

Revêtements de façades en pierres agrafées

par **Gabriel BAJEUX**

Directeur au Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP)

et **Bernard CHAGNEAUD**

Chef du service Maçonneries - Monuments historiques du CEBTP

1. Techniques de la pierre agrafée	C 2 120 - 2
1.1 Matériaux	— 2
1.2 Supports	— 3
1.3 Types d'attaches	— 3
1.4 Techniques de pose	— 6
1.4.1 Agrafes scellées et polochons	— 6
1.4.2 Agrafes chevillées et polochons	— 7
1.4.3 Pattes scellées	— 7
1.4.4 Pattes mécaniques chevillées	— 7
1.4.5 Fixations sur ossature	— 7
1.4.6 Préfabrication	— 7
2. Réglementation. Évolutions	— 8
2.1 Premiers documents	— 8
2.2 Norme NF B 10-514 (juillet 1981)	— 9
2.3 Norme XP B 10-601 (novembre 1995)	— 9
2.4 Norme NF P 65-202	— 10
3. Pathologies spécifiques	— 11
3.1 Pathologies liées à la mise en œuvre	— 12
3.2 Pathologies liées à la nature des matériaux	— 15
3.3 Diagnostic des pathologies	— 15
4. Techniques de remplacement et de consolidation	— 16
5. Conclusion	— 16
Pour en savoir plus	Doc. C 2 120

La pierre a toujours été, pour l'homme, synonyme de solidité, de pérennité, voire de luxe et de richesse (Il fallait « investir dans la pierre... »).

Le coût élevé de ce matériau, principalement dû aux difficultés d'extraction, de transport et de découpe, a progressivement conduit à une diminution de son emploi sous forme de pierre massive (pierre de taille), au profit de produits plus minces (généralement 2, 3 ou 4 cm) commercialisés sous forme de plaques de surface généralement inférieure au mètre carré.

Dans ces épaisseurs (inférieures à 7 cm), les matériaux ne peuvent pas être autoporteurs ; ils ont besoin de se fixer sur un support stable. Il a donc fallu mettre au point des systèmes particuliers d'accrochage, adaptés aux supports construits en matériaux économiques les plus couramment utilisés dans la construction contemporaine, c'est-à-dire la brique, le parpaing ou le béton.

Des règles, concernant la mise en œuvre de ces revêtements de façades en pierres minces agrafées, ont alors été édictées au début des années 1970, puis progressivement améliorées ou complétées jusqu'à ce jour. Sur le plan réglementaire, le DTU 55-2 « Revêtements muraux attachés en pierre mince » fait référence depuis décembre 1979, la norme NF P 65-202, y apportant cependant quelques améliorations.

Pour bien comprendre toutes ces techniques de pose relativement nouvelles ainsi que les pathologies qui leur sont associées, il est nécessaire de garder à l'esprit que la pierre n'y joue qu'un rôle d'habillage décoratif : elle ne constitue en aucun cas une paroi étanche, ni à l'eau, ni à l'air.

S'agissant cependant d'habillages « lourds », il est courant d'exiger, pour ces travaux, la même garantie décennale qui s'applique au gros-œuvre. Il sera intéressant de suivre les évolutions de la jurisprudence sur ce sujet.

Enfin n'oublions pas que la pierre est un matériau naturel avec possibilité d'hétérogénéité, ce qui la différencie des autres matériaux décoratifs tels que la céramique, la terre cuite, la pâte de verre, etc., et que les dimensions des plaques mises en œuvre (et donc leur poids) sont beaucoup plus grandes. Cette différence a longtemps exclu la fixation des pierres par simple collage, mais les progrès récents dans les performances de certaines colles bicomposants sont en passe de modifier les habitudes.

1. Techniques de la pierre agrafée

1.1 Matériaux

La pierre naturelle est un produit obtenu par creusement dans des carrières ou par découpage et transformé par un procédé d'usinage.

