire permettant de suspendre des objets.

On retrouve ce genre de construction en pierres sèches dans de nombreuses régions méditerranéennes, sous des noms variés : *capitelle*, *cazelle*, *cadole*, *orris*, *trullo*... Tout un quartier d'Alberobello dans les Pouilles en Italie est constitué de *trulli* ; ce quartier est d'ailleurs classé au patrimoine mondial de l'Unesco.

On perçoit bien dans ces constructions l'obsession de l'inertie thermique permettant de se protéger de la canicule estivale, période durant laquelle le paysan est aux champs. En hiver, il rentre chez lui, le chauffage des bories n'est pas son souci premier. Un détail est à remarquer dans ces constructions, comme le confirme la disposition du village des bories à Gordes, dans le Vaucluse : il n'y a jamais aucune ouverture vers le nord et la porte est toujours au sud. Cette disposition permet en particulier de se protéger du principal fléau de la région : le mistral, vent froid et sec, qui glace les habitations en hiver et dessèche tout en été.

Les constructions provençales traditionnelles conservent ces principes de base et sont à l'image de leur localisation : faites de rigueur et refermées sur elles-mêmes en altitude, elles sont nettement plus accueillantes à la lumière en plaine.

Elles sont bâties en moellons grossièrement équarris et revêtues d'une toiture à deux faibles pentes habillées de tuiles romaines. Les murs sont toujours enduits sur leur face extérieure de chaux de teinte claire, non éblouissante, protégeant les pierres des intempéries. En altitude, la teinte s'assombrit parfois, afin de mieux absorber la chaleur en hiver.

Il n'y a jamais de gouttières, qui ne présentent aucun intérêt ici : quand il pleut, aucune gouttière ne saurait recevoir le flot intense des orages de Provence. L'important n'est pas alors de canaliser l'eau, mais de l'éloigner des murs grâce à l'emploi systématique de génoises, constituées généralement de deux à trois rangs de tuiles positionnés en corniche. Les combles sont fortement ventilés, parfois par des ouvertures rondes sans fenêtre, situées sur les pignons : les oiseaux et chauve-souris doivent pouvoir y nicher, pour débarrasser les abords de l'habitation des mouches et moustiques.



Cet habitat traditionnel provençal (pays arlésien) est entièrement tourné vers le sud. Il n'y a aucune ouverture ni à l'est ni à l'ouest ni au nord. Les pièces du rez-de-chaussée donnent toutes sur la terrasse, et communiquent directement entre elles. La large terrasse ombragée, pourvue d'un puits, est un élément fondamental de la construction, car lieu de vie principal 6 à 8 mois par an. Les murs sont protégés en hauteur par une vigne vierge, en bas par une treille. Des platanes complètent l'ombrage d'été.



La tradition provençale, c'est d'abord de construire en harmonie avec le paysage et le climat, de savoir utiliser la végétation pour se protéger de l'ardeur du soleil estival, de s'orienter dans le sens du climat, dos au vent, face au soleil, même si la vue au dos semble plus attrayante. Ici, la construction tourne le dos à la montagne sur l'adret, mais lui fait face sur l'ubac. (Architecte Jérôme Solari.)



Le bioclimatisme selon Vitruve

La première description « scientifique » de l'ordonnancement intérieur bioclimatique des bâtiments nous a été donnée par Vitruve, au 1^{er} siècle av. J.-C., dans son traité d'architecture. L'extrait suivant montre à quel point ces principes que nous devons défendre aujourd'hui étaient d'ores et déjà bien compris :

« Nous allons expliquer maintenant les qualités que doivent avoir les différents genres de bâtiments, suivant l'usage auquel ils sont destinés, et vers quel aspect du ciel ils doivent être tournés. Les salles à manger d'hiver ainsi que les bains doivent regarder le couchant d'hiver, parce que l'on y a principalement besoin de la clarté du soir, et que le soleil couchant, les éclairant directement, y répand une chaleur assez douce vers le soir. Les chambres à coucher et les bibliothèques doivent être tournées au soleil levant, parce que leur usage demande la lumière du matin, et en outre que les livres ne se gâtent pas si facilement dans ces bibliothèques que dans celles qui regardent le midi ou le couchant, lesquelles sont sujettes aux vers et à l'humidité, parce que la même humidité des vents qui fait naître et qui nourrit les vers fait aussi moisir les livres. Les salles à manger dont on se sert au printemps et en automne doivent être tournées vers l'orient ; car par le moyen des fenêtres que l'on tient fermées jusqu'à ce que le soleil soit tourné vers le couchant, on entretient dans ces lieux une température moyenne pour le temps que l'on a coutume de s'en servir. Les salles qui sont pour l'été regarderont le septentrion, parce que dans cette situation elles seront constamment rafraîchies et d'une habitation saine et agréable, n'étant point exposées aux ardeurs du soleil, dont la chaleur est insupportable, surtout pendant le solstice d'été. »

Les constructions provençales reprennent comme une rengaine certains traits caractéristiques. Le premier est de toujours tourner le dos au nord. La façade nord possède un minimum d'ouvertures, réservées à la ventilation naturelle des locaux ; elle accueille par ailleurs les granges, les remises. Les façades est et ouest sont dotées de petites fenêtres étroites, toujours munies de lourds volets. Quel que soit le côté par lequel on arrive, tout invite à aller chercher la façade ensoleillée, protectrice du vent de nord et d'ouest, et des pluies d'est.

Qu'elles soient de modestes abris ou des forteresses impo-santes, les constructions sont toujours à étage, comme pour protéger les pièces à vivre du ciel, tout en offrant, dans les riches demeures, les chambres au vent, ou plus

simplement des greniers isolants pour les maisons plus modestes. Les toitures à double pente sont équipées côté sud d'une génoise à deux ou trois rangs selon la richesse de l'occupant. La génoise a deux fonctions principales : éloigner la pluie des murs lors des violents orages, et protéger ces mêmes murs du soleil d'été. La façade sud de la maison provençale est celle qui caractérise l'habitation. Les fenêtres y sont plus généreuses, mais également équipées de volets massifs, dont l'objet principal est de bloquer l'ardeur du soleil en été. Si celles de l'étage se protègent aussi du soleil par la génoise, celles du rez-de-chaussée sont abritées par une pergola ou une treille sur laquelle pousse une vigne ou une glycine. Entièrement ensoleillés en hiver, ces espaces se cachent à l'ombre dès le printemps, les plantations offrant en été une fraîcheur appréciée à une terrasse qui sert alors de principale pièce de vie.

La conception intérieure, elle-même, a sa logique propre. Contrairement à ce que l'on retrouve dans la plupart des autres régions françaises, il n'y a aucun couloir, aucun recoin étroit : l'air doit toujours pouvoir circuler amplement dans l'ensemble des volumes.

L'entrée principale est généralement discrète, placée sur le côté de la façade sud, mais se désigne d'elle-même par son lien avec la terrasse. L'escalier donnant à l'étage se trouve juste derrière cette porte d'entrée. Les pièces à vivre ont toutes un accès direct à la terrasse, ainsi que des portes permettant la circulation intérieure. La salle à manger est généralement au centre de la façade sud, la seule paroi de la pièce principale à être en contact avec le climat extérieur.

Les chambres sont à l'étage et donnent toujours sur le sud. Si un couloir doit desservir les chambres, il est au nord et les isole de cette face. Les remises, caves et autres pièces de service sont également au nord.

Comme on le voit, la conception de la maison traditionnelle provençale n'est pas le fruit du hasard, mais l'aboutissement d'une longue tradition, ayant au fil des siècles expérimenté toutes les solutions envisageables, et en ayant retenu les meilleures, afin d'offrir, malgré des moyens financiers parfois limités et une technologie simple, un bon confort de vie. Et il est une évidence admise par tous, même si souvent les Provençaux aujourd'hui s'interrogent sur le pourquoi de cette évidence : les mas traditionnels sont infiniment plus confortables que les maisons modernes et n'ont pas besoin de climatisation en été pour rester frais.

3| LES FORMES ET TECHNIQUES BIOCLIMATIQUES

Après ce tour non exhaustif des principes et moyens du bioclimatisme, nous pouvons commencer à envisager les solutions disponibles pour atteindre les objectifs que nous voulons nous fixer. Nous étudierons successivement les solutions concernant l'enveloppe du bâtiment, puis celles relatives à l'énergie.

CONCEVOIR BIOCLIMATIQUE

Un bâtiment n'est pas simplement une ligne de démarcation entre un lieu habitable et un environnement agressif, mais un lien ininterrompu entre l'extérieur et l'intérieur, une interface transformatrice des forces de la nature au profit du confort humain, dont les fonctions principales sont, rappelons-le :

- protéger des intempéries,
- capter l'énergie solaire,
- stocker cette énergie,
- diffuser la chaleur,
- réguler l'ambiance.

Finalement, un bâtiment doit tout simplement répondre à l'attente des cinq sens : fournir un confort thermique pour le toucher, lumineux pour la vue, hydrologique pour le goût, sonore pour l'ouïe, olfactif pour l'odorat. Bref, être tout simplement humain – *mens sana in corpore sano* – avec un air sain dans un bâtiment sain.

L'ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

Le bioclimatisme d'un bâtiment commence par son environnement immédiat. Il doit :

- pouvoir capter le soleil en hiver et limiter les apports de chaleur en été ;

- protéger du vent froid d'hiver et favoriser la ventilation tout en limitant les risques d'effraction ;
- permettre de bien voir à l'intérieur et vers l'extérieur en tenant compte de la luminosité spécifique de la région ;
- se protéger du bruit.

Le concepteur d'un bâtiment doit savoir faire la synthèse de ces contraintes et les prendre en compte dans l'intégration du projet par rapport au site. Cela comprend la mise en place de points d'eau fournissant l'humidité indispensable l'été et l'implantation réfléchie de la végétation, qui protège du bruit, des vents d'hiver par un feuillage persistant au nord, et donne de la fraîcheur l'été, le feuillage caduc conservant la possibilité des apports solaires en hiver.



Ce projet de serre bioclimatique est prévu sur une école primaire du Luberon. Les salles de classe actuelles sont froides en hiver et surchauffées dès le mois d'avril. La serre permettra de produire 100 % des besoins de chauffage pour peu qu'il y ait du soleil, protégera les vitrages du soleil d'été et offrira aux enfants un préau abrité confortable pour les mauvais jours. (Architecte Olivier Joubert – Cabinet Ostraka.)

L'architecture savait par le passé y répondre avec ses moyens, en particulier pour tout ce qui a trait au confort d'été. Des solutions contemporaines existent.

LA FORME BIOCLIMATIQUE

Nous avons vu qu'une façade de notre bâtiment pose un véritable problème, il s'agit de celle exposée au nord. En plus de peu voir le soleil, cette façade nord prend de plein fouet le vent glacial de l'hiver et desséchant de l'été. L'idéal serait de pouvoir s'en passer, en maximisant la surface orientée au sud¹ et en supprimant au maximum toute emprise au vent du nord. Mais avec quelle forme pouvoir se passer d'une façade nord ?

L'œuf

Cette forme existe. On en a vu une ébauche avec l'igloo. L'igloo est rond, car l'Inuit ne peut pas déterminer *a priori* l'origine du vent. En région méditerranéenne, on sait en général d'où vient le vent dominant. La forme idéale s'appelle l'ovoïde, ou plus simplement la forme d'œuf. Si la nature l'a créée, ce n'est pas pour rien : c'est la forme la plus solide et la plus aérodynamique qui soit, celle offrant le meilleur ratio volume/surface de parois, et n'of-



Une forme ovoïde tronquée permet de limiter au strict minimum les surfaces déperditives, tout en maximisant le potentiel solaire sur la façade sud. La partie nord peut être utilement mise à profit pour créer un stockage inertiel saisonnier.

frant aucune surface au nord si on tourne sa pointe vers le sud. Évidemment, les standards actuels et les canons architecturaux ne sont pas vraiment en harmonie avec une telle forme. Cela viendra un jour ; c'est bien arrivé pour les automobiles sans que quiconque s'en aperçoive. Cette forme présente malgré tout un défaut, qui est de ne pas avoir non plus de face orientée plein sud. Pour gérer de la surface plein sud, il faut envisager de tronquer l'ovoïde. Et, pour offrir si besoin des terrasses, on peut également tronquer horizontalement la partie sud de la pente supérieure, en un ou plusieurs niveaux. Enfin, pour éviter un équilibre instable cher à Christophe Colomb, on peut se contenter d'une moitié d'ovoïde reposant par sa tranche plate sur le sol.

Coefficient d'ensoleillement bioclimatique

Un indicateur fréquemment employé en bioclimatisme est le coefficient de forme, qui est le rapport entre la somme des surfaces déperditives et le volume intérieur. Il serait utile d'y adjoindre un second indicateur, qui exprime le rapport de façade sud vitrée par rapport à la surface déperditive totale, sous réserve d'avoir une parfaite occultation d'été de ces vitrages. L'ovoïde tronqué donne dans les deux cas le meilleur résultat. En fait, en faisant le produit de ces deux coefficients, on constate qu'on aboutit à un nouveau ratio bioclimatique, qui est tout simplement le rapport entre les surfaces vitrées au sud et le volume intérieur. Pour parfaire le tout, on peut alors remplacer la surface de vitrage par l'énergie solaire reçue, qui doit être maximale en hiver et minimale en été. En faisant le rapport de ces deux valeurs, on obtient alors un coefficient d'ensoleillement bioclimatique.

Mais l'architecte risque de hurler si on lui demande des parois aussi tordues. En fait, qui interdit de faire des murs droits ? Pour atteindre la forme ovoïde au nord, on peut très bien partir de murs droits, qu'il suffit ensuite d'habiller par l'extérieur de matière, de terre par exemple, retenue par de petites restanques en gabion ou en appliquant une toute autre technique, ce qui permettra accessoirement de végétaliser l'ensemble des parois. Cette matière protectrice supplémentaire ne pourra qu'améliorer l'inertie et donc le confort intérieur d'été.

1. En bioclimatisme, on entend classiquement par « sud » une orientation située entre 30° sud-est et 30° sud-ouest, la perte d'ensoleillement étant inférieure à 15 % entre ces deux directions.

Les critères d'urbanisme

Il demeure évident que la forme ne peut pas être uniquement déterminée par des considérations énergétiques : la fonction du bâtiment, son environnement, la géométrie du terrain, les activités alentour, les besoins humains, la sociabilité et la convivialité, tout participe à la détermination de cette forme. Il n'en reste pas moins vrai que la forme extérieure cubique n'est pas la seule envisageable et que la réduction réfléchie, par un habile compromis, des surfaces des parois, surtout celles orientées au nord, peut contribuer à l'économie d'un projet. Et la plus grosse difficulté dans la forme d'un bâtiment réside souvent dans une réglementation archaïque d'urbanisme, basée sur un pseudo-régionalisme architectural, n'ayant souvent rien à voir avec l'architecture vernaculaire ou la tradition, mais plutôt généralement avec l'incompétence architecturale et énergétique de ceux qui le décrètent². Il y a encore du chemin à parcourir pour que l'efficacité énergétique devienne un critère d'urbanisme.

LES PAROIS EXTÉRIEURES

La paroi, c'est ce qui nous sépare de l'extérieur. Elle est souvent l'élément porteur (et souvent à tort, voir pages suivantes), mais surtout celui qui nous protège des rigueurs du climat. Et il existe une infinité de façons de remplir cette fonction. Chacune a ses avantages et ses inconvénients. Autant dire d'emblée que les choix conventionnels ne sont généralement pas des plus logiques.

Les facteurs de choix

Le choix est, en conséquence, assez cornélien. Entre le mur de béton et la paroi de paille, entre le mur de pierre et le Monomur, entre le bloc de béton et la brique, quelle est la meilleure solution ? Répondre directement à cette question serait assez prétentieux, tant le contexte du choix va modifier les arguments qu'on pourrait *a priori* avancer. Ce contexte comprend, de manière non exhaustive, le mode d'occupation des lieux et le comportement supposé des utilisateurs, la qualité de l'environnement climatique et le choix de l'isolant, l'ensoleillement dispon-



Construire bioclimatique n'interdit pas la créativité architecturale. Les formes les plus modernes comme les plus traditionnelles peuvent apporter la réponse recherchée. Ce chantier de maison individuelle situé à Saint-Quentin-la-Poterie (30) est un projet de construction résolument moderne pour faire coïncider performances énergétiques, budget serré et grandes surfaces. Isolation en ouate de cellulose (15 cm en mural et 30 cm en toiture) et structure en douglas traité au sel de bore ; habillage extérieur en mélèze ajouré ; puits climatique, menuiseries à vitres haute performance et rupture de pont thermique ; toiture terrasse végétalisée. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

nible et l'hygrométrie prévisible de l'ambiance interne, la dimension du bâti et son mode de chauffage, la sismicité et l'hydrologie du site, ou même la forme de la paroi, sans oublier la disponibilité locale des matériaux.

Certains d'entre eux, à la lecture de tout ce qui précède, semblent condamnés, et pourtant... On peut vouloir les éviter et parfois conclure qu'ils sont les moins inadaptés.

Prenons le cas du Monomur en terre cuite, parfois présenté comme une panacée. Il suffit de prendre en compte ses qualités moyennes d'isolation et d'y ajouter l'énergie grise qu'il supporte pour en arriver à remettre fortement en question

2. Un exemple extrême du prolongement de ces règles au niveau des équipements en énergie durable : l'interdiction des capteurs solaires en toiture sur une construction en béton des années 1960 dans certains villages, au prétexte du respect du patrimoine architectural, ou parce que « vus d'avion » ils risquent de dénaturer le paysage.

son usage. Et un mur en béton n'est-il pas le plus judicieux et le plus simple pour créer un mur Trombe (voir page 216), malgré tout ce qu'on entend parfois dire contre le béton ?

Nous avons vu toutes les qualités que l'on peut être amené à demander à un mur : perspiration, inertie thermique, isolation thermique, capacité à déphaser, solidité, tenue dans le temps, sans parler du prix. Le matériau à retenir sera fonction des priorités que l'on se donne, sans oublier l'aspect qualitatif architectural. L'important à ce niveau est d'abord d'avoir une cohérence dans les choix faits : isoler en paille un mur de béton n'a aucun sens et peut même conduire à de graves désordres. Associer le bois au ciment peut aboutir aux mêmes résultats.

Même l'inertie, présentée comme étant *a priori* un impératif de confort en été, peut, dans certains cas, conduire à un résultat énergétique défavorable. Prenons le cas d'une salle des fêtes d'un petit village, qui sera utilisée tout au plus quelques soirs par semaine. Vouloir lui donner de l'inertie serait une erreur s'il faut six heures pour l'amener à une température de confort en hiver, pour une à deux heures d'occupation journalière. Au contraire, une

absence totale d'inertie permettra de limiter au maximum ses besoins en chauffage comme en rafraîchissement. Pour le confort d'été, il faudra alors trouver une autre réponse, qui sera forcément d'abord d'ordre architectural, en y incluant une bonne ventilation, naturelle si possible, et une parfaite protection contre les apports solaires (nous verrons plus loin le moyen d'apporter une inertie variable, « à la demande »).

Il n'y a donc pas de réponse toute faite sur le meilleur choix pour une paroi. La bonne méthode consiste à lister les propriétés requises (aptitude à la forme, adaptation au contexte, performances), à leur affecter une priorité, puis à évaluer pour chacune d'elles comment les matériaux envisageables vont pouvoir répondre au programme fixé : un peu, beaucoup, pas du tout...

Séparer les fonctions

En poussant un peu le raisonnement, on peut s'interroger sur cette habitude tellement ancrée qu'elle en est devenue une évidence : les parois extérieures doivent tout faire – porter le bâtiment, ses planchers et sa toiture, l'isoler, l'éclairer, lui donner de l'inertie... À vouloir tout demander aux parois extérieures, elles finissent par ne plus rien faire bien. Les murs intérieurs en deviennent des objets secondaires, représentant un surcoût incontournable, donc construits avec les matériaux les moins chers et les moins solides possible, des cloisons en carton-pâte, mises çà et là pour des raisons d'usage humain, mais sans aucun apport au bâtiment. Pourquoi ne pas dissocier les différents objectifs assignés aux parois et se demander si la paroi extérieure est toujours la plus appropriée pour remplir chaque fonction ?

Si l'on veut offrir au bâtiment l'enveloppe la plus isolante possible, il faut utiliser des matériaux qui n'offrent généralement pas la solidité nécessaire pour porter la structure. Quel gaspillage financier que de doubler cette enveloppe isolante d'une enveloppe porteuse devenue inutile sur les parois extérieures, alors qu'on pourrait beaucoup plus efficacement profiter du besoin de cloisons intérieures pour porter cette structure ! On se torture à vouloir protéger de la condensation, à grands coups de pare-vapeur (encore un surcoût financier et environnemental), la structure porteuse positionnée en paroi extérieure, alors que le problème pourrait être réglé tout simplement en la supprimant. Et on s'interdit la moitié de la surface d'échange des parois porteuses



Les matériaux naturels les plus simples assurent la meilleure longévité aux constructions humaines, tout en garantissant une parfaite protection face aux caprices de la météo. Ici, construction islandaise. (Photo Bernard Arditti.)

afin de valoriser l'inertie, alors qu'il serait si simple de leur rendre toute leur fonctionnalité.

Dans une construction bioclimatique intelligente, les parois extérieures ne portent rien, si ce n'est elles-mêmes, leur seule fonction est d'isoler des rigueurs du climat et d'apporter la lumière. Et il revient aux murs et planchers intérieurs d'être des parois lourdes supportant la structure, et apportant à l'intérieur autant l'inertie thermique que le confort sonore. Ce choix permet de redonner une grande liberté de forme aux parois extérieures, devenues légères, simple parement thermique d'un bâtiment, sans contraintes mécaniques de structure. Prenons exemple sur la nature : il est temps d'abandonner le modèle du bâtiment escargot, de l'architecture du mollusque, pour passer à celui des bâtiments vertébrés qui offrent un avantage évolutif incontestable. Et la séparation des fonctions est le premier pas vers une meilleure compréhension de la fonction de chaque élément d'un bâtiment.

LA VENTILATION

Nous allons laisser temporairement de côté les parois, pour parler de ventilation, gouffre à énergie bien connu en hiver. Nous avons déjà évoqué les principes généraux de détermination des conditions de circulation de l'air dans un bâtiment (voir page 68), nous allons maintenant aborder les conditions plus pratiques de mise en œuvre. Chacun a appris qu'il faut renouveler l'air dans un bâtiment. Mais pour quoi faire ? La question est de comprendre d'où vient cette certitude. S'interroger sur le besoin de renouvellement d'air peut amener à le remettre en cause, au moins partiellement, mais aussi à revenir sur un certain nombre d'autres choses.

Pourquoi ventiler ?

Le renouvellement d'air peut avoir trois raisons d'être :

- rafraîchir en été : aérer ;
- assainir l'air : ventiler, pour éliminer les polluants et renouveler l'oxygène ;
- accessoirement, brasser l'air, sans apport d'air neuf, pour améliorer la sensation de confort physiologique des occupants.



Ce chantier concerne la construction d'une extension de maison d'habitation, pour une surface de 130 m², dans la haute vallée du Gardon d'Alès. L'habillage extérieur est en bardage de red cedar, les fenêtres en châtaignier. Structure bois haute isolation et plancher bois phonique. (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)



La charpente de la construction de la page 158 est à ossature interne. Les parois externes ne sont pas utilisées pour porter la charpente, leur seule fonction est d'isoler. L'inertie des parois porteuses est intérieure à la construction.



Qu'est-ce qu'un COV ?

Un produit est considéré comme un COV s'il répond aux deux conditions suivantes (selon la directive 1999/13/CE du Conseil européen du 11 mars 1999) :

- « tout composé organique ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa (1/100 de la pression atmosphérique) ou plus à une température de 273,15 K (0 °C) ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières ;
- tout composé contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques ».

S'il s'agit d'aérer pour rafraîchir, nul besoin d'étanchéité à l'air, bien au contraire, et une ventilation naturelle bien conçue sera souvent plus efficace. Nous en reparlerons un peu plus loin.

S'il est question de ventiler pour assainir, le problème est tout autre et, avec un minimum de réflexion, on constate que les deux fonctions ne peuvent pas être remplies en s'appuyant sur les mêmes bases. Le but de la ventilation est d'assurer aux utilisateurs du bâtiment un environnement intérieur sain et confortable. Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur est nécessaire avant tout pour éliminer les divers polluants qui y sont générés³. Voyons un peu quels sont ces polluants et les volumes d'air correspondants pour une personne assise (volume d'air neuf nécessaire pour ramener le taux des polluants présents à un niveau supportable) :

- air inspiré par une personne : 1 m³/h ;
- CO₂ expiré : 15 m³/h ;
- chaleur excédentaire : 17 m³/h ;
- vapeur d'eau : 28 m³/h ;
- COV : 35 à 50 m³/h ;
- plus quelques autres...

Les COV⁴ proviennent des substances nocives présentes sous la forme de solvants dans les peintures et les vernis, dans les matériaux chimiques (polystyrène, PVC, plastiques...), dans les détergents ou dans les produits artificiels pour les soins du corps, dans les gaz propulseurs des bombes aérosols...

On constate ainsi que les besoins biologiques sont de l'ordre de 15 m³/h d'air neuf (pour absorber le CO₂ émis par la respiration), mais que les besoins structurels du bâtiment sont de 35 à 50 m³/h. C'est la raison pour laquelle les débits de ventilation de base sont toujours déterminés par rapport à la surface construite et non en fonction du nombre d'occupants, sauf dans le cas d'activités particulières ou de forte densité de fréquentation. Qu'une chambre soit occupée ou non, par une ou par dix personnes, la norme nous dit qu'il faut la ventiler en fonction de son volume. Pourtant, il est facile de comprendre que si le bâtiment n'émet pas de polluants, si les murs ne sont plus étanches à la vapeur d'eau, s'ils n'émettent pas de COV et sont construits en matériaux sains, si les murs « respirent », il n'y a plus de raison de ventiler autrement qu'en proportion de l'occupation, ce qui entraîne autant d'économie de chauffage ou de rafraîchissement. Une légère ventilation naturelle, éventuellement assistée, correctement conçue, peut alors largement suffire. Et à défaut de ventilation naturelle, une VMC mieux régulée, sur la présence humaine plutôt que sur la surface habitable, et donc plus économique en énergie, est envisageable.

L'importance des matériaux

La ventilation importante des bâtiments, imposée par les normes actuelles, tient donc en réalité plus au manque constaté de qualité sanitaire des bâtiments qu'aux besoins physiologiques des occupants ou au souci du confort d'été. Plutôt que d'essayer de « limiter les dégâts » sanitaires par la ventilation, ne serait-il pas plus logique de les éviter, en réduisant l'usage des matériaux polluants ? Compte tenu des progrès importants réalisés sur l'isolation thermique, le poste renouvellement d'air arrive dans une construction passive en tête en termes de dépenses de chauffage et d'électricité ; il faut désormais y être attentif. La solution, avant de se jeter sur les

3. Voir à ce sujet les riches documentations de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur.

4. COV : composés organiques volatils.

systèmes de ventilation les plus complexes possible et forcément énergivores, est de travailler sur la détérioration de la qualité de l'air par les matériaux du bâtiment. De même que la meilleure énergie est celle que l'on ne consomme pas, la meilleure ventilation est celle dont on peut se passer.

Ventilation et confort

Bien sûr, une bonne ventilation restera toujours indispensable dans une construction présentant une bonne étanchéité à l'air, afin de parfaitement maîtriser les flux d'air, ce qui va bien au-delà du simple renouvellement hygiénique de l'air. En effet, la circulation de l'air est, ou devrait être, le principal vecteur du confort intérieur d'un bâtiment. C'est elle qui peut permettre de transférer la chaleur et la fraîcheur d'un point à un autre, d'un point d'émission à un point de stockage, et d'un point de stockage à un point d'utilisation. Il ne s'agit plus alors de simplement faire pénétrer de l'air dans le bâtiment et de l'extraire ailleurs, comme le conçoivent les normes, mais de transporter l'énergie à l'intérieur du bâtiment en fonction des besoins. Un système de ventilation se dimensionne alors selon deux critères indépendants :

- le renouvellement hygiénique de l'air ;
- les besoins de transfert d'énergie.

Dans un bâtiment sain, le besoin hygiénique de renouvellement de l'air est directement proportionnel au nombre d'occupants, il peut alors être réglé soit par une mesure du taux d'humidité, soit par celle du taux de CO_2 , et même être interrompu en période d'absence temporaire (lors d'une absence prolongée, il est préférable de maintenir un très léger renouvellement régulier, de l'ordre de deux à trois volumes par semaine pour un bâtiment sain). Dans un bâtiment conventionnel, les normes déterminent le taux de renouvellement recommandé, qu'il pourra être nécessaire d'augmenter dans certains cas d'utilisation intensive de produits émetteurs de polluants, en particulier dans les bâtiments neufs : usage d'isolants synthétiques ou minéraux, peintures chimiques, colles et adhésifs assurant l'étanchéité ou fixant les revêtements, bois traités chimiquement, béton neuf...

Les techniques

Les principales techniques actuelles de renouvellement hygiénique de l'air sont :



Un intérieur sain fait appel à une ventilation réduite et économique en énergie, car il n'y a plus de polluants à évacuer. Ici, construction en Provence. (Photo Didier Nadeau – Architecte Jérôme Solari.)

- la ventilation naturelle (VN) : méthode ancestrale, elle est généralement non maîtrisée et utilise les fuites naturelles du bâtiment, ainsi que des ouvertures volontaires dans les parois ;
- la ventilation naturelle assistée (VNA) : utilisant le principe de la ventilation naturelle, elle permet à l'inverse une parfaite maîtrise des flux d'air, soit par de simples moyens mécaniques régulant les ouvertures dans les parois, soit en étant complétée par des ventilateurs. L'objectif est alors de valoriser les principes de convection naturelle, mais en supprimant les effets parasites liés par exemple au vent ;
- la ventilation par insufflation (VMI) : privilégiant le soufflage sur l'aspiration de l'air intérieur, ce système est très utile pour valoriser des éléments de production d'énergie, tels qu'une serre bioclimatique, un stockage inertiel ou un puits climatique. Par ailleurs, en mettant en surpression le bâtiment, il évite les entrées d'air parasites, mais favorise du même coup les fuites de calories vers l'extérieur. C'est appréciable en été, moins en hiver si la production d'énergie n'est pas gratuite ;



La ventilation participe à la qualité sanitaire d'une construction, la ventilation mécanique ne peut pas se réduire à un assemblage de tuyaux qu'on oublie ensuite, les laissant se dégrader et se transformer en nid à microbes, sans plus jamais se préoccuper de leur devenir.

- la ventilation hygroréglable⁵ (VMC Hygro B) : elle utilise des bouches de ventilation qui se régulent en fonction de l'hygrométrie intérieure. Pour être efficace, elle doit être complétée d'un asservissement des ventilateurs et devient performante si on y ajoute un asservissement au taux de CO₂ et une horloge permettant un arrêt quasi complet en période d'absence ;
- la ventilation double flux (VMC DF) : elle permet de récupérer sur l'air extrait la majeure partie de l'énergie qu'il contient. Le rendement de ces systèmes dépassant aujourd'hui les 85 %, c'est une technique très performante de maîtrise des coûts énergétiques de la ventilation, puisqu'il faut alors dix fois moins d'énergie pour assurer le même taux de renouvellement. Les systèmes actuels ne peuvent pas encore être couplés avec une VMC hygroréglable, encore moins avec un autre système. Pour être totalement efficace, il faudrait l'asservir à l'hygrométrie ou à la teneur en CO₂ de l'air, ce qui n'est quasiment jamais fait à l'heure actuelle.

Chacune de ces techniques possède ses avantages et ses inconvénients, et prétendre que l'une vaut mieux que l'autre est une conclusion un peu hâtive. En fonction du type de bâtiment, l'une sera préférable à l'autre, l'important étant de concevoir un flux d'air cohérent avec la technologie employée. Si dans une maison individuelle bioclimatique, une VNA saura souvent assurer les besoins de renouvellement au moindre coût économique et énergétique, dans un immeuble tertiaire, le recours à un type de VMC deviendra généralement indispensable, en l'attente de systèmes de VNA performants, en cours de développement.

En réalité, bien que cela soit très rarement fait, c'est en mixant ces différents systèmes qu'on peut obtenir les meilleurs résultats. La difficulté provient de leur incompatibilité, car les fabricants n'ont pas encore imaginé qu'on puisse les utiliser conjointement. Une VMC double flux sera la plus adaptée en saison froide, une VMC hygroréglable sera très puissante dans des locaux à forte fréquentation non permanente (bâtiments scolaires par exemple), une VNA sera idéale pour rafraîchir en été, permettant d'assurer la surventilation indispensable la nuit, et une VMI sera nécessaire pour valoriser les apports bioclimatiques gratuits de façon efficace. On le voit, l'idéal serait d'avoir les quatre systèmes ensemble, ajustables selon la situation.

Le transfert d'énergie

Le besoin de flux d'air relatif au transfert d'énergie dépend fortement du type de conception architecturale. Dans une construction conventionnelle, qui généralement ne gère ni les apports thermiques internes ni les apports solaires ni le stockage inertiel, ce besoin n'existe pas ou peu, ce qui explique le silence des normes à ce sujet. Dans une construction bioclimatique, le problème est tout autre. L'utilisation prépondérante de l'énergie solaire en hiver et de la fraîcheur nocturne en été, sans parler de nombreuses autres techniques de production de chaleur, de fraîcheur et de stockage de l'énergie, impose une gestion réfléchie des transferts d'énergie à l'intérieur du bâtiment. Ceux-ci peuvent se faire par des boucles thermiques utilisant la convec-

5. Il existe deux types de ventilation hygroréglable, le type A et le type B. Le type A, peu efficace, correspond au balbutiement de cette technique et il est aujourd'hui quasiment abandonné.

tion naturelle, ils peuvent aussi être assistés mécaniquement. Il est aussi parfois possible de substituer à ces flux d'air des circuits d'eau destinés aux besoins de transfert thermique.

Il existe à ce jour très peu de systèmes de régulation adaptables à ce besoin de gestion des flux internes, la régulation ne se faisant plus sur la qualité de l'air mais sur des différences de température entre éléments, certains pouvant être un volume habitable, d'autres des parois de stockage, et sur des états climatiques : ensoleillement, température extérieure...

Espérons que le développement des concepts bioclimatiques poussera rapidement les meilleurs fabricants à s'intéresser à cette problématique. Autant le chauffage à air pulsé est à proscrire dans un bâtiment conventionnel, autant il reprend tout son intérêt lorsqu'il ne s'agit plus que d'apporter un léger appoint à une construction bioclimatique gérant parfaitement les flux d'air.

Un dernier point à noter : le plus gros problème des systèmes de ventilation actuels concerne leur entretien. Dans la pratique, ces systèmes ne sont jamais entretenus et se transforment au fil du temps en nids à microbes et autres pollutions. La conception correcte d'un système de ventilation doit absolument intégrer non seulement une prise d'air extérieur en lieu sain, une bonne filtration de l'air entrant, mais aussi la facilité d'entretien des gaines, ce qui exclut d'office la plupart des systèmes utilisant des gaines souples, peut-être simples et économiques dans leur mise en œuvre, mais véritables niches à poussières et superbes biotopes microbiens, dont le bilan au niveau de la santé est catastrophique à terme. La VNA présente en particulier cet avantage de pouvoir s'affranchir du besoin de gaines.

de vapeur d'eau. L'habillage de bois doit donc abriter du vent et de la pluie à l'extérieur, protéger et habiller l'isolant à l'intérieur, mais laisser l'air se renouveler sur les deux faces. Cette construction, se voulant bioclimatique, n'est pas équipée de ventilation mécanique, mais se ventile naturellement, en hiver par convection de l'air chaud vers une petite ouverture régulée, située en hauteur, et en été tout simplement par l'ouverture modérée des menuiseries par exemple.

Ajoutons-y le fait qu'elle est construite sur terre-plein non isolé afin de valoriser l'inertie du sol. Autant vous dire qu'elle ne sera pas conforme à la réglementation thermique, d'autant plus qu'elle ne dispose ni de VMC ni de réseau de chauffage, ce qui ne convient pas du tout aux outils de calculs réglementaires. Ce n'est pas tant la réglementation qui pose problème à ce niveau que les organismes officiels qui, ne disposant généralement pas en interne de la compétence nécessaire et perturbés par les méthodes innovantes, ne seront souvent pas capables d'appliquer littéralement l'esprit des textes et ne pourront la considérer autrement que comme « non conforme ».

Mais pour l'instant, c'est ce qu'il se passe en hiver qui nous intéresse. La construction étant passive, il faut très peu d'énergie pour la chauffer, un petit poêle à bois pourra suffire pour un volume important.



La paille est avant tout un matériau vivant qui respire et donc qui supporte les phénomènes naturels comme la vapeur d'eau, sans perdre en aucune façon ses performances énergétiques. (Photo Vincent Pierré, énergéticien BET Terranergie dans les Vosges.)

LE MUR RESPIRANT

L'exemple de la paille

Laissons-nous aller à rêver un peu et imaginons une construction (le modèle existe d'ailleurs déjà) dont les parois extérieures sont en matériau naturel : au hasard, de la paille. Afin de protéger des intempéries cette structure isolante, il faut l'habiller de bois, tout en la laissant respirer, pour éviter les effets fâcheux de la condensation

Les murs sont très mal étanchés, si l'on s'en tient aux critères habituels, l'air peut passer partout à travers la paille. Il n'est donc pas possible de répondre aux critères du test d'étanchéité par mise en dépression ou surpression du bâtiment. Et comme nous avons allumé un petit poêle à bois, la fumée monte par la cheminée et crée une dépression dans la construction. Cette dépression aspire lentement l'air extérieur à travers la paille. Très lentement, vu le ratio entre la surface de mur et la dépression. Que constatons-nous ?

- Le flux d'air en traversant lentement la paille se réchauffe et pénètre dans la construction à une température très proche de celle qui règne à l'intérieur. Pour faire simple, ce flux d'air, qui récupère au passage la chaleur qui fuit en sens inverse, annule la déperdition latente à travers la paille, comme cela est prévu par les calculs classiques et la réglementation thermique.
- Ce même flux, qui détruit théoriquement l'étanchéité à l'air, fournit gratuitement, sans ventilateur ni électrisité, un renouvellement d'air plus que suffisant pour assurer le confort des lieux, d'autant plus qu'il n'y a pas de COV émis par du béton ou du polystyrène.
- Ce flux d'air encore, par son mouvement dynamique, contredit les équations de transfert de vapeur d'eau via la paille, puisqu'il ramène systématiquement la vapeur dans la pièce... avant de l'emporter dehors à travers la cheminée.
- L'air traversant la paille se trouve filtré de ses impuretés et pénètre dans la construction, propre et sain, légèrement humidifié par l'humidité naturelle de la paille.

Que conclure de cette petite description des murs respirants ? En premier lieu, que les modèles mathématiques classiques de la construction, sur lesquels s'appuie la réglementation thermique, ne répondent pas forcément de la meilleure façon à tous les cas de figure et que si l'on se contente de les appliquer obstinément sans réfléchir, on risque, au mieux, de critiquer une amélioration, ou, au pire d'interdire toute innovation.

Dynamique interne

Ce qui a été décrit est facile à comprendre avec de la paille, mais le même type de phénomène ou d'autres similaires peuvent se produire avec quantité d'autres matériaux naturels, comme la terre crue, le bois et ses dérivés, les

fibres végétales ou animales, la pierre, la chaux... Comment un mammifère, comme par exemple un cheval, arrive-t-il à vivre dehors en plein hiver sous la neige, même avec un pelage mouillé, là où un homme, même chaudement habillé, ne survivrait pas une nuit ? Ce qui est le plus surprenant, c'est qu'aucun modèle s'intéressant à l'isolation des constructions ne se soit jamais posé cette question toute simple. On sait par exemple que la laine de mouton peut absorber jusqu'à 30 % de son poids en eau sans perdre ses qualités isolantes. Mais on persiste à vouloir placer des pare-vapeur, y compris sur ce type de matériau, sans même se demander à quoi ils servent.

Le problème posé va, en fait, beaucoup plus loin, car on touche à ce que l'on pourrait appeler le modèle dynamique des parois, incluant le cycle de l'eau déjà évoqué plus haut. Les modèles d'évaluation actuels présentent en effet un mur comme un élément statique, homogène, inerte, sec et ne supportant pas l'humidité, n'ayant aucune réaction aux conditions extérieures ni aucune variabilité interne, pouvant être considéré comme possédant des caractéristiques fixes et linéaires en régime permanent. Or, un mur, tel que nous venons de le décrire, possède une dynamique interne très particulière, changeant ses propriétés selon le climat extérieur et son hygrométrie interne, voyant même ses propriétés se modifier selon la profondeur à laquelle on les observe au sein dudit matériau. En hiver, le flux d'air va apporter de l'humidité dans le mur ; le volume intérieur, lui, va apporter de la vapeur d'eau et modifier ainsi nombre de ses caractéristiques superficielles ou profondes selon l'heure de la journée. En été, le phénomène inverse aura le même effet de modification dynamique de la paroi. Entre le jour et la nuit, entre les périodes ensoleillées et les périodes pluvieuses ou venteuses, entre les passages froids et les moments chauds, il y aura à nouveau modification de cette dynamique interne. Elle ne sera pas directement liée en instantané au climat extérieur, car elle sera affectée par l'inertie de l'ensemble, par ses capacités de déphasage et d'amortissement des fluctuations d'apports d'énergie et de migration de l'eau, par l'hygrométrie variable au sein de sa masse et même par le comportement des occupants (ouverture de fenêtres, cuisson, activités sportives...).

Nous indiquons ci-après quelques-uns des phénomènes pouvant modifier les propriétés thermiques internes d'un matériau :

	Mécanismes	Causes
Chaleur	Conduction de chaleur	Différence de température
	Radiation	Différence de température
	Convection par flux d'air	Différence de densité
	Flux enthalpique de l'eau	Changement de phase
Vapeur	Diffusion des gaz	Pression de vapeur
	Transport moléculaire (effusion)	Pression de vapeur
	Diffusion en solution	Pression de vapeur
	Convection par fuite d'air	Gradient de pression totale
Liquide	Transport capillaire	Suction capillaire
	Diffusion de surface	Humidité relative
	Drainage	Gravité
	Flux hydraulique	Pression différentielle totale
	Electrokinesis	Champ électrique
	Osmose	Concentration

Nous sommes bien loin du seul coefficient U de la réglementation thermique décrivant une paroi. On peut complexifier encore un peu la réactivité de la paroi en créant sur sa face extérieure une peau laissant libre cours à une circulation convective de l'air modifiant l'hygrométrie de sa surface, convertissant et irradiant le flux solaire, créant des flux dynamisés par effet Venturi... Dans le même ordre d'idées, on peut encore souhaiter que l'air circulant sous cette peau, une fois réchauffé, puisse servir à chauffer l'intérieur du bâtiment en hiver.

Vouloir dans ces conditions, comme le fait la réglementation thermique, considérer un matériau naturel et une paroi intelligente comme n'importe quel isolant synthétique étanche et inerte ne peut que mener à d'importantes erreurs d'appréciation et d'interprétation.

Un matériau performant ne peut pas être un matériau synthétique inerte, il doit être dynamique, et réagir à son environnement. C'est ce dynamisme qui lui permet, comme au judoka, d'utiliser la puissance de l'adversaire

climatique au profit du confort humain, plutôt que de chercher à lutter inutilement contre une force qui sera toujours infiniment supérieure à tout ce que l'homme pourra inventer.

LE MUR TROMBE

Nous avons parlé du mur respirant, nous n'allons pas pour autant oublier son miroir, le mur Trombe, conçu par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel. (Voir aussi les différentes variantes de réalisation page 216 et suivantes.)

Félix Trombe est l'un des pionniers mondiaux de l'énergie solaire, il est en particulier celui qui dirigea la construction du four solaire d'Odeillo dans les Pyrénées.

Le principe général du mur Trombe est simple : on alimente en énergie solaire, par effet de serre, un volume de stockage de forte capacité, constitué d'un mur massif. Les matériaux utilisables sont des matériaux lourds : béton, brique pleine cuite ou crue, pierre, etc. Dans la pratique, les déclinaisons sont nombreuses et variées, selon l'effet précis recherché. On peut souhaiter valoriser immédiatement au mieux le moindre ensoleillement, en augmentant le nombre d'ouvertures laissant circuler l'air, comme on peut au contraire désirer restituer la nuit la chaleur de la lumière du jour, en utilisant une surface étanche à l'air d'épaisseur adaptée. On peut rechercher la capacité d'amortissement ou plutôt vouloir avantager le déphasage.

À chaque objectif visé correspondra une ou plusieurs variantes dans la conception, les formes et dimensions, les matériaux utilisés, la teinte, la régulation, l'espace entre le mur et la vitre...

La quantité d'énergie solaire transmise à travers un mur Trombe standard (en l'absence d'ouvertures de ventilation : mur capteur) dépend de l'épaisseur de la paroi, de son facteur solaire, de son déphasage et de sa résistance thermique.

Nous avons vu comment déterminer le déphasage d'un mur. Il faut qu'il soit de l'ordre de douze heures, afin d'apporter la nuit la chaleur accumulée le jour.

Le facteur de transmission solaire F_{ts} du mur (extrait des règles Th-BV de septembre 1988) dépend :

- du facteur solaire du vitrage S_v dont nous avons déjà vu la méthode de calcul ;

- du facteur d'absorption solaire α de la surface extérieure opaque, fonction de sa teinte (que nous allons examiner plus loin), et qui varie de 0,9 pour une surface noire à 0,2 pour des teintes très claires ;
- du coefficient K de transmission thermique de la paroi complète, mur, lame d'air et vitrage, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- de la somme des résistances thermiques des constituants de la paroi extérieure à la surface absorbante : vitrage et lame d'air.

$$F_{ts} = S_v \cdot \alpha \cdot K \cdot \sum R_i$$

L'énergie totale fournie est égale à l'intensité E_s du rayonnement solaire reçu (en joules par mètre carré) réduite du facteur solaire F_{ts} , multipliée par la surface A (en mètres carrés) du mur Trombe.

$$Q = E_s \cdot F_{ts} \cdot A$$

Si le facteur solaire d'un mur opaque est de l'ordre de 0,02, celui d'un mur Trombe correctement conçu, étanche à l'air, peut dépasser 0,10 dans sa forme simple (mur capteur étanche), soit une capacité à valoriser 10 % de l'énergie solaire reçue.

Un mur Trombe ventilé peut fortement augmenter cette valorisation, pour lui faire atteindre 50 %, mais en réduisant le déphasage. À noter, pour anticiper certaines questions, que si l'apport solaire d'un vitrage est supérieur à cette valeur, le facteur de valorisation solaire, lui, ne sera généralement pas à ce niveau, une part importante de la lumière ressortant par ce même vitrage ou par un autre (facteur d'absorption solaire souvent très faible dans le local). Ce qui nous intéresse ici, c'est de convertir la lumière en chaleur.

Le mur capteur transmet l'énergie solaire pour partie par conduction à travers le mur et pour une autre partie par circulation naturelle de l'air à travers les orifices. Le débit de ce flux d'air peut être calculé par la relation suivante⁶ :

$$m = \rho \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot (T_m - T_{in})}{(8 \cdot \left(\frac{A_d}{A_v}\right)^2 + 2) \cdot T_m}}$$

avec :

- m = débit massique de l'air (kg/s)
- ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)

- A_d = section du canal d'air (m^2)
- A_v = surface des orifices (m^2)
- g = constante gravitationnelle (m/s^2)
- H = distance entre les orifices d'entrée et de sortie d'air (m)
- T_m = température de l'air dans le canal
- T_{in} = température d'entrée de l'air dans le canal

Il nous faut déterminer la température de l'air dans le canal d'air du mur Trombe. Celle-ci ne varie pas de façon linéaire, mais exponentielle :

$$T_m = T_{in} + \left(T_{in} - \frac{(T_v - T_g)}{2} \right) \cdot \left(- \frac{m \cdot C_p}{2 \cdot h_c \cdot A} \cdot e^{\left(\frac{2h_c \cdot A}{m \cdot C_p} \right)} - 1 \right)$$

avec :

- T_v = température de la vitre (K)
- T_g = température de la face extérieure du mur (K)
- C_p = chaleur massique de l'air ($J/kg \cdot K$)
- h_c = coefficient de convection thermique ($W/m^2 \cdot K$)
- A = surface du mur Trombe (m^2)

L'ordre de grandeur du coefficient de convection thermique peut être pris par défaut égal à 10 en valeur approchée.

Les ouvertures de ventilation haute et basse du mur Trombe doivent représenter environ 3 % de la surface du mur, en augmentant relativement de l'ordre de 10 % les ouvertures hautes pour compenser la dilatation de l'air chauffé. Les ouvertures basses doivent être munies de clapets afin d'empêcher une inversion de la convection de nuit.

Il ne reste plus ensuite qu'à déterminer la puissance thermique de l'installation, en fonction du débit massique m d'air chauffé (en kg/s), de la chaleur massique C_p de l'air ($J/kg \cdot K$) et du différentiel de température $\Delta\Theta$ obtenu (en $^\circ C$).

$$P = \frac{dQ}{dt} = m \cdot C_p \cdot \Delta\Theta$$

Orientation

La première règle de base à appliquer pour réaliser un mur Trombe performant est de respecter scrupuleusement une orientation plein sud à plus ou moins $15^\circ C$ maximum. En effet, en dehors de l'intensité solaire, favorable au sud, autant il est facile de protéger un mur sud du soleil en été,

6. K. Imessad et M. Belhamel du Centre de développement des énergies renouvelables d'Alger : *Évaluation des performances d'un mur Trombe*.

autant la tâche devient difficile pour une orientation est ou ouest. Un détail fondamental qui est souvent oublié dans ce type de réalisation est le masque solaire pour l'été. Sans ce masque, le mur Trombe peut vite devenir une catastrophe pour les occupants des lieux. D'autres accessoires utiles peuvent être un rideau blanc ou réfléchissant, pouvant facilement être mis en place l'été devant le mur Trombe, un volet d'obturation et un système de ventilation haute vers l'extérieur. Il faut également penser au moyen de pouvoir nettoyer la vitre côté intérieur.

Une diffusion étalée sur vingt-quatre heures (amortissement thermique journalier) peut s'obtenir en jouant sur l'épaisseur du mur, devenue variable, par exemple, en alternant des zones minces et épaisses.

Déphasage

La dimension des ouvertures permettant le passage de l'air détermine en grande partie le déphasage du système. La recherche d'un déphasage complet peut amener à supprimer totalement ce flux d'air convectif et à déterminer l'épaisseur en fonction du matériau employé, de l'ordre de 15 à 20 cm en général pour un mur lourd. Mais dans ce cas, on se limite strictement à la capacité thermique du mur Trombe, cette solution a surtout un intérêt dans une construction sans inertie.

Quel que soit l'effet souhaité, l'inertie du reste du local recevant l'air chauffé d'un mur Trombe doit de préférence être élevée. Dans le cas contraire, il se produit une surchauffe lors de la restitution, ainsi qu'un déséquilibre thermique entre les différents murs, dégradant la sensation de confort, qui nécessite un rayonnement le plus homogène possible. La forte inertie intérieure permet d'enclencher un effet thermosiphon assurant une circulation naturelle de l'air. Celle-ci assure le transport de chaleur par convection vers l'intérieur, les parois intérieures absorbent la chaleur, refroidissant ainsi l'air qui revient au mur Trombe par le bas. On comprend aisément que si l'inertie n'est présente que dans le plancher, la pompe du thermosiphon ne fonctionnera pas ou très mal, de même donc que le mur Trombe. À l'inverse, une forte inertie au plafond en améliorera le fonctionnement.

Mais il ne faut pas que la nuit la pompe s'inverse et éjecte dehors via le mur Trombe et son vitrage la chaleur gagnée en journée. La première solution est d'équiper les ouvertures du mur de clapets interdisant l'inversion

du flux du thermosiphon la nuit. Mais rappelons-nous l'igloo des Inuits. Une autre solution toute simple, naturelle et automatique, est de munir le mur Trombe d'un siphon thermique en partie basse, parfaitement isolé thermiquement du reste de la construction et surtout de la masse du mur Trombe. La nuit, l'air froid va tomber dans ce siphon et former ainsi un bouchon thermique



Les discrets murs Trombe de cette construction sont protégés par un vitrage assurant l'effet de serre, et équipés de protections solaires, qu'on distingue particulièrement bien sur l'avancée. L'insertion montre le détail constructif de ces murs en chantier, montés avec de la brique de terre crue. Dans le cas présent, les nombreuses ouvertures pratiquées dans le mur Trombe permettent un échange instantané de la chaleur produite, et donc un faible déphasage. Une teinte de brique plus sombre aurait amélioré leur efficacité, et une protection solaire externe plus importante aurait été préférable pour l'été. (Photos Didier Hubert, BTC.)

qui bloquera tout simplement le thermosiphon. Ce siphon sera en même temps un accélérateur du thermosiphon dès les premiers rayons de soleil.

Couleur et surface

Dans tous les cas, il faut se rappeler que la teinte du mur Trombe conditionne énormément son efficacité. Si un mur noir est capable de convertir en chaleur plus de 90 % de la lumière, un mur de béton brut ou de couleur brique convertira de l'ordre de 50 à 60 % de cette énergie. Là plus qu'ailleurs, l'esthétique architecturale doit passer au second plan. C'est la teinte du matériau employé en surface qui importe.

De même, plus la surface est rugueuse, plus sa capacité d'absorption est grande. On peut ainsi soit strier la surface, soit créer de nombreux redents verticaux ou aspérités, qui augmentent l'accumulation tout au long de la journée. On peut également jouer sur ces formes pour privilégier la capture thermique le matin ou plutôt le soir, suivant l'usage des locaux chauffés, ou encore corriger une orientation non parfaitement au sud.

Des performances accrues

Enfin, en équipant le mur Trombe d'un volet, éventuellement roulant, on améliore encore sa performance, d'une part, en réduisant les pertes vers l'extérieur la nuit, d'autre part en assurant une parfaite protection l'été. Le volet ouvert et peint en blanc peut même servir de réflecteur l'hiver pour augmenter la capture solaire, entre autres, en cas d'orientation défavorable du mur, par exemple vers l'est ou l'ouest. La mise en place de volets présente aussi l'intérêt, par exemple, plutôt que de les isoler parfois avec difficulté, de transformer opportunément les allèges de fenêtres mal isolées en mur Trombe, avec un volet commun à la fenêtre et à l'allège.

S'il est correctement dimensionné et conçu, un mur Trombe peut couvrir la totalité des besoins énergétiques d'une grande salle en plein hiver, voire d'un bâtiment entier, pour peu qu'il y ait du soleil. Pour un rayonnement immédiat, sans déphasage, la surface de mur à prévoir se situe aux alentours de 10 % de la surface à chauffer, avec une épaisseur réduite (une plaque de tôle pourrait à la limite faire l'affaire, si ce n'est qu'il y a un risque de surchauffe locale), les ouvertures de convection de l'air ne devant pas dépasser 2 à 3 % de la surface du mur. Les ouvertures hautes

sont légèrement plus grandes que les ouvertures basses, et une ouverture de ventilation haute doit alors exister vers l'extérieur afin de créer la ventilation naturelle du bâtiment en été, excellente, pour peu qu'un puits climatique alimente le renouvellement d'air. Le mur Trombe se transforme alors en ventilateur naturel du puits climatique.

Il existe de nombreuses variantes au mur Trombe, comprenant par exemple des refends intérieurs ou des circuits d'eau. Ces derniers permettent de transporter la chaleur à distance et de régler au moins partiellement le problème de l'été, sous réserve de disposer d'un système de décharge.

Une construction bioclimatique est avant tout un système dynamique, qui joue sur les mouvements de l'air, de la vapeur et de l'eau. La bonne compréhension des mouvements d'air générés par le dynamisme de la construction est fondamentale pour aboutir à un résultat performant.

LES TEINTES BIOCLIMATIQUES

Nous avons abordé avec le mur Trombe l'effet de la couleur sur la capture thermique du rayonnement solaire. Nous allons en profiter pour parler un peu plus longuement des couleurs et de leur utilisation en bioclimatisme.

Conversion de la lumière en chaleur

Blanc	0,10 à 0,25
Orange à rouge	0,30 à 0,50
Gris à gris foncé	0,40 à 0,50
Vert	0,40 à 0,60
Rouge à brun	0,50 à 0,70
Brun à bleu	0,70 à 0,80
Bleu clair à bleu foncé	0,80 à 0,90
Noir	> 0,90

Nous disions que le noir sur un mur Trombe absorbe 90 % du rayonnement solaire. Nous allons ajouter qu'une peinture cellulosique bleu ciel pourra convertir environ 80 % de la lumière en chaleur (eh oui ! bleu ciel, c'est, comme son nom l'indique, la couleur du ciel), à peine moins que le bleu foncé, contrairement à quelques idées bien ancrées. Ce n'est pas dans les fréquences bleues du rayonnement solaire que se trouve son énergie thermique, et si la paroi

est bleue, c'est qu'elle吸orbe tout le reste, à commencer par le rouge et l'infrarouge. Les teintes tirant sur le rouge, au contraire, renvoient les infrarouges qu'elles n'absorbent pas. Quant au blanc, qui réfléchit presque toute la lumière reçue, il atteint avec peine les 10 % de rendement et il est à proscrire pour un mur Trombe.

Coefficients d'absorption solaire de différents matériaux

Ardoise	Noir	0,89
Bois	Foncé	0,85
	Clair	0,60
Granite	Foncé	0,80
	Rouge	0,55
Grès, terre crue	Rouge	0,73
	Gris clair	0,62
	Beige	0,54
Béton	Sale	0,80
	Ancien	0,70
	Neuf	0,55
Brique	Rouge	0,73
	Claire	0,44
	Blanche	0,26
Marbre	Sombre	0,66
	Clair	0,44
Calcaire	Sombre	0,50
	Clair	0,35
Plâtre	Blanc	0,07

C'est pourquoi les murs ocre de Provence sont presque aussi frais que les murs blancs, l'éblouissement en moins. Et un mur Trombe ocre ou rouge ne fonctionnera pas.

Mais ce qui vaut pour le mur Trombe est-il également vrai pour les murs, plafonds et plancher d'un bâtiment ? Dans le cas du mur Trombe, la quasi-totalité de la lumière qui n'est pas absorbée est renvoyée vers l'extérieur par le vitrage, car elle ne peut aller ailleurs et elle est alors perdue. Il faut donc une teinte très absorbante.

Tons foncés

Dans une pièce, le fonctionnement est tout autre. D'abord, il serait insupportable d'avoir un mur capable de monter à 60 °C ou 80 °C. La réaction serait instantanée : ouvrir

les fenêtres. La sensation immédiate de chaleur irradiée serait intense, le gain pour le bâtiment serait beaucoup plus discutable. Ensuite, ce mur créerait un déséquilibre entre les différentes températures de radiation des parois, augmentant la sensation d'inconfort. Enfin, le mur n'étant pas capable d'absorber instantanément la chaleur produite, cette dernière serait immédiatement irradiée de nouveau pour chauffer l'air ambiant, avec un fort effet convectif de la chaleur vers le haut, plutôt qu'en s'accumulant dans la matière. Et si la fenêtre n'était pas ouverte, la hausse de température intérieure augmenterait les déperditions de ladite fenêtre.

Couleurs claires

À l'inverse, si les cloisons sont claires, que se passe-t-il ? Une faible part de la lumière est absorbée, le reste est réfléchi dans toutes les directions, y compris dans les zones à l'ombre. En effet, un mur n'est pas un miroir, il diffuse dans toutes les directions la lumière. Cette diffusion lumineuse permet de chauffer uniformément l'ensemble des parois de la pièce : le confort est conservé ainsi que la luminosité, il y a peu d'ombre, l'absorption de chaleur par la matière se fait sur une surface beaucoup plus grande, donc moins intensément, ce qui laisse le temps à la matière d'accumuler cette chaleur dans sa masse. *In fine*, la température de la pièce augmente beaucoup moins vite, alors que la quantité d'énergie absorbée est sensiblement la même. Seul un effet convectif de l'air déséquilibre légèrement l'ensemble, en augmentant la quantité de chaleur au niveau du plafond. Pour le contrebalancer, il faut simplement utiliser au sol une teinte plus sombre, et au plafond du blanc pur. C'est ce qui s'est toujours fait d'instinct dans les anciennes constructions. La recherche du confort passe souvent par des règles simples et évidentes pour peu qu'on s'y intéresse.

Chaque type de matériau présente une capacité propre de conversion de la lumière en chaleur.

Et le noir ?

L'erreur à proscrire, qu'on retrouve même parfois dans certaines maisons passives, est de croire qu'en peignant en noir un mur massif, on va augmenter l'efficacité de la valorisation du soleil. La seule chose qu'on gagnera à coup sûr, c'est un inconfort insupportable en été. La surchauffe diurne via des parois sombres peut être appré-

ciable au niveau du cercle polaire mais l'est nettement moins en région méditerranéenne et ne permet en tout cas jamais de faire des économies d'énergie. À Nice sur la Promenade des Anglais se trouve une caricature de cette erreur, sous forme d'un immeuble en verre, orienté plein ouest et surchargé de noir : un superbe capteur solaire, invivable douze mois sur douze malgré une climatisation gargantuesque. Ce n'est pas avec du noir que l'on maîtrise l'énergie et encore moins le confort. Le bioclimatisme passe par des teintes claires qui assurent confort, luminosité agréable et valorisation efficace de l'énergie solaire.

LA TOITURE

Nous avons longuement évoqué les cloisons extérieures, il en est pourtant une qui reste à traiter : la toiture. Cette paroi a une particularité : elle possède, surtout en région méditerranéenne, une orientation idéale pour capter un maximum de soleil en été et un minimum en hiver.

Nous passerons rapidement sur l'erreur monumentale qui consiste à poser sur des toitures ayant souvent un angle d'inclinaison inférieur à 15° une batterie de capteurs solaires destinée à alimenter une chaudière solaire (cela devrait être interdit car une telle implantation permet de surproduire en été de la chaleur qui détruit l'installation solaire et ne produit quasiment plus rien en hiver, quand on en a besoin) et nous allons nous intéresser à l'été.

Pourquoi à l'été, alors qu'on nous répète à l'envi que la principale source de déperdition thermique en hiver d'une construction est sa toiture ? Tout simplement parce que « qui peut le plus peut le moins ». Si la toiture possède les qualités pour vous protéger de la canicule l'été, elle aura probablement les atouts suffisants pour réduire vos besoins de chauffage en hiver : s'il fait - 10 °C dehors, il y a 30 °C d'écart de température à vaincre. En été, il n'est pas rare, en particulier en zone méditerranéenne, de voir une toiture approcher ou dépasser les 80 °C : le problème est d'un autre ordre de grandeur.

De l'air !

Pour se protéger de cette fournaise qu'est une toiture en été, il faut bien sûr commencer par l'isoler parfaitement, sans pont thermique, avec environ 30 cm d'isolant clas-

sique, qu'il s'agisse de matériau naturel ou artificiel. Le problème de l'hiver est ainsi réglé, mais celui de l'été ne l'est que partiellement. Comme il n'existe pas de moyen d'empêcher la toiture de recevoir le soleil de plein fouet, là comme ailleurs, la solution ne vient pas de la lutte contre la nature, mais de l'adaptation, en utilisant les propriétés qui découlent de la situation climatique. Si la toiture atteint des températures extrêmes, il n'en est pas de même avec l'atmosphère qui, grâce à son inertie, arrive à se maintenir dans des ordres de température supportables (et heureusement pour nous). Pour protéger l'isolant de la température de la toiture, il faut donc y intercaler... tout simplement le plus grand volume d'air possible et le laisser se renouveler autant qu'il le peut. L'isolant, au lieu d'être porté à plus de 80 °C sur sa face externe, se retrouve alors à la température de l'air, à environ 40 °C lors d'une canicule. Si on souhaite obtenir 25 °C dans la construction, on aura un apport thermique par la toiture divisé par quatre par cette simple lame d'air, c'est comme si on multipliait par 4 l'épaisseur d'isolant. En hiver, la toiture étant à la température de l'air, on ne change rien.

Dans les vieilles constructions méditerranéennes, il y avait toujours des combles largement ventilés. Mais depuis le milieu des années 1970, sur la foi des certitudes de la réglementation thermique, on s'est mis à étancher les combles, quand la solution n'a pas été de les supprimer, en les aménageant ou en collant l'isolant à la toiture.

La bonne solution est pourtant celle de la surtoiture, qu'elle soit classique ou plate ou en terrasse : la paroi de la toiture ne doit jamais toucher l'isolant, mais au contraire laisser largement l'air circuler, présenter une pente régulière afin de permettre la convection naturelle de l'air et posséder des entrées d'air en parties basse et haute. Plus cela chauffera, plus l'air y circulera vite. Ainsi, en hiver, cela ne change rien, puisque c'est l'isolant qui assure tout le travail (il n'y a pas ou peu de soleil) et on peut même améliorer l'isolation en supprimant la circulation d'air, alors qu'en été, la température de surface de l'isolant ne sera plus de 80 °C mais de 30 à 40 °C. Là encore, c'est la bonne compréhension des mouvements de l'air qui assure l'efficacité de la paroi. Et c'est encore une fois la séparation des fonctions qui permet de perfectionner chaque élément d'un bâtiment ainsi que l'économie globale d'un projet.



Ce projet de logements pour un centre de réinsertion sociale situé près d'Avignon dans le Vaucluse est en cours de construction. Le bâtiment en ossature bois et isolants naturels est équipé d'une surtoiture destinée à éviter l'usage de climatisation, tout en offrant un bon confort thermique y compris en période caniculaire. La surtoiture crée un espace ventilé de 40 cm environ. Sa pente orientée au sud augmente l'effet venturi créé par le mistral omniprésent dans la région. (Architecte Olivier Joubert - Cabinet Ostraka.)



Une toiture végétalisée permet d'amplifier le rapport fusionnel entre une construction et son environnement. Ici, construction islandaise. (Photo Bernard Arditti.)

Enfin, à l'inverse du mur Trombe, il n'est pas question d'essayer dans les régions à fort ensoleillement de faire de la récupération thermique avec une toiture. Il faut éviter de choisir une couleur qui convertisse la lumière en chaleur. Les teintes allant du blanc au beige sont à privilégier, en renonçant au bardage bleu ciel, comme on le voit parfois, surtout outre-mer ou, pire, au revêtement bitumineux noir.

Sans cette disposition, il est illusoire de vouloir assurer un bon confort climatique d'été aux locaux situés sous la toiture.

C'est, là encore contrairement à certaines idées reçues, dans les régions nordiques ou montagneuses que la capture d'énergie solaire par les toitures devient performante, d'autant plus que du fait de la neige les toitures sont généralement à forte pente.

LA TOITURE VÉGÉTALISÉE

Il n'est pas toujours évident de réaliser une surtoiture. La réponse dans ce cas-là doit être l'inertie, en plus évidemment de l'isolation thermique. Et pour assurer cette inertie à moindre frais, il n'y a pas de meilleure solution que la terre. Celle-ci apporte à faible coût une inertie très importante mais aussi d'autres avantages non négligeables.

Traditionnellement, la technique des toitures végétales nous vient des pays scandinaves, comme sur les igloos de terre des Sámis que nous avons visités. L'étanchéité des toitures était assurée par de l'écorce de bouleau qu'on maintenait en place par des mottes d'herbe.

C'est dire que son intérêt, d'origine nordique, ne concerne pas uniquement la canicule d'été.

Esthétique et isolation

Réservee il y a peu à quelques réalisations atypiques, cette technique commence à se démocratiser et à fleurir sur un plus grand nombre de toits, au point de devenir obligatoire dans certaines villes. Elle concerne autant le particulier que le tertiaire, chacun y trouvant un intérêt environnemental, énergétique et économique, y compris sur l'aspect urbain des îlots de chaleur. Les avantages sont en effet multiples et variés :

- augmentation de l'étanchéité ;
- protection de l'isolation par l'extérieur ;
- très faible énergie grise ;
- forte augmentation de l'inertie thermique (protégeant de la surchauffe estivale et des pics de froid hivernaux) ;
- rétention d'eau ;
- meilleur aspect architectural ;
- support de la biodiversité ;
- coût limité de mise en œuvre et de maintenance.

Elle permet, à l'aide de matériaux économiques, simples à trouver sur place, de réaliser des toitures bien isolées thermiquement, étanches à l'air et à l'eau, résistantes aux intempéries et aux incendies. En milieu urbain, elle participe à l'isolation phonique et à la purification de l'atmosphère, offre une alternative esthétique aux toitures goudronnées, aluminisées ou gravillonnées et réduit le phénomène d'îlot de chaleur. Elle participe aussi de façon importante à la régulation des flux orageux, en apportant une inertie hydrologique. Elle offre enfin un écosystème refuge pour de nombreuses espèces animales et végétales. Et dans la rigueur de l'hiver, elle participe à l'isolation thermique importante apportée par la couche de neige qu'elle maintient longtemps.

Sur une toiture terrasse existante, elle n'amène pas ou peu de surcharge par rapport au substrat classique, la résistance de la toiture étant d'ailleurs calculée sur sa capacité à retenir l'eau et la neige.

On distingue deux types de toiture végétalisée :

- extensif, il fait appel à une faible épaisseur de terre, de 5 à 15 cm, et accueille des plantes rustiques, supportant la sécheresse et ne nécessitant pas d'entretien.

La toiture végétalisée est une pratique ancienne et fréquente en Islande pour protéger les constructions du froid.

Pour une telle toiture, celui-ci est très faible, généralement inférieur à celui d'une étanchéité classique ;

- intensif, il demande une épaisseur de terre plus importante, comprise entre 15 et 30 cm. Il permet l'utilisation de plantes à racines profondes et, sous réserve d'une surveillance de son hygrométrie, il peut accueillir toutes sortes de plantations, y compris des fleurs et des légumes, des arbustes ou du gazon. Cette solution impose toutefois un entretien régulier.

Dans certains pays, on a même vu les résidents commencer à s'approprier ces toitures et les transformer en jardin, y faisant pousser fleurs et légumes. La durée de vie d'une toiture végétalisée est au moins deux fois supérieure à celle d'une toiture classique et, l'expérience aidant, elle pourrait encore s'améliorer.

Dans le cas de construction de maisons individuelles ou de petits bâtiments tertiaires, la toiture végétalisée invite à poursuivre le raisonnement un peu plus loin, en se demandant s'il ne serait pas judicieux de faire descendre la toiture côté nord jusqu'au sol, et pour cela de remblayer la façade nord avec de la terre, jusqu'à la toiture. On obtiendrait ainsi une toiture facile d'accès, à très forte inertie, et une bonne isolation de la façade nord, tout en protégeant la construction des vents.

Enfin, une bonne compréhension du mouvement de l'eau dans une toiture végétalisée est indispensable à son efficacité. Un drainage insuffisant ou mal conçu apportera des difficultés d'étanchéité ; trop important, il desséchera la toiture en été et empêchera son biotope de survivre.

Par contre, ce qui est beaucoup plus rarement mis en œuvre, c'est l'apport d'inertie au bâtiment lui-même, parce que la toiture végétalisée classique est placée au-dessus de l'isolant plutôt qu'en dessous. Tout en conservant au-dessus de l'isolant une couche suffisante de terre pour assurer la végétalisation, la bonne attitude consiste à placer un maximum de terre, ou tout autre matériau dense, sous l'étanchéité et l'isolation thermique plutôt qu'au-dessus. Cet apport majeur d'inertie au niveau de la toiture permet de beaucoup mieux limiter la surchauffe estivale et de mieux valoriser les apports solaires en hiver.

Il semble parfois que, dans l'esprit de certains concepteurs, cette toiture végétalisée possède comme seul objectif l'esthétique « verte » du résultat, ou qu'elle soit simplement un moyen alternatif de faire du greenwashing



© trakker - Fotolia.com

avec une toiture végétalisée sur laquelle se battent trois herbes vivaces.

Dans ce cas en particulier, mieux vaut mettre la terre sous l'isolant et recouvrir celui-ci de son étanchéité puis d'une couche de gravier. Cela sera sûrement moins vert d'aspect, mais plus efficace du point de vue bioclimatique. Si la toiture le permet, l'idéal reste la double couche de terre emprisonnant en son centre l'isolation thermique et l'étanchéité.

LA PROTECTION SOLAIRE DES FENÊTRES

Nous avons vu comment concevoir une enveloppe bioclimatique du bâtiment, il nous reste à y maîtriser le soleil, laisser entrer sa chaleur au maximum en hiver, au minimum en été, et cela, si possible, de façon passive, c'est-à-dire sans équipements technologiques sophistiqués, consommateurs d'énergie et sujets à pannes.

Nous nous abstiendrons de commenter ces constructions équipées de protections solaires horizontales sur les menuiseries orientées au nord, comme on en voit si souvent sur les bureaux des zones d'activité, et qui n'ont comme seul intérêt que d'obliger à allumer la lumière en plein jour, y compris l'été, en plus du surcoût pour le maître d'ouvrage. Certains objecteront que c'est toujours mieux que les tours de verre et d'acier laquées noir, orientées est-ouest.

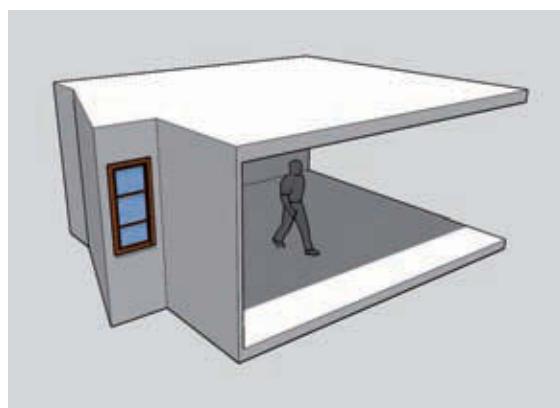
Cela a déjà été dit, il y a une seule façon de faire entrer efficacement le soleil dans une construction, c'est par la façade sud. Celle au nord ne voit que très peu le soleil, un peu au lever et au coucher en été ; la façade est, et encore plus la façade ouest, sont des catastrophes pour le confort d'été. Pour ces deux dernières orientations, une solution simple est de décrocher ces façades en redent pour y inclure des fenêtres orientées au sud, à condition toutefois de ne pas oublier de les protéger du soleil d'été.

À défaut, il reste les volets afin de pouvoir occulter correctement ces ouvertures et les protéger du soleil couchant d'été et apporter un complément d'isolation l'hiver. Il faut évoquer séparément les menuiseries orientées au sud (qu'on peut élargir aux orientations entre le sud-est et le sud-ouest) et celles orientées du sud-est au nord-est ou du sud-ouest au nord-ouest.