Les groupes suivants de matériaux sont considérés comme de la pierre naturelle :

— **roches magmatiques ou ignées** : roches formées par le refroidissement et la solidification du magma ; par exemple, le granit, le basalte, la diorite, le porphyre ;

— **roches sédimentaires** : roches formées par le dépôt (généralement dans l'eau) et la consolidation de particules d'origine organique ou minérale ; par exemple le calcaire, le grès, le travertin ;

— **roches métamorphiques** : roches transformées résultant de l'action de la chaleur et/ou de la pression sur des roches préexistantes ; par exemple le schiste, le gneiss, la quartzite, le marbre.

Toutes les pierres ne peuvent pas être débitées en plaques minces (2 à 7 cm). Si les granits et les marbres ne posent généralement pas de problème, il n'en est pas de même avec les pierres calcaires sédimentaires qui sont classées en plusieurs catégories selon leur dureté (tableau 1).

Certaines pierres calcaires deviennent brillantes après abrasion fine ; elles « prennent le poli » comme un marbre ou un granit. Il s'agit de pierres « marbrières ».

L'usage montre que seules les pierres ayant un coefficient de dureté égal ou supérieur à 8 sont utilisables en façades agrafées en épaisseur de 3 cm ou même de 2 cm.

Nota : le coefficient de dureté est une valeur (de 1 à 14), assez controversée, issue de la norme B 10-001 (Pierres calcaires), qui classait les pierres en fonction de leur masse volumique associée à leur contrainte de rupture. Ce coefficient ne doit pas être confondu avec la dureté superficielle, résultat d'une mesure normalisée d'une largeur de rayure obtenue à la surface d'un bloc (norme NF B 10-508).

Historique

L'utilisation de plaques de pierre mince (ou pierre « pelliculaire ») remonte à un lointain passé. Tout se passe comme si l'homme cherchait à reconstituer l'environnement minéral de la grotte originelle de son ancêtre préhistorique...

Au fur et à mesure que les moyens techniques permettaient d'amincir les plaques de pierre décorative (souvent du marbre), leur mise en œuvre nécessitait des systèmes d'accrochage particuliers, tels que des fils ou des crochets métalliques, qui permettaient de tenir les pierres de plaçage. On trouve, par exemple, déjà des attaches métalliques dans le célèbre mausolée indien du Taj Mahal, érigé de 1632 à 1643, et celles-ci d'ailleurs se corrodent sous l'effet des pluies de mousson en endommageant les marbres.

En France, l'emploi du fer ou de la fonte s'est généralisé comme moyen de consolidation des monuments en pierre.

Dans la première moitié du XX^e siècle, le développement du béton, qui avait la particularité inégalable de pouvoir se couler dans des moules (les coffrages), a rendu encore plus aléatoire le simple scellement en plein des plaques minces de pierre sur un support qui devenait de plus en plus lisse et plan au fur et à mesure des progrès des coffrages. En effet, de par les dimensions des plaques de pierre (de l'ordre du mètre carré) et de par leur poids (plusieurs dizaines de kilos), il est très vite apparu la nécessité d'accrocher celles-ci **mécaniquement** par des fils (par exemple de cuivre). Le fil travaillait en traction, et un patin de mortier (de ciment ou de plâtre) résistait à la compression, empêchant tout mouvement des pierres. Ce procédé s'est développé vers 1950 et s'est perfectionné d'année en année. Les fils ont été fabriqués dans un alliage inoxydable (le zintane) et les scellements ont cédé la place à des chevilles (les chevilles Zamak).

Mais ce procédé a rapidement connu ses limites : il n'était utilisable qu'avec une distance limitée du support au dos de la pierre (2 à 5 cm).

Or, dans les années 1970, la crise de l'énergie et l'apparition des isolations par l'extérieur ont subitement modifié les données. Il fallait s'écartier du support de 8 à 12 cm pour laisser la place aux isolants thermiques ! Des pattes métalliques, à l'inertie suffisante pour servir de console et travailler à la fois en traction et en compression, ont alors été très largement utilisées, ainsi que différents types de dispositifs mécaniques plus ou moins réglables (figure 1).