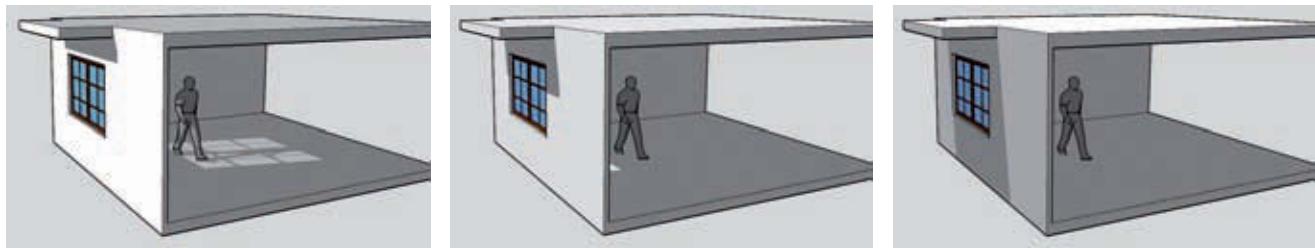


Toitures végétalisées au cœur de Tokyo.

Faire entrer le soleil par le sud impose de prévoir des protections solaires adaptées, qui laisseront passer le soleil en hiver et l'interdiront l'été. Nous reviendrons ultérieurement plus en détail sur la meilleure façon de dimensionner ces protections.



Un redent permet sur les parois à l'est et à l'ouest d'orienter l'ouverture des fenêtres vers le sud.



Hiver

Printemps-automne

Été

Une protection solaire bien dimensionnée offre sur les menuiseries la totalité de l'ensoleillement disponible en hiver et les protège parfaitement du rayonnement direct en été.

Il ne faut pas oublier la protection solaire des parois opaques, qui est également importante en région fortement ensoleillée. La solution sur la façade sud est le débord de toiture suffisant (balcon, loggia, corniche, marquise, auvent...) et la treille végétalisée. On pourra aussi citer pour mémoire la végétation grimpante sur les façades est et ouest, de type vigne vierge ou ampélopse par exemple, qui est malheureusement passée de mode, bien qu'étant extrêmement efficace. Et on finira par la végétation caduque des arbres, qui ne relève plus directement de l'enveloppe, mais qui est tout aussi performante, en particulier pour protéger les murs et les vitrages ouest. La végétation apporte un autre avantage lié à sa dissipation d'humidité durant les fortes chaleurs.

Pour les ouvertures non strictement orientées sud, il peut être efficace de prévoir un brise-soleil vertical.



Principe d'une protection solaire. Les deux axes représentent la trajectoire des rayons solaires en hiver et en été à midi ; ils permettent de visualiser la variation d'emprise de l'ensoleillement reçu selon la saison, et l'adaptation de la protection solaire aux dimensions des baies vitrées. (Architecte Olivier Joubert - Cabinet Ostraka.)

Dimensionnement des protections solaires

Une question revient comme un leitmotiv dans la bouche de tous ceux qui commencent à s'interroger sur le sujet : comment dimensionner une protection solaire ?

Faire entrer le soleil par le sud impose de prévoir des protections solaires adaptées. Pour définir un brise-soleil efficace, il faut comprendre l'évolution de la position du soleil en fonction de l'heure et de la saison.

Cette position en fonction de l'heure varie grosso modo de l'est à l'ouest, à raison de 15° par heure, l'angle du soleil par rapport au sud étant par convention de -90° à 6 heures du matin, 0° à midi et +90° à 18 heures. Évidemment, si la façade principale n'est pas parfaitement au sud, il faudra procéder à une correction en conséquence.

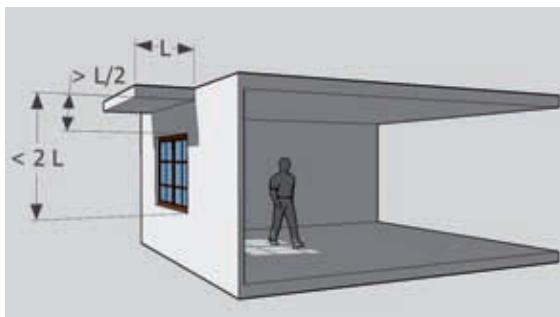
La position saisonnière détermine l'angle par rapport à l'horizontale. Cet angle au niveau de l'équateur est appelé déclinaison et varie entre -23°27' et +23°27' par rapport à la verticale, il correspond au plan de l'écliptique, c'est-à-dire l'inclinaison de la Terre sur son axe, par rapport au plan qu'elle parcourt autour du soleil. Mais comme nous ne sommes pas à l'équateur, il faut, comme pour la position horaire, procéder à une correction correspondant à la latitude du lieu que l'on ajoute à la déclinaison. La latitude de la France est d'environ 45°. L'angle du soleil à midi par rapport à l'horizontale va donc varier entre environ 22° en hiver et 68° en été.

En pratique, on va pouvoir accepter sur les fenêtres le plein soleil durant les quatre mois les plus froids et on va vouloir s'en passer totalement pendant les quatre mois les plus chauds. Nous ne sommes pas en train de construire la fusée Ariane, mais un simple bâtiment.

Nous pouvons donc nous contenter d'approximations et considérer que notre brise-soleil devra laisser totalement passer les rayons solaires sous un angle de 30° et les arrêter avec un angle supérieur à 60°. Ces deux valeurs d'angle sont assez pratiques, car elles nous permettent d'édicter trois principes simples :

- nous appelons longueur du brise-soleil la distance horizontale qui sépare le mur de l'extrémité du brise-soleil ;
- la ligne horizontale qui relie la longueur du brise-soleil au mur doit se situer au-dessus du haut de la fenêtre, au moins à la moitié de cette longueur (cela pour assurer l'ensoleillement d'hiver) ;
- cette même ligne doit être à une distance du bas de la fenêtre au plus égale à deux fois la longueur du brise-soleil.

D'une autre manière, on peut dire que l'extrémité du brise-soleil doit former avec le haut de la fenêtre un angle au moins égal à 30° et avec le bas de la fenêtre un angle au plus égal à 60°. En procédant ainsi, on obtient une ombre totale en milieu de journée d'avril à août et un ensoleillement total d'octobre à février. En faisant quelques croquis, on verra vite que plus la fenêtre est haute, plus l'extrémité du brise-soleil doit être éloignée du mur.



Principe de dimensionnement d'une protection solaire.

Dans les régions froides, on pourra augmenter la durée d'ensoleillement en réduisant la profondeur du brise-soleil. Si la façade n'est pas plein sud, les choses se compliquent un peu, car l'angle d'incidence du soleil est faussé. On peut déterminer de manière mathématique la position idéale de l'extrémité du brise-soleil. Mais pour rester simple, disons que la longueur et la largeur du brise-soleil devront être augmentées d'autant.

Pour être totalement efficace, en particulier pour les ouvertures qui ne sont pas orientées parfaitement plein sud, le brise-soleil pourrait être équipé d'une occultation verticale en biais, dont l'arête extérieure reliera l'extrémité du brise-soleil à un angle d'environ 45°. Dans la pratique, on pourra se contenter d'un encastrement de la fenêtre dans le mur, à condition que le brise-soleil déborde de chaque côté de la fenêtre d'une distance grossièrement égale à sa profondeur. On y perdra un peu en chaleur en hiver et en ombrage en été. Rappelons que nous parlons bien ici d'une fenêtre orientée approximativement au sud.

Il existe de multiples autres solutions de détails pour créer ces brise-soleil, dont les impacts esthétiques sont à prendre en compte afin de parfaitement les intégrer à l'architecture du bâtiment. Les réaliser d'un seul tenant ou en multiples lamelles horizontales ou, encore mieux, inclinées vers le haut pointant vers le soleil d'hiver : les choix ne manquent pas et devront être étudiés au cas par cas. Des lamelles orientées vers le haut à 22° et espacées de façon à créer un ombrage total durant les mois d'été peuvent être particulièrement performantes.

Un dernier détail à ne pas négliger concerne le sol devant le vitrage. Il ne sert à rien de protéger une baie vitrée du soleil, si c'est pour disposer devant elle une terrasse de teinte claire qui créera un magnifique miroir rendant caduque le brise-soleil, *a fortiori* quand cette terrasse est en béton carrelé garantissant une accumulation puissante de chaleur. La pergola ou la treille, mais aussi les plantations au sol, montrent ici tout leur intérêt, car non seulement elles n'absorbent pas de chaleur, mais elles ne réfléchissent pas la lumière.

Utilité des volets et persiennes

Il existe un autre type de pare-soleil, tout simple, qui s'appelle le volet, qui n'est pas contradictoire d'ailleurs avec un brise-soleil, mais peut utilement le compléter. Le volet peut être classique sur charnières, roulant (vertical) ou coulissant (horizontal). Cette occultation des fenêtres peut également servir de complément d'isolation les nuits d'hiver. Il est d'ailleurs étonnant que la réglementation thermique autorise la mise en place de systèmes de climatisation sur des bâtiments non équipés de persiennes ou de volets. Climatiser sans protection solaire, c'est comme chauffer fenêtres ouvertes : cela n'a aucun sens.

Quand on parle de persiennes, il s'agit bien de persiennes « extérieures », surtout pas de ces machines à produire du chaud que sont les persiennes intérieures métalliques. Malgré tout, en rénovation, ces persiennes intérieures sont parfois un moindre mal, à condition de les choisir blanches ou réfléchissantes, quand il n'existe pas d'autre solution (ce qui est rare). Un simple rideau blanc en coton brodé, comme savaient le systématiser nos anciens, est souvent tout aussi efficace.

Nous avons décrit le masque solaire des vitrages orientés au sud mais pas celui des vitrages orientés à l'est ou à l'ouest. C'est tout simplement parce qu'il n'y a pas de masque performant dans ces directions. Les masques verticaux, dits « redents », s'ils apportent un petit gain complémentaire au sud-ouest ou au sud-est, sont totalement contre-performants à l'est et à l'ouest, car ils n'atténuent quasiment rien en été et, au contraire,

ils deviennent efficaces en hiver, quand on recherche le soleil. Pour ces orientations, la seule occultation efficace en été, en dehors de la solution idéale d'une végétation positionnée entre l'est et l'ouest en passant par le nord, est la persienne ou le volet, qui offriront aussi en hiver une isolation complémentaire la nuit. Un brise-soleil horizontal sur une menuiserie à l'est ou à l'ouest, prolongé côté sud, apportera toutefois un supplément de confort en été aux heures les plus chaudes, la meilleure solution restant de limiter au strict minimum les menuiseries sur ces orientations et, lorsqu'elles sont nécessaires pour l'éclairage, de leur donner une forme verticale étroite en les encastrant fortement dans la paroi.

LE PUITS CLIMATIQUE

Historique du puits climatique

Il y a deux mille ans, les Romains savaient maintenir une température clémence dans leurs demeures, sans électricité, sans haute technologie, mais simplement en observant les phénomènes naturels et en se servant du climat à leur profit plutôt qu'en essayant de le combattre.

Ils utilisaient le système du puits romain, ancêtre, ô combien plus performant, de nos puits climatiques actuels, dits « canadiens » ou « provençaux »⁷, ne serait-ce que parce qu'il fonctionnait sans électricité. En été, lorsque le soleil irradie son ardente lumière, une paroi au sud devient très chaude et même brûlante. Un conduit vertical en terre cuite, orienté au sud, chauffe au point de voir apparaître en son sein une convection de l'air surchauffé, qui monte afin de s'échapper. Ce flux enclenche ce qu'on appelle le tirage naturel. Si la cheminée prend son air à l'intérieur de la construction, il se crée une dépression dans le bâtiment. Sous la surface du sol, la terre est à une température d'environ 15 °C. Il suffit alors de permettre une entrée d'air par des conduites enterrées pour forcer la circulation d'air dans ce milieu frais, ce qui va rafraîchir l'air extérieur avant qu'il n'arrive dans le bâtiment. Ce n'est rien d'autre que ce qu'on nomme aujourd'hui un puits provençal, mais fonctionnant naturellement, le débit d'air étant proportionnel à l'ensoleillement.



La protection solaire peut se faire de multiples manières. Vers l'est ou l'ouest, les persiennes restent la meilleure solution. (Architecte Thierry Gonard.)

7. Ces puits n'étant en réalité ni canadiens ni provençaux, il convient d'utiliser la bonne terminologie, qui est « puits climatique » ou encore « échangeur air-sol ».

Propriétés thermiques des matériaux constituant le sol

Matériaux	ρ	C	λ
Minéraux	2 650	0,80	2,90
Sable et gravier	1 700 à 2 200	0,91 à 1,18	2,00
Argile et limon	1 200 à 1 800	1,67 à 2,50	1,50
Terre arable	1 300	1,90	0,25
Eau	1 000	4,20	0,59
Glace	920	2,10	2,20
Air	1 250	1,00	0,02

Le système peut d'ailleurs très bien fonctionner avec une simple cave, l'air chauffé dans la construction servant à créer le tirage naturel pour peu qu'on le laisse s'échapper par le haut. Il faut bien sûr prévoir une entrée d'air extérieur dans la cave. Et cela nous renvoie indirectement aux maisons mozabites que nous avons déjà mentionnées. Dans une variante de ce principe pour un usage hivernal, la cheminée permettant de chauffer l'air au sud peut posséder en partie haute un clapet permettant à l'air chaud de pénétrer dans la construction, clapet que l'on ouvre en hiver, en obstruant le haut du conduit. On crée ainsi une boucle thermodynamique si on ajoute côté nord un passage de l'air intérieur vers la cave.

Pour qu'une boucle thermodynamique fonctionne, il faut une source chaude et une source froide, la convection naturelle fait le reste. L'air chaud, en montant, aspire l'air de la cave, qui se retrouve en dépression et aspire l'air de la construction. Arrivé dans la cave, l'air se rafraîchit en cédant sa chaleur à la masse de la construction et éventuellement au sol. La nuit, la boucle s'inverse et c'est alors la cave, transformée en siphon (comme dans l'igloo), qui cède sa chaleur à l'air, lequel va la transporter vers l'intérieur de la construction.

Mais nous allons plutôt nous tourner vers les *bagdirs*⁸ iraniens, présents dans de nombreuses régions du Moyen-

Orient, et nous interroger sur une conception intelligente et passive des systèmes d'aération, car nous avons aussi à apprendre de la riche architecture vernaculaire iranienne. Un *bagdir* est une tour qui marie l'eau, la terre et le vent pour lutter passivement contre le feu du ciel.

Le *bagdir* comprend une source d'eau et une tour aérodynamique. Il reprend le principe du puits romain, mais en plus travaillé. Ce puits romain est rempli en partie d'eau dans son tracé enterré horizontal. Dans les *bagdirs* les plus simples, le puits se limite à un bassin d'eau au pied de la tour à vent. Celle-ci est constituée de terre crue et comprend un certain nombre de lames d'air verticales, généralement entre deux et huit, suivant le type de vents dominants, les unes présentant leur entrée face au vent, les autres dos au vent. Au pied de la tour, les lames d'air communiquent entre elles ainsi qu'avec le volume habitable et permettent une remontée de l'air entrant sans passer par l'intérieur de l'habitation. Le système ne peut évidemment fonctionner efficacement que dans les régions chaudes, ventées et présentant un air sec... comme par exemple en Provence. Nous reviendrons ultérieurement sur la conception pratique d'un *bagdir* (voir partie 4, page 218).

Conception générale d'un puits climatique

En attendant de voir le principe des *bagdirs* repris en version modernisée dans des constructions neuves, la meilleure compréhension de leur fonctionnement permet aujourd'hui d'envisager des systèmes de puits climatiques simples et performants. Les canalisations enterrées n'étant pas isolées de la masse du sol, elles fonctionnent sur le principe de l'amortissement thermique. Il ne faut donc surtout pas arrêter un puits la nuit, mais au contraire maintenir le flux d'air et le rejeter dehors afin de ne pas injecter dans la construction la chaleur évacuée. Pourtant, si vous cherchez un puits provençal permettant d'évacuer la nuit la chaleur qui s'y est accumulée en journée, vous allez avoir un peu de mal à le trouver. Au mieux, les puits continuent à souffler dans la construction la nuit, ralentissant d'autant leur rafraîchissement nocturne ; au pire, ils sont arrêtés la nuit, interdisant ainsi leur rafraîchissement. En période de canicule, au bout de quelques jours, le puits climatique sature et ne rafraîchit

8. *Bagdir* : attrape-vent en farsi. La technique des *bagdirs* remonte probablement à plusieurs millénaires et aurait été mise au point par les Mésopotamiens.

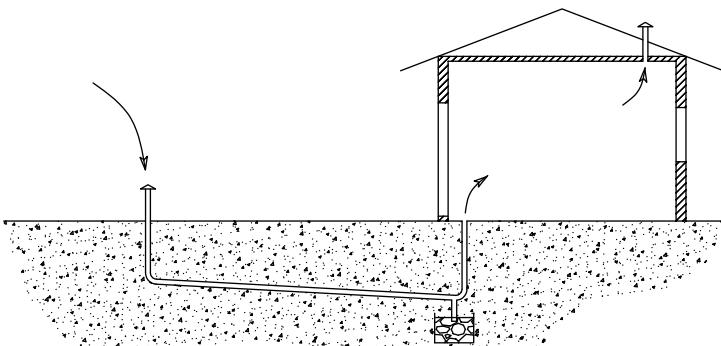


Schéma de principe d'un puits climatique.

plus rien, et l'utilisateur en conclut que « cela ne marche pas ». La nuit, il faut injecter dans la construction un air provenant directement de l'extérieur et rejeter dehors l'air extrait du puits pour renouveler son stock de fraîcheur.

Le dimensionnement d'un puits climatique créé à l'aide de conduites enterrées n'est pas quelque chose de très complexe, sachant que l'on travaille sur de l'approximation, mais nécessite quand même quelques précautions. Ce qui est plus ardu, c'est de réellement comprendre comment il fonctionne et comment l'utiliser, afin de bien le concevoir et d'en tirer vraiment profit.

La meilleure matière d'échange au niveau du sol est le sable fin, le plus humide possible (au moins 10 % d'eau en volume), à la rigueur le limon. Il faut éviter autant que possible l'argile et encore plus la terre arable ou la tourbe pour ce qui concerne le contact avec le tube du puits. À l'inverse, la meilleure matière pour le stockage thermique est, après l'eau, l'argile. Un puits efficace sera de préférence réalisé dans un sol argilo-marneux ou argilo-sableux humide, construit dans un lit de sable pour améliorer les échanges thermiques. Si le sol est très sablonneux, il faudra prévoir un lit étanche en cuvette afin de retenir l'eau, bâti à partir de glaise.

Comme nous l'avons vu précédemment, la profondeur idéale est d'au moins 3 mètres, niveau où la température naturelle devient quasiment stable à 15 °C⁹, et

sous réserve d'un coût de mise en œuvre acceptable en fonction de la taille du projet. Dans la pratique, ce n'est pas toujours facile à obtenir dans des conditions économiques acceptables ; un puits unique se limitera pour ces raisons à une profondeur de 2 mètres. Une première solution logique est d'éviter de placer les tubes sous une surface de terrain ensoleillée. Le pire, qu'on voit pourtant parfois, est de faire circuler les canalisations sous un parking extérieur goudronné. Le mieux et le plus simple est de les faire circuler sous le bâtiment, en profitant des excavations liées aux fondations, plutôt qu'à l'extérieur, sous réserve que la base du bâtiment soit isolée. On profite ainsi de ces excavations, au besoin augmentées en taille, pour y enterrer les conduites à bonne profondeur.

Il faut, en revanche, éviter à tout prix les échanges avec la construction et donc s'éloigner d'au moins 1 mètre des fondations et de la dalle basse, qu'il faudra alors isoler correctement. Sans ombrage au-dessus par un bâtiment, il faut éviter les profondeurs inférieures à 2 mètres, auxquelles l'amplitude de température est encore de 6 à 8 °C environ entre l'été et l'hiver. Mais on sait qu'au-delà les contraintes réglementaires rendent les travaux nettement plus coûteux.

La circulation de l'air dans le tube doit rester turbulente afin d'assurer un bon échange avec les parois. Il ne sert donc à rien de chercher à supprimer tous les coude, le tout étant de ne pas créer de pertes de charge trop importantes.

Il ne sert à rien non plus d'utiliser des tubes trop larges dans l'objectif de limiter les pertes de charge, la capacité d'échange thermique n'augmentant pas aussi vite que le diamètre. Au-delà d'un certain diamètre, on peut même constater une baisse de l'échange thermique. Un bon compromis consiste à utiliser des tubes de 10 à 15 cm, voire jusqu'à 20 cm en cas de besoin important de débit, et à limiter la vitesse de l'air afin de ne pas exploser les pertes de charge, qui varient comme le carré de cette vitesse. Il faut éviter de dépasser une vitesse de l'air supérieure à 3 m/s. Cela signifie que, pour des débits importants, il faudra augmenter le nombre de tubes plutôt que le diamètre. En fonction du climat et de la qualité du bâtiment, il faudra prévoir un tube pour rafraîchir de l'ordre de 25 à 50 m² de surface habitable (plutôt 25 m²

9. Cette température moyenne d'équilibre varie en fonction de la situation géographique du site, de la nature du sol, de son hygrométrie... Elle sera plus proche des 10 °C en altitude et dans les régions froides du nord et de l'est de la France.

en zone méditerranéenne). Installer un unique puits climatique pour un bâtiment de plusieurs centaines de mètres carrés n'a aucun sens et peut être assimilé à du *greenwashing*. Un tube trop long n'apportera rien non plus à l'efficacité du système et augmentera inutilement les pertes de charge. Pour ceux qui aiment les calculs, le bon ratio entre la surface d'échange en mètres carrés et le débit horaire en mètres cubes par heure doit être de l'ordre de 1/10 à 1/20.

La longueur du tube doit être suffisante pour empêcher le front thermique d'atteindre sa sortie. En effet, autour du tube, le sol change progressivement de température au fur et à mesure de l'échange avec l'air circulant dans le tube. Au début, seule la portion de tube proche de l'entrée d'air voit la terre environnante changer de température. Mais avec le temps, ce front thermique avance, car la diffusion dans la terre environnante n'a pas le temps d'amortir le changement thermique. Cette progression du front thermique ne peut s'arrêter que lorsque la surface d'échange est suffisante pour équilibrer les apports par l'air. Dans le cas contraire, lorsque le front thermique atteint la sortie dans le bâtiment, le puits cesse de fonctionner, non parce qu'il fait trop chaud mais parce qu'il est mal conçu. Comme nous allons le voir plus en détail ci-dessous, dans la pratique, il faut prévoir des tubes d'environ 30 à 40 mètres au moins. Au-delà de 60 mètres, le gain devient généralement négligeable sur la température de l'air extrait, mais une longueur plus importante peut aider à éviter dans les climats les plus extrêmes de voir le front thermique atteindre la sortie du puits. On retiendra les plus grandes longueurs dans les régions au climat extrême (Alpes et Vosges pour l'hiver, ou Côte d'Azur pour l'été, par exemple). On retiendra également des longueurs plus importantes dans des terrains mauvais conducteurs (argileux et secs) et plus courtes dans des terrains bons conducteurs (sablonneux et humides).

De même, pour un amortissement journalier, il ne sert à rien d'éloigner les tubes de 1 ou 2 mètres les uns des autres. Compte tenu de la vitesse de transfert de la chaleur dans la terre, la diffusion journalière est d'environ 30 à 40 cm suivant le type de sol, un tel espacement est plus que suffisant et permettra d'évacuer la nuit une partie de la chaleur accumulée en journée.

DIMENSIONNEMENT D'UN PUITS CLIMATIQUE

La densité de flux thermique φ (prononcer « phi » – quantité de chaleur par unité de temps, en watts par mètre carré) s'échangeant entre un tube de puits climatique et le sol environnant se détermine par la formule classique de flux thermique à travers une paroi :

$$\varphi = \frac{dQ}{S \cdot dt}$$

soit un flux thermique, en watts, de :

$$\varphi = dQ/dt = S = (T_{\text{sol}} - T_{\text{air}}) / (R \cdot S)$$

avec :

- R la résistance thermique de la paroi du conduit
- S la surface d'échange
- dQ la quantité de chaleur échangée
- dt le temps durant lequel se produit l'échange
- T_{sol} et T_{air} les températures respectives du sol et de l'air extérieur

La résistance thermique R de la paroi du conduit est la somme de sa résistance convective et de sa résistance conductive. La résistance convective est fonction de la vitesse v de circulation de l'air :

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{5,55 \cdot v^{0,8}}$$

La résistance conductive, quant à elle (pour un tube de faible épaisseur par rapport à son rayon), est approximativement égale à :

$$R_{\text{cond}} = \frac{e}{\lambda}$$

avec :

- e l'épaisseur en mètres de la paroi
- λ la conductivité du matériau

Pour un tube en plastique (PVC ou PE) de 5 mm d'épaisseur, $R_{\text{cond}} \approx 0,031 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Il reste à déterminer la variation de température obtenue en fonction de l'échange de chaleur effectué :

$$dT_{\text{air}} = \frac{dQ}{C \cdot \rho \cdot V_{\text{air}}}$$

avec :

- C la chaleur massique de l'air (1,005 kJ/(kg.K))
- ρ la masse volumique de l'air (1,2 kg/m³)
- V le volume d'air considéré en m³

On peut évaluer cette formule en travaillant sur des segments réduits, dans lesquels on considère la température de l'air comme constante, le différentiel de temps étant le temps nécessaire pour parcourir le tronçon, soit la longueur du tronçon divisée par la vitesse de l'air. À chaque tronçon, il faut réévaluer la température de l'air en fonction du tronçon précédent. On peut au final déterminer la température en sortie du puits :

$$\Delta T_{\text{air total}} = \frac{\sum_1^n \frac{T_{\text{sol}} - \Delta T_{\text{air}}}{\left(\frac{1}{5,55 \cdot V^{0,8}} + \frac{e}{\lambda} \right)} \cdot S \cdot \Delta t_i}{C \cdot \rho \cdot V}$$

Cette approche a ses limites. Il faut d'abord que les segments soient petits devant la longueur totale du tube, soit au minimum une à deux centaines de tronçons. On obtient alors une bonne approximation de ce qu'il se passe. L'autre limite tient à la variation de la température du sol, engendrée par l'utilisation sur une longue période du puits. On pourrait appliquer pour une meilleure précision le même principe de progressivité à la température de la terre, en la faisant varier en sens inverse, mais cela se complique un peu avec la diffusivité du sol.

En appliquant cette formule, l'important à retenir est qu'on constate une stabilisation du flux thermique au-delà d'une trentaine à une soixante de mètres selon le débit d'air, prouvant qu'il est inutile de créer des puits trop longs. Le pallier apparaît à une distance plus ou moins grande en fonction du débit d'air et de la qualité du sol.

Comme nous l'avons vu, le flux thermique récupérable par un échangeur air/sol est proportionnel à la différence de température entre l'air de surface et le sol. Nous avons également vu, quand nous avons abordé l'amortissement thermique terrestre, que la température du sol évolue selon la saison, de moins en moins sensiblement au fur et à mesure que l'on pénètre en profondeur. Si la différence de température qui nous intéresse est de quelques degrés à 50 cm de profondeur, elle peut dépasser les 20 °C en été et en hiver à une profondeur de 4 mètres, d'où l'importance d'une profondeur suffisante.

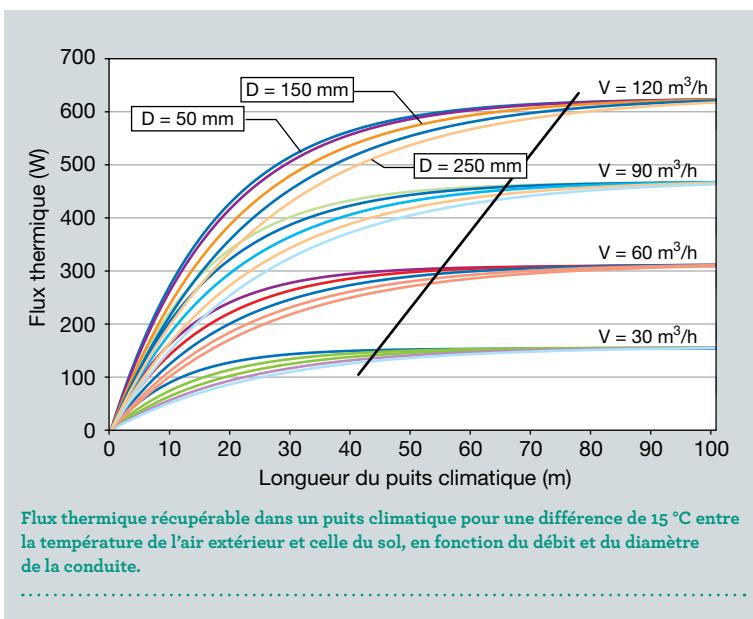
Avec un débit volumique V exprimé en mètres cubes par heure, une masse volumique de l'air de 1,2 kg/m³ et une chaleur massique de l'air de 1 005 kJ/kg, on peut estimer, indépendamment du diamètre du conduit, ce flux thermique par la formule simplifiée suivante, sous réserve que la longueur soit suffisante pour approcher le pallier de flux thermique (soit la limite de longueur utile) :

$$\varphi = \frac{V}{3} \cdot (T_{\text{sol}} - T_{\text{air}})$$

PUITS CLIMATIQUE THERMIQUEMENT ISOLÉ

Un espace supérieur entre tubes peut être envisagé, mais il signifie alors que l'on vise un amortissement saisonnier. Dans ces conditions, la profondeur doit être supérieure à 3 mètres, pour rester cohérent avec l'effet recherché. La profondeur peut toutefois être simulée par un artifice assez simple : il faut isoler la masse de terre de l'air extérieur, cette isolation débordant de l'emprise des tubes sur une largeur d'au moins 3 mètres. Dans ces conditions, seule la température en profondeur influe sur le système, en raison de la vitesse de transfert de la chaleur dans le sol : il faudra six mois pour que la variation météorologique extérieure atteigne les tubes.

Cette isolation peut être obtenue de plusieurs manières. La première qui vient à l'esprit est tout simplement de planter de la végétation persistante dense au-dessus du parcours du puits, constituée de buissons qui pro-



tégeront le sol autant de la neige en hiver que du soleil l'été. L'isolation pourra être renforcée par un mulch¹⁰ ou un tapis de feuilles qui ne pourra que faire du bien aux buissons.

Une autre bonne solution consiste à positionner les tubes sous la construction, si le plancher bas est parfaitement isolé, servant d'écran à la masse de terre intervenant dans le fonctionnement du puits climatique.

Une troisième possibilité, plutôt réservée aux grosses installations pour bâtiment tertiaire, consiste à recouvrir tout le champ des puits climatiques d'un isolant artificiel ou naturel, et à veiller à un parfait drainage de la zone isolée, l'eau étant l'ennemi de l'isolation thermique. On peut à cet effet utiliser une couche de roche volcanique parfaitement drainée, enfermée dans une double couche étanche en argile. Si l'isolation est assurée par des matériaux synthétiques, il est préférable de procéder en plusieurs couches fines, chacune séparée par un film polyane, et reposant sur une couche drainante, afin d'assurer une certaine souplesse à l'ensemble. Cet ensemble doit être protégé par une bonne épaisseur de terre, en fonction de ce que l'on souhaite faire par-dessus. Le plus important est d'assurer une totale étanchéité à la pluie de la couverture isolante, afin d'éviter un « rinçage » thermique du puits climatique par l'eau d'infiltration. Cette étanchéité est assurée par une forme légèrement bombée, équipée d'un drain en périphérie permettant d'évacuer l'eau en surplus à l'écart du puits climatique, et en évitant bien sûr les nappes phréatiques affleurant la surface du sol.

Il n'est pas nécessaire de rechercher une résistance thermique élevée, l'important est que la perte énergétique par la surface du sol soit nettement inférieure aux apports en provenance de la profondeur, un peu comme un frein-vapeur suffit à interdire la condensation. L'épaisseur d'isolant peut se réduire progressivement en s'éloignant du champ de tubes, le différentiel de température chutant en proportion. On obtient alors une couverture isolante autorisant un fonctionnement saisonnier de l'amortisseur, qui, couplé à des murs Trombe et à une bonne gestion dynamique des flux d'air de la construction, permet d'envisager un ensemble bioclimatique cohérent et performant.

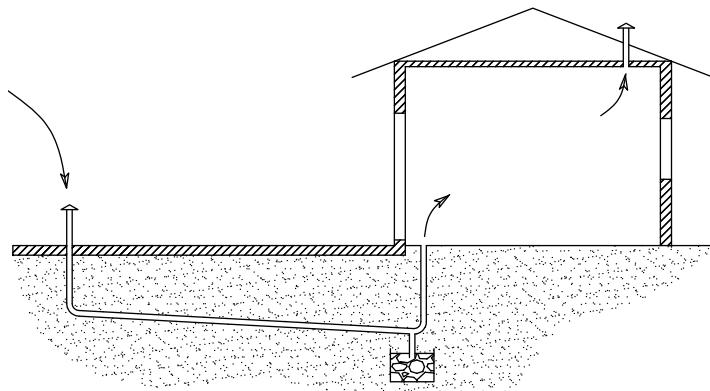


Schéma de principe d'un puits climatique isolé.

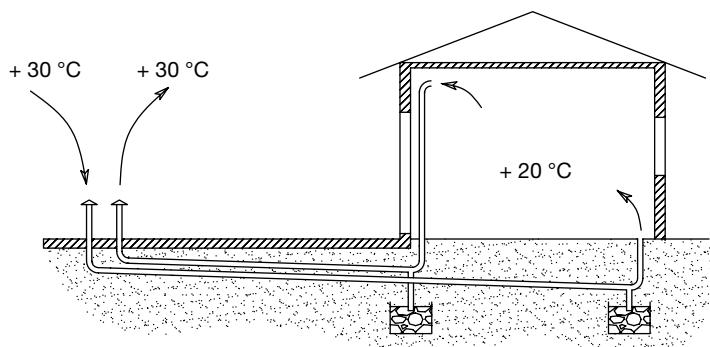


Schéma de principe d'un puits climatique à double flux.

PUITS CLIMATIQUE À DOUBLE FLUX

Le principe du puits climatique conserve un défaut majeur : l'air qui y entre implique une sortie équivalente au niveau de la construction, qui représente autant de pertes – de chaleur en hiver, de fraîcheur en été – recrachées dans l'atmosphère. On ne peut, en conséquence, encore parler de système énergétique totalement neutre. Pour atteindre cette efficacité totale, il faut pouvoir récupérer l'énergie contenue dans l'air extrait, ce qui n'est jamais fait à ce jour. Cette récupération peut pourtant

10. Le mulch, ou mulching, est une technique qui a été mise au point par les Britanniques. Les premières applications consistaient simplement à étaler des feuilles mortes au pied d'un végétal afin de limiter la levée des mauvaises herbes. Les pépiniéristes utilisent aujourd'hui une toile tissée qu'ils fixent au sol. Le mulch peut être réalisé de manière efficace avec des écorces de pin, des débris de terre cuite, des végétaux broyés (plaquettes de chauffage au bois), ou encore des minéraux comme la pouzzolane, le gravier, le gros sable, etc. Le mélange de plusieurs matériaux est souvent très efficace.

être réalisée facilement, par un moyen si évident qu'il n'est presque jamais mis en œuvre. Pour extraire l'air, on positionne généralement en partie haute de la construction une sortie d'air. Ou alors on a recours à un échangeur double flux : c'est la réponse dite « technologique », que nous verrons un peu plus loin.

La bonne solution consiste à raccorder cette sortie d'air à un second puits climatique, circulant parallèlement au puits d'entrée. On crée ainsi un échangeur double flux enterré, l'énergie extraite du bâtiment, qu'il s'agisse de chaud ou de froid, étant cédée en continu *via* l'échange entre les deux puits à l'air entrant, au travers de la masse de terre du double puits climatique. On est alors en présence d'un vrai puits climatique, à double flux, pouvant avoir un fonctionnement autant provençal que canadien.

Le système n'est évidemment efficace que pour une construction parfaitement isolée, qui n'apporte que peu d'énergie à l'air ambiant par ses parois, sinon, on risque de réchauffer en été l'air qui entre avec celui qui sort. Pour éviter cet échange néfaste, les premiers mètres des deux conduits peuvent être éloignés l'un de l'autre avant de les amener en contact direct.

L'énergie apportée à la masse inertielle par l'air entrant, qui peut le conduire à perdre son efficacité, est ainsi évacuée en continu par l'air sortant. Le bilan thermique de l'échangeur climatique est neutre, sa température globale reste constante, de même que l'air qu'il insuffle dans le bâtiment. Nous sommes ainsi devant un véritable amortisseur saisonnier, capable de préchauffer tout un bâtiment en hiver et de le rafraîchir en été sans consommer un seul kilowattheure d'énergie fossile, hormis pour le ventilateur. Cet amortisseur se stabilise à la température annuelle moyenne de la terre, soit 15 °C. C'est toujours insuffisant pour apporter le confort en hiver. Mais comme nous l'avons vu, nous sommes en face d'un système adiabatique en équilibre. Il suffirait alors d'apporter un surplus d'énergie en été pour monter progressivement sa température d'équilibre à une valeur de 22 à 24 °C, pour qu'il donne ce qu'on attend de lui. Cet apport supplémentaire estival peut être fourni soit par une surventilation de certains puits soit par une décharge de capteurs solaires. Et cela tombe bien, on ne sait généralement pas quoi faire en été de la chaleur captée par les systèmes solaires thermiques. Pourquoi ne pas la stocker pour l'hiver à venir ? On arrive alors à un système bioclimatique complet, pouvant assurer la totalité des besoins énergéti-

ques d'une construction, en été comme en hiver, s'il est bien dimensionné. Nous allons revenir plus loin en détail sur la méthode constructive d'un tel échangeur.