Dans certains pays comme la France, les simples scellements dans le support ont, quant à eux, cédé la place à des chevilles métalliques dont les performances ne cessent de s'améliorer.

Sur le plan réglementaire, on verra que le DTU 20 de 1961 ignorait presque les revêtements en pierre, alors que le DTU 55-2 relatif aux « revêtements muraux attachés en pierre mince » fait autorité depuis 1979 et que la norme NF P 65-202 sera révisée en 2001.



Figure 1 – Exemple de pose dans le joint vertical (doc. Rocamat)

Tableau 1 – Classification AFNOR des pierres calcaires

Dureté	Type	Masse volumique (kg/m ³)	Porosité (%)
Très tendres	N 1	< 1 470	> 46
Tendres	N 2	1 471 à 1 650	46 à 40
	N 3	1 651 à 1 840	40 à 32
Demi-compactes	N 4	1 841 à 2 000	32 à 27
	N 5	2 001 à 2 150	27 à 21
Compactes	N 6	2 151 à 2 270	21 à 17
	N 7	2 271 à 2 355	17 à 13
Dures (1)	N 8	2 356 à 2 440	13 à 11
	N 9	2 441 à 2 505	11 à 8
	N 10	2 506 à 2 580	8 à 5
Froides (1)	N 11	2 581 à 2 640	5 à 3
	N 12	2 641 à 2 690	3 à 1,5
	N 13	2 691 à 2 730	1,5 à 0
	N 14	> 2 731	pratiquement 0

(1) Couramment utilisables en revêtements minces de 3 cm d'épaisseur.

En matière de norme, cependant, le critère normalisé prédominant n'est pas le coefficient de dureté mais la résistance aux attaches (norme NF B 10-514).

Bien évidemment d'autres considérations interviennent dans le choix des pierres susceptibles d'être utilisées en revêtements muraux agrafés. Il s'agit :

- de l'esthétique ;
- de la résistance aux salissures ;
- de la résistance aux intempéries (pluie, gel, etc.).

À cet égard, il ne nous paraît pas inutile de mettre en garde contre les matériaux dits « autonettoyants » qui sont unurre et qui conduisent à d'inévitables déceptions lorsque le propriétaire constate que sa façade a vieilli comme les autres et réclame un nettoyage ou un ravalement.

Enfin, il est bon de rappeler que les principes applicables pour la pierre naturelle peuvent aussi, dans certains cas, être utilisés avec des pierres artificielles ou reconstituées.

1.2 Supports

On a vu que le revêtement en pierre agrafée ne constituait qu'un décor, un habillage. Les efforts auxquels cet habillage est soumis (principalement son propre poids vertical et les effets horizontaux du vent) sont transmis, par l'intermédiaire des attaches, à un support suffisamment résistant et stable.

Les supports que l'on rencontre sont de natures très variées. Ils peuvent, par exemple, être constitués :

- de briques pleines ou creuses ;
- de parpaings (blocs) pleins ou creux, à base de granulats courants ou légers ;
- de béton, armé ou non, de granulats courants ou légers ;
- de maçonnerie de pierre naturelle.

On rencontre parfois comme support des structures en bois ou des structures métalliques.

Le choix du système d'attache des pierres minces agrafées dépend bien évidemment de la nature de ce support mais aussi du paramètre important qui est la présence ou non d'un isolant thermique extérieur. En effet, la présence d'un isolant (d'épaisseur courante de 50 mm à 80 mm environ) imposera d'écartier la face interne du revêtement en pierre de 70 à 100 mm (épaisseur de l'isolant + 20 mm de vide d'air minimal) et interdira donc de recourir à des systèmes d'attache du type agrafe avec polochon limité à des distances support-revêtement de l'ordre de 50 mm. De la même manière, des formes architecturales audacieuses nécessitant d'éloigner les habillages de pierre très loin du support (angles aigus, par exemple) obligeront à avoir recours à des ossatures métalliques intermédiaires appelées « échelles à marbre » (même si la pierre mise en œuvre n'est pas du marbre).

Les tableaux 2 et 3, extraits de la norme NF P 65-202-1 résument la compatibilité mécanique entre les systèmes de fixation, les supports et les couches d'isolation thermique.

1.3 Types d'attachments

À l'origine, les systèmes les plus simples étaient constitués de fils ronds (agrafes) en métal difficilement corrodable (cuivre, laiton, bronze, acier inoxydable, etc.). Le marbrier, à l'aide d'une pince, donnait une forme particulière à ces fils pour en faire des « agrafes » qui pénétraient d'un côté dans le chant de la pierre et de l'autre étaient scellées dans des trous ménagés dans le support. L'ensemble était bloqué et protégé par des patins de plâtre ou de mortier de ciment (les « polochons ») (figure 2).

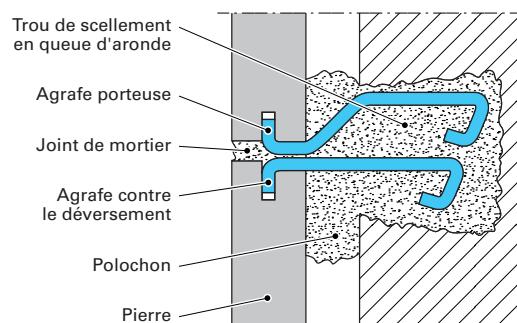


Figure 2 – Agrafes scellées dans le support

Tableau 2 – Compatibilité mécanique entre les systèmes de fixation et les supports, sans couche d'isolation extérieure (d'après NF P 65-202-1)

Types de supports	Types de fixations (1)				
	Agrafes avec polochons		Attachés sans polochons		Ancre sur ossature intermédiaire
	Scellées	Fixées mécaniquement	Scellées	Fixées mécaniquement	
Béton armé ou non	X	X	X	X	X
Béton de granulats légers	X	(2)	X	(2) (3)	X
Briques pleines ou perforées	X	(3)	X	(3)	X
Blocs pleins ou perforés de béton de granulats courants ou légers	X	(3)	X	(3)	X
Briques creuses et blocs de terre cuite Blocs creux de béton de granulats courants ou légers	O	O	O	(3)	X
Maçonnerie de pierre naturelle	X	(3)	X	(3)	X
Blocs en béton cellulaire autoclavé	O	O	O	(3)	X
Structure en bois	O	O	O	(3) (4)	X
Structure métallique	O	O	O	(4)	X

(1) X = admis ; O = non admis.
(2) Acceptable dans la mesure où la résistance caractéristique est au minimum de 15 MPa en compression à 28 jours.
(3) Ces attaches, notamment leurs fixations dans le support, doivent faire l'objet de justifications particulières pour le support concerné : avis technique ou agrément technique européen. À défaut, elles doivent être décrites dans un cahier des charges visé favorablement par un contrôleur technique et servant alors de base à l'accord entre les parties ; dans ce cadre, sur un support non connu, il pourra être procédé à une campagne d'essais d'arrachement *in situ* en s'inspirant du cahier 1661 du CSTB juillet-août 1980 « GS7 – Détermination sur chantier de la charge maximale admissible applicable à une fixation de bardage rapporté ».
(4) Possible à condition que la structure réponde aux spécifications requises dans le cas d'ossature intermédiaire.