Ce principe d'échangeur à bilan thermique nul est une des bases de la gestion de l'énergie en bioclimatisme. Il a de nombreuses autres applications. En respect du deuxième principe de la thermodynamique, le bilan réel ne peut pas être parfaitement nul. Mais à cause de la saisonnalité des températures, sa température réelle d'équilibre oscille autour d'une moyenne, dont l'amplitude dépend de la qualité de réalisation de l'ensemble. Cette oscillation est par ailleurs déphasée par rapport aux saisons, ce qui permet de déplacer les amplitudes extrêmes de température en mi-saison, quand justement le système est le moins sollicité.

Le plus gros problème des puits climatiques actuels, c'est que, étant mal compris dans leur mode de fonctionnement et donc mal mis en œuvre, ils voient leurs faibles performances rapidement chuter dans des conditions climatiques extrêmes, alors qu'une conception réfléchie leur permettrait une efficacité proportionnelle à la rigueur du climat : plus il fait chaud, plus ils rafraîchissent, plus il fait froid, plus ils réchauffent. Un puits climatique n'est pas un simple tuyau planté au hasard dans le sol à n'importe quelle profondeur, il est bien plus que cela, c'est un système thermodynamique complexe, mû par le soleil et effectuant des échanges d'énergie entre l'eau, l'air et la terre. Bien conçu et correctement intégré dans un bâtiment, lui-même pensé à cet effet, il peut fournir 100 % des besoins de chaleur et de fraîcheur de la construction, et même, au-delà du simple aspect de la température, réguler par exemple l'hygrométrie de l'air. Et le tout, sans fioul, sans gaz, sans électricité, juste avec de la réflexion et surtout de la volonté.

Dernier point à noter : ce système de puits climatique, surtout dans sa version incomplète monotube, est adapté à la France métropolitaine, particulièrement à ses régions chaudes et sèches. En bord de mer, si la région est soumise à un air humide, et encore plus en région tropicale, à cause de l'humidité élevée de l'air, laquelle condense dans le puits climatique en relâchant sa chaleur latente, il devient totalement inopérant dans cette forme simple. En Méditerranée, le puits climatique monotube est performant, en Bretagne, il est plus discutable, aux Antilles, il n'a pas de sens. Le bioclimatisme doit adapter les techni-



En savoir plus

Un échangeur double flux moderne présente un rendement supérieur à 80 %. Cela signifie que s'il fait -10°C dehors, l'air injecté dans la construction à 20°C sera amené à au moins 14°C . Et si la température est de 0°C dehors, cet air sera conduit à plus de 16°C . Si on y couple un puits canadien capable de produire de l'air à 5°C (cas idéal), l'air qui sortira de l'échangeur sera en théorie injecté dans le bâtiment à 17°C au lieu de 16°C . Mais comme cette montée en température de l'air entrant limite la capacité à valoriser l'énergie latente de l'humidité de l'air sortant, le rendement chute d'environ 20 %. Le gain d'un puits canadien monté sur un échangeur double flux, dans le meilleur des cas, se limite en conséquence à nettement moins de 1°C . De ce faible gain théorique en énergie, il faut déduire la surconsommation de la ventilation nécessaire pour compenser la perte de charge supplémentaire sur le flux d'air. On arrive alors à un rendement global négatif, le puits climatique fait consommer plus d'énergie qu'il n'en apporte.

- Q le débit de ventilation
- ρ et C la masse volumique et la chaleur massique de l'air

La formule ne prend pas en compte une éventuelle condensation dans l'échangeur, encore moins un gel éventuel de cette eau condensée.

Dans un tel montage, le gain énergétique total est alors la somme du gain induit par la VMC double flux et celui apporté par le puits climatique. Un rapide calcul montre que la VMC double flux présente en hiver un nettement meilleur résultat que le puits climatique, mais surtout que la mise en série des deux ne permet pas un gain de plus de 10 % par rapport à une VMC double flux seule. Pire encore, en été, la mise en série des deux réduit le rendement énergétique global.

On rappellera en outre que le rendement d'un puits climatique devient négatif en mi-saison, du fait du déphasage thermique du sol. Dès le mois de mars, par exemple, la température décroît quand on descend en profondeur (jusqu'à 3 à 4 mètres sous la surface), car le sol restitue le froid accumulé en hiver, alors que la température extérieure commence à remonter. Le phénomène inverse se produit en septembre.

ques à la région concernée et éviter les généralisations et l'uniformisation des principes. Dans ces régions humides, il existe des solutions de puits climatiques performants, basés sur le principe du double flux, mais qui nous amèneraient un peu loin sur ce sujet.

PUITS CANADIEN + VMC DOUBLE FLUX

Nous terminerons par quelques remarques sur le frère jumeau du puits provençal, le puits canadien. Développée au Canada, son utilisation hivernale avait comme premier objectif, non de chauffer, mais seulement de maintenir hors gel des constructions inoccupées durant une saison où il n'est pas rare de voir le thermomètre descendre en dessous de -30°C . Avec l'avènement des systèmes de ventilation à double flux, il a été constaté, toujours au Canada, que ces puits apportaient un gain non négligeable dans leur fonctionnement, en préchauffant l'air entrant. Mais si le gain est évident avec de telles conditions climatiques, qu'en est-il dans une région où la température hivernale descend rarement en dessous de -10°C , et la moyenne en dessous de 0°C , surtout lorsqu'il n'y a aucune approche sous l'aspect d'un amortisseur thermique saisonnier ?

Utilisé seul sur une ventilation à simple flux, le puits canadien peut apporter un léger réchauffement de l'air entrant en plein hiver, réduisant d'environ 20 à 25 % les besoins énergétiques du renouvellement d'air. Cela vaut pour les régions les plus froides de la métropole, comme l'Alsace ou les Alpes, et c'est beaucoup plus doux ailleurs. Quel gain peut-on espérer d'un tel système quand la température moyenne journalière est à peine inférieure à celle du sol ?

Reste le montage tant vanté par certains fabricants, couplant un puits canadien avec une VMC double flux.

Nous avons vu comment calculer le gain énergétique d'un puits climatique. Celui d'une VMC double flux se détermine par la formule :

$$E = \Delta T \cdot \eta \cdot Q \cdot \rho \cdot C$$

avec :

- ΔT la différence de température entre l'air entrant et l'air extrait
- η le rendement de l'échangeur

Dans les régions les plus froides, le montage peut effectivement, en plein hiver, à défaut d'économies de chauffage, permettre d'éviter le givrage de l'échangeur, lié au gel de l'humidité de l'air extrait. Si les échangeurs double flux givrent, c'est pourtant simplement parce qu'ils sont mal conçus. Il suffirait d'extraire l'eau de condensation avant qu'elle ne gèle pour résoudre le problème, mais on préfère vous vendre un coûteux puits canadien en prime, plutôt qu'un petit tuyau d'évacuation de la condensation. Le puits canadien peut donc dans les régions les plus froides servir parfois à éviter le givrage d'un échangeur double flux mal conçu, beaucoup plus difficilement à faire des économies substantielles de chauffage. Et le dimensionnement d'un puits canadien n'ayant rien à voir avec celui d'un puits provençal (les débits d'air nécessaires sont très différents), mieux vaut éviter de s'imaginer faire facilement coup double avec une telle installation.

Enfin et surtout, les quelques régions de France métropolitaine où un puits canadien pourrait ponctuellement, quelques jours par an, apporter quelque chose à une VMC double flux, sont les mêmes que celles où le puits provençal ne présente plus beaucoup d'intérêt. En résumé, le système VMC double flux couplée à un puits canadien n'est pas économiquement pertinent en France métropolitaine. Pour le prix du puits canadien inutile, vous pourrez ajouter un mur Trombe ou quelques mètres carrés de

capteurs solaires à votre construction, qui seront bien plus productifs, beaucoup plus longtemps dans l'année.

On retrouve avec le puits climatique le besoin fondamental de bien maîtriser le mouvement dynamique de l'air dans l'ensemble du bâtiment comme dans son environnement.

PLANCHER À INERTIE ET ISOLATION PÉRIPHÉRIQUE DES SOLS

Maintenant que nous avons abordé les cinq principales façades d'un bâtiment et le puits climatique, nous allons nous pencher sur la sixième « façade », à savoir le plancher bas.

Cette façade semble ne pas pouvoir participer directement aux apports solaires. Elle est pourtant un complément important au bon fonctionnement bioclimatique d'une construction, en raison de sa capacité à convertir la lumière solaire la frappant directement par l'inertie qu'elle peut apporter ; elle ne doit donc pas être ignorée dans la réactivité globale du bâtiment. C'est souvent l'élément par lequel il est le plus facile d'apporter de l'inertie, à condition que la dynamique des mouvements de l'air permette un échange efficace avec le volume intérieur.

Pour que le plancher puisse fournir une réelle inertie, l'idéal serait de ne pas l'isoler, ce que déconseille fortement la réglementation thermique. Et pourtant... Comme nous l'avons déjà dit, la température de la terre à 4 mètres est quasiment constante toute l'année et égale à la température terrestre moyenne, soit 15 °C. Pour bénéficier de ces 15 °C et donc d'une perte limitée en hiver comme d'un bon confort en été, il faudrait idéalement que la construction soit bâtie à 4 mètres sous terre, ce qui n'est pas facilement envisageable. Il y a pourtant une manière simple d'obtenir le même résultat, mais la solution est si évidente qu'elle choque les habitudes au point d'être systématiquement refusée : isoler la surface extérieure du terrain environnant la construction sur une largeur de 3 à 4 mètres, plutôt que la face inférieure du plancher (voir partie 4, page 213).

Cette isolation serait économique dans un bâtiment tertiaire de taille moyenne, pour peu qu'il soit conçu de façon intelligente (espaces techniques non chauffés au nord, serre solaire au sud, par exemple). En agissant ainsi,



Question de bon sens

La meilleure économie sur la ventilation reste l'utilisation dans la construction de matériaux naturels non polluants, non étanches à la vapeur d'eau, et l'exclusion des produits chimiques, surtout en surface, ce qui permet de réduire fortement la pollution de l'air et donc le besoin en ventilation. Et surtout, la possibilité de couper la ventilation lorsque le local n'est pas occupé, qui permet de faire facilement plus de 50 % d'économie sur les pertes énergétiques de la ventilation. À quoi bon ventiler des bureaux la nuit et le week-end, ou une salle de bains vingt-quatre heures sur vingt-quatre ? Il est vrai que le chauffage ou la climatisation continuant dans le même temps à tourner, le gaspillage supplémentaire est relativisé...

on supprime non seulement toute perte thermique par le sol ainsi que tous les problèmes de ponts thermiques au niveau du plancher, mais on permet surtout à la construction de bénéficier d'une masse d'inertie immense, de la forme d'une demi-sphère, pour une surface égale à celle de la construction. Cette masse se trouve naturellement par défaut à environ 15 °C en permanence, quelle que soit la saison. Plus important encore, en déchargeant dans cette masse une production solaire estivale, il est alors possible d'élever sa température de façon permanente, afin de pouvoir la récupérer l'hiver. Dernier point et non des moindres : en isolant la périphérie d'un bâtiment de façon étanche, et pour peu que l'on draine l'eau captée, on éloigne la pénétration de la pluie dans le sol, qui est une des principales voies de déperdition thermique au niveau de ses fondations. En effet l'eau de pluie divise environ par dix la résistance thermique de la terre. L'eau est un très bon fluide caloporteur et, en léchant les fondations, les refroidit au maximum en hiver, ou les réchauffe en été.

On retrouve là le principe des systèmes PAHS¹¹. Pourquoi n'y a-t-il pas de déperditions avec une isolation de 4 mètres ? Tout simplement parce que le temps que la chaleur émise par le bâtiment l'hiver parcourt ces 4 mètres de terre, il s'est écoulé six mois ; la chaleur qui fuit percute alors le chauffage du soleil d'été et repart vers le plancher. Les pertes hivernales sont compensées par les gains estivaux. En région tempérée comme l'est la zone méditerranéenne, une largeur d'isolation de 3 mètres peut d'ailleurs suffire.

Les principes classiques de la réglementation thermique imposent une technique (l'isolation des planchers) coûteuse et peu efficace. Cette réglementation « tolère » l'isolation verticale en périphérie, le long des fondations. Il lui reste à franchir le pas et à autoriser (si ce n'est à inciter) l'isolation extérieure horizontale.

PLANCHER CHAUFFANT À INERTIE

Comme c'est par cette surface qu'il est le plus facile de produire le complément éventuel d'énergie en hiver, on peut y placer un plancher chauffant basse température, qui simulera tant bien que mal l'inertie terrestre perdue tout en restant dans le cadre réglementaire. Et c'est là

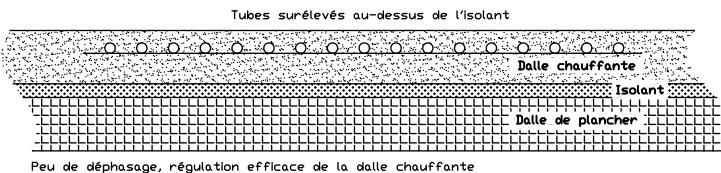
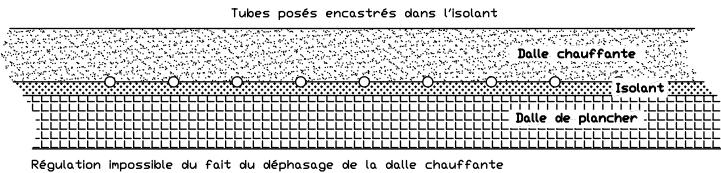
que souvent le bât blesse. Pour que ce chauffage basse température fonctionne correctement, il faut que la régulation puisse réagir rapidement aux apports solaires.

Il faut avoir conscience que si le chauffage est fourni par ce plancher, il ne pourra être contrôlé que si l'inertie de ce dernier est inférieure à l'inertie globale du bâti : l'inertie d'un corps de chauffe doit toujours rester nettement inférieure à celle du bâtiment.

Ensuite, si les canalisations émettrices de chaleur sont installées au fond de la dalle de chauffage, elles sont dans l'incapacité totale de savoir ce qu'il se passe en surface, du fait du déphasage (encore un problème de déphasage !) existant entre leur émission et l'apport de chaleur en surface. Pour qu'un plancher chauffant soit réactif aux apports solaires, il faut impérativement que la part la plus importante de son inertie soit « sous » et non « sur » les canalisations. Ainsi, dès que le soleil réchauffe cette dalle, celle-ci va pouvoir indiquer au système de production qu'il n'est plus besoin d'ajouter de la chaleur, le soleil s'en chargeant. Or dans la pratique, c'est exactement l'inverse qui est habituellement fait, les canalisations sont tout au fond, contre l'isolant. Mais cela permet de mettre moins de tubes et de chauffer à plus haute température, en utilisant la diffusivité pour corriger l'ensemble. Le raisonnement ne vaut plus lorsqu'il s'agit d'un chauffage d'origine solaire, que nous évoquerons plus loin.

On se préoccupe encore une fois de savoir comment on va consommer, jamais de savoir comment on va pouvoir éviter de consommer. Pour chauffer, peu importe de connaître l'emplacement des tubes, puisque c'est la dalle qui rayonne dans l'ambiance et non les tubes. Et comme il est plus facile d'utiliser des dalles de polystyrène à plots pour poser le réseau de chauffage, pourquoi se gêner ? Tant pis pour la régulation, s'il fait trop chaud, s'il y a des apports solaires, il reste à ouvrir les fenêtres. L'épaisseur d'une dalle de plancher chauffant classique (on ne parle pas de plancher solaire) a une seule raison d'être : ne pas casser sur son isolant souple. Pourtant, il suffirait de poser sur un treillis surélevé les tubes de chauffage, comme on sait le faire sans problème quand il s'agit d'édifier un mur chauffant, pour profiter correctement des apports solaires. Et éviter d'utiliser un isolant coûteux.

11. PAHS : Passive Annual Heat Storage (stockage annuel passif de chaleur), développé par John N. Hait du Rocky Mountain Research Center. Il s'agit d'une technique de construction consistant à enterrer partiellement le bâtiment dans une masse de terre isolée.



Principe de réalisation d'un plancher chauffant.

L'une des deux solutions pouvant être retenues est de limiter au maximum l'épaisseur de dalle, mais dans ce cas, en dehors du problème de sa résistance mécanique, on perd l'inertie, qu'il va falloir à nouveau trouver ailleurs. L'autre solution consiste à limiter les apports du plancher chauffant.



Un plancher est plus qu'une simple surface plane, c'est un élément majeur du confort d'un lieu, mais aussi de son caractère. En bois, en pierre ou en terre cuite, il ne véhiculera pas le même message. Ici, bambouseraie de Prafrance (30). (Photo et réalisation Les Charpentiers d'Uzès.)

fant aux stricts besoins de base et à compléter par des systèmes réactifs, du type radiateur basse température ou chauffage de l'air ambiant. Mais on pourra aussi noter que, dans une construction bioclimatique, passive par essence, le besoin de base se réduit au strict minimum. On en arrive vite à la conclusion que, dans une telle construction, l'apport par radiateurs basse température est suffisant, et que l'on peut se passer de plancher chauffant.

Trouver l'inertie ailleurs, disions-nous, un refrain que nous avons déjà répété maintes fois : c'est ce que nous allons voir maintenant.

LE DÉPHASEUR THERMIQUE

Il nous reste en effet à traverser la sixième façade, pour aller jeter un œil à la septième. Eh oui ! Notre bâtiment compte une septième façade que nous n'avons pas encore abordée franchement, qui lui sert d'interface avec la planète. Nous arrivons ainsi à la cave, mais pas n'importe quelle cave, bien sûr : une cave solaire.

Une cave solaire, quelle drôle d'idée ! Cela peut sembler surprenant au premier abord, mais une cave n'est-elle finalement pas le meilleur endroit pour valoriser et stocker l'énergie solaire ? Nous allons voir comment.

Nous avons longuement évoqué les problèmes d'inertie, de déphasage et d'amortissement thermiques. Et pour ce faire, jusqu'à présent, nous nous sommes limités à une unique solution : les murs et planchers massifs. Mais en constatant que cela pouvait parfois poser des difficultés insolubles. L'idéal a été plusieurs fois indiqué : il faudrait disposer d'un maximum d'inertie en été, parfois en hiver, mais pouvoir aussi dans certains cas s'en passer complètement. Or l'inertie n'est pas comme un volet qu'on peut ouvrir ou fermer selon les besoins. Elle est intrinsèquement liée à la matière : elle est ou elle n'est pas.

Les glacières provençales

Qui n'a jamais entendu parler des glacières de la Sainte-Beaume, qui permettaient jusqu'au début du xx^e siècle de fabriquer en Provence de la glace et de la fournir à Marseille et à Toulon même en plein été ? Pourtant, quand on explique à un touriste que ces glacières, au nombre d'une vingtaine, pouvaient fabriquer en hiver puis stocker durant tout l'été pour certaines d'entre elles jusqu'à plus de 3 000 m³ de glace par an, il vous regarde avec un sou-

rire en coin, pensant très fortement à une traditionnelle galéjade provençale.

Dans le passé, on savait, avec des moyens très simples, rudimentaires pourrait-on dire, sans polystyrène ni pompe à chaleur, stocker l'énergie, dans le domaine du chaud ou du froid, dans une construction, en valorisant tout simplement l'inertie du sol. Et on savait le faire durant toute une saison.

L'hypocauste romain

Nous avons commencé à entrevoir la solution avec le puits climatique, sous la forme de l'amortisseur thermique que constitue le sol. Développée par les Grecs, elle a été perfectionnée et systématisée dans les riches demeures romaines, encore elles, il y a deux mille ans. Mais qui aurait l'idée de s'intéresser au mode de chauffage des Romains ? Cette solution simple, appelée « hypocauste », consistait à déporter l'inertie et à l'utiliser, selon ses besoins, par un système de circulation d'air ou d'eau. Les demeures romaines se chauffaient et se rafraîchissaient par le sous-sol, à travers un système à forte inertie. Cela avait plusieurs avantages : les esclaves faisaient du feu à l'étage en dessous, ou ailleurs dehors, et envoyait dans le sous-sol de l'habitation l'air chauffé sans perturber le propriétaire. Dans certains cas, c'était tout simplement une source thermale qui circulait sous le sol de la maison selon les besoins. L'empereur Sextius nous en a laissé des traces profondes dans ses villes d'eau, les « Aquae Sextius », ces « Aix-Quelque-Chose » que l'on retrouve entre la Provence et la Rhénanie du Nord. En été, c'était plutôt de l'eau froide ou de l'air frais qui y circulait, par un système de puits romain. Dernier avantage, et non des moindres, même si ce n'était pas la préoccupation des Romains, il n'est plus besoin d'inertie au niveau de la maison, tout se joue en sous-sol.

La cave solaire

Il n'est, répétons-le, pas question de revenir deux mille ans en arrière, mais simplement de bénéficier de l'expérience acquise pour essayer de progresser. Nous voulons un système qui puisse nous autoriser à déphaser de douze heures les conditions climatiques, de façon à bénéficier, le jour en été, du climat de la nuit et, dans

certains cas, la nuit en hiver, du climat du jour. Pour cela, il nous faut une très forte inertie, utilisable quand bon nous semble, capable d'emmagasiner suffisamment de chaleur ou de fraîcheur, de nous la restituer avec douze heures de décalage et, qui plus est, avec le moins de pertes possible.

Ce dispositif s'appelle un déphaseur thermique. Le principe de ce système, permettant le déphasage à amortissement quasi nul d'une oscillation thermique, a été décrit de façon formelle par Pierre Hollmüller en 2002, dans sa thèse sur les échangeurs air/sol¹² et nous en montrerons la conception lorsque nous aborderons les solutions architecturales. Il est constitué de parois lourdes, séparées par de fines lames d'air, le tout étant enfermé dans un caisson isolant. Les lames d'air remplacent tout simplement le tube du puits provençal, mais en offrant à section identique une surface d'échange deux fois et demie supérieure. L'isolation de l'ensemble permet d'obtenir un système adiabatique évitant le phénomène d'amortissement et de pertes. En effet, s'il n'y avait pas d'isolation, la chaleur se répartirait dans le sol et, au final, nous obtiendrions une température pas très éloignée de la température moyenne injectée entre le jour et la nuit. Nous aurions alors un amortisseur thermique, qui permet le fonctionnement de l'inertie d'une construction ou d'un puits climatique, mais pas d'un déphaseur thermique. Pour que celui-ci fonctionne efficacement, en été par exemple, il faut qu'il puisse restituer au plus chaud de la journée la fraîcheur de la nuit et non la moyenne entre les deux.

Le dimensionnement du système dépend du besoin en énergie, des matériaux utilisés, du débit d'air voulu et du déphasage recherché, et impacte la surface d'emprise ainsi que la hauteur du système. Pour une première approximation, on peut considérer que l'emprise d'un déphaseur journalier est d'environ 10 % de la surface habitable du bâtiment à rafraîchir, pour une hauteur d'environ 1 mètre.

La mise en œuvre d'un tel système apporte plusieurs avantages. Le premier est de ne plus lier le volume d'inertie thermique à l'enveloppe du bâtiment. On peut alors construire avec une isolation répartie, ou intérieure ou extérieure, en utilisant les matériaux de son choix.

12. *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*, thèse présentée à la faculté des Sciences de l'université de Genève pour obtenir le titre de docteur ès sciences, 2002.

Et comme nous l'avons vu précédemment, on peut ainsi se passer totalement de parois extérieures massives, mais également de parois intérieures lourdes, si cela est utile. On peut envisager une structure porteuse légère, par exemple en bois, constituée de simples poutrelles, habillée d'un bon isolant, sans aucune paroi lourde.

Une inertie « à la demande »

Le deuxième avantage est de pouvoir réguler l'inertie utilisée en fonction des besoins. Pour être plus concret, on peut dissocier la production d'énergie de l'inertie utile. Si l'on souhaite une montée en température rapide l'hiver, par exemple pour un usage transitoire, on pourra le faire sans inertie. Si l'on souhaite valoriser une partie des apports diurnes pour les restituer la nuit, on pourra réguler la température en utilisant tout ou partie du déphaseur thermique. À l'inverse, si l'on souhaite une forte inertie et un déphasage complet afin de garantir l'été, de jour, l'ambiance la plus fraîche possible, on utilisera complètement le déphaseur thermique, dont le surplus d'énergie sera évacué dehors la nuit. C'est l'air de ventilation qui sert alors de vecteur entre le volume habitable et le système inertiel.

La conception interne des *bagdirs*, mentionnés plus haut (page 179), fait fortement penser au principe du déphaseur thermique journalier.

On peut pousser le raisonnement encore plus loin et envisager, sur le même principe, un déphasage semestriel, permettant de restituer l'été le froid de l'hiver et, récipro-

quement, l'hiver la chaleur de l'été, comme le faisaient si bien les glacières de la Sainte-Beaume. Un tel déphaseur représente toutefois une surface d'emprise nettement plus importante, de l'ordre de 175 % de celle à ventiler, toujours pour une hauteur de 1 mètre, mais que l'on peut éventuellement créer en plusieurs épaisseurs.

Ces systèmes de déphaseurs thermiques, bien que prometteurs, n'en sont encore qu'à l'étape de développement, de « redécouverte », pourrions-nous oser, et il faudra pouvoir instrumenter de façon très pointue et suivre dans le temps leur fonctionnement afin de définir avec précision leurs caractéristiques et d'affiner leurs modes de dimensionnement. Une première approche empirique du système de déphaseur thermique a toutefois été mise en œuvre avec succès depuis plus de vingt ans dans le système PAHS déjà cité.

Le fait est que, dans une construction bioclimatique équipée d'un déphaseur thermique, on libère l'architecture de toute contrainte de forme et de matériaux, liée à son inertie interne, laissant libre cours à l'innovation sur les matériaux et les systèmes de valorisation bioclimatique. Ce qui permet d'envisager des parois perspirantes, des murs solaires aérauliques, des baies vitrées valorisant au mieux l'ensoleillement et des systèmes de chauffage et de rafraîchissement parfaitement régulés fonctionnant sans énergie fossile d'appoint.

Nous allons revenir ultérieurement sur la conception d'un tel déphaseur.

4| L'ÉNERGIE SOLAIRE

Nous l'avons vu, l'énergie solaire est la principale clé du bioclimatisme. Et l'apprivoiser de façon passive est la meilleure réponse à apporter aux besoins de nos constructions. Mais il reste toujours des cas où la situation est telle que, malgré toutes les précautions prises, il faut un appoint afin de répondre complètement aux besoins du bâtiment.

Cet appoint, dans la logique de ce qui a été dit, doit prioritairement être d'origine solaire. Compte tenu de la disponibilité et de la gratuité de cette source d'énergie, il n'existe aucune raison valable de s'en priver.

LE CHAUFFAGE SOLAIRE HYDRAULIQUE

La solution la plus simple et la plus connue est le chauffage solaire thermique par capteurs hydrauliques.

Encore faut-il le mettre en œuvre de façon pertinente. Si on trouve de plus en plus d'artisans et d'entreprises compétents dans ce domaine, nombre d'installations aujourd'hui sont encore peu efficaces, quand elles ne sont pas totalement inefficaces. La raison principale de ces défaillances tient en trois mots : orientation, température, stockage.

Pour utiliser l'énergie solaire en hiver, il faut s'orienter face au soleil d'hiver. Or quand on pose des capteurs solaires sur une toiture, surtout si celle-ci est à faible pente comme dans les régions méditerranéennes, on les oriente vers le soleil d'été. Et on produit ainsi un maximum de chaleur en été, mais très peu en hiver. Pour qu'un chauffage solaire soit fonctionnel, il faut que l'inclinaison des capteurs soit au moins de 45° et, si pos-

sible, supérieure ou égale à 60°. En dernier ressort, un capteur solaire destiné au chauffage sera plus efficace à la verticale qu'à l'horizontale ou même à 45°. Dans le cas contraire, sauf à disposer d'un système efficace de désstockage (piscine par exemple), l'installation surchauffera en été, ce qui accélérera le vieillissement du matériel¹³ et produira peu de chaleur en hiver. Il est illusoire de penser



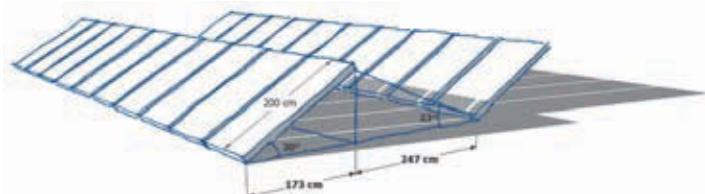
Le soleil, source d'énergie gratuite et éternelle.

13. En été, un capteur solaire vitré à 30° d'inclinaison peut atteindre les 130 °C si tout va bien, voire 180 °C dans certains cas, et un capteur sous vide pourra approcher les 300 °C. Le fluide antigel qui y circule se détruit alors rapidement, les joints synthétiques du capteur aussi, de même que les isolants et calorifuges.

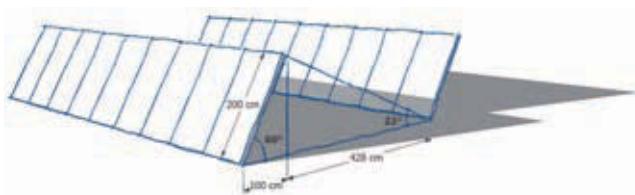
que la consommation d'eau chaude en été pourra suffire à décharger l'énergie reçue par les capteurs.

Le raisonnement n'est plus complètement valable s'il s'agit uniquement de produire de l'eau chaude sanitaire (et encore !), les besoins étant alors, en général, plus ou moins constants sur l'année, mais, même dans ce cas, il vaut mieux privilégier les besoins hivernaux, plus importants alors que le soleil est faible. Les installations pour maisons individuelles sont, pour la plupart, surdimensionnées, il faut privilégier la production hivernale plutôt que la production totale annuelle, qui sera de toute façon trop forte en été. Ce raisonnement devient indispensable, par exemple, pour une installation sur un établissement scolaire, les besoins de la cuisine étant nuls durant les trois mois les plus chauds de l'année.

L'inclinaison est importante, mais n'apporte plus rien si les capteurs se masquent les uns les autres. Pour capter correctement la chaleur solaire hivernale, il faut pouvoir recevoir le soleil dès qu'il est à 10° au-dessus de l'horizon. Si les capteurs sont placés en plusieurs rangées sur un même plan, il est quasiment impossible de respecter cette contrainte de masque avec un écartement entre rangs inférieurs à deux à trois fois la hauteur des capteurs. Autant cette contrainte peut être admissible pour la production annuelle d'eau chaude, autant elle devient prohibitive pour du chauffage hivernal. Il faut donc éviter pour le chauffage les rangs multiples se masquant les uns les autres.



Production d'eau chaude sanitaire : les capteurs privilégient le soleil d'été.



Production de chauffage solaire : les capteurs privilégient le soleil d'hiver.

Par conséquent, une installation solaire destinée au chauffage doit être réalisée soit au sol, soit sur une terrasse, avec une inclinaison des capteurs à plus de 45°, idéalement à 70°, et, pour être parfaite, elle doit disposer d'un masque solaire la protégeant du rayonnement en été, lorsque le soleil dépasse les 60° de déclinaison. La pose à la verticale, sur un mur équipé de masque solaire, n'est alors pas une option à négliger, sous réserve de bien calculer la surface de capteurs nécessaire.

Profitant de l'inclinaison, nous ajouterons un mot sur l'orientation en azimut. Si l'orientation plein sud est évidemment idéale, il ne faut toutefois dans ce cas pas en faire une obsession. Entre le sud-est et le sud-ouest, les capteurs produiront quasiment la même quantité d'énergie, un peu plus le matin ou l'après-midi suivant leur orientation et un peu moins le reste de la journée. Si le choix existe, mieux vaut les décaler plutôt vers l'ouest, afin d'anticiper au mieux les besoins de la nuit à venir.

La deuxième contrainte à respecter est celle de la température des circuits de distribution du chauffage. Il n'est déjà pas très facile de faire en saison chaude de l'eau chaude sanitaire à 60 °C. Mais s'imaginer qu'on va pouvoir alimenter de façon efficace en hiver une installation de chauffage nécessitant une température de 60 °C ou 70 °C est un doux rêve. Pour pouvoir fonctionner efficacement, un chauffage solaire doit être exclusivement réservé à des installations basse température, nécessitant une température d'environ 30 °C. Il existe deux techniques permettant un tel fonctionnement : les planchers chauffants basse température et les radiateurs du même nom. Si l'installation n'a pas été conçue ou modifiée à cet effet, une chaudière solaire n'amènera qu'à des déconvenues.

Le troisième point à considérer avec précaution est le volume de stockage solaire. Classiquement, on se contente pour une chaudière solaire, faute de place, d'un réservoir d'eau de 600 à 800 litres pour une maison individuelle. Or une dalle de plancher chauffant de 100 m², de 7 cm d'épaisseur (ce qui est vraiment le minimum pour ce type de chauffage), représente un volume de 7 m³. Le ballon de stockage solaire semble, dans ces conditions, bien ridicule, et le fait d'ajouter un petit centimètre supplémentaire à la dalle pourrait amener à la conclusion qu'il n'y a plus besoin du ballon solaire. En fait, un plancher de chauffage solaire digne de ce nom devrait présenter une épaisseur supérieure à 10 cm, plutôt 15 cm,



La qualité de réalisation d'une installation solaire importe autant que celle du matériel.

pour bien fonctionner, et le ballon de stockage solaire devient alors totalement inutile, si ce n'est comme simple moyen d'échange thermique. Le volume de stockage a pour objectif principal de stocker le jour la chaleur dont on va avoir besoin la nuit. Il doit donc présenter, en plus de ses capacités de stockage, un déphasage suffisant pour cette fonction.

Nous avons déjà évoqué par ailleurs les planchers à inertie (voir page 186 et suivantes) et nous n'y reviendrons pas.

Il existe de nombreux autres critères permettant d'obtenir ou non une installation de chauffage solaire performante, le but n'est pas ici de passer en revue toutes les conditions d'une bonne installation. Nous citerons

toutefois le détail souvent négligé du calorifuge sur les canalisations extérieures. S'il n'est pas protégé des ultraviolets et surtout des oiseaux, sa durée de vie se limitera par expérience à moins de trois ans, ensuite, une part non négligeable de la chaleur captée en hiver servira à chauffer l'atmosphère et non l'intérieur de la construction.

LE CHAUFFAGE SOLAIRE AÉRAULIQUE

La technique du chauffage aéraulique est méconnue et mériterait, par sa simplicité de mise en œuvre, d'être plus largement développée. Nous en avons déjà expliqué un principe dérivé, qui est le mur Trombe (voir page 167).

Avant de présenter plus en détail la technique et pour permettre de bien mesurer son efficacité, nous citerons une réalisation exemplaire : l'usine Canadair du constructeur Bombardier, au Québec. L'usine a été équipée en 2003 d'un mur solaire aéraulique de 855 m², produisant de l'ordre de 1 MWh/m².an. L'investissement a été rem-



Ces capteurs solaires, orientés plein sud à 60°, alimentent une chaudière solaire et peuvent être déchargés en été dans la piscine, évitant une surchauffe nuisible à l'installation.

boursé en trois ans par les économies d'énergie réalisées. Rappelons que nous sommes pourtant au Québec, dans un pays peu réputé pour ses hivers cléments (avec 5 000 DJU₁₈, il y fait nettement plus froid qu'à Tignes !). De tels systèmes de murs solaires existent également en France, trop peu nombreux malheureusement, dans des usines, des écoles, des mairies de village.

En quoi consiste ce mur solaire ? Tout simplement en une tôle de bardage métallique sombre (mais cela peut être un autre matériau : si on utilise du verre, on en revient au mur Trombe, mur solaire équipé d'un vitrage créant un effet de serre) placée en double peau devant le mur extérieur sud du bâtiment, ménageant un espace entre elle et le mur porteur permettant la libre circulation de l'air. Ce bardage est agrémenté d'ouvertures permettant à l'air (mais pas à la pluie) de pénétrer derrière lui, ainsi que d'éventuels ventilateurs afin d'aider à canaliser l'air vers l'ensemble du volume à chauffer. Non seulement ce mur solaire produit de la chaleur le jour, mais il permet aussi de faire des économies la nuit, car les pertes de chaleur par le mur réchauffent l'air dans l'espace entre le capteur et le bâtiment. Cet air est ensuite réinjecté dans l'air de ventilation nocturne. L'été, le mur solaire, équipé de systèmes de by-pass sur la circulation de l'air, peut aussi permettre des économies notables sur le rafraîchissement, en protégeant le mur du bâtiment de la surchauffe par ensoleillement direct.

Le système, entièrement statique, est tellement simple qu'il ne nécessite quasiment aucun entretien, et ne présente aucun risque d'usure ou de vieillissement imprévu. Éitant l'usage de surface vitrée, il est économique en énergie grise, également économique financièrement et très résistant. Il peut servir au chauffage des bâtiments, mais aussi au séchage de produits industriels ou agricoles, et il peut même accueillir un capteur photovoltaïque mince, de type amorphe, sans perte conséquente de productivité thermique. Les seules difficultés, relatives, tiennent au dimensionnement des entrées d'air, du système de diffusion de l'air chaud et à la régulation de l'ensemble.

Sans aller jusqu'à couvrir les murs sud de tous les bâtiments d'un bardage métallique, il est possible de s'inspirer de cette méthode pour créer de façon simple des surfaces de production de chaleur. Avec une construction respectant seulement les prescriptions BBC 2005, 1 m² d'un tel capteur permet en principe de chauffer une salle

de hauteur normale et d'environ 20 m² de surface, pour peu que ladite salle sache gérer son inertie.