Tableau 3 – Compatibilité mécanique entre les systèmes de fixation et les supports, avec couche d'isolation extérieure (d'après NF P 65-202-1)

Types de supports	Types de fixations (1)				
	Agrafes avec polochons		Attachés sans polochons		Ancre sur ossature intermédiaire
	Scellées	Fixées mécaniquement	Scellées	Fixées mécaniquement	
Béton armé ou non	O	O	X	X	X
Béton de granulats légers	O	O	X	(2) (3)	X
Briques pleines ou perforées	O	O	X	(3)	X
Blocs pleins ou perforés de béton de granulats courants ou légers	O	O	X	(3)	X
Briques creuses et blocs de terre cuite Blocs creux de béton de granulats courants ou légers	O	O	O	(3)	X
Maçonnerie de pierre naturelle	O	O	X	(3)	X
Blocs en béton cellulaire autoclavé	O	O	O	(3)	X
Structure en bois	O	O	O	(3) (4)	X
Structure métallique	O	O	O	(4)	X

(1) X = admis ; O = non admis.
(2) Acceptable dans la mesure où la résistance caractéristique est au minimum de 15 MPa en compression à 28 jours.
(3) Ces attaches, notamment leurs fixations dans le support, doivent faire l'objet de justifications particulières pour le support concerné : avis technique ou agrément technique européen. À défaut, elles doivent être décrites dans un cahier des charges visé favorablement par un contrôleur technique et servant alors de base à l'accord entre les parties ; dans ce cadre, sur un support non connu, il pourra être procédé à une campagne d'essais d'arrachement *in situ* en s'inspirant du cahier 1661 du CSTB juillet-août 1980 « GS7 – Détermination sur chantier de la charge maximale admissible applicable à une fixation de bardage rapporté ».
(4) Possible à condition que la structure réponde aux spécifications requises dans le cas d'ossature intermédiaire.

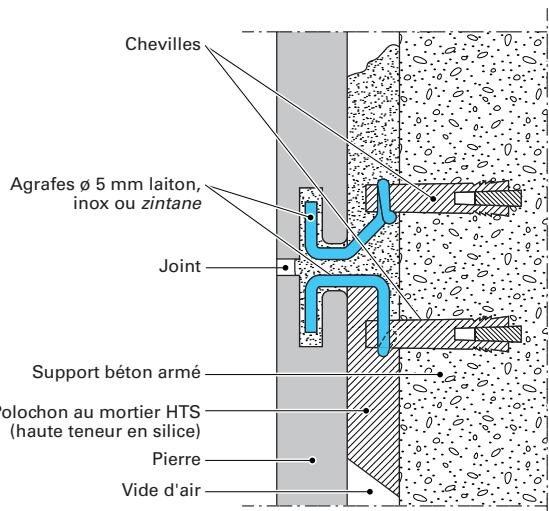
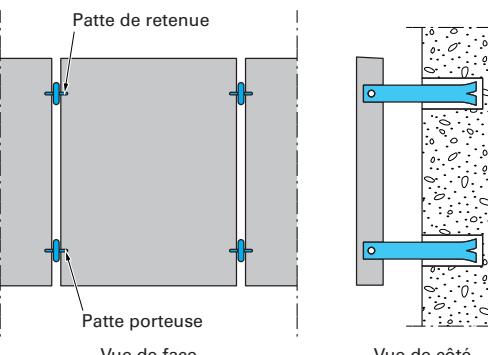
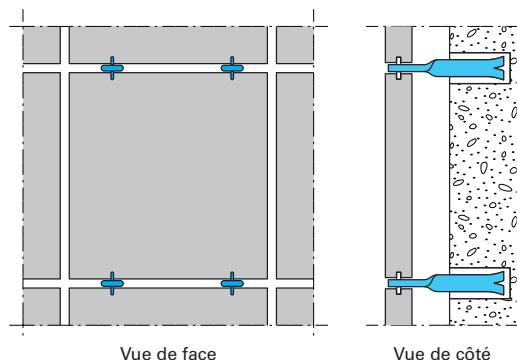