Dans le cas du chauffage des bâtiments industriels, qui présentent généralement d'immenses surfaces de mur inutiles, la solution semble aller de soi, et elle est si simple qu'on se demande pourquoi elle n'est pas généralisée.

LA CLIMATISATION SOLAIRE

Après avoir décris si longuement la manière de construire des bâtiments ne nécessitant pas de climatisation pour rester frais l'été, il peut paraître surprenant de prononcer le mot « climatisation ». Dans un bâtiment classique, qu'il s'agisse de logement ou d'immeuble d'activité tertiaire, un besoin de climatisation traduit souvent simplement un défaut de conception architecturale ; un bon architecte sait éviter le besoin de climatisation pour sa construction, même en région méditerranéenne. Il existe pourtant un certain nombre de cas où cette climatisation sera indispensable : dans les locaux tertiaires saturés d'ordinateurs, dans les locaux publics surchargés de monde, dans les industries nécessitant du froid pour leurs procédés, ou tout simplement pour conserver les aliments ou d'autres produits au frais.

L'analogie du réfrigérateur

Comment peut-on faire du froid avec du soleil ? La question est si fréquente qu'elle mérite qu'on s'y arrête un peu. Nous allons faire appel à un équipement que tout le monde connaît : le réfrigérateur. Pour fonctionner, un réfrigérateur utilise trois composants nécessaires à la production de froid : une source d'énergie (généralement l'électricité, transformée en énergie mécanique par le compresseur), un générateur de chaleur (le radiateur situé derrière), un générateur de froid (l'intérieur du réfrigérateur). C'est d'ailleurs le même principe qui fait fonctionner les pompes à chaleur et les climatisations électriques. Pour transférer la chaleur d'un point à un autre, on utilise un double changement d'état du fluide frigorigène, qui va absorber la chaleur d'un côté et la restituer de l'autre.

Le point important à comprendre est que, pour fonctionner, pour « pomper la chaleur », le réfrigérateur a simplement besoin d'énergie, celle qui va permettre de

transporter la chaleur d'un point à un autre. Dans les réfrigérateurs de camping-car, c'est souvent du gaz qui fait fonctionner le système, on y produit du froid avec une flamme. On trouve également assez régulièrement sur les immeubles tertiaires des climatiseurs à gaz, utilisant une pompe à absorption.

Le principe de la pompe à absorption solaire

Une climatisation solaire fonctionne exactement sur le même principe : on a une source d'énergie, le soleil, un générateur de chaleur et un générateur de froid. Mais ce n'est plus de l'énergie électrique ou mécanique qui va procéder au transfert de chaleur, c'est un double changement de composition chimique ou d'état physique du matériau caloporteur. Il existe plusieurs techniques actuellement en cours de développement et nous n'entrerons pas dans le détail de leurs avantages et inconvénients. Ce qu'il importe de savoir, c'est que ces techniques, dont les pompes à absorption, ont pour certaines d'entre elles largement dépassé le stade des essais en laboratoire¹⁴, pour entrer dans le domaine de la production industrielle à un coût économiquement viable.

Nous allons décrire rapidement le fonctionnement d'une pompe à absorption solaire (dans un schéma simple, les pompes modernes utilisant des procédés plus sophistiqués assurant une production en continu).

La pompe comprend deux réservoirs. Le premier, le réacteur, est rempli de sel, l'autre, le condenseur, est rempli d'eau, les deux réservoirs sont sous vide (d'air). Lorsque ceux-ci sont à la même température et interconnectés, le sel contenu dans le premier réservoir attire l'eau du deuxième jusqu'à le vider complètement. La « soif » en eau du sel couplée au vide d'air est telle que l'eau se met littéralement à bouillir, bien qu'elle ne soit pas chaude, elle va vers le sel sous forme de vapeur puis elle se fait absorber par le sel.

Une fois le condenseur vidé de son eau, si l'on chauffe alors le réacteur avec la source d'énergie, solaire bien sûr, l'eau s'évapore, la pression augmente dans le premier réservoir, et l'eau retourne sous forme de vapeur dans le condenseur. On ferme alors la canalisation entre les deux réservoirs, afin de les isoler. Pour condenser l'eau, on utilise un circuit de refroidissement (la source chaude), qui

évacue la chaleur. L'eau est alors emprisonnée de nouveau dans le condenseur et reste à son état potentiel autant qu'on le souhaite. Dès qu'on désire produire du froid, on ouvre à nouveau la connexion entre les deux réservoirs. Une fois le passage entre les deux réservoirs ouvert, le sel commence à nouveau à absorber l'eau (pour être rigoureux, on parle plutôt dans ce cas d'adsorption). L'énergie qui a permis d'évaporer l'eau est absorbée par la réaction, ce qui produit une baisse de température du condenseur. De même, en condensant la vapeur du réacteur, donc en le refroidissant, on augmente la température du fluide de refroidissement. On a ainsi procédé à un transfert thermique entre les deux réservoirs. Pour que le réacteur puisse continuer à absorber la vapeur, il faut le refroidir en permanence (source chaude : générateur de chaleur). Dans le même temps, on peut récupérer du froid dans le condenseur (source froide : générateur de froid), ce qui va le réchauffer et aider à la vaporisation de l'eau.

De même que pour une pompe à chaleur électrique, le système est réversible et peut autant servir à produire du froid en été que du chaud en hiver, et même idéalement les deux en même temps selon les besoins du bâtiment – comme, par exemple, le refroidissement d'une salle informatique en même temps que le chauffage de bureaux.

Un COP très « performant »

Plus il y a de soleil, plus la production de froid peut s'intensifier. N'est-ce pas merveilleux ? Mais ce qui attire l'attention, dans un tel système, c'est son COP, son coefficient de performance, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie finale consommée et celle produite. Dans un système classique de pompe à chaleur électrique, le COP se situe en général autour de 2 à 3, parfois 4 pour les systèmes les plus performants, et plutôt 1, voire moins, pour les pompes à chaleur à air utilisées en système de chauffage hivernal. En énergie primaire, la source étant électrique, cela donne finalement un COP de 1 à 1,5 dans le meilleur des cas. En réalité, une pompe à chaleur électrique produit à peu de chose près autant qu'elle consomme en énergie fossile (en général en France du charbon en hiver, de l'uranium en été), et se transforme en simple radiateur électrique dès qu'il fait trop froid, ce qui en fait le pire des systèmes de chauffage qui soit, au point qu'il est

14. La plus ancienne pompe à absorption en France a été installée en 1991 pour rafraîchir les caves de Banyuls et elle fonctionne toujours.

interdit dans nombre de pays européens, et qu'il va probablement être interdit en France avec la RT 2012. Pour chauffer, une chaudière à charbon pollue moins qu'une pompe à chaleur à air.

Avec une pompe à absorption solaire, le COP en production de froid est d'environ 850, et de 1 700 en production de chaud. Oui, vous avez bien lu ! Autant dire quasiment rien comme consommation d'énergie primaire, juste de quoi contrôler la régulation de l'ensemble.

Pour que la pompe à absorption fonctionne, il faut qu'elle puisse disposer d'une source de chaleur élevée, d'au moins 50 °C au-dessus de la température du générateur de chaleur. Pour une température d'utilisation du

générateur chaud de 40 °C, la puissance d'une pompe à absorption peut doubler entre une température de 80 °C et une température de 100 °C de la source solaire. Les capteurs solaires vitrés ne conviennent alors plus vraiment à ce type d'application, et les capteurs sous vide, qui n'apportent pas grand-chose avec une chaudière solaire classique ou un chauffe-eau solaire, trouvent ici toute leur justification.

Il faut compter environ 3 m² de capteurs sous vide par kilowatt de puissance frigorifique. Le prix clés en main hors taxes (en 2009) se situait aux environs de 3 000 à 4 000 € par kilowatt de puissance frigorifique. Un coût qui peut sembler élevé, mais pas tant que cela si l'on prend en compte le fait que le système ne consomme ensuite quasiment plus aucune énergie.

Couplée à une bonne inertie, la pompe à absorption peut devenir rapidement, été comme hiver, une source d'énergie majeure, apte à résoudre nombre de problèmes énergétiques de nos sociétés boulimiques.

Couplée à un déphasage thermique semestriel, elle peut permettre de produire non seulement du froid en été, mais aussi de façon efficace un stock d'énergie suffisant pour répondre aux besoins de chauffage hivernaux, y compris en l'absence de soleil.

LE CHAUFFAGE AU BOIS

La valorisation de l'énergie solaire n'est pas toujours très aisée, surtout en zone urbanisée, compte tenu des masques pouvant exister, mais aussi en réhabilitation, où il n'est pas toujours facile de créer un système de chauffage basse température. Une autre façon de produire de l'énergie propre est d'utiliser la biomasse et en particulier le bois. La France accueille la deuxième forêt d'Europe. Cette dernière, dont l'exploitation a été totalement abandonnée, voit d'année en année son emprise et son volume croître, alors que la biomasse est l'énergie renouvelable la plus consommée en France. C'est dire si son potentiel est important.

C'est une énergie renouvelable, dans la mesure où l'exploitation est faite correctement. Un arbre producteur de bois bûche met en moyenne une vingtaine d'années à atteindre sa taille optimale pour être exploité. Il suffit par conséquent de limiter la coupe annuelle à un vingtième

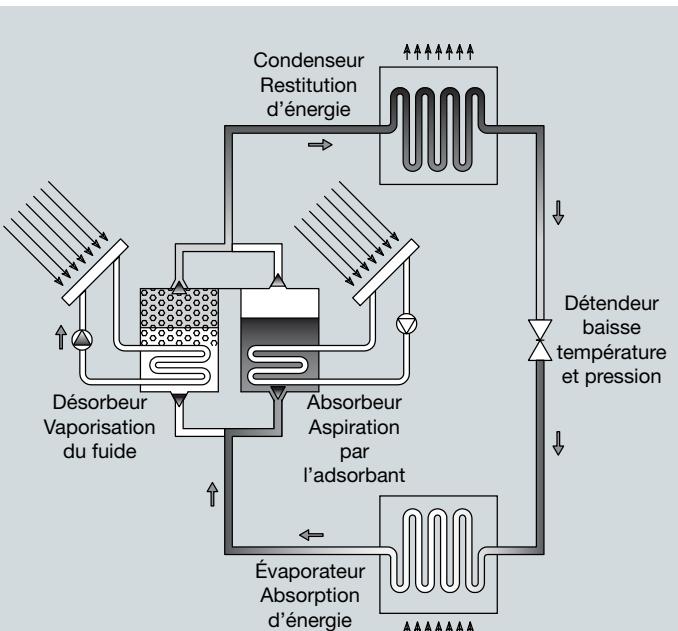


Schéma d'une pompe à absorption solaire à production continue. Les deux réservoirs alternent leur fonction à chaque cycle. Le désorbeur, chauffé par l'énergie solaire, évapore son eau. La vapeur d'eau part dans le condenseur, dans lequel on peut extraire l'énergie en y faisant circuler un fluide plus froid qui va se réchauffer (production de chaleur). L'eau condensée et refroidie passe à travers un détendeur. Aspirée par la basse pression qui se trouve en aval, elle s'évapore de nouveau en se refroidissant, avant d'arriver dans l'évaporateur, où elle va alors pouvoir se réchauffer au contact d'un second fluide qui va être refroidi (production de froid). Elle arrive enfin à l'adsorbeur et se combine à son sel. Une fois le cycle d'évaporation accompli dans le désorbeur, les deux réservoirs intervertissent leurs rôles et le cycle reprend.

de la ressource pour ne pas l'entamer et la maintenir viable pour les générations futures.



© Maurice van der Velde - iStockphoto.com

La seule vision d'un feu est déjà un élément majeur du confort ressenti. Si la construction est bien conçue, un poêle à bois est normalement largement suffisant pour assurer tous les besoins d'une surface de 200 à 300 m².

Contrairement à ce qu'il se passe pour les énergies fossiles, le CO₂ dégagé par la combustion du bois n'en augmente pas la teneur dans l'atmosphère, car pour chaque unité de CO₂ produite par du bois brûlé, la même quantité est absorbée par la régénération de la forêt exploitée. Mieux, si le bois mort n'est pas valorisé, il pourrit sur place et, par voie de conséquence, il dégage du méthane,

gaz présentant un effet de serre vingt fois plus important que le CO₂ – soixante fois, selon certaines sources. Brûler du vieux bois participe à la limitation du réchauffement climatique.

La France métropolitaine (hors DOM-TOM), comme l'indique le rapport EurObserv'ER 2008, est le premier pays consommateur de biomasse d'Europe en valeur absolue, avec 9,5 millions de tonnes équivalent pétrole (tep). Elle semble avoir perdu cette place en 2009 au profit de l'Allemagne, mais ne se situe qu'au douzième rang en consommation par habitant, avec 0,146 tep, quand le Finlandais consomme 1,353 tep par an. C'est dire si le potentiel de croissance existe. Pour la seule région PACA, qui possède la deuxième forêt de France, constituée pour une bonne part de chênes verts, impropre à l'exploitation du matériau mais excellents comme combustible, la quasi-totalité de sa ressource bois part en fumée dans les incendies d'été, faute d'entretien et d'exploitation, et elle n'est exploitée pour les besoins hivernaux que de façon marginale.

Une fois brûlées par les incendies, ces forêts de chênes, dont le biotope végétal et animal a été détruit, laissent la place à des forêts de pins sans vie, encore plus inflammables en été. Utiliser le bois comme combustible constitue un acte participant à la protection de la forêt et de son écosystème, et à la lutte contre les incendies par son entretien.

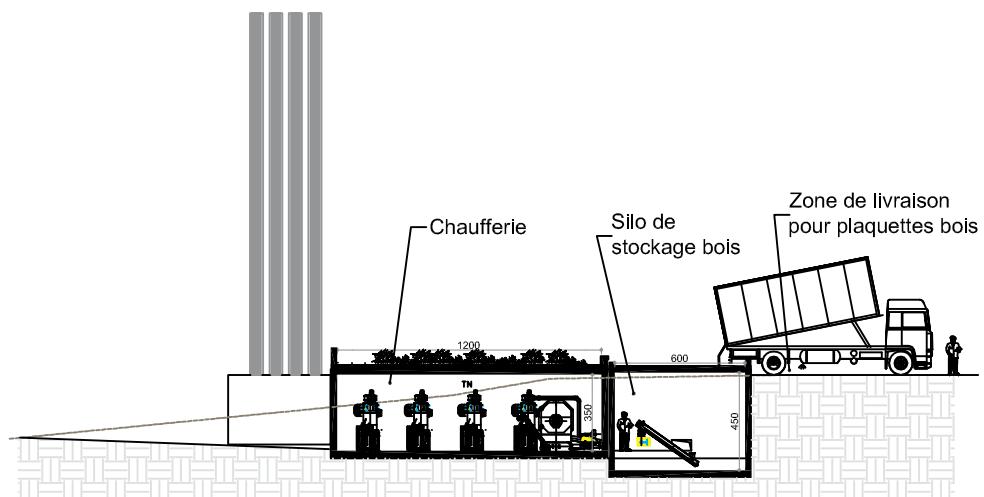


Schéma de principe d'implantation d'une chaufferie bois.

Techniques de valorisation du bois

Nous passerons sur le feu de cheminée (en foyer ouvert), dont le rendement énergétique est dérisoire, et commencerons rapidement par les poêles à bois et les inserts modernes, qui s'apparentent à un poêle à bois. C'est la méthode la plus simple et la plus répandue à ce jour en France, surtout lorsqu'il s'agit d'utiliser une ressource individuelle.

À plus grande échelle de puissance et de besoins, trois techniques permettent de valoriser directement en chaleur la ressource bois :

- les granulés ;
- les plaquettes ;
- les bûches.



Poêle à bois avec échangeur hydraulique. (Photo Vincent Pierré, énergéticien BET Terranergie dans les Vosges.)

Les bûches représentent la méthode la plus ancienne. Elles présentent une difficulté majeure pour un usage autre que privé, liée à un besoin permanent de main-d'œuvre.

Pour les installations collectives, tertiaires et industrielles, cette contrainte est rédhibitoire. Si le fait de dépenser une fortune en achat de pétrole ne choque personne, faire la même dépense pour acheter du bois et surtout payer un salarié devient une décision impossible à prendre. On peut toutefois trouver des solutions de mutualisation de ce type de fonctionnement, y compris si nécessaire via des entreprises d'exploitation de chaufferies. Le plus difficile, là encore, relève de la volonté de faire.

Pour pallier cette difficulté de la manipulation du bois, une technique a été développée depuis une cinquantaine d'années, qui consiste à broyer le bois en plaquettes. La main-d'œuvre est remplacée par des moteurs électriques, d'abord pour broyer, ensuite pour convoyer le bois depuis un silo jusque dans la chaudière. La plaquette forestière se présente sous la forme de bois déchiqueté, de dimension homogène d'environ 2 à 5 cm de long, de 2 cm de large et 1 cm d'épaisseur, avec une hygrométrie maximale de 25 % ; elle s'adapte parfaitement à toutes les puissances de chaudière et notamment à celle des particuliers ou aux petites collectivités. Il faut environ 10 m³ de plaquettes pour remplacer 1 000 litres de fioul, il est donc indispensable de prévoir un système de stockage de dimensions appropriées. C'est une des raisons fondamentales qui fait que cette technique est surtout réservée aux grosses chaudières, à partir de 100 kW de puissance.

La troisième technique fait appel aux granulés de bois, encore appelés pellets. Certains ont tendance à vouloir les rejeter, au prétexte qu'ils ne seraient pas « naturels » et qu'ils contiendraient une quantité non négligeable d'énergie grise. Ce n'est pas entièrement faux, mais vaut-il mieux un chauffage à pellets ou au fioul, faute de solution pour utiliser des plaquettes, qui ne sont pas non plus vierges d'énergie grise ? Faut-il refuser toute forme de progrès au nom d'une écologie obstinée ? Le pellet reste du bois pur, sans aucune adjonction chimique, contenant moins d'énergie grise que beaucoup de produits dits « naturels ».

Leur principal avantage réside dans leur densité énergétique. Les pellets sont constitués de sciure de bois, sou-

vent issue de l'industrie du bois, provenant généralement de résineux, plus aptes à s'agglomérer, que l'on comprime très fortement. La pression fait jaillir la sève qui sert de liant et permet d'obtenir de petits cylindres denses de 6 à 8 mm, et d'une longueur égale à 4 à 5 fois leur diamètre. Le bois est beaucoup plus sec (son hygrométrie ne dépasse pas 5 à 6 %). Étant compacté, il possède un haut pouvoir calorifique, de l'ordre de 5 kWh/kg, pour une masse volumique de 650 kg/m³. Il n'en faut ainsi plus que 3 m³ pour produire autant que 1 000 litres de fioul. Dernier avantage et non des moindres, les pellets, bien secs, brûlent parfaitement et produisent très peu de cendres, de l'ordre de 0,5 % du volume initial.

De par leur taille, les pellets peuvent être livrés partout, par sacs de 15 kg pour les petits besoins, mais aussi par camions souffleurs permettant une livraison à distance du silo par des conduits, de la même façon que se fait l'approvisionnement en fioul. C'est donc la solution idéale en milieu urbain dense qui n'autorise pas toujours le recours aux plaquettes.

On trouve aujourd'hui également des poêles à granulés, qui peuvent constituer un chauffage principal pour des habitations dont les besoins en énergie sont faibles (maison passive, petites surfaces, peu de pièces...). Bien souvent, il s'agit de systèmes d'appoint situés dans la pièce principale, en substitution d'une cheminée. Ces poêles comprennent un petit réservoir leur donnant une autonomie de plusieurs heures, voire de plus d'une journée en maison passive, largement en tout cas de quoi passer une nuit entière tranquille.

La contrepartie de cette souplesse d'utilisation, c'est le prix, qui prend en compte la transformation de la matière première, en gros 50 % plus cher que la plaquette, mais qui reste inférieur à celui du gaz de ville, sur la base d'un baril de pétrole à 50 dollars. Et rien ne laisse penser qu'il augmentera lorsque le baril de pétrole reprendra son envolée : le prix est stable depuis près de vingt ans qu'a émergé la filière. Il l'est resté quand le pétrole était à 150 dollars le baril et, si l'exploitation de la forêt est bien gérée, nous ne sommes pas près d'atteindre le pic de Hubbert sur la ressource bois.

Le bois énergie, qu'il s'agisse de bûches, de plaquettes ou de pellets, est une assurance d'indépendance vis-à-vis du prix des énergies fossiles. Il apporte un autre avantage majeur par rapport à ces énergies, que nous avons



Le bois : la meilleure façon de stocker l'énergie solaire. Quelles que soient ses prouesses technologiques, l'homme ne pourra jamais inventer plus performant ni plus durable.

déjà évoqué : il transforme une dépense, qui consiste à envoyer à 6 000 km du pays une part non négligeable de sa richesse, en investissement sur l'avenir, générateur d'emploi et d'activité locale protectrice de notre environnement.

Remarques sur les chaudières

Pour conclure sur ce sujet, nous décrirons rapidement les installations de chaudières. Une chaudière présente un bon rendement uniquement si elle fonctionne à pleine charge. (La remarque vaut d'ailleurs aussi pour les chaudières fioul et gaz.) Mais comme elle est dimensionnée pour pouvoir répondre aux besoins les plus importants, soit durant les quelques jours les plus froids de l'hiver, sa charge courante est généralement réduite. Une chaudière fonctionne habituellement pendant plus de 85 % de son temps avec une charge de puissance inférieure à la moitié de sa puissance théorique. Son rendement s'en ressent fortement, et d'un rendement théorique de 85 %, on tombe facilement en dessous des 50 %. Cela est d'autant plus vrai que la taille de la chaudière est faible, car dans les grandes installations, l'inertie générale du réseau permet de mieux optimiser la charge de fonctionnement.

Pour pallier ce défaut majeur, il existe une solution simple : augmenter l'inertie du réseau de chauffage, en y insérant un réservoir tampon, d'au moins 50 litres par kilowatt de puissance pour les petites installations de maison individuelle. Un réservoir tampon bien dimensionné doit pouvoir, à lui seul, assurer au moins vingt-quatre heures des besoins en mi-saison. Cela ne se fait bien sûr jamais avec des chaudières à combustibles fossiles, qui sont faciles à allumer et éteindre. Ainsi, à chaque mise en marche, il faut réchauffer la chaudière avant de commencer à produire de la chaleur ; après chaque extinction, la chaudière se refroidit à travers sa cheminée, allant réchauffer gratuitement les petits oiseaux. Pour une chaudière bois, le recours au réservoir tampon est indispensable car il est plus difficile de maîtriser la puissance du feu ou d'allumer et d'éteindre en permanence. Et c'est surtout une mesure en cohérence avec le choix de produire de l'énergie propre et maîtrisée.

Là encore, la réglementation thermique, qui devrait inciter à moins consommer et à utiliser l'énergie de façon rationnelle, a des progrès à faire. Elle ne prend en compte que le rendement théorique, pas le rendement réel d'une mauvaise conception, ce qui explique, entre autres, pourquoi le constat est rarement à la hauteur des calculs théoriques.

LA GÉOTHERMIE

La géothermie est une des rares sources d'énergie considérée comme renouvelable qui ne puise pas forcément son énergie directement du soleil, mais plutôt, au moins en partie pour la géothermie profonde, des réactions nucléaires du centre de la Terre (le reste provenant de l'échauffement en surface par le soleil). Nous ne parlerons pas de la géothermie profonde, bien développée, par exemple, en région parisienne ou dans les DOM-TOM, qui sort du sujet, même si elle est à l'évidence très performante, et en resterons à ce qu'on appelle la géothermie de surface, qu'il s'agisse de capteurs horizontaux au ras du sol, ou de capteurs verticaux installés dans des forages de 60 à 80 mètres de profondeur.

Pour extraire l'énergie du sol, il faut une pompe à chaleur, et on en revient à ce qui a été dit précédemment concernant le COP réduit de tels systèmes. Le rendement

est amélioré en hiver par rapport à une pompe puisant la chaleur dans l'air, la pompe à chaleur géothermique conservant un bon rendement, quelles que soient les conditions climatiques atmosphériques. Mais, au final, sachant que pour faire de l'électricité l'hiver, réseau nucléaire ou pas, il faut faire tourner des centrales au charbon, dans le meilleur des cas, une pompe à chaleur géothermique produira autant d'énergie et de pollution qu'une chaudière à charbon individuelle (il faut consommer 3 kWh de charbon pour produire 1 kWh d'électricité en hiver).

Si la géothermie de surface permet d'utiliser une énergie renouvelable, le problème vient de ce que, pour y parvenir, il faut beaucoup d'énergie... en général d'origine non renouvelable. Faire appel à la géothermie n'est donc à proprement parler pas vraiment bénéfique à l'environnement, pas plus, en tout cas, que la combustion directe de charbon. Le raisonnement serait bien sûr tout autre si la source d'énergie de la pompe à chaleur était d'origine solaire, donc produite par des modules photovoltaïques.

Le problème, c'est qu'en hiver, il n'y a pas beaucoup de soleil. Pour que la géothermie puisse être une énergie renouvelable, il faudrait produire de l'électricité photovoltaïque en quantité suffisante au moment où on fait fonctionner la pompe à chaleur. Mais dans ce cas, une chaudière solaire sera plus efficace.

Il reste un cas particulier où cette énergie peut être utilisable de façon propre, c'est lorsqu'est disponible une source thermale, capable de fournir une eau à une température directement valorisable, au moins avec un système de chauffage basse température. Mais il n'est pas toujours évident alors d'obtenir les autorisations de forage.

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

Nous ne saurions terminer cet inventaire des systèmes de chauffage par énergie renouvelable sans parler de l'électricité, non polluante, paraît-il, en France.

Il est important, du point de vue environnemental (l'aspect financier du coût global étant un autre argument à ce sujet), avant de décider de la création ou du maintien d'une installation de chauffage électrique, de comprendre ce que celui-ci représente. La France dispose d'une

puissance électrique nucléaire disponible d'environ 50 GW (63 GW installés, avec une disponibilité de l'ordre de 80 %¹⁵). La demande électrique en hiver, stimulée par les besoins de chauffage électrique, se situe entre 80 et 100 GW. Le différentiel de 30 à 50 GW est fourni principalement par des centrales électriques fonctionnant au charbon, l'hydraulique (10 % des besoins) servant surtout à la régulation instantanée. Le rendement de ces productions à base de charbon étant de l'ordre de 30 % (en incluant les pertes du réseau), il faut brûler 3 kWh de charbon pour fournir 1 kWh sur un radiateur électrique. La mise en place en local d'un chauffage au charbon est donc trois fois plus performante du point de vue environnemental que l'utilisation d'un radiateur électrique. Tout autre système sera bien sûr encore plus performant sur cet aspect environnemental. C'est d'ailleurs pourquoi l'électricité globalement consommée subit un coefficient multiplicateur du calcul en énergie primaire de 2,58, la part hivernale du chauffage étant nettement plus haute (chiffre discutable, il est de 4 en Autriche par exemple). Le chauffage au charbon est une énergie verte, si on le compare à l'électricité... qui l'eût cru ?

Sur l'aspect financier, les récentes demandes d'augmentation tarifaire de la part d'EDF (+ 20 %) montrent la pression qui existe aujourd'hui pour faire rapidement progresser le coût de l'énergie électrique et, à minima, pour aligner la hausse sur le prix des énergies fossiles. Cela tient à plusieurs raisons, dont la faiblesse des ressources en uranium (environ quarante ans de disponibilité au coût actuel d'extraction si les capacités nucléaires mondiales ne sont pas augmentées), l'absence de rentabilité de la filière faute de subventions majeures, le coût prévisible du stockage – devenu indispensable – des déchets, et celui, non provisionné à ce jour, du démantèlement des centrales nucléaires les plus anciennes.

Une démarche environnementale, sociétale et économique cohérente doit donc se fixer comme priorité absolue la suppression rapide des systèmes de chauffage électrique, l'électricité étant une ressource trop vitale pour la société pour la gaspiller dans des radiateurs ou même dans des pompes à chaleur. Ces investissements de conversion énergétique se rentabilisent généralement

en quelques années, compte tenu du coût d'usage de cette énergie.

LE COMPORTEMENT HUMAIN

Du point de vue purement énergétique, un bâtiment comporte plusieurs composantes :

- la première est consommatrice d'énergie, c'est l'enveloppe du bâtiment ;
- la deuxième est productrice d'énergie, comprenant l'installation de chauffage, éventuellement le dispositif de climatisation, les équipements d'éclairage et enfin les différents équipements assurant le bon fonctionnement de l'ensemble : système de ventilation, pompes de circulation, moteurs divers, etc. ;
- enfin, la troisième, trop négligée, est l'utilisateur final ou plutôt le comportement de cet utilisateur (ou des utilisateurs) du site.

Dans la conception de tout bâtiment interviennent deux types d'acteurs :

- l'architecte, dont la mission est de donner du sens à la demande du maître d'ouvrage (celui qui commande la construction). Son intervention s'attache à l'aspect qualitatif de la demande, et s'intéresse à l'enveloppe du bâtiment ;
- le thermicien, dont la mission est technique et qui a pour objectif de produire l'énergie nécessaire au fonctionnement du bâtiment. Son intervention est de l'ordre du quantitatif.

De ce double constat ressort une double conclusion :

- les deux acteurs ont une mission bien distincte, qui conduit généralement à ce qu'ils s'ignorent mutuellement ;
- la troisième composante du bâtiment, liée aux comportements, est généralement ignorée, tant par l'architecte que par le thermicien.

Cette ignorance du rôle des comportements ne vient pas d'une volonté de ne pas prendre en compte cette troisième composante, mais tout simplement d'une méconnaissance de son existence et, encore plus, de son importance.

15. Source : Sénat, <http://extranet.senat.fr/rap/l97-439/l97-439153.html>



Projet de bâtiment tertiaire bioclimatique pour la SCI Espace Bio alternatif à la Duranne, près d'Aix-en-Provence (13). 1 464 m² de SHON, ossature bois, isolation ouate de cellulose et VMC double flux. Performance prévue : 20 % de la RT 2005 (Cep 5 postes : 30 kWhep/m².an). Si on ne tient pas compte du climat qui l'environne, un bâtiment devient une source majeure de consommation d'énergie pour compenser le confort oublié dans sa conception. Une protection solaire adaptée supprime le besoin de climatisation. (Architecte Jérôme Solari.)

Question de confort

En quoi les comportements peuvent-ils agir de façon notable sur la performance énergétique d'un bâtiment ? C'est un vaste sujet. Mais on peut donner quelques pistes de réflexion en indiquant que la consommation énergétique d'un bâtiment peut provenir à plus de 50 % de ces seuls comportements.

À titre d'exemple, si l'air du bâtiment est malsain, l'utilisateur ouvrira une fenêtre pour « aérer ». Or si cet air est malsain, cela provient autant de la conception de l'enveloppe que des systèmes de ventilation. Et encore, si l'utilisateur éprouve une sensation de froid, il aura tendance à augmenter la consigne de chauffage, indépendamment de la température réelle du volume chauffé. Or 1 °C de plus, c'est 7 % de consommation supplémentaire, et 3 °C de plus représentent 20 % de consommation en plus.

À quoi bon alors chercher à économiser 1 % de plus via les menuiseries vitrées, si le confort n'est pas au rendez-

vous ? Et ce confort, relève-t-il plutôt du qualitatif ou du quantitatif ? De l'architecte, ou du thermicien ?

La réponse est dans la question. Le confort ou l'inconfort de l'utilisateur et les comportements qui en découlent relèvent des deux concepteurs, architecte et thermicien, et, plus précisément, de l'incohérence ou de la cohérence entre leurs interventions. L'inadéquation de leur réponse commune à la demande de confort est la source du comportement futur de l'utilisateur, qui doit s'adapter malgré lui à cette défaillance de son bâtiment.

On peut être en présence d'un architecte de talent et d'un thermicien compétent, travaillant pour un futur utilisateur vertueux. Le « diable » se tient dans le détail de la relation entre l'architecte et le thermicien. On pourrait imaginer, comme réponse appropriée, de conseiller à l'architecte d'inclure dans son cabinet un thermicien, ou au thermicien d'incorporer dans son bureau d'études un architecte. Mais le remède pour-

rait être pire que le mal, en mettant l'un sous la coupe de l'autre.

L'ingénierie de conception

La bonne réponse ne peut être que de mettre les deux fonctions dans une relation d'égalité collaborative, et ce, avant le premier trait de crayon de l'architecte. Cette concertation préalable, où chacun peut exposer à l'autre ses propres contraintes, proposer les pistes qu'il envisage et négocier une solution acceptée par les deux, est l'unique voie permettant d'aboutir à une proposition commune, comprise par l'un comme par l'autre, pertinente et durable pour l'utilisateur.

C'est ce que dans l'industrie on appelle l'ingénierie de conception. Un bâtiment durable ne peut être conçu ni dans une pure vision esthétique ni par une simple analyse

technique. Il ne peut être conceptualisé efficacement que dans une approche partagée entre deux regards complémentaires et indissociables, celui de l'architecte et celui de l'énergéticien (et non du thermicien), mariant la sensibilité globale et la compréhension des détails, harmonisant la matière et l'énergie.

Dans cet objectif, chacun doit faire un effort : le thermicien doit devenir énergéticien, en apprenant les matériaux et les formes, l'architecte doit anticiper l'aspect énergétique, en prenant conscience que l'enveloppe d'un bâtiment est vivante, et le maître d'ouvrage doit apprendre à faire simultanément appel aux deux compétences. Enfin, les trois doivent apprendre à appréhender de manière globale les différentes solutions bioclimatiques à leur disposition.

C'est ainsi que l'on pourra bâtir dans une approche bioclimatique.



QUATRIÈME PARTIE

SOLUTIONS ARCHITECTURALES

1| ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Maintenant que nous avons longuement exposé les aspects théoriques et les principes bioclimatiques, nous allons pouvoir aborder quelques solutions concrètes.

Il n'est à l'évidence pas question ici de prétendre donner des solutions à l'architecte. De même qu'il lui revient de composer avec des blocs de pierre un mur qui soit autre chose qu'une vulgaire surface, c'est à l'architecte de composer avec les quelques « briques » bioclimatiques qui vont être décrites pour inventer de nouveaux bâtiments.

S'il est fait appel ici à des croquis pour mieux décrire les idées, ce n'est pas avec la prétention de donner la solution architecturale. Mais si ces mêmes croquis, purement techniques et à but explicatif, peuvent contribuer, ne serait-ce que de façon marginale, à l'inspiration architecturale pour inventer un bioclimatisme du futur, alors l'objectif recherché aura été atteint.

On pourra préciser que nombre de solutions évoquées ci-dessous, si elles s'inspirent souvent de solutions ancestrales, et si quelques-unes ont déjà été étudiées par certains architectes, n'existent généralement pas à ce jour. L'objectif des chapitres qui suivent, est-il bon de le préciser, n'est pas uniquement de lister ce qui se fait déjà, mais surtout de rechercher dans les chemins de l'innovation les moyens de changer du tout au tout l'approche de la construction, dans une optique bioclimatique. Nous nous intéresserons en particulier avec insistance à l'aspect « confort d'été » indispensable dans les régions méditerranéennes, qui a jusqu'à présent été très peu abordé en bioclimatisme, sans toutefois oublier l'aspect hivernal. La plupart des solutions bioclimatiques sont viables sous tous les climats, pour peu de savoir les adapter en conséquence, et donner si besoin la priorité à la saison la plus extrême.

Nous allons donc partir d'un petit bâtiment tertiaire tout simple, « traditionnel », comme on dit, et essayer de le modifier progressivement en tenant compte de ce qui a été vu précédemment. Les principes énoncés peuvent être facilement déclinés pour une maison individuelle de plain-pied comme pour un grand immeuble tertiaire de plusieurs étages.



Croquis 1 – Modèle de bâtiment dit « traditionnel ».

Un bâtiment traditionnel (voir croquis ci-dessus) est composé de quatre murs en béton ou parpaing, d'un toit, souvent à double pente, d'un plancher en béton. Il est équipé de nombreuses fenêtres performantes en aluminium ou PVC, également réparties sur l'ensemble de sa périphérie. Il est isolé sur ses faces intérieures par de la mousse de pétrole et de la roche fondue (avec du pétrole) en fins filaments, il est peint intérieurement avec du pétrole coloré et est chauffé à l'aide de pétrole brûlé. Il est orienté face à la rue, faisant souvent office de délimitation entre l'espace

public et le terrain sur lequel il est construit. Pour maintenir l'ensemble « propre » visuellement, le sol alentour est soigneusement goudronné (encore un peu de pétrole).

Ce bâtiment ignore totalement son environnement naturel. Peu importe son confort intérieur, il n'a pas été conçu pour cela. Peu importe son coût d'exploitation, seul le coût d'investissement est généralement considéré. Peu importe la quantité d'énergie nécessaire pour sa construction, pour s'y rendre et pour y vivre. Peu importe son impact sur la santé humaine. La seule chose qui compte, c'est l'aspect extérieur, ce qu'on appelle la contrainte architecturale.



Une construction bioclimatique vit avec le soleil, elle s'ouvre au maximum au sud et se protège au nord. Elle n'est plus qu'un grand capteur solaire intelligent. La façade sud suit la course du soleil. (Architecte Raphaël Bobeda – Cabinet Architecture Naturelle.)

GESTION DES APPORTS SOLAIRES D'ÉTÉ

Nous allons donc commencer à modifier ce modèle de base, en nous intéressant prioritairement à la gestion des apports solaires, d'abord en l'orientant plein sud plutôt que face à la route. Si la construction doit être réalisée enré-



Une protection solaire performante, c'est d'abord une bonne compréhension architecturale du climat local. Sur cette construction, plusieurs protections solaires sont visibles : en étage sur la façade orientée plein sud, une protection horizontale par lamelles inclinées à 20°, en pergola par chevrons pour limiter l'ensoleillement du rez-de-chaussée, et en protection de terrasse à l'ouest pour bloquer le soleil couchant d'été, tout en laissant entrer le soleil hivernal. (Architecte Jérôme Solari.)

gion méditerranéenne, nous commencerons par essayer de protéger, autant que faire se peut, la façade sud des rayons ardents du soleil d'été (voir croquis ci-dessous). On remarquera sur ce croquis que la toiture a perdu un pan. Cette amputation a plusieurs raisons d'être. Une pente de toiture orientée au sud surchauffe en été, sans apporter un quelconque confort supplémentaire en hiver. En revanche, elle génère un surcoût pour la construction. Et notre objectif n'est pas de construire plus cher qu'un bâtiment traditionnel. Mais cette pente simple présente aussi l'avantage de simplifier la ventilation des combles par effet Venturi lorsque les vents dominants viennent du nord, aidant au rafraîchissement estival.

La toiture est devenue débordante, largement sur la façade sud, plus modérément sur les faces est et ouest, et on en voit immédiatement l'effet par les ombres portées sur les façades. Évidemment, ces ombres se limitent pour l'instant à l'étage supérieur, nous n'avons donc trouvé qu'une moitié de solution pour limiter la surchauffe d'été. Ce qui se distingue moins facilement sur le croquis, c'est que l'isolation a été faite par l'extérieur.

En été, la masse porteuse du bâtiment n'est plus chauffée par le soleil, il faudra beaucoup moins de temps pour la rafraîchir le soir. Et en hiver, elle n'est plus refroidie par les rigueurs du climat, elle pourra se réchauffer dès les premiers rayons de soleil. Un mur réchauffé en hiver présente un écart de température beaucoup plus faible avec l'intérieur et donc des déperditions réduites



Croquis 2 – Orientation au sud et protection solaire.

d'autant. Plus vite ce mur se réchauffe au soleil, moins il consomme d'énergie.

Bien sûr, la nuit il se refroidira plus vite, mais comme (en théorie) on baisse la température de consigne, les fluctuations de température seront synchrones. On évitera ainsi de maintenir trop chaud la nuit et trop froid le jour.

Notre construction présente encore de nombreux défauts :

- Il reste à régler le problème de l'inertie des murs porteurs ;
- La partie basse du mur sud n'est pas abritée du soleil en été ;
- Les fenêtres des murs est et ouest sont mal protégées ;
- Celles du mur nord ne reçoivent toujours pas le soleil et restent très déperditives en hiver.

GESTION DES APPORTS SOLAIRES D'HIVER

Nous allons donc procéder à une série d'autres modifications (voir croquis page 209).

La première consiste à supprimer les fenêtres sur la façade nord, qui n'apportent rien ; à réduire celles orientées à l'est et à l'ouest, qui apportent peu ; et à maximiser les surfaces vitrées orientées vers le sud. Les déperditions en hiver par les vitrages sont ainsi réduites au maximum et les apports de lumière en hiver sont sensiblement augmentés. Afin d'augmenter la protection estivale des menuiseries est et ouest, ces dernières sont munies de pare-soleil individuels. Des stores ou volets extérieurs peuvent améliorer l'ensemble, pour limiter l'éclairage le matin et le soir, et compléter l'isolation de nuit l'hiver.

Mais une autre modification majeure est effectuée dans la conception du bâtiment : une serre bioclimatique est installée au rez-de-chaussée côté sud, surmontée d'une terrasse débordante. Son premier intérêt est de valoriser au mieux les apports solaires hivernaux, quand le soleil pénètre dans le bâtiment. Le mur porteur du rez-de-chaussée, situé en aplomb du mur sud de l'étage, emmagasine la chaleur et la restitue lentement dans l'ensemble du bâtiment. On peut constater que l'été, comme le montrent les ombres sur le croquis, toutes les menuiseries



Croquis 3 – Modification des ouvertures et ajout d'une serre bioclimatique.

orientées au sud sont à l'ombre et éliminent tout apport solaire direct. La porte d'entrée latérale de la serre est, elle-même, encastrée afin de limiter son exposition au soleil zénithal.

La mise en œuvre d'une serre bioclimatique doit s'accompagner d'un système de ventilation passif correctement conçu. Le passage d'air entre le rez-de-chaussée et l'étage doit se faire par le mur nord, afin de forcer un flux traversant au rez-de-chaussée. À l'inverse, une entrée d'air doit être prévue en partie basse, sur la façade de la serre, et une évacuation d'air doit être envisagée en façade sud à l'étage. On obtient ainsi une ventilation naturelle par convection, qui balaie l'ensemble du bâtiment tout en le chauffant. Ce système doit pouvoir être condamné en été et remplacé par une source d'air frais, tel un puits climatique. La serre, quant à elle, sera largement ventilée en été, ou équipée d'occultations solaires efficaces.

On peut noter d'autres détails :

- On a profité de la mise en place de la serre pour réaliser une terrasse d'étage. Celle-ci offre un espace agréable en mi-saison, ainsi que le matin et le soir en été. Elle peut également servir l'été, sous réserve de l'équiper d'une treille ou de toute autre protection solaire.
- Il n'existe plus qu'une seule cheminée en partie centrale. Notre construction commençant à présenter des performances bioclimatiques confortables en hiver, il

Serre bioclimatique

La conception d'une serre bioclimatique doit être parfaitement réfléchie, en particulier par rapport au système de ventilation du bâtiment et des capacités de stockage thermique. En région méditerranéenne, il n'est pas impossible de voir une telle serre monter à 45 °C en plein mois de décembre¹.

Une capacité d'amortissement thermique insuffisante incitera les occupants à ouvrir les fenêtres en journée et donc à perdre une bonne partie de l'efficacité potentielle de la serre.

1. Voir le retour d'expérience effectué sur la Maison solaire du Clos, présentée en première de couverture et page 211. Elle a été construite par le cabinet Architecture Naturelle à Mourières-les-Avignon, et a fait l'objet d'un suivi précis de ses conditions climatiques intérieures : www.architecturenaturelle.com.



n'est en effet plus nécessaire d'y prévoir un chauffage central, ce qui représente autant d'économie d'investissement. Un simple poêle à bois d'agrément, ou un poêle de masse (suivant le taux d'occupation du bâtiment), suffit pour pallier les besoins des quelques journées particulièrement froides en plein hiver.

- Le choix du site a porté sur un terrain légèrement pentu. La construction est enterrée dans sa partie arrière (face nord). L'isolation du plancher bas est supprimée et remplacée par une isolation en périphérie des fondations. L'inertie globale est, de ce fait, fortement augmentée. Les rayons solaires de l'hiver sont mieux valorisés et cette même inertie permet l'été de maintenir en journée une ambiance fraîche, la chaleur étant évacuée par une surventilation de nuit. Pour assurer une bonne diffusion du potentiel de cette inertie, les murs séparatifs intérieurs sont bâtis en matériaux lourds et le système de ventilation assure un brassage complet de l'ensemble du volume construit.

La mise en œuvre de matériaux lourds à l'intérieur de la construction permet de convertir les cloisons intérieures en murs porteurs. Les murs extérieurs n'ont plus besoin d'être porteurs et peuvent alors être supprimés et se limiter à une légère structure de rigidité et/ou parasismique, si nécessaire, suivant la forme architecturale retenue. Les murs extérieurs n'ont plus pour fonction que d'ap-

porter de la lumière (menuiseries) et d'isoler du climat extérieur (isolation et protection contre les intempéries). La matière du bâti a été déplacée, mais il n'y a pas eu de rajout, au contraire, plutôt une réduction de matière. Le coût global reste grossièrement identique. Mais nous avons supprimé le chauffage central et donc réalisé des

économies d'investissement à ce niveau. De même pour le sol, en réduisant de façon importante la surface à isoler, nous avons aussi fait des économies, tout en améliorant la performance générale du bâti.

TRAITEMENT DE L'INERTIE DU BÂTIMENT

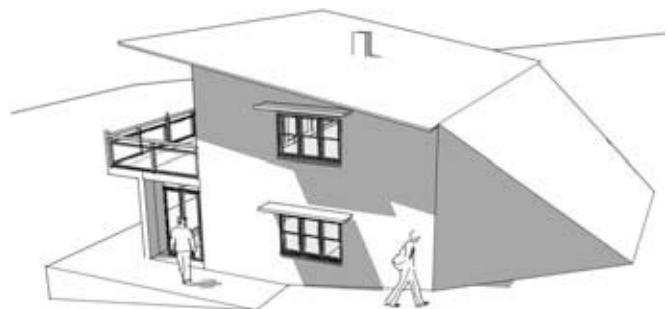
Pourtant, l'ensemble présente encore quelques difficultés, en particulier sur la meilleure façon de valoriser l'inertie du sol. On pourrait en effet considérer qu'il ne va pas être évident de faire pleinement profiter l'étage de l'inertie du plancher bas.

Nous allons procéder à une modification notable, qui entre dans la catégorie des opérations qui sortent des pratiques traditionnelles, en créant une masse inertielle déportée, sur la face nord du bâtiment (voir croquis ci-dessous). Cette masse de matière peut provenir, par exemple, tout simplement des matériaux excavés par les fondations et pour réaliser l'encaissement partiel du bâtiment dans le sol. N'étant pas isolée du bâtiment, elle va rayonner à longueur d'année sa propre température vers l'intérieur de la construction.

La masse inertielle ne doit bien sûr pas être isolée thermiquement du bâtiment, il faut en conséquence supprimer l'isolation thermique du mur nord. Mais pour lui donner toute sa performance, il va falloir procéder à l'isolation de cette masse inertielle par rapport à l'air extérieur et l'apposer sur la totalité de sa surface. Il va aussi falloir nous assurer qu'elle ne détériore pas l'étanchéité du bâtiment aux intempéries. L'isolation et l'étanchéité de cette surface importante peuvent être effectuées de multiples manières,



Une serre bioclimatique apporte un espace de vie servant de lien entre l'intérieur et l'extérieur, sans impliquer de compromis du point de vue du confort. (Architecte Sylvie Détot.)



Croquis 4 – Apport d'une masse inertielle en façade nord.

en fonction de la pente de ses parois, de la matière utilisée pour la créer, de la forme du terrain environnant...

Cette masse inertielle doit être recouverte d'une couche de matériaux thermiquement isolants. On peut imaginer à titre d'exemple, si la pente n'est pas trop forte, une épaisse couche d'argile, une autre de pouzzolane ou de liège, le tout recouvert d'une membrane étanche et d'une épaisseur de terre végétalisée. Si la masse inertielle est contenue entre des murs, il suffira de les isoler comme n'importe quel mur. L'isolation thermique n'a pas besoin d'être très importante et pourra être réduite en s'éloignant du bâtiment. La quantité totale d'isolant à mettre en œuvre ne sera pas supérieure à ce qu'elle aurait été pour la seule isolation du mur nord de la construction.

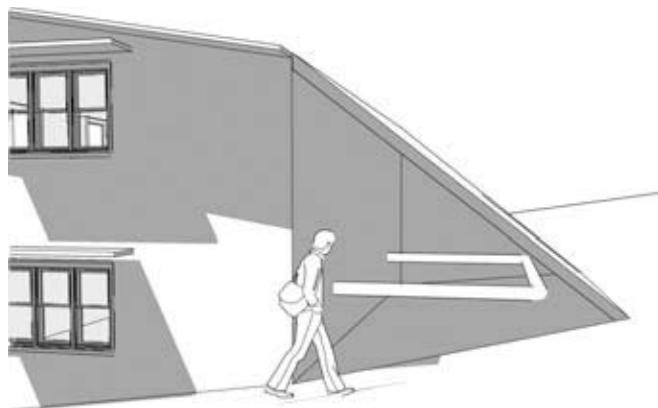
Les points importants à traiter sont une parfaite étanchéité à l'eau et un drainage efficace en périphérie : plus cette masse sera maintenue sèche, plus elle sera performante. En fait, la présence d'humidité ne serait pas un problème en soi, il suffirait d'assurer l'étanchéité du mur nord. Mais la circulation de l'eau en serait un. L'eau a un très fort pouvoir calorifique et sa circulation entraînerait au loin toute l'énergie contenue dans la masse inertielle. C'est souvent l'un des problèmes de l'inertie par le sol : si une nappe phréatique proche de la surface circule dans le sol, elle peut en faire fortement varier la température, par les flux générés par les pluies. Il faut alors drainer le sol en profondeur.

Cette masse inertielle ainsi conçue va apporter plusieurs autres avantages importants à la performance bioclimatique du bâtiment. Nous l'avons déjà évoqué à plusieurs reprises, en particulier en parlant des puits climatiques : il faut environ six mois pour que la chaleur diffuse à travers 4 mètres de matière lourde, c'est pour cela que les fluctuations thermiques de l'hiver et de l'été n'arrivent pas à modifier la température dans la profondeur du sol. Cette masse inertielle va nous permettre de commencer à travailler sur le déphasage thermique, non plus sur celui de douze heures entre le jour et la nuit, mais sur le déphasage semestriel, entre l'été et l'hiver. Elle va apporter le même effet que si le bâtiment était enterré dans le sol.

Certains répondront que dans le sol, il fait 15 °C toute l'année et que, si en été, cela peut être agréable, en hiver, c'est un peu juste. Nous allons donc répondre à leur juste interrogation, en chauffant cette masse de



Maison en Provence (voir aussi page 207). Pièces techniques, matériaux lourds et inertie au nord, cette maison s'ouvre au soleil vers le sud par une serre bioclimatique en bois et paille. La ventilation naturelle balaie transversalement l'ensemble des volumes habitables, depuis la serre vers la partie arrière nord, avant de remonter vers le sud à l'étage. (Architecte Raphaël Bobeda – Cabinet Architecture Naturelle.)



Croquis 5 – Masse inertielle équipée d'un échangeur thermique.

matière. Et comme il faut six mois pour que la chaleur diffuse à travers 4 mètres de matière, nous profiterons de la chaleur de l'été pour chauffer la masse inertie à 4 mètres du mur nord, grâce à un puits climatique hydraulique ou aéraulique (voir croquis page précédente, le schéma est très simplifié, la longueur réelle de tube à utiliser est nettement plus importante). Pour faire d'une pierre deux coups, nous commencerons par chauffer la masse inertie à mi-profondeur avec la chaleur interne à la construction, afin de rafraîchir cette dernière. Mais comme notre construction est bioclimatique, elle ne chauffe pas beaucoup en été. Nous pouvons renforcer ce chauffage estival grâce à des capteurs solaires. Six mois plus tard, cette chaleur accumulée rayonnera dans le bâtiment par le mur nord.

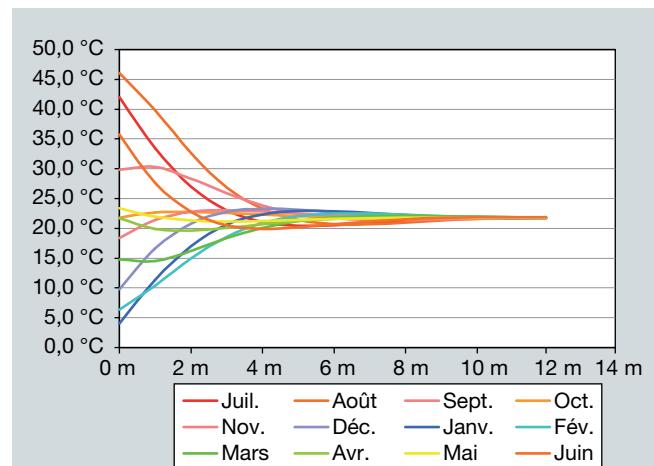
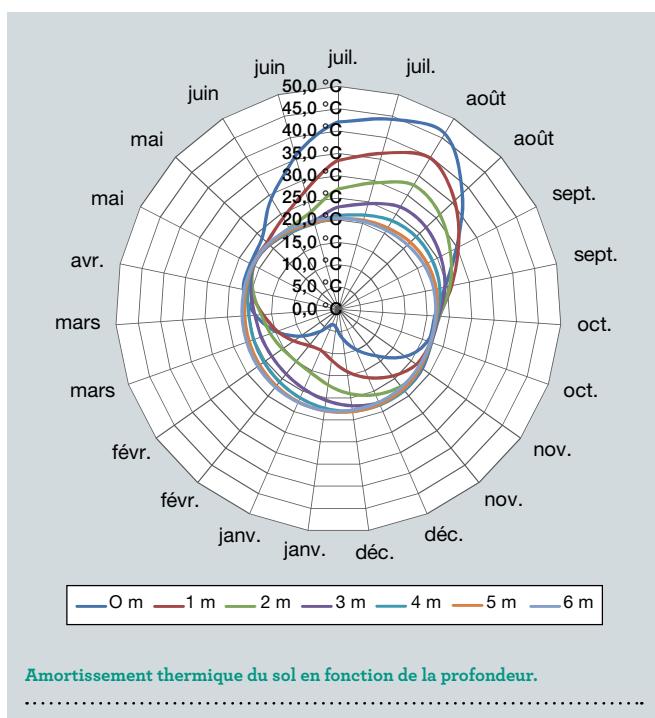
Une nouvelle interrogation apparaît : la masse ainsi chauffée va effectivement diffuser une partie de sa chaleur vers la construction, mais une bonne partie va filer dehors vers le nord, en passant sous l'isolant. De même, une fois dans la construction, cette chaleur va s'enfuir dans le sol puis vers l'air extérieur à travers les fondations. Comment alors maintenir cette masse de matière

à une température constante, supérieure à celle du sol, permettant d'assurer un bon confort en été comme en hiver ? Comment confiner notre bulle thermique ?

AMORTISSEUR THERMIQUE SEMESTRIEL

Eloignons-nous de nouveau pour cela des pratiques conventionnelles. La question posée est intéressante : elle ne concerne plus l'isolation du volume du bâtiment par rapport à l'extérieur, mais celle de la masse du sol par rapport à cet extérieur. Le sol et la masse inertie apposée sur le mur nord, qui n'est rien d'autre qu'une excroissance du sol, sont devenus notre réserve de chaleur pour l'hiver et de fraîcheur pour l'été. Or nous avons résolu le problème de l'isolation de l'excroissance du sol sur le mur nord, en l'isolant de l'extérieur. Il reste à pousser le raisonnement jusqu'au bout de sa logique et à isoler, non plus les fondations, mais la masse de sol autour de la construction.

Nous avons pu étudier l'amortissement thermique du sol par rapport aux fluctuations annuelles de la température de l'air extérieur. Reprenons ce principe, mais fixons nous-mêmes la température d'injection dans la masse du sol, à une distance suffisante de la construction, soit de l'ordre de 4 mètres, et en nous affranchissant de l'influence du climat par l'isolation de la masse de l'air extérieur.



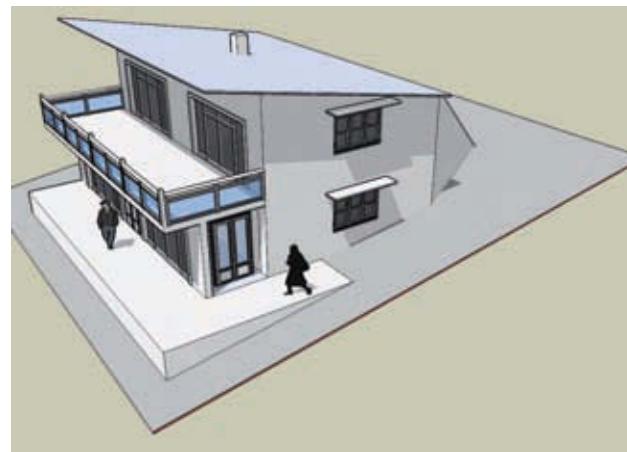
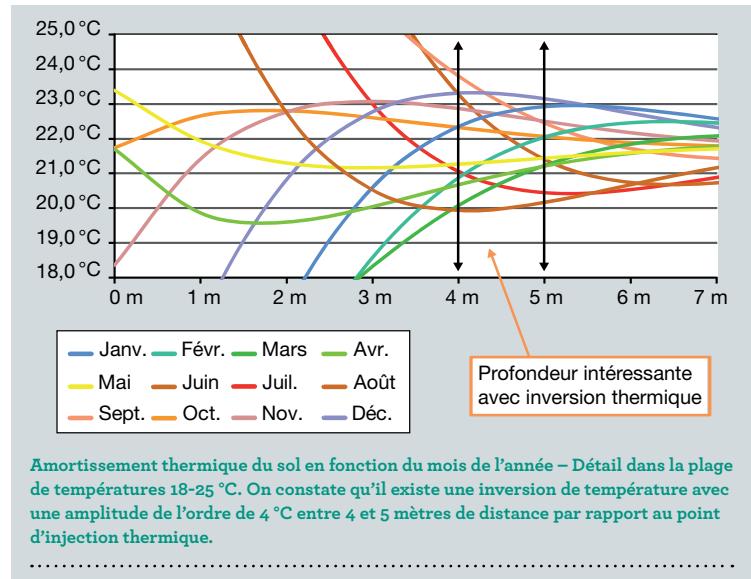
En hiver, nous refroidissons cette masse, et en été, nous la surchauffons à l'aide de capteurs solaires. L'objectif est d'obtenir un amortissement permettant d'atteindre une température d'équilibre, confortable en toute saison, légèrement oscillante, un peu plus chaude en hiver et un peu plus froide en été. Les courbes ci-contre et page de gauche indiquent un exemple de températures d'injection et leur variation en fonction de la distance depuis le point d'injection.

Comme on peut le constater, à environ 6 mètres du point d'injection, la température est totalement stable, autour de $21,5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Si on observe plus en détail ce qu'il se passe entre 4 et 5 mètres, on constate une inversion de température, avec une légère surchauffe en hiver et un faible refroidissement en été. On se trouve alors à la distance idéale pour se mettre en contact avec le volume à tempérer. En décembre, la température est d'environ 23°C , et en juin, elle est de 20°C . C'est à cette distance que l'on va placer notre plancher et/ou notre mur rayonnant.

Les résultats peuvent bien sûr varier en fonction de la nature du sol, de son humidité, de la forme de l'amortisseur thermique...

Dans une construction conventionnelle on isole les six faces, dont le plancher bas, en enveloppant le bâtiment, comme dans un paquet cadeau, pour le rendre totalement indépendant de son environnement considéré comme hostile. En bioclimatisme, nous ne voulons pas rendre le bâtiment indépendant du sol et de son environnement, nous recherchons au contraire une relation fusionnelle. Nous allons donc procéder à une isolation extensive sur la sixième face, incluant la masse de sol concernée par le bâtiment, mais sans isoler le sol. Et nous retrouvons nos 4 mètres d'isolation, nécessaires à une diffusion semestrielle de l'énergie. Dehors, l'hiver, le sol se refroidit fortement. Cette fraîcheur, nous voulons la voir arriver en été dans le bâtiment. En été, à l'inverse, le sol s'échauffe, ce dont nous souhaitons pouvoir bénéficier en hiver. Nous allons donc isoler le sol extérieur autour du bâtiment sur une largeur de 4 mètres (voir croquis ci-contre).

De même qu'à 4 mètres de profondeur la température se stabilise au niveau de celle moyenne annuelle de la surface de la terre, à 4 mètres du bord extérieur de notre isolation, la température va se stabiliser au niveau de la moyenne annuelle de l'intérieur de notre bâtiment.



Croquis 6 – Isolation périphérique extensive (isolation horizontale extérieure au bâtiment).

Une fois que cette température aura été stabilisée dans l'amortisseur thermique à environ 20°C , elle ne bougera quasiment plus à sa surface, sous réserve d'apporter en été le petit complément correspondant aux déperditions hivernales de notre bulle de chaleur, en particulier par la ventilation indispensable de l'ensemble. Cette injection supplémentaire est ce qui va nous permettre de décaler la température d'équilibre vers le haut, afin d'obtenir dans

le bâtiment une ambiance acceptable en toute saison, de l'ordre de 20 à 25 °C.

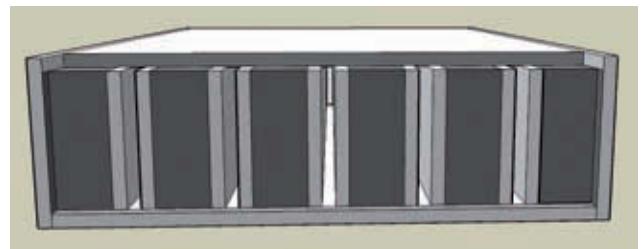
Il faudra, comme pour la masse d'inertie côté nord, veiller à ne pas avoir de flux hydraulique sous le bâtiment, ce qui ruinerait toute l'efficacité du procédé. Comme il n'est pas question d'étancher le sol en profondeur, la solution dépendra du terrain retenu. Un drainage périphérique efficace (à l'extérieur de l'emprise de l'isolant, bien sûr) devrait, la plupart du temps, résoudre le problème. Dans certains cas, il faudra creuser et étancher verticalement le drain. Cette solution permet une économie sur l'investissement. En effet, l'épaisseur de l'isolant peut être réduite au fur et à mesure que l'on s'éloigne des limites de la construction, son volume total n'est pas supérieur à ce qu'il serait en isolation du plancher bas. Cette isolation est beaucoup plus simple à installer et il n'y a plus besoin d'isoler ni le plancher bas ni les fondations. Différents matériaux isolants sont utilisables, comme le verre cellulaire, le béton de chanvre, la pouzzolane, le liège... Le choix dépend en particulier de l'utilisation ultérieure de la surface isolée. Il est toujours possible de renforcer ou d'étanchéifier si nécessaire l'isolant sur sa face supérieure, comme pour n'importe quelle mise en œuvre d'isolant, puis de réaliser un dallage de pierre, de terre crue ou cuite, un revêtement végétalisé... Il y a au moins un avantage dans cette technique : comme elle est hors volume bâti, les restrictions des DTU ne s'y appliquent pas. Ce qui n'empêche pas de procéder à une réalisation très soignée, prenant en compte les mouvements possibles du terrain, le tassement prévisible des abords, le maintien de l'étanchéité à l'eau et les capacités nécessaires de dilatation de l'ensemble.

DÉPHASEUR THERMIQUE ADIABATIQUE

Les solutions que l'on vient d'évoquer ne sont pas forcément applicables de façon simple. Afin de remplacer l'inertie naturelle du terrain, il est toutefois possible de créer une autre sorte de système de stockage d'énergie, artificiel, celui-ci.

Nous avons vu le stockage par amortisseur saisonnier réalisé à l'aide du sol. Nous allons étudier un peu plus en détail le principe du déphaseur thermique adiabatique, que nous avons déjà évoqué. Contrairement à l'amortisseur, ce système n'a pas pour objectif de supprimer les variations de température, mais de les conserver en les décalant dans le temps.

Afin de réaliser ce déphaseur, il faut créer des lames de matière entre lesquelles circule de l'air (voir croquis ci-dessous), l'ensemble étant enfermé dans une enveloppe thermiquement isolante sur les six faces du dispositif, afin d'empêcher tout échange avec l'extérieur. La matière entre les lames d'air peut simplement être de la terre ou de la roche retenue par des parois maçonniées. Le dimensionnement du déphaseur, son volume global, l'épaisseur des lames d'air... dépendront du type de déphasage recherché – journalier (douze heures) ou saisonnier (six mois) –, de la surface du bâtiment concerné et, bien sûr, du volume d'air à traiter. Pour un déphasage saisonnier, il faut compter une surface à peu près équivalente à la surface de plancher à traiter, sur une hauteur de 2 mètres environ.



Principe d'un déphaseur plan adiabatique.

Il s'agit à l'évidence d'un volume conséquent, quasiment équivalent au volume habitable pour un bâtiment habituduel, comme on peut le voir sur le croquis ci-dessous.



Croquis 7 – Déphaseur thermique saisonnier enterré.

Mais il n'est pas indispensable de s'orienter vers un déphaseur saisonnier et un déphasage journalier de dimensions nettement plus réduites (dix à vingt fois plus petit) pourra déjà apporter pas mal de facilités dans la gestion des apports solaires, surtout en hiver, ainsi que dans celle de la fraîcheur en été.

Nous n'entrerons pas ici dans la description des critères de dimensionnement exact d'un tel déphaseur, un peu trop complexes pour être décrits en quelques lignes. L'important à retenir est qu'il est possible de créer une inertie déportée, capable de gérer les besoins journaliers. Celle-ci présente l'avantage incontestable, par rapport à une inertie interne au volume habitable, de pouvoir être gérée suivant les besoins du moment, de disposer d'une inertie modulable à volonté.

En été, elle peut être utilisée la journée pour rafraîchir l'intérieur et, la nuit, la chaleur accumulée est directement évacuée à l'extérieur. Le déphaseur sert alors de stockage de la fraîcheur nocturne.

L'hiver, elle peut stocker la chaleur en journée, mais sans interdire un réchauffage rapide du volume habitable, lequel peut alors utilement être conçu sans aucune inertie. Des bureaux peuvent ainsi être construits sans inertie, en structure bois-paille par exemple, être mis en hors gel en fin de semaine, ne pas être chauffés la nuit et être remis rapidement en température le matin, tout en bénéficiant d'une importante inertie de stockage des apports solaires les jours ensoleillés, réglable à volonté. On peut envisager à partir de là des capteurs solaires thermiques (mur Trombe, serre bioclimatique, capteur aéraulique ou hydraulique...) rechargeant en journée ce déphaseur, afin d'aller y puiser le lendemain matin la chaleur nécessaire pour compenser le refroidissement nocturne.

Comme indiqué, le dimensionnement et la conception dépendront fortement des objectifs fixés au déphaseur, du type d'utilisation et des horaires d'occupation du bâtiment ainsi que des apports solaires envisageables...

Le déphaseur thermique adiabatique est un accumulateur thermique de très grande capacité, qui présente l'avantage majeur d'offrir à un bâtiment une inertie déportée, variable à volonté, depuis l'absence totale d'inertie jusqu'à une inertie ultralourde, en fonction des besoins climatiques instantanés. De même que l'amortisseur saisonnier, mais pour une utilisation différente, il permet d'envisager des constructions ne nécessitant quasiment

aucune source d'énergie complémentaire pour assurer des conditions climatiques intérieures confortables en toute saison.

INERTIE INTÉRIEURE

La création d'un amortisseur ou d'un déphaseur massif n'est malheureusement pas toujours envisageable. On est alors amené à se poser la question de l'inertie interne de la construction.

Comme nous l'avons déjà dit, la bonne réponse ne peut être ni « aucune inertie » ni « une inertie maximale ». Tout dépend de l'usage des lieux et des objectifs thermiques fixés, de l'amortissement et du déphasage recherché. Entre une salle de classe et une chambre à coucher, entre une salle de spectacle et un plateau de bureaux, la réponse ne peut pas, ne doit pas être uniforme. En fonction des apports solaires disponibles, de la ventilation nécessaire, des apports internes... la réponse devra être adaptée à chaque situation.

Ce qui est évident, c'est qu'il existe une cohérence indispensable à trouver entre l'utilisation du site, l'inertie du bâtiment, les apports solaires, la ventilation et le traitement de l'hygrométrie, les matériaux employés, la durée du déphasage et l'amplitude de l'amortissement. Traiter l'un sans se préoccuper des autres, ce qui est malheureusement encore trop souvent le cas, ne peut que conduire à des déconvenues insurmontables par la suite.

Prenons un exemple que nous avons déjà cité : non seulement un Monomur de 37,5 cm offre un déphasage de l'ordre de vingt-quatre heures, mais son isolation thermique est nettement insuffisante lorsqu'il est mis en œuvre seul. Dans une région froide, il ne permet même pas de satisfaire à la réglementation thermique. Mais surtout dans une région chaude, il offrira un confort très limité en été, car il déchargera le lendemain la chaleur qu'il aura accumulée la veille sur sa face extérieure. On pourra toujours essayer de surventiler la nuit, cela ne servira pas à grand-chose. En revanche, le même mur, correctement isolé par l'extérieur, offrira un excellent amortissement des fluctuations thermiques et pourra alors être déchargé la nuit, à condition de le réserver à des pièces inutilisées en période nocturne. Dans un logement, les chambres devront par conséquent être traitées différemment du salon ou de la salle à manger.

L'homogénéité d'une construction est généralement son premier défaut. Une chambre devra présenter une inertie très faible, afin de pouvoir rapidement se rafraîchir la nuit en été et se réchauffer en hiver, et afin d'éviter de la chauffer inutilement en pleine journée.

Le bioclimatisme, c'est d'abord savoir gérer avec intelligence les apports solaires, en été comme en hiver, ainsi que les apports internes. Cette gestion ne peut se faire sans engager simultanément le traitement des apports des vitrages, la position, la matière et la masse des surfaces d'inertie, ainsi que la ventilation des lieux.

Le style d'occupation des lieux est un autre paramètre important. Une forte inertie impose en hiver de préchauffer longtemps un lieu refroidi. Si cela n'est pas un problème majeur dans un lieu chauffé en permanence comme un logement (sauf dans les chambres ou les salles d'eau), il faut se poser la question de l'intérêt de cette inertie dans une salle de classe servant cinq jours par semaine, huit heures par jour, et jamais de nuit. Une trop faible inertie sera pénalisante pour les journées chaudes d'été, et une trop forte inertie le sera encore plus pour le chauffage d'hiver.

Mais il est possible de déporter cette inertie dans un local non chauffé, comme les circulations qui seront à très forte inertie, à condition d'isoler les classes qui devront avoir la plus faible inertie possible. En été, on peut ainsi surveiller les circulations la nuit et coupler la ventilation des classes à travers les circulations afin de leur offrir une forte inertie et de leur assurer une fraîcheur permanente. En hiver, on pourra supprimer tout lien entre ces volumes pour ne chauffer les salles qu'aux seules heures de cours, en les ventilant avec un système double flux valorisant les apports internes. Comme on peut le voir dans cet exemple, il n'est plus simplement question d'inertie ou de ventilation, la réponse se trouve dans la conception même du bâtiment, le positionnement de son inertie, le principe de son système de ventilation, en traitant le problème énergétique d'un point de vue global. La consommation d'énergie de la construction ne dépend pas fondamentalement du thermicien classique, mais beaucoup plus du comportement du maître d'ouvrage et de l'architecte avant le premier trait d'esquisse, qui auront su ou non concevoir le projet en partenariat avec un énergéticien.

Le même principe de déplacement d'inertie peut opportunément s'appliquer à quasiment tous les bâtiments.

Comme déjà évoqué, dans un logement, l'inertie dans une chambre à coucher ou une salle de bains est plutôt une source d'inconfort et de gaspillage d'énergie, alors qu'elle est un plus indéniable dans un salon ou une salle à manger, *a fortiori* dans une véranda.

Apporter une réponse péremptoire et généralisatrice à la question de l'inertie ne peut donc conduire qu'à commettre des erreurs. L'inertie, oui sûrement, à condition de savoir « où ».

MUR TROMBE

Nous avons déjà décrit en détail le fonctionnement d'un mur Trombe (voir page 177 et suivantes). Nous allons en examiner les différentes variantes de réalisation.

Le mur Trombe le plus courant comporte une paroi massive, destinée à accumuler la chaleur provenant de la lumière traversant un vitrage. La paroi d'accumulation comporte par ailleurs en parties haute et basse des ouvertures permettant à l'air de circuler.

Quand le soleil brille, l'air emprisonné entre le vitrage et le mur Trombe s'échauffe et monte par convection, puis s'échappe par les ouvertures hautes. De l'air frais est alors aspiré par les ouvertures basses. Par ailleurs, la masse du mur s'échauffant, elle transmet dans le bâtiment par conduction la chaleur accumulée, avec un certain déphasage. On a donc un chauffage instantané par les ouvertures et un chauffage déphasé à travers le mur.



Conception d'un mur Trombe.

En fonction des besoins, on peut régler la durée du déphasage en jouant sur l'épaisseur du mur, supprimer le chauffage déphasé en isolant le mur côté intérieur au local et/ou supprimer le chauffage instantané en enlevant les ventilations.

Afin d'éviter les pertes la nuit, il est préférable de placer un volet isolant devant le vitrage, qui permettra aussi d'empêcher le mur Trombe de chauffer l'été.

Pour parfaire l'ensemble, si le local à chauffer se situe derrière le mur Trombe, celui-ci peut être utilement accolé à un mur porteur intérieur qui servira de diffuseur thermique.

En tubant les ouvertures de ventilation, il est également possible d'utiliser la chaleur accumulée pour un autre local, par exemple situé à l'étage au-dessus. Et en plaçant un ventilateur sur ce tube, on peut réchauffer un autre local à distance. Les combinaisons sont multiples.