Figure 3 – Agrafes fixées à l'aide de chevilles de frappe

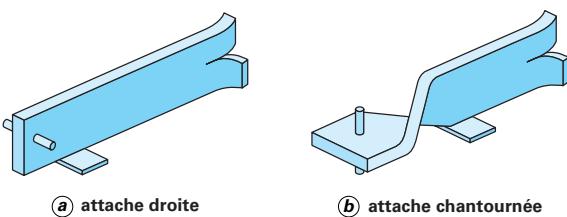


(a) fixation dans les joints verticaux



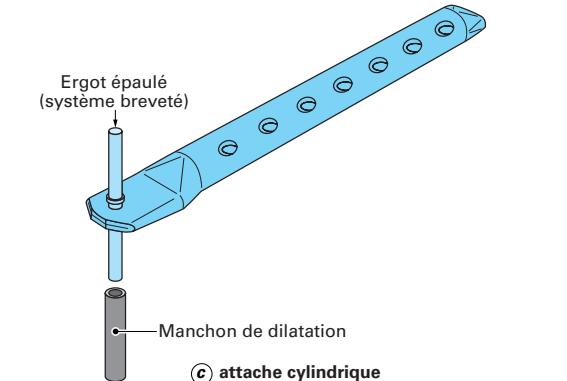
(b) fixation dans les joints horizontaux

Figure 5 – Pierres attachées. Fixation par pattes placées dans les joints



(a) attache droite

(b) attache chantournée



(c) attache cylindrique

Figure 4 – Exemples d'attachments

Pour des raisons de commodité le scellement de ces agrafes dans le support a été remplacé par une fixation à l'aide de chevilles de frappe à simple ou double œillet (figure 3).

La patte de fixation destinée à la pose sans polochon, quant à elle, est apparue d'abord sous la forme d'une patte à scellement dont l'extrémité était munie d'un ergot simple ou double, pour se

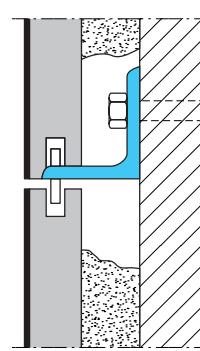


Figure 6 – Cornière de fixation

fixer dans la pierre (figure 4). Ces pattes pouvaient être « chantournées » ou non, plates ou cylindriques, en fonction du mode de fixation des plaques de pierre (dans les chants verticaux ou dans les chants horizontaux) (figure 5).

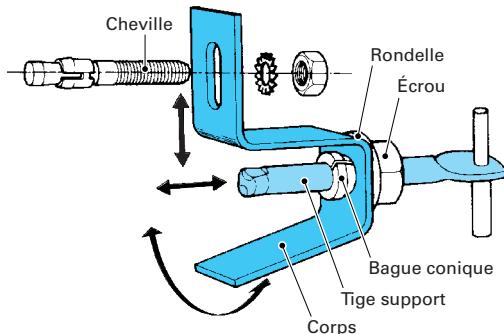


Figure 7 – Patte de fixation mécanique réglable

Comme pour les agrafes, le système s'est simplifié avec le remplacement des scellements par des chevilles, pour conduire à des systèmes à base de cornières (difficilement réglables) (figure 6) ou constitués de pattes mécaniques sophistiquées avec possibilité de réglage (dans les 3 directions) (figure 7).

On notera enfin que quel que soit le dispositif d'attache des pierres de façade, c'est d'une part la **rapidité de pose** et d'autre part la

capacité de réglage qui sont les qualités principales recherchées par le poseur. C'est pourquoi, dans certains chantiers importants, il est parfois intéressant de concevoir et de fabriquer d'autres types d'attaches spécifiques, en les basant sur les mêmes principes.

1.4 Techniques de pose

1.4.1 Agrafes scellées et polochons

Dans cette technique, les pierres sont fixées à l'aide d'un fil rond de diamètre 4 ou 5 mm selon l'épaisseur des pierres (4 mm pour les pierres de 20 mm et 5 mm pour les pierres de 30 à 40 mm). Ce fil est généralement constitué d'un alliage inoxydable et facilement malléable, le *zintane*; il est plus rarement constitué d'acier inoxydable (plus difficile à mettre en œuvre). Ces fils, après avoir été préparés sous forme « d'agrafes » sont, d'une part, introduits dans un trou ménagé sur le chant de la pierre et, d'autre part, scellés au mortier dans un trou de scellement ménagé en queue d'aronde dans le support (empochement) (figure 8).