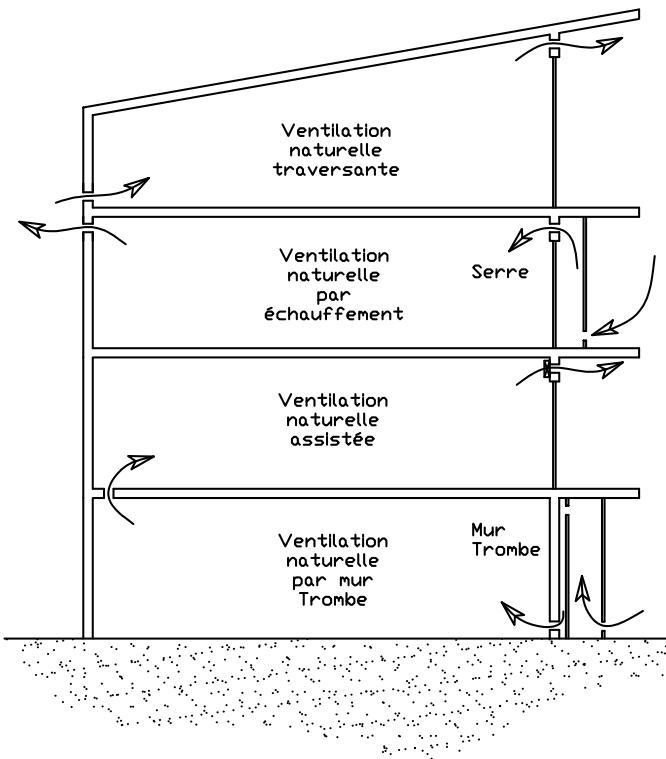
En Provence en plein hiver, l'irradiation d'un mètre carré de mur Trombe est de l'ordre de 2,5 à 3,5 kWh par jour, en fonction de l'altitude, soit de quoi chauffer en janvier de l'ordre de 10 m² de surface d'une construction simplement BBC. Un vitrage de 2 mètres de haut par 1,5 mètre de large peut ainsi suffire à chauffer gratuitement une pièce d'environ 30 m². Dans une construction bioclimatique passive, la surface chauffée pourra être nettement plus importante, au moins du double, à condition de bien maîtriser le déphasage journalier.

VENTILATION NATURELLE

Une ventilation naturelle reste la méthode la plus économique, autant en investissement et en énergie grise qu'en consommation d'énergie, pourvu qu'elle soit correctement conçue et maîtrisée, et mise en œuvre dans une construction elle-même de bonne qualité.

Un système de ventilation naturelle dépend fondamentalement des formes architecturales en jeu. Il est donc difficile de proposer des solutions toutes faites. On peut toutefois revenir sur les principes généraux de tels systèmes. Une ventilation naturelle peut utiliser différents principes de fonctionnement :

- par mono-ouvrant ;
- par flux traversant ;
- par tirage thermique.



Les différents principes de ventilation naturelle.

Seul le dernier (déclenché par la poussée d'Archimède) autorise un contrôle automatique précis du débit de ventilation obtenu, qui ne dépend alors que de la différence de température, de la hauteur entre l'entrée et la sortie d'air, et d'un éventuel contrôle des ouvertures (hygroréglable) ou des débits (ventilateur, obturateur). Pour permettre au tirage thermique d'assurer un renouvellement complet de l'air intérieur, le point d'échappement doit se situer à l'opposé du point d'entrée dans le volume chauffé, obligeant l'air à traverser la totalité de ce volume.

Afin d'améliorer le contrôle du débit de ventilation, il est possible d'utiliser un ventilateur mécanique, on se trouve alors avec une VNA (ventilation naturelle assistée). L'entrée d'air via un mur Trombe, éventuellement à flux inversé, garantit un contrôle total du débit d'air par la ventilation. En l'absence de ventilation assistée, le tirage thermique reste faible et assure un renouvellement minimal de l'air. La ventilation peut être ainsi asservie à un

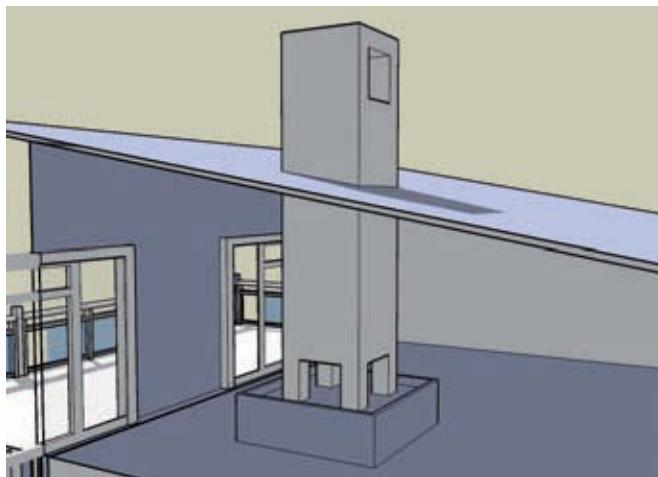
thermostat régulant en hiver son fonctionnement selon la température intérieure et celle du mur Trombe. En été, le mur Trombe inversé génère une ventilation naturelle vers l'extérieur, évitant d'injecter dans la construction de l'air surchauffé.

Le sens de la ventilation mécanique peut d'ailleurs lui-même être inversé. D'autres techniques telles que la double peau, la liaison avec un puits climatique, un amortisseur ou un déphasageur thermique... peuvent compléter de multiples schémas envisageables en fonction de la conception et de la situation du bâtiment.

BAGDIR

Nous avons évoqué le chauffage hivernal, nous allons maintenant parler du rafraîchissement estival, revenir aux *bagdirs* iraniens et nous intéresser de plus près à leur conception.

Le *bagdir*, comme indiqué précédemment, comprend une source d'eau et une tour aérodynamique. Dans les versions les plus simples, la source d'humidité se limite à un bassin d'eau au pied de la tour à vent. Dans les exemples plus sophistiqués, la colonne d'entrée d'air se situe à distance et circule dans une canalisation enterrée dans laquelle se trouve de l'eau. Le principe a été poussé à son efficacité maximale par les Romains, qui ont mis au point ce qui est aujourd'hui devenu le puits provençal ;



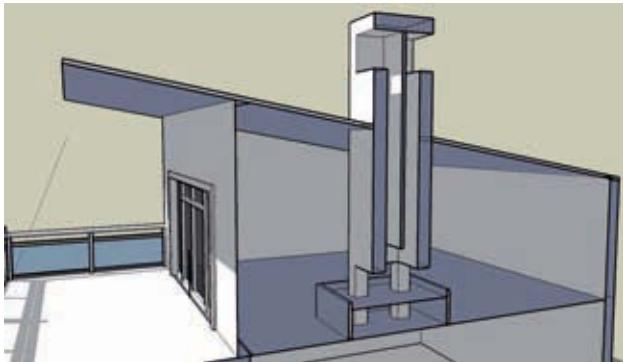
Bagdir.

l'air circulait alors à travers les conduites enterrées d'amenée d'eau potable. Précisons d'ailleurs que l'on rencontre aujourd'hui des problèmes de condensation dans certains puits climatiques, qui fonctionnent alors exactement à l'inverse de l'effet recherché. En particulier en régions tropicales humides, tant qu'on ne prendra pas en compte le cycle de l'eau, on continuera d'affirmer qu'un puits climatique ne peut pas y fonctionner.

La tour à vent est constituée de terre crue et comprend un certain nombre de lames d'air verticales, généralement entre deux et huit, suivant le type de vents dominants, les unes présentant leur entrée face au vent, les autres dos au vent. Au pied de la tour, les lames d'air communiquent entre elles ainsi qu'avec le volume habitable et permettent une remontée de l'air entrant sans passer par l'intérieur de l'habitation.

En l'absence de vent, l'air chaud de l'habitation remonte lentement par effet Venturi (par convection naturelle) dans la cheminée du *bagdir*, la partie extérieure de la tour, chauffée en journée par le soleil, participant pleinement à la ventilation naturelle. En présence de vent, l'entrée face au vent se retrouve en surpression alors que celle qui est dos au vent est en dépression. Ce différentiel de pression crée un flux continu d'air sec au pied de la tour, qui brasse l'air intérieur par la turbulence créée, sans le renouveler fondamentalement, mais en lui empruntant son humidité. Cet air intérieur brassé et asséché fait évaporer l'eau au pied du *bagdir*, ce qui a pour effet de le refroidir. L'inertie thermique de la tour participe au rafraîchissement du flux d'air diurne et surtout nocturne. L'air chaud de l'habitation s'échappe à travers la tour et crée une dépression dans la construction qui aspire l'air frais nocturne à travers le puits, même en l'absence de vent.

De jour, l'air intérieur se recharge en humidité et se refroidit sous cette action, puis se dissipe par turbulence naturelle dans l'habitation en la rafraîchissant. L'humidité est absorbée par les murs en terre crue, où elle condense en y transférant la chaleur intérieure, puis s'évapore à nouveau à l'extérieur sous l'effet du soleil. Il ne reste plus qu'à évacuer la nuit la chaleur accumulée dans les murs le jour. Des parois extérieures non étanches à la vapeur d'eau et offrant un déphasage journalier sont donc indispensables pour que l'ensemble fonctionne bien. Ce système de rafraîchissement ne peut évidemment fonctionner efficacement que dans les régions chaudes, ventées et présentant un air sec... comme par exemple en Provence.



Bagdir, coupe de conception.

PAROIS À LAME D'AIR

Nous en arrivons naturellement à la conception des parois extérieures. Si elles se doivent d'être thermiquement isolantes, il leur faut aussi valoriser les flux d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur afin d'assurer un confort d'été agréable. L'utilisation d'un pare-vapeur est donc à proscrire. Pourtant, la réglementation semble indiquer comme indispensable l'utilisation de cet obstacle à la progression de l'humidité. L'élément manquant en réalité dans cette contradiction apparente est la compréhension de la raison d'être réelle de ce pare-vapeur jugé indispensable.

Tous les fabricants d'isolants artificiels vous le diront : il ne faut surtout pas que l'humidité les pénètre, sous peine de perdre toutes leurs propriétés. Mieux vaut ne pas regarder quelques années plus tard le bouillon de culture formé sous le pare-vapeur, ni la facture de chauffage, sans parler de la santé des enfants qui y vivent. Et si on arrachait tout pour repartir de zéro ?

La meilleure protection contre la condensation sur ou dans les murs, c'est d'abord et avant tout la maîtrise de l'hygrométrie et donc une bonne ventilation ainsi que des parois saines. Aucun pare-vapeur ne pourra résoudre les problèmes liés à une mauvaise ventilation et de piètres matériaux. Dans une construction correctement ventilée, il n'y a pas de problème de condensation en hiver, tout simplement parce que l'humidité de l'air extérieur

ne peut pas condenser dans un milieu plus chaud. Le problème ne peut apparaître qu'en été dans une région humide, lorsque l'intérieur de la construction est plus froid que l'extérieur. Si, dans un bâtiment, il se produit de la condensation en hiver, c'est à la ventilation et à l'isolation qu'il faut s'intéresser, parce qu'un pare-vapeur sera au mieux un vulgaire cache-misère et, malheureusement, plus souvent une aggravation du problème, qui, de plus, ne sera plus visible.

On trouve des maisons relativement anciennes dans des régions à l'atmosphère humide, en Vendée par exemple, qui ont résolu le problème de l'humidité de façon assez simple, en construisant un double mur légèrement ventilé. Non seulement la lame d'air ainsi créée améliore l'isolation thermique l'hiver, mais en plus elle permet de réguler l'humidité des murs, en forçant le point de condensation dans cette lame d'air dont la ventilation naturelle fait le reste. Et s'il y a trop de condensation, elle peut couler vers le sol. Cette ventilation est assurée par une double prise d'air vers l'extérieur, en point bas via un siphon thermique et en point haut ; croisés à l'horizontale afin d'assurer un flux sur toute la surface de mur. Quand le soleil chauffe, la paroi extérieure monte en température et déclenche une convection naturelle dans la lame d'air. Ce flux d'air a pour fonction d'assécher la cloison intérieure, y accélérant la diffusion de vapeur d'eau. De nuit en été, le flux évacue simultanément la chaleur accumulée dans les murs, améliorant le pouvoir isolant de la paroi.

Cette conception ancienne s'intéresse bien sûr en priorité au confort d'été et, dans un bâtiment moderne, il faudra positionner la lame d'air² à l'extérieur de l'isolant ou, mieux encore, au cœur de l'isolant, l'important étant d'assurer une bonne convection potentielle, donc une étanchéité relative sur les surfaces entre les entrées d'air basse et haute de la double paroi, et de pouvoir supprimer cette ventilation devenue inutile, voire nuisible l'hiver.

Dans cette situation, un freine-vapeur (et surtout pas un pare-vapeur) pourra à la limite permettre de s'assurer que la condensation a bien lieu dans la lame d'air. Si l'isolant est homogène, si le revêtement intérieur est moins perméable à la vapeur d'eau que l'isolant, il n'y a aucune raison de rajouter une couche technologique,

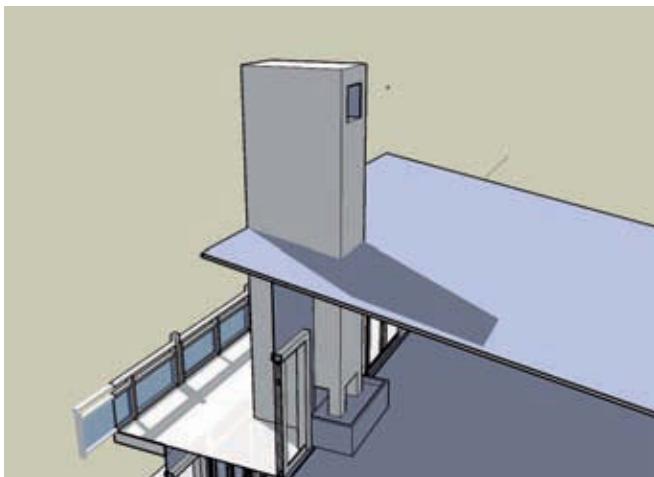
2. Pour mémoire, une lame d'air fait moins de 5 cm d'épaisseur afin d'interdire la convection interne, au-delà, ce n'est plus une lame d'air, c'est un volume non chauffé, qui perd une bonne part de ses qualités thermiques.

la mise en œuvre intelligente restant comme toujours la solution la plus simple, la plus économique et la plus performante.

CHEMINÉE ROMAINE

On parlait de ventilation. « Cela consomme de l'électricité », rétorqueront les contradicteurs. Mais comment faisaient nos ancêtres, sans électricité, pour bâtir des constructions qui ne moisissaient pas ?

Les Grecs et les Romains, encore eux, avaient mis au point un système très simple, qu'on trouve encore sur de vieilles fermes : la cheminée extérieure en pierre ou en terre, cuite ou crue. Une cheminée, cela permet de faire du feu, mais bien plus que cela.



Bagdir « romain ».

Comme nous l'avons déjà montré, la poussée d'Archimède génère un flux d'air proportionnel au différentiel de température entre l'entrée et la sortie :

$$\Delta P = \left(\frac{352,6}{T_0} - \frac{352,6}{T_1} \right) \cdot g \cdot H$$

Cette cheminée, il ne faut pas la construire n'importe où : elle doit se situer sur une façade orientée entre le sud et l'ouest et posséder une sortie haute positionnée

dos au vent dominant (cela semble évident, mais quand on regarde la plupart des cheminées...). Elle peut aussi tout simplement dépasser au-dessus de la toiture du bâtiment. Dès que le soleil chauffe, l'air à l'intérieur du conduit de cheminée s'échauffe, monte par convection naturelle et crée une dépression dans la construction, et cela, qu'on soit en été ou en hiver. Comme l'entrée intérieure du conduit est en partie basse de la construction, il aspire l'air au sol, là où il est le plus froid. En hiver c'est parfait ; en été, il faut prévoir une ouverture dans le conduit au point le plus haut du volume intérieur, afin d'évacuer la chaleur intérieure qui s'y accumule.

On dispose ainsi d'un système de ventilation naturelle particulièrement efficace. Si la construction est par ailleurs correctement étanche à l'air (s'il ne faut pas faire de l'étanchéité à l'air une obsession, il faut quand même la réaliser de manière correcte), rien ne se produit à travers la cheminée tant qu'une autre ouverture n'a pas été créée. On peut alors réguler le renouvellement d'air et surtout choisir par où l'air doit entrer, par un puits climatique par exemple.

En poussant un peu le raisonnement et en revenant aux *bagdirs*, on peut se demander s'il ne serait pas intéressant de coupler les deux systèmes, d'autant que le *bagdir* utilise en réalité le même principe que la cheminée romaine, en un peu plus sophistiqué : on pourrait appeler cela un *bagdir « romain »*. Il faut alors positionner la paroi interne du *bagdir* au niveau de la cloison sud (voir croquis ci-contre). La cheminée sud s'échauffera au soleil et accélérera la convection d'air, même sans vent. L'entrée d'air de la cheminée côté nord du *bagdir* devra pouvoir être régulée et modifiée en position, afin d'adapter le système à la saison et condamner, ou tout au moins limiter, l'entrée d'air en hiver, en fonction des besoins de ventilation naturelle.

PAROI PARIÉTODYNAMIQUE

À partir des principes précédents – mur Trombe, paroi à lame d'air, cheminée romaine – et en élargissant notre point de vue, on arrive à ce qu'on appelle une paroi pariétodynamique.

Ce type de paroi utilise une lame d'air et combine les principes du mur Trombe et de la ventilation naturelle de la cheminée romaine, en mettant en valeur la meilleure

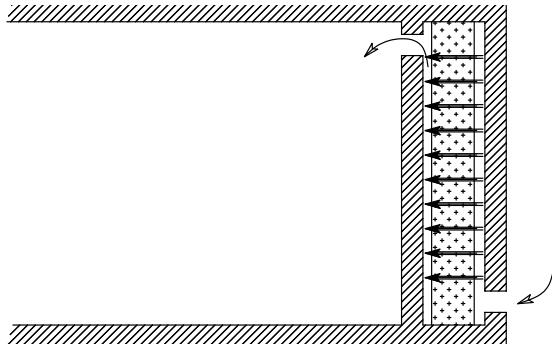


Schéma de principe d'une paroi pariétodynamique.

compréhension des phénomènes physiques en jeu. La ventilation de la lame d'air entre les deux parois se produit en partie basse sur la paroi extérieure, et en partie haute sur la partie intérieure. L'air circulant dans la lame d'air va récupérer l'énergie qui fuit à travers la paroi intérieure avant de pénétrer dans le bâtiment.

De nombreuses variantes existent sur ce principe, depuis le triple vitrage pariétodynamique au mur capteur vitré. L'objectif reste toujours le même : récupérer de l'énergie dans la lame d'air avant de la faire pénétrer dans la construction. Les bâtiments de la cité de la Habette à Créteil (94) ont ainsi été réhabilités en 1993 et ont été équipés en particulier de fenêtres pariétodynamiques. Les résultats se sont avérés supérieurs aux estimations prévisionnelles.

En allant encore plus loin, on en vient à positionner une isolation perspirante, comme par exemple de la paille, entre deux murs pariétodynamiques, créant ainsi une « isolation pariétodynamique ». La poussée d'Archimède liée à l'échauffement de l'air intérieur entraîne une dépression sur l'isolant, de sorte que l'air extérieur diffuse progressivement à travers l'isolant. La chaleur qui voudrait fuir à travers l'isolant est en totalité récupérée par l'air entrant, si bien que les déperditions de l'isolant deviennent nulles. On utilise en fait l'énergie de déperdition de l'isolant pour réchauffer l'air entrant, créant un système aussi performant qu'une VMC double flux, mais sans électricité ni équipement technologique compliqué risquant de givrer en hiver. Le principe peut alors être généralisé à la totalité d'une paroi isolée en

matériau perspirant naturel. Ce schéma offre plusieurs avantages :

- il résout le problème de bruit d'une installation de ventilation, l'isolant ayant une double fonction thermique et phonique ;
- il permet une filtration très efficace de l'air entrant contre les pollens pour les personnes allergiques ;
- il convertit les déperditions de la paroi en préchauffage de l'air entrant, la paroi ne perdant plus d'énergie.
- couplé à un mur thermique, donc équipé d'une paroi extérieure captant l'énergie solaire, la paroi se transforme en un système très puissant de chauffage de l'air intérieur en hiver dès qu'il y a du soleil, et en ventilation naturelle dynamique l'été par inversion du flux d'air.

Dans ce dernier cas, les systèmes sophistiqués inversent le flux entre l'été et l'hiver, afin qu'en été la chaleur soit évacuée par convection naturelle vers l'extérieur et qu'elle « aspire » en quelque sorte l'air intérieur, qui pourra provenir par exemple d'un puits climatique, ou tout simplement d'une cave. On n'invente rien avec un tel système, on ne fait que sophistiquer les principes antiques de la cheminée romaine, grâce aux vitrages et à une meilleure compréhension du fonctionnement de l'ensemble.

PUITS ROMAIN

Il reste à choisir le point d'entrée de l'air de ces différents systèmes, et on revient à nos Romains, qui n'étaient pas toujours aussi « fous » que le prétendaient les Gaulois.

Quel est le lieu permettant de fournir un air idéal du point de vue de sa température, quelle que soit la saison ? Une cave, bien sûr, à condition de la ventiler vers l'extérieur. Tout simplement parce qu'elle se stabilise à la température du sol, soit à environ 15 °C, en été comme en hiver. Mais pour un grand volume à ventiler, la capacité d'une cave à tempérer l'air extérieur n'est pas forcément suffisante. Les Romains prenaient l'air par une autre arrivée, qui n'existe plus dans nos constructions modernes : l'ameunée d'eau. Circulant sur de longues distances dans des caniveaux enterrés, l'air ainsi prélevé était en permanence autour de 15 °C. Ils pouvaient ainsi climatiser en été, et préchauffer en hiver. Ils étaient moins frileux que l'homme moderne, mais, au besoin, il suffisait en hiver d'un petit feu pour améliorer le tirage de la cheminée – donc la ventilation – et la température du volume intérieur.

Ce système a ensuite évolué dans les lieux dépourvus de conduite d'eau vers ce qu'on appelle aujourd'hui le puits provençal, en enterrant une canalisation en terre cuite sur une distance suffisante. La porosité de la terre cuite lui confère une hygrométrie permanente, qui contribue au rafraîchissement de l'air qui y circule, mais avec des risques ignorés à l'époque romaine, par rapport au radon en particulier, ou au développement microbien et fongique dans les conduites. Avec les conduits modernes totalement étanches, on améliore les conditions sanitaires, au détriment d'une efficacité énergétique nettement moins grande en été, de par l'absence d'eau.

À partir du moment où l'on supprime l'avantage estival de l'évaporation de l'humidité du puits climatique, on est en droit de se poser la question de savoir s'il est encore pertinent d'y faire circuler de l'air, et s'il ne serait pas plus efficace de réaliser des puits climatiques hydrauliques, avec un échangeur eau/air dans la construction à ventiler ou, encore mieux, à travers un réseau incorporé au plancher : utilisation en été du plancher chauffant, *via* un hypocauste dont nous parlerons plus loin. L'eau est un vecteur d'énergie nettement plus efficace que l'air, les

conduites peuvent donc être beaucoup plus petites en section, et ainsi tout risque sanitaire est supprimé. On sait fabriquer des échangeurs très performants pour les climatiseurs électriques, on arrive même à le faire pour une pompe à chaleur géothermique, mais cela semble beaucoup plus difficile à imaginer pour un vulgaire puits climatique. Le plus simple est souvent le plus difficile à mettre en œuvre.

MOUCHARABIEH OU GARGOULETTE

Si en Europe, nous ne savons plus protéger les ouvertures est et ouest, ce n'est pas pour autant que cette protection n'est pas possible. Il suffit de nous rendre de nouveau dans les pays du soleil, de l'Inde à l'Espagne en passant par le Moyen-Orient et le Maghreb, pour retrouver la solution, si simple qu'elle est invisible aux yeux du touriste moyen. Le voyageur s'arrête aux formes générales et ne prête généralement aucune attention aux détails de technique architecturale, encore moins à leur fonction. Il s'ébahit devant l'art qui dissimule la technique. Quant aux autochtones, imprégnés de leur cadre local, ils n'éprouvent pas le besoin d'en décrire le rôle, tellement évident à leurs yeux. Cette solution est connue en français sous le nom de moucharabieh.

Celui-ci peut bien sûr être un magnifique objet architectural, parfois riche d'un savoir-faire sculptural impressionnant. Mais c'est bien plus qu'un simple puzzle décoratif, constitué de centaines de pièces imbriquées, formant une loggia débordante. Et ce n'est que tardivement que sa fonction a été dissimulée par l'art, qui n'est dans cet objet que la partie émergée de « l'iceberg » ou plus précisément du climatiseur.

Nous avons déjà évoqué les constructions du M'zab qui utilisent une jarre d'eau positionnée devant les entrées d'air. Boire se dit *sariba* (s.r.b.). Cette jarre d'eau en terre poreuse s'appelle un *masraba* ou *misraba*. Elle est placée derrière une paroi perforée, en bois sculpté dans les maisons riches, le *masrabiya* (littéralement « emplacement de la cruche à eau »), devenu « moucharabieh » en français, conçu pour optimiser le fonctionnement de cette jarre, lui assurant une ombre totale, ainsi qu'une ventilation optimisée. Cette paroi à trois faces en bois épais, située généralement en hauteur, perforée d'une infinité d'ouvertures permettant la circulation de l'air, tout en



Un *masrabiya*, signature d'une culture architecturale multimillénaire, dans la région d'Assouan, en Égypte. (Photo Claire Cornu.)



L'eau a, de tout temps, permis aux hommes de s'assurer une fraîcheur simple et saine, en utilisant son fantastique potentiel énergétique. Ici dans la région d'Assouan, en Égypte. (Photo Claire Cornu.)

interdisant au soleil de la traverser et donc de réchauffer l'eau de la jarre, n'est donc en aucune façon une fenêtre permettant de « voir sans être vu », comme on le lit trop souvent en Occident, mais d'abord un système de climatisation par évapotranspiration, puis de rafraîchissement de l'eau et, accessoirement, d'éclairage indirect.

L'air extérieur pénètre dans la construction à travers le *masrabiya*, aspiré par l'air chaud qui s'échappe par le haut de la construction. Il lèche alors la terre poreuse de la jarre et évapore l'eau qui y suinte, en se refroidissant au passage. Cette humidité va ensuite être absorbée par les murs, s'y condenser, puis s'évaporer de nouveau à l'extérieur après transfert à travers les murs. L'air refroidi descend dans la construction, chassant vers le haut l'air qui s'y est réchauffé. La chaleur de l'air est ainsi transférée directement depuis le point d'entrée vers l'extérieur, sans réchauffement intérieur : le système permet non seulement un renouvellement d'air sans apport thermique, mais surtout un rafraîchissement de l'air intérieur, ainsi que celui de l'eau pour les occupants.

En Provence, la technique de la jarre poreuse était connue il y a encore peu sous le nom de *gargoulette* (*gargoulette* signifie « cruchon » en provençal). La technique était

aussi utilisée dans les armées sous la forme de la vache à eau (elle l'est encore par certains campeurs informés, la performance d'une vache à eau est impressionnante). Il s'agit d'un simple seau (une « bâche » qui n'a, d'ailleurs, rien du bovin) en toile de jute épaisse, muni en partie supérieure d'une toile couvrante et d'un robinet en partie basse, que l'on suspend à l'entrée de la tente ou sous un arbre, procurant ainsi fraîcheur et eau fraîche, y compris en pleine canicule.

On ne peut que regretter cette force destructrice qui incite les plus riches cultures architecturales à abandonner leurs pratiques multiséculaires au profit de la technologie occidentale triomphante. Il nous reste à retrouver l'humilité qui nous permettra aussi de réapprendre des autres, et à concevoir un système mettant en œuvre ce principe simple, s'appuyant sur notre compréhension pointue des phénomènes thermodynamiques, pour progresser dans le respect de nos normes sanitaires modernes.

Pour la protection solaire des ouvertures est et ouest, ce type d'habillage tamisé des ouvertures sur le principe du *masrabiya* peut donc être une solution performante, bien plus qu'un vitrage étanche ou un quelconque brise-soleil,

pour peu qu'on y positionne une réserve d'eau poreuse devant, même si ce type de solution peut perturber les tenants de l'étanchéité totale et du pare-vapeur. Ce genre de climatisation ne peut évidemment être mis en œuvre que si le reste de la construction intègre cette fonctionnalité, en particulier sur le traitement des flux d'air et sur le cycle de l'eau : aucune chance de le faire fonctionner dans une construction étanche à la vapeur d'eau, face à du béton ou du parpaing, de la laine de verre ou du polystyrène. Il doit être assorti d'une ventilation par convection naturelle, donc dans une construction qui s'y prête :

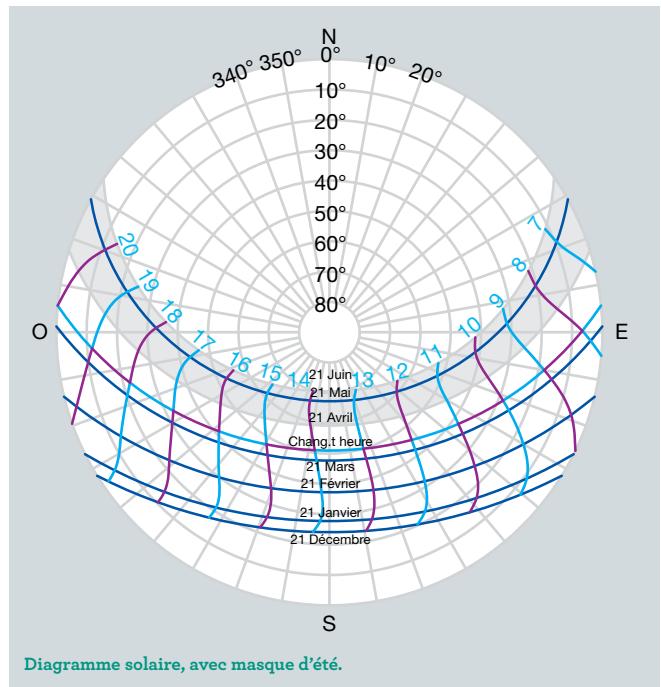


Maison en Égypte, dans la région d'Assouan. Les deux mouscharabiehs sont positionnés sous la fenêtre, au niveau du flux d'air. On remarquera le sol enterré par rapport à l'extérieur, pour valoriser la fraîcheur de l'inertie terrestre. (Photo Claire Cornu.)

l'air rafraîchi tombe au sol de la construction, dont on maintient les ouvertures basses fermées pour y retenir la fraîcheur, pendant que l'air chaud s'échappe par le haut. Les murs à forte inertie absorbent cette fraîcheur et la rayonnent. Là encore, il ne faut pas chercher à forcer ou à contrarier la nature, mais au contraire la laisser faire, utiliser sa puissance au profit du confort.

Tout en laissant libre cours à l'imagination architecturale, on peut essayer de décrire quelques principes généraux de la conception de ces mouscharabiehs pour les orientations est et ouest. Nous parlerons de l'ouest pour simplifier, mais le même raisonnement s'applique le matin à l'est.

La solution la plus performante, techniquement simple mais difficile à intégrer architecturalement, serait de positionner des masques solaires sous forme de vanteuses axées sur la trajectoire solaire hivernale, soit des vanteuses horizontales dans leur largeur, descendant vers le nord avec un angle de 20 à 30° (voir diagramme ci-dessous), n'offrant aucun masque visuel vers l'horizon, mais suffisamment larges et serrées pour cacher la trajectoire solaire au-delà de fin avril ou mai, suivant les conditions météo locales. Pour être totalement performantes et



suivre le soleil, ces vantelles devraient présenter, vues de dessus, une forme arrondie faisant toujours face au soleil d'hiver.

Cela peut sembler complexe, mais il ne faut pas oublier que les moucharabiehs sont des systèmes offrant trois faces, en saillie sur la paroi du bâtiment.

Une solution alternative est de positionner les vantelles à l'horizontale dans le sens de leur longueur, et de les équiper d'une fixation mobile permettant de modifier leur inclinaison au fil des saisons, vers le haut en hiver, vers le bas en été. Le défaut de cette solution est de créer un masque fréquent vers l'horizon.

Pour pouvoir rester sur des formes verticales et horizontales simples et conserver la vision de l'horizon, globalement, on peut considérer que ces moucharabiehs sont constitués d'un double jeu de masques : un ensemble horizontal, qui masque la position zénithale du soleil, et un ensemble vertical qui s'occupe de la latitude.

Pour l'inclinaison (vantelles horizontales), il faut masquer le soleil lorsqu'il est haut dans le ciel. Cette position correspondant à début avril, cela signifie au-dessus de 45° vers le sud-ouest et 15° à l'ouest. Il faudra choisir un compromis pour garantir une efficacité en hiver comme en été, qui peut être de se fixer 30° d'inclinaison comme objectif.

Pour la latitude (vantelles verticales), il faut masquer le soleil totalement lorsqu'il dépasse l'ouest, soit le masquer à partir de début avril.

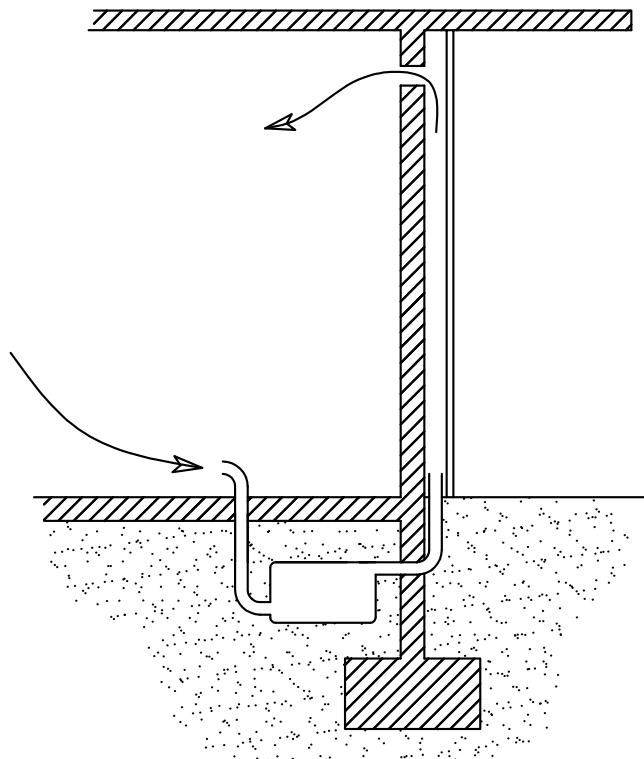
Pour obtenir ce résultat, il nous faut par conséquent, d'une part, des vantelles verticales interdisant la vision au-delà de l'ouest vers le nord, et, d'autre part, des vantelles interdisant la vision vers le zénith au-delà d'un angle de 30°. Les vantelles verticales pourront donc être orientées vers le sud-ouest, sans se chevaucher, et les vantelles horizontales seront positionnées à plat ou à environ 15° vers le haut, tout en assurant un masque zénithal total au-delà de 45°.

La gargoulette n'a pas à ce jour inspiré de solution moderne évidente et il reste à trouver un fabricant qui s'intéressera à cette question du rafraîchissement par évapotranspiration permettant d'éviter l'utilisation d'eau stagnante. On pourrait imaginer un système de buses de brumisation aspergeant une surface poreuse. Dans cette attente, il y a toujours la fontaine à eau en pierre poreuse, la cruche en terre cuite et même, pourquoi pas, la vache à eau.

SIPHON THERMIQUE

À force d'évoquer des solutions pour le confort d'été, il ne faudrait pas laisser penser que le bioclimatisme s'arrête à cette notion. Nous allons donc revenir un peu à l'igloo pour traiter du chauffage hivernal.

Notre construction bioclimatique possède une grande façade vitrée orientée plein sud, voire sous forme d'un mur Trombe, protégée du soleil en été et parfaitement ensoleillée l'hiver. Mais comme le soleil ne brille que de jour, il ne faudrait pas que cette surface vitrée serve en hiver de refroidisseur la nuit.



Principe du siphon thermique.

Pour qu'elle fonctionne correctement, nous savons qu'il faut lui associer une convection naturelle à travers la construction : l'air se réchauffe au contact du vitrage, s'élève, traverse le bâtiment vers le nord, en cédant sa

chaleur aux parois et en se refroidissant, puis retourne au vitrage par le bas. Si rien n'est fait, la nuit, c'est le flux inverse qui va se déclencher : l'air se refroidit au contact du vitrage froid, descend puis est remplacé au sommet du vitrage par l'air chaud de la construction.

Pour bloquer cette inversion de flux, on peut mettre en place un « siphon thermique », comme avec l'entrée de l'igloo : l'air froid doit passer dans un « réservoir tampon », situé sous le plancher du bâtiment. De nuit, l'air refroidi par le vitrage cède sa « fraîcheur » au volume tampon (l'inertie de la terre fait le reste), et s'il ne peut plus échanger d'énergie avec le siphon, la circulation d'air se bloque. De jour, la convection reprend et l'échange thermique se fait avec le volume habitable.

Ce siphon peut tout simplement être une cave, ce qu'on retrouve dans nombre de constructions anciennes. Une double entrée d'air existe pour la cave, l'une au nord de la construction, souvent dans une remise, l'autre au sud devant les surfaces de paroi pouvant être chauffée par le soleil. En été, si la paroi chauffe, le même principe permettra d'absorber la chaleur entrant par cette paroi.

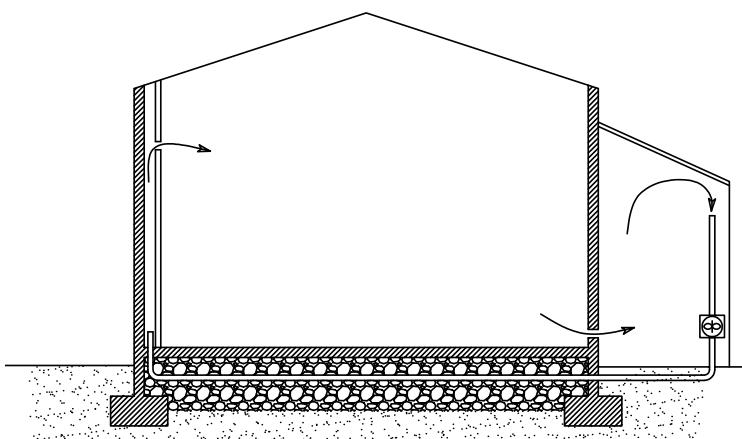
À défaut de cave, un simple petit volume enterré suffit : ce n'est pas la taille qui importe, mais la différence de niveau entre le plancher de la construction et le haut du

passage à travers le siphon. Ce siphon pourra par exemple être un caniveau situé au pied du vitrage de la serre bioclimatique ou du mur Trombe, raccordé de préférence à la façade nord du bâtiment afin de contribuer au flux traversant, par une ou plusieurs canalisations enterrées. Ce caniveau devra être dimensionné en fonction du flux d'air recherché. Il faudra penser à positionner sur les gaines un système de purge pour évacuer une éventuelle condensation en été. L'ensemble pourra opportunément être couplé à des puits climatiques par un système de vannes.

CHAUFFAGE PAR HYPOCAUSTE

Comme nous l'avons vu à la page 189, l'hypocauste est le système de chauffage par le sol utilisé à l'époque romaine, en particulier pour chauffer les thermes. Un grand feu alimentait en chaleur, par ses fumées, le dessous du sol du local à chauffer, à travers des galeries créées par les piliers sur lesquels reposait le plancher de la construction. Les fumées s'échappaient ensuite soit à travers des conduits, soit directement dans le doublage des cloisons, continuant ainsi à réchauffer le local par les murs.

Dans une installation bioclimatique moderne, on peut envisager d'utiliser le même principe, par exemple en valorisant le chauffage de l'air d'une serre bioclimatique (mais la source de chaleur peut aussi bien être un capteur solaire aéraulique ou hydraulique, un conduit de cheminée d'un poêle à bois ou d'une chaudière...), en soufflant l'air chauffé dans un réseau de gaines situées sous la dalle de plancher. En été, un by-pass peut permettre au contraire d'y souffler la nuit l'air frais extérieur et, la journée, l'air provenant d'un puits climatique. L'ensemble peut être perfectionné en prolongeant les gaines de la dalle dans le vide d'air d'une double cloison des murs, afin de les chauffer eux aussi (il faudra bien évidemment que l'isolant soit à l'extérieur). Dans un tel schéma, l'isolation du plancher est bien sûr proscrite et sera efficacement remplacée par une isolation du sol extérieur entourant la construction afin de créer une véritable bulle de chaleur sous l'édifice chauffé (ou rafraîchi en été par surventilation).



Principe de l'hypocauste à ventilation forcée. L'hypocauste est traversé par l'air préchauffé dans la serre. Une partie de la chaleur est accumulée dans l'hypocauste, le reste balaye le volume occupé. L'hypocauste sert d'accumulateur et donc de déphasage et d'amortisseur thermique, en proportion de son volume.

POÊLE DE MASSE

Suivant la situation, les possibilités architecturales et techniques ou plus simplement en fonction du climat local, il n'est pas toujours possible ou suffisant de gérer des apports solaires pour satisfaire tous les besoins thermiques hivernaux. Il est alors nécessaire de recourir à une production complémentaire, interne au bâtiment.

Un objet venu du Nord

Les peuples nordiques ont mis au point l'un des systèmes les plus efficaces pour chauffer une construction : le poêle de masse, qui a la particularité de permettre de produire avec un certain déphasage la chaleur requise pour maintenir une température de confort à l'intérieur d'une construction. En d'autres termes, on peut produire avec cet équipement en journée ou le soir la chaleur qui sera nécessaire durant toute la nuit. On peut également amortir la chaleur fournie, afin de produire en quelques heures la chaleur nécessaire à une journée entière de chauffage. On en revient toujours à l'amortissement et au déphasage, clés d'un bioclimatisme bien compris.

Le poêle de masse est un simple poêle, fonctionnant traditionnellement au bois, mais qui pourrait brûler d'autres combustibles. L'intérieur peut être en fonte, mais aussi en brique réfractaire, en pierre ou en n'importe quel matériau conducteur, apte à supporter un feu. Ce qui le différencie d'un poêle normal, c'est qu'il communique sa chaleur non pas à l'air ambiant mais à une masse de matériau l'enveloppant complètement. Quand il fonctionne, il emmagasine la chaleur générée dans ce matériau, qui va la restituer en fonction de son épaisseur et de sa masse globale avec un certain retard et un étalement dans le temps.

Les dimensions et la forme de la masse de diffusion dépendent de l'usage qui est fait du bâtiment ainsi que du déphasage et de l'amortissement souhaités : combustion le soir pour chauffer toute la nuit telle ou telle pièce, combustion permanente et diffusion à travers tout le bâtiment, chauffage rapide d'une pièce, autonomie après extinction du feu... Ces caractéristiques sont à déterminer en fonction de la chaleur massique de la matière employée, de sa diffusivité, du déphasage et de l'amortissement recherché. Un poêle de masse bien conçu doit normalement pouvoir être touché de l'extérieur sans se brûler, mais une fois le feu éteint, on doit pouvoir y faire cuire une pizza, puis un ou plusieurs pains, puis un plat à

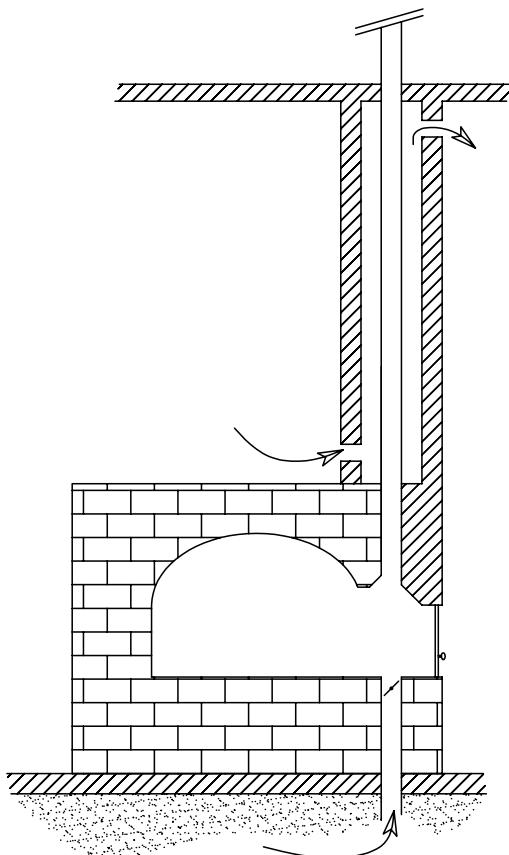


Schéma de principe d'un poêle de masse. Pour être efficace, un poêle de masse doit être positionné au centre de la construction, afin de pouvoir diffuser sa chaleur par toutes ses faces, au besoin à travers des murs massifs.

mijoter. C'est d'ailleurs ainsi qu'il était traditionnellement employé : quand venait l'heure du repas, on supprimait les braises et la cendre, et le poêle se transformait en four. On trouve encore dans certaines vieilles fermes françaises ces fours qui permettent aussi de chauffer tout le logement durant la nuit. La chaleur de la cuisson est valorisée en chauffage de l'habitation, plutôt que de partir vers les étoiles.

L'emplacement

La première règle à respecter pour le concevoir est de ne pas le mettre en contact avec un mur extérieur. C'est l'erreur classique qui consiste à accolter une cheminée à

un mur extérieur. On chauffe ainsi autant l'extérieur que l'intérieur. Le poêle de masse est soit seul, trônant au centre d'une pièce, soit plus généralement accolé, si ce n'est incorporé, à un mur porteur à forte inertie, intérieur à la construction. La combustion dans le poêle va ainsi transmettre à ce mur la chaleur produite, qui sera lentement diffusée dans l'ensemble du bâtiment.

Le conduit

La deuxième règle est de ne pas isoler le conduit. On voit trop souvent aujourd'hui ces conduits en Inox isolés par de la laine de roche, sans trop comprendre d'où vient cette manie étrange. Le conduit doit être bâti dans un matériau massif, en pierre, en brique d'argile, ou à la limite en moellon d'épaisseur réduite ou en fer noir, afin de pouvoir récupérer un maximum de la chaleur des fumées. Incorporé dans le mur à inertie, le rendement du poêle est alors optimisé, les fumées cédant le maximum de leur énergie à ce mur. Un conduit de fumées qui « tire mal » peut être trop large, trop étroit, pas assez haut, de forme incorrecte, avec un sifflet mal conçu, mal positionné en sortie par rapport aux vents ; cela peut aussi être dû à l'entrée d'air de combustion qui n'est pas correcte, ou à tout ce que l'on voudra, mais ce n'est sûrement pas en isolant le conduit qu'on va améliorer les choses. L'isolation d'un conduit mal conçu permettra, à la limite, d'améliorer le tirage en augmentant la consommation d'énergie qui fuit à travers la cheminée. Alors qu'un poêle de masse bien conçu peut dépasser en rendement les meilleures chaudières dites « modernes ».

L'entrée d'air

La troisième règle à respecter est de fournir au poêle la quantité d'air suffisante pour la combustion, et, n'en déplaise aux thuriféraires de l'étanchéité totale à l'air, il faut en conséquence pour utiliser le bois comme combustible une entrée d'air correctement dimensionnée. Si elle passe par le sol, elle fonctionnera en siphon thermique (voir la porte d'entrée des igloos) et ne permettra aucune fuite d'air chauffé en l'absence de feu. Pas

besoin de clapet, de bouchon ou de tout autre artefact inutile. Afin de ne pas refroidir toute la construction, sa pénétration dans le volume chauffé doit se trouver sous le poêle, voire dans le poêle. La seule fuite possible se situe à travers la cheminée. C'est donc au niveau du poêle qu'il faudra assurer l'étanchéité, afin d'éviter une fuite par convection dans le conduit de cheminée.

On commence à trouver aujourd'hui des poêles munis d'une entrée d'air pouvant être raccordée à une gaine. C'est évidemment la meilleure solution. Le chauffage au bois présente un risque majeur, en particulier en présence d'une VMC double flux. Dans cette configuration, un conflit apparaît entre les deux systèmes de flux d'air, avec un risque important de production de monoxyde de carbone (gaz mortel et inodore) par mauvaise combustion du bois. La seule bonne solution est de ne pas méler ces deux flux d'air et donc d'utiliser un système de chauffage possédant son propre circuit d'alimentation en air frais.

Pour conclure sur ce sujet, nous évoquerons succinctement les difficultés liées à l'incohérence d'une réglementation dépassée, qui oblige à des subterfuges irrationnels. Ceux-ci ne pourront être évités que par le particulier réalisant lui-même les travaux, les bâtiments tertiaires ne pouvant contourner la loi. Dans le cas d'une construction d'une maison individuelle devant respecter la réglementation (vente clés en main par un professionnel), une solution consiste, par exemple, à prévoir sur le poêle à bois un échangeur hydraulique équipé d'une résistance électrique, dont on maintiendra ensuite bien sûr l'alimentation coupée en permanence et la réserve d'eau vide. Il faudra faire de même pour le chauffage de la salle de bains.

La tâche reste immense pour adapter la législation à une conception moderne des bâtiments. En attendant la fin d'un combat qui ne peut qu'être gagné, tout concepteur peut malgré tout rendre son bâtiment sain et énergétiquement performant, au prix de solutions originales permettant de s'adapter à la réglementation actuelle.



Eco-hôtel Le Hameau de Gaïa – Concept BIO/ Mauro Veneziano

Ce projet se fixe comme objectif principal de devenir exemplaire dans la prise en compte du contexte bioclimatique. Un effort tout particulier est mis sur la performance énergétique, les procédés et matériaux constructifs, la gestion des eaux de pluie et l'utilisation d'énergies renouvelables.

Tout naturellement, c'est l'énergie bois qui a été retenue compte tenu de la présence d'une usine de production de granulés à l'entrée du village. De même le bois a été privilégié en tant que matériau de construction et d'isolation. En termes d'insertion, il a été choisi d'implanter les bâtiments sur un axe est-ouest de façon relativement compacte, sur la partie haute de la parcelle. Ceci pour maximiser les apports solaires gratuits, préserver une partie importante de l'espace naturel (notamment le plateau central) et limiter les terrassements.

Concept BIO (<http://www.concept-bio.com/>) est concepteur de constructions bioclimatiques passives. Au travers de son gérant Frédéric Michel, l'entreprise est activement engagée dans le PRIDES Bâtiments durables méditerranéens de même qu'au sein de la Maison Passive France.

Mauro Veneziano, architecte du projet, a suivi plusieurs formations traitant des différents aspects de la qualité environnementale des bâtiments. Il travaille régulièrement avec Concept BIO dans le cadre de projets exemplaires tel que celui-ci.

Données sur le projet :

Hôtel SPA & restaurant***

Surface : 2 500 m² SHON

Performance énergétique :

12 kWh/m².an pour l'hébergement et 50 % du CEP de réf. pour les services

Principale source d'énergie : bois

Matériaux de construction :

Hébergement : construction bois

Services (bar, restaurant et SPA) : béton armé isolé par l'extérieur - toitures végétalisées.

Démarche et certification : le projet suit la démarche de qualité environnementale Bâtiments durables méditerranéens et vise la certification Passivhaus.

Maîtrise d'ouvrage privée.

Localisation : Alpes Maritimes – Altitude : 1 000 m



Ce projet s'appuie sur une seule et unique démarche intellectuelle, qui est d'une importance fondamentale tant pour les concepteurs que pour le maître d'ouvrage : une démarche très poussée, franche et maîtrisée, dans le sens du développement durable.



Adossé à la montagne au nord le protégeant des vents, faisant face au soleil méditerranéen, cet hôtel se veut exemplaire dans la prise en compte des objectifs bioclimatiques.



BTC – Didier Hubert

L'habitat en terre est le plus répandu dans le monde. Grâce aux nouvelles technologies de fabrication et la création de presses à hautes performances, la brique de terre crue, qui est l'un des plus anciens matériaux fabriqués par l'homme, s'est considérablement améliorée. Elle possède tant de qualités qu'il serait dommage de s'en priver, à commencer par une résistance remarquable (90 kg/cm^2), qui en fait un matériau totalement porteur.

Mais là où l'on attend la brique de terre, c'est sur sa capacité à contribuer au développement des maisons passives et des constructions bioclimatiques, en adéquation avec les futures normes BBC (basse consommation d'énergie), passives et Bepos (bâtiment à énergie positive). La brique de terre compressée possède une incomparable inertie thermique et hygrométrique qui lui permet de réguler chaleur et humidité selon un déphasage de 8 h à 12 h, ce qui facilite le maintien d'une température constante (fraîcheur en été et chaleur en hiver), évite l'assèchement et, inversement, le développement de moisissures. La brique de terre compressée est par ailleurs un excellent isolant phonique et magnétique.

Après plusieurs années d'expérience dans la construction en briques de terre crue, en France et à l'étranger, Didier Hubert a acquis un savoir-faire qui le place au rang de spécialiste. Il a construit le Centre solaire du Castellet en 1984 (actuelle Maison des Vins de Bandol), qui reste une référence en matière de construction bioclimatique, puis a réalisé



Palettes de BTC produites en partenariat avec Estérel Granulats à Fréjus, prêtes à l'expédition.



Base de pilier de $30 \times 30 \text{ cm}$ pour une école en Afrique. Au centre, les ferraillages assurent la liaison avec les autres éléments et stabilisent la structure.

plusieurs constructions expérimentales dans lesquelles il a essayé des volumes plus osés : arcs, voûtes nubiennes, coupole... Au sein d'ONG, il a développé la construction en terre dans les pays pauvres en mettant des presses à disposition des populations. Depuis les années 2000, il s'emploie au redémarrage d'une filière de production en France, tout d'abord au sein de l'association de réinsertion Le Village, à Cavaillon, puis de l'entreprise qu'il crée en 2002 à



Cet ensemble d'habitations situé en haute Provence, de type méditerranéen, comprend 4 modes de couvrement différents : toit plat, voûte nubienne, coupole, toit pentu traditionnel. Le but de cette construction, exposée au nord-ouest, n'était pas tant bioclimatique que de produire différents volumes à partir de formes méditerranéennes, s'inscrivant parfaitement dans le site. Dans cette région au climat rude, froid l'hiver et parfois très chaud l'été, le confort y est surprenant : chauffé uniquement avec un petit poêle à bois, il y fait bon vivre en hiver. En été, la fraîcheur est très appréciée.



Les voûtes nubiennes : exposées au nord-ouest, elles recouvrent 3 chambres de plan rectangulaire.



Chantier de la coupole intérieure, montée sur 4 arcs supportés par des piliers de 45 x 45 cm. Des pendentsifs assurent la liaison entre les arcs et la coupole. La très forte inertie de la construction est idéale pour maintenir la fraîcheur indispensable au confort dans cette région.

Fréjus, Didier Hubert BTC, en partenariat avec Estérel Granulats (<http://briquedeterre.over-blog.com>). La raison d'être de cette entreprise tient dans le fait que la brique de terre compressée est difficile à trouver sur le marché. Beaucoup de gens s'essaient à produire leurs propres briques, mais sans grand résultat, car elles nécessitent de respecter une procédure de fabrication très stricte : composition de la terre, granulométrie, qualité du malaxage, de son



Le Centre d'application et de démonstration d'énergie solaire du Castellet (83) abrite aujourd'hui la Maison des Vins de Bandol. Cette construction bioclimatique valorise l'énergie solaire sous ses multiples formes. On peut ainsi citer, parmi les atouts naturels du bâtiment, une architecture en briques de terre crue, des murs capteurs, un rafraîchissement naturel par puits climatique, des capteurs solaires thermiques alimentant une chaudière solaire qui peut le chauffage hivernal ainsi que les besoins en eau chaude du site, des capteurs photovoltaïques pour l'alimentation électrique de l'éclairage. On remarque, en saillie sur la façade, le mur Trombe protégé par ses rideaux d'occultation.

taux d'humidité, de l'ajout ou non de liant, qualité du séchage... La carrière d'Estérel Granulats est un lieu de recyclage de terres provenant des fouilles de chantiers du bâtiment et qui dispose d'une traçabilité totale quant à leur qualité. Ainsi il n'est pas besoin de créer une nouvelle carrière. Non seulement l'impact sur l'environnement est nul, mais l'entreprise fournit un nouveau débouché et une valeur ajoutée à ces terres. Elle dispose de 4 presses sur le site de Fréjus, ce qui permet une large palette de briques, de tailles et de fonctions différentes, et aux couleurs allant du rose naturel à l'ocre jaune. Avec cette nouvelle entreprise, la BTC est aujourd'hui disponible en région PACA.



Le claustra de la Maison des Vins de Bandol avant que les vitrages et les occultations solaires ne soient en place. Cette vue illustre le principe de construction des murs Trombe. Au premier plan, les capteurs de la chaudière solaire, inclinés à 60° face au sud.



Construction bois-paille – Vincent Pierré

La construction bois-paille s'adapte à tous les besoins, comme ici pour la construction de 22 logements sociaux pour la société d'HLM Le Toit Vosgien. Le projet a été conduit par les architectes Eric Schmitt et Antoine Pagnoux, accompagnés du bureau d'études Terranergie à Moyenmoutier en Lorraine, dont le responsable, Vincent Pierré, ingénieur en éco-construction, est un spécialiste reconnu des constructions bioclimatiques. Vincent Pierré intervient en construction à basse et très basse consommation d'énergie. En termes de matériaux d'isolation, il ne préconise que de la fibre végétale. Il travaille sur des projets innovants soit en neuf (petits collectifs) soit en rénovation (bâtiments classés en collaboration avec les ABF). La structure habitable de ces logements est en bois massif, isolé par de la fibre de cellulose. La quantité de CO₂ stockée dans chaque maison est d'environ 20 tonnes. Les façades sont isolées par 60 mm de fibre de bois et 140 mm de fibre de cellulose, les combles par 300 mm de fibre de cellulose. Des capteurs solaires répondent aux principaux besoins en eau chaude sanitaire. Le chauffage hivernal de chaque maison est réalisé grâce à un poêle bouilleur à bûches d'un rendement de 86 %, qui complète également la production d'eau chaude ; la consommation annuelle est de 4 stères de bois. Les charges annuelles sont de l'ordre de 150 à 200 €



Les constructions bois-paille peuvent être réalisées très rapidement, grâce à la préfabrication en atelier de la plupart des constituants.

pour la fourniture du bois bûche et de 50 € d'électricité pour la ventilation. Les occupants conservent la possibilité de se chauffer à l'électricité, pour un coût annuel de 640 €.



Une fois terminées, rien ne distingue ces constructions bois-paille d'une construction traditionnelle en parpaing-polystyrène, si ce n'est le confort, la qualité de l'air intérieur (en particulier s'il s'agit de paille labellisée « Bio »), et surtout les charges réduites au strict minimum.





1

Livraison de l'isolant.



2



3

Mise en œuvre sur le mur.

Les photos ci-dessous montrent la technique générale de pose d'une isolation paille sur le mur d'une construction en ossature bois. Le poids de chaque élément justifie l'emploi de moyens mécanisés. Une fois réalisé, ce mur, en plus de ne présenter aucun pont thermique, offrira un grand confort acoustique, la paille étant un très bon isolant phonique. Comme l'ont montré les essais du CSTB, ce type de mur est très résistant au feu : après avoir soumis le bardage extérieur une demi-heure à un feu à 1 000 °C, la paille n'a pas encore commencé à se consumer.



4

Fixation.



5

Sur cette construction, l'isolant paille est monté entre solives.



Ossatures bois - Les Charpentiers d'Uzès

Roland Studer, dirigeant des Charpentiers d'Uzès (<http://www.charpentiers.fr/>), possède une longue expérience de l'éco-construcción et du bioclimatisme, et se situe aujourd'hui parmi les experts en techniques bioclimatiques, écologiques et environnementales dans le bâtiment. Il a construit en 1990 la première maison bioclimatique passive dans le Gard, puis en 1994 la première maison bioclimatique en ossature bois à Saint-Quentin-la-Poterie. Fortement impliqué dans le développement des constructions bois, il a créé en 2009 une coopérative d'artisans du bâtiment spécialisée en construction de maisons à ossature bois basse énergie, matériaux écologiques, rénovation énergétique et énergies renouvelables.



Création d'une terrasse et d'une extension selon les techniques écologiques sur un bâtiment nîmois en béton/parpaing. Murs et charpente sont en ossature bois, les fenêtres mixtes en bois et aluminium, le toit est en tôle laquée cintrée, avec isolation en ouate de cellulose, le parquet en châtaignier, les cloisons en plaques de Fermacell®, l'escalier en hêtre. La terrasse extérieure et son garde-corps ont été réalisés en mélèze. La surface étanchéifiée est compensée par la création d'un bassin de rétention de surface adaptée.

Terrasse extérieure sur poteaux réalisée pour une maison individuelle à Nîmes. La structure est en Douglas trié sur le volet, purgé d'aubier, la charpente traditionnelle est assemblée et boulonnée, avec jambes de force cintrées. Le chevonnage en châtaignier des Cévennes supporte un caillebotis en acacia rainuré à l'atelier. La structure du brise-vue supérieur est en Douglas purgé et son habillage en red cedar sur mesure. Le tout est protégé par une laque maison à base d'ingrédients naturels.



Le chantier de cette maison située au nord d'Uzès a été réalisé en moins de 6 semaines. La construction des murs a pris moins d'un mois, il en est de même pour la très belle toiture en forme de vague. Le bois employé est du Douglas traité lors de la pose au sel de bore. Les encadrements de fenêtres sont en Douglas raboté avec appuis de fenêtre en plaqué alu. Les façades seront recouvertes par le propriétaire en clins de red cedar. Cette vue montre la construction avant habillage des façades. On distingue le capteur thermosiphon (pour l'eau sanitaire) sur le toit.

.....

L'isolation est en ouate de cellulose, soufflée pour la toiture (25 cm), et injectée pour les murs (15 cm). On voit ici le soufflage de la ouate de cellulose entre solives. Une fois soufflée, celle-ci est recouverte d'un bardage de protection, avant pose de l'étanchéité.

.....



Cette habitation nouvelle en ossature bois, dans le petit village de Vallabrix (30), a été construite en 2005. La maison est posée sur un terre-plein semi-isolé en liège. L'ossature, la charpente et l'habillage sont en Douglas traité au sel de bore. L'ossature des murs a été recouverte d'un enduit chaux sur Fibralith®, panneaux d'OSB à faible teneur en formaldéhyde. L'isolation est en ouate de cellulose soufflée et projetée. On peut encore citer les détails suivants : installation électrique blindée, gouttière et étanchéité en cuivre, zinc et plomb, menuiseries à vitrage à faible émissivité. L'autonomie thermique visée est de 50 % en hiver et 100 % en été.



Habitation dans la haute vallée du Gardon d'Alès. Le terrain présente une forte déclivité naturelle. La construction est posée sur un faux-plat. Elle est entièrement préfabriquée en atelier. On voit ici le levage d'un mur fabriqué sur chantier.



Construction bioclimatique islandaise – Reykjavik

Ce reportage photographique est le fruit de recherches réalisées par Bernard Ardit, architecte DESA depuis 1972, qui s'est formé tout au long de sa carrière professionnelle aux techniques de qualité environnementale des constructions. Expert près la cour d'appel d'Aix-en-Provence depuis 1982, géobiologue dès 1987, formé et riche d'une longue expérience en HQE, en performance énergétique, en construction durable et dans la mise en œuvre des matériaux naturels,

il est également diplômé de la faculté de Médecine de Nice, sur le thème « Habitat et équilibre de santé », et est un spécialiste reconnu des problématiques de qualité de l'air dans les bâtiments. S'intéressant aux différents styles architecturaux vernaculaires et aux performances énergétiques des bâtiments traditionnels, il a pu étudier, parmi ses nombreux voyages, le style architectural de la région de Reykjavik, source d'inspiration pour les modèles de construction à mettre en œuvre en région froide, en particulier en France en zone montagneuse.



1



2



3



4



5

1. Il s'agit d'habitations intégrées à leur environnement. La structure générale en bois complète son inertie par le sol et des séparations massives en pierre entre constructions. Les constructions présentent une couverture végétalisée continue.
2. Les toitures sont en continuité directe du sol, les surfaces de mur déperditives se limitent au strict minimum nécessaire pour laisser entrer la lumière naturelle.
3. Les volumes en pierre sèche bâtis entre les maisons, en plus d'apporter une inertie thermique et une isolation des murs, soutiennent la végétalisation des toitures et en assurent le drainage. Lorsque la neige arrive, ces mêmes masses de remplissage, incitant à la formation de congères, participent au maintien de la couche isolante de neige sur la construction, limitant d'autant mieux les déperditions de chaleur en hiver.
4. On distingue à travers cette ouverture dans le plafond intérieur le matériau moderne servant d'étanchéité : de la tôle ondulée. L'écorce d'arbre a été abandonnée au profit d'un matériau plus moderne, mais qui maintient la libre circulation de l'air sous l'étanchéité. Cette lame d'air laissant s'équilibrer la pression de vapeur d'eau apporte non seulement la qualité sanitaire au plafond en bois monté à clin, mais aussi ses propriétés isolantes.
5. La lumière naturelle, rare en hiver, est importante dans les constructions. On remarquera le mobilier et l'habillage des parois des chambres situées à l'étage, permettant de valoriser au mieux la chaleur intérieure par la radiation thermique du bois omniprésent.

On remarque bien sur ce détail constructif la souplesse des briques. L'ouverture laissée permet à la charpente en bois des menuiseries de mieux respirer, et assure une parfaite circulation de la vapeur d'eau.



Les « briques » de tourbe, fabriquées et montées manuellement à sec, garantissent une totale étanchéité aux intempéries des cloisons, malgré leurs formes irrégulières. La végétation se développe progressivement sur ces parois, améliorant d'autant leur homogénéité.

Les constructions non accolées à d'autres maisons voient leurs murs isolés par de la brique de tourbe, présente localement à l'état naturel.

Maison du Petit Montaganard – Atelier 3A

La maison du Petit Montagnard à Villard-de-Lans (38) doit accueillir l'ensemble des futurs utilisateurs de la colline des Bains, site ludique de glisse. Elle se compose d'un accueil, d'un espace de convivialité, d'un bar à goûter et d'une cheminée centrale. Épousant la pente du terrain, le projet se présente sous la forme d'un parallélépipède coiffé d'une toiture courbe. Le toit descend bas côté nord et s'élève largement en façade Sud. Aucun élément architectural n'est là sans fondement concret. De forme architecturale compacte, la maison du Petit Montagnard est l'objet de moins de déperditions thermiques, le volume étant enveloppé par une surface aussi réduite que possible. Côté sud, la façade s'ouvre pleinement sur l'extérieur, favorisant ainsi l'ensoleillement et son apport énergétique. Son retour arrondi à l'est permet de bénéficier au plus tôt dans la matinée des rayons du soleil. Elle donne également accès au solarium tout en offrant une vue panoramique sur les pistes. La façade ouest est ponctuée de petites ouvertures qui éclairent de manière ludique l'intérieur de la salle commune. Le choix de matériaux tels que le bois et le verre confirme la conjugaison entre l'architecture contemporaine, le développement durable et la qualité environnementale. Il ne faut pas voir ici un projet singulier qui nie le cadre bâti dans lequel il s'insère. La maison du Petit Montagnard s'inspire des contraintes de son terrain pour générer formes, textures et teintes les plus susceptibles d'intégration douce.



Chauffage par un insert central à bois ouvert sur ses 4 faces.



Vue d'ensemble de la construction.



Charpente du hall central en cours de construction.

Données sur le projet

Conception-réalisation 2005-2007

Architecte : Orlane Argoud-Puix, Atelier 3A

Surface : 450 m² SHON

Montant travaux HT : 702 190 €

Mission : Base + Exe + HQE

Qualité environnementale : insertion, volume et orientation, énergie solaire (capteurs et accumulation), matériaux (bois, ouate de cellulose...), chauffage (cheminée).



Retour vitré vers l'est favorisant l'éclairage matinal, avec capteurs solaires en brise-soleil.

CONCLUSION | UN FUTUR BIOCLIMATIQUE ?



Le coût global direct

La phase de faisabilité d'une opération de construction représente, en règle générale, environ 1 % de la durée de ce cycle, celle de programmation/conception environ 5 % et celle de construction et de mise en service du bâtiment de l'ordre de 6 %. S'étalant sur plusieurs dizaines d'années, la phase de fonctionnement équivaut au restant de la durée du cycle, soit 88 %. (Qualité environnementale dans la construction et la réhabilitation des bâtiments publics : www.minefe.gouv.fr/directions_services/daj/guide/gpem/table.html)

RESPECTER L'HOMME

Maîtriser l'énergie, c'est replacer l'homme au centre de tout projet, dans son confort temporel et dans le respect inaliénable de son environnement naturel, c'est redonner ses lettres de noblesse à la science constructive, plutôt que de vouer un culte au veau d'or de la technologie.

Le besoin de confort matériel apparent et la recherche de la facilité sont devenus la source majeure des gaspillages énergétiques du monde moderne, par manque de vision du vrai confort à long terme, qui implique la qualité environnementale. Qu'il s'agisse de logement, de lieu de production ou de déplacement, la facilité du court terme nous aveugle souvent sur notre intérêt en tant qu'humains, sur notre besoin, pour nous et pour nos enfants, d'un monde qui ne sacrifie pas notre devenir à la facilité immédiate. Notre monde moderne gaspille de l'énergie pour masquer son absence de confort réel.

Un investissement raisonné ne peut s'affranchir de la prise en compte du coût futur de nos décisions. Une construction, qu'elle soit industrielle, tertiaire, ou affectée au logement, dont la durée devrait dépasser logiquement celle de la vie humaine, ne peut se concevoir sans y intégrer son coût d'exploitation, financier et environnemental. À l'échelle d'une génération, soit une trentaine d'années, les coûts énergétiques des bâtiments actuels représentent souvent plusieurs fois leur coût de construction, et les coûts globaux de fonctionnement de cinq à dix fois leur coût d'investissement. Sans augmenter de façon notable les coûts de conception et de construction, qui restent marginaux, on peut aisément réduire d'un facteur 10 au moins ce coût énergétique, tout en résolvant simultanément une grande part de la problématique énergétique et environnementale de nos sociétés modernes. Le bio-climatisme en est l'une des réponses.

REDÉCOUVRIR L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Parmi les plus gros dégâts que l'homme commet sur la planète par sa bousculade énergétique, les bâtiments représentent à eux seuls environ 40 %.

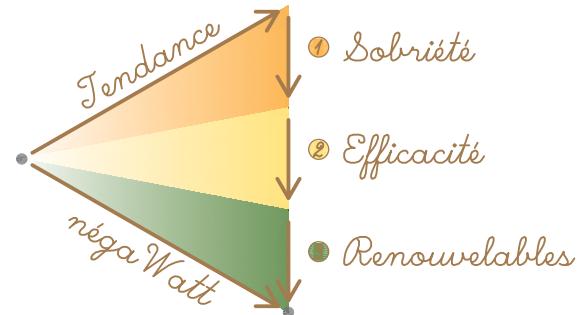
Nous venons de passer quelques dizaines d'années où le leitmotiv de la construction a trop souvent été la « rentabilité ». Il est temps de revenir à plus de simplicité et d'humilité, et de bâtir au profit des générations futures. La « rentabilité », telle qu'elle est aujourd'hui conçue, exploitant de façon exagérée la planète, est une fausse rentabilité, son résultat indirect est de faire supporter à nos enfants le coût de nos propres actions, en nous laissant croire que nous construisons de façon économique.

Dans toute l'histoire de l'humanité, on n'a jamais construit de manière aussi coûteuse que durant le demi-siècle passé, on n'a jamais non plus transféré aux générations futures un tel fardeau.

Il est possible de construire autrement, sans nier le progrès, et, bien au contraire, en se tournant résolument vers l'avenir, en remettant en cause cette pseudo-technologie à courte vue qui confond science et gabegie. L'architecture bioclimatique n'a d'autre objectif que de proposer de revenir à une approche globale et pluridisciplinaire, susceptible de produire un bâtiment éco-responsable, c'est-à-dire ancré dans une culture et un territoire, socialement équitable, écologiquement soutenable et économiquement viable. Comme nous l'avons vu, cette approche bioclimatique ne peut se faire par la simple addition de recettes techniques incomprises, qui parfois sont contradictoires entre elles, mais elle doit au contraire provoquer une réflexion globale sur la dynamique du bâtiment, en amont de toute décision architecturale. L'architecture vient après, lorsque le modèle bioclimatique du projet a été retenu.

De plus en plus nombreux sont les architectes et les thermiciens qui comprennent qu'on ne peut plus se contenter de recopier la vision d'un Le Corbusier en y ajoutant un peu de *greenwashing* sous forme de détail « bioclimatique », et que l'on doit aussi privilégier la rentabilité à long terme plutôt que celle à court terme.

Ils font partie de ces visionnaires capables de comprendre l'état du monde présent et de penser l'architecture à



Le scénario « néga Watt ». Pour modifier la tendance actuelle, il faut d'abord de la sobriété, puis de l'efficacité. Ensuite seulement, on peut parfaire l'ensemble avec des énergies renouvelables.

travers le prisme de l'avenir de nos enfants. Une architecture durable, soutenable, pour l'humain qui y vit, dans la nature qui l'environne. Ils ne rejettent pas systématiquement le béton, le verre ou l'acier, mais apprennent à utiliser ces matériaux à bon escient, au service de l'être humain, et non comme une fin en soi.

Ils sont largement soutenus dans leur démarche innovante par des organismes comme l'Ademe, par de nombreuses collectivités publiques, et les mouvements associatifs agissant pour la sobriété énergétique, ou plus simplement par des mouvements citoyens comme celui des autoconstructeurs bioclimatiques. Tous ensemble, ils inventent le bâtiment de demain.

Bibliographie

- F. Baddache, *Le développement durable*, Eyrolles, 2008.
- C. Charlot-Valdieu, Ph. Outrequin, *Écoquartier mode d'emploi*, Eyrolles, 2009.
- A. de Bouter, B. King, *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*, La maison en paille, Eyrolles, 2009.
- Collectif, *Pierre sèche, guide des bonnes pratiques de construction de murs de soutènement*, CAPEB, 2007.
- Collectif ADEME, C. Miller, *Prévenir et gérer les déchets de chantier*, Le Moniteur, 2009.
- P. Coste, R. Sette, Cl. Cornu, D. Larcena, *Pierre sèche*, Le Bec en l'air, 2008.
- S. Courgey, J.-P. Oliva, *La conception bioclimatique*, Terre vivante, 2006.
- D. Gauzin-Müller, *L'architecture écologique du Vorarlberg*, Le Moniteur, 2009.
- B. de Gouvello, *La gestion durable de l'eau*, CSTB, 2010.
- A. Guerriat, *Maisons passives*, L'inédite, 2008.
- Ch. Lassure, *La pierre sèche, mode d'emploi*, Eyrolles, 2008.
- J.-M.-P. Le Chapellier, *La bio-construction*, Trédaniel, 2010.
- A. Liébard, *Architectures solaires*, Eyrolles, 2009.
- A. Liébard, A. de Herde, *Guide de l'architecture bioclimatique - Tome 2 - Cours fondamental : construire avec le climat*, Systèmes solaires, 1996.
- F. Loyau, *Puits canadien et ventilation basse énergie*, L'inédite, 2009.
- V. McLeod, *50 projets d'architecture en bois*, Eyrolles, 2010.
- S. Moréteau, *Murs et toits végétalisés*, Rustica éditions, 2009.
- T. Rijven, *Entre paille et terre*, Goutte de sable, 2008.
- L. Schriver-Mazzuoli, *La pollution de l'air intérieur*, Dunod, L'Usine Nouvelle, 2009.