Ces agrafes sont enrobées dans un « polochon », destiné à absorber les efforts de compression que le fil d'agrafe ne peut absorber. Les polochons sont à base soit de mortier de ciment dans le cas de revêtements extérieurs, soit de plâtre ou de mortier de ciment dans le cas de revêtements intérieurs à l'abri de l'humidité. Les polochons de plâtre sont renforcés par des fils de chanvre (la « filasse »).

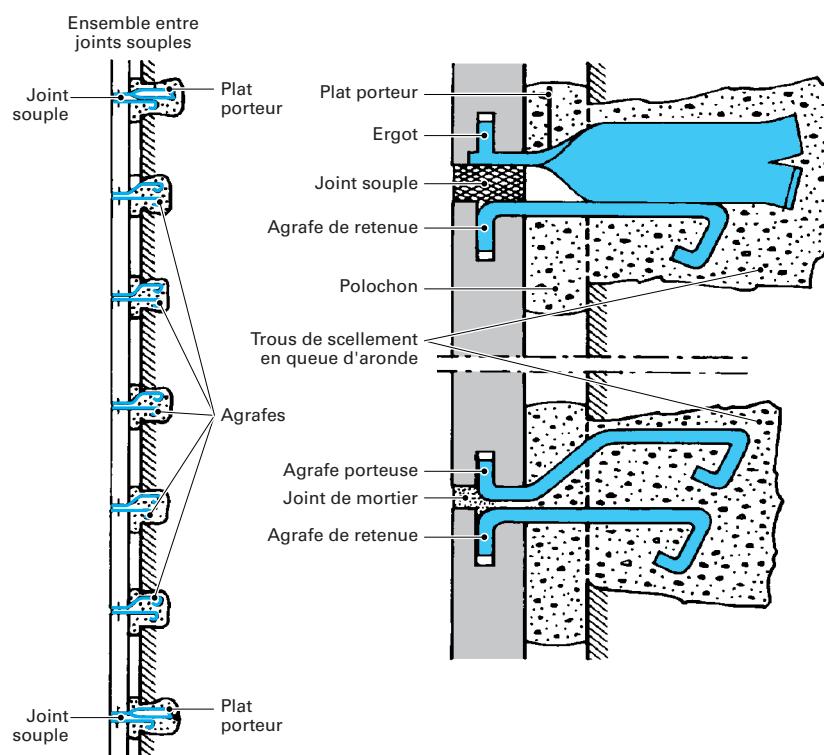


Figure 8 – Technique de pose par agrafes scellées et polochons (doc. Rocamat)

En attendant que le patin de mortier ou de plâtre ait « fait sa prise », le poseur maintient souvent celui-ci à l'aide de morceaux de polystyrène ou de papier qu'il abandonne derrière la pierre comme « coffrage perdu ». Cette pratique peut conduire à l'apparition ultérieure de taches disgracieuses (spectre) si le papier est riche en produits tachants comme le tanin (exemple : vieux sacs de ciment).

Ce point sera repris plus en détail au paragraphe 3.1.

1.4.2 Agrafes chevillées et polochons

La technique de pose ne diffère de la précédente que par le remplacement des trous de scellement dans le support par des chevilles spécialement conçues pour recevoir le passage du fil d'agrafe. Ces chevilles sont généralement en alliage inoxydable, le *Zamak*, et sont fixées dans le support par un cône expansif (il s'agit de chevilles de frappe). Leur tête est munie d'un simple ou double œillet dans lequel le fil d'agrafe peut s'enfiler.

L'ensemble, agrafe-cheville est parfois appelé fixation mécanique, mais n'est autorisé que dans des supports en maçonnerie ou en béton justifiant d'une résistance suffisante aux efforts de traction.

Comme pour les agrafes scellées, il est indispensable d'enrober les agrafes chevillées dans des polochons interposés entre le dos des pierres et le support.

Il est prudent d'effectuer des essais d'arrachement sur quelques chevilles en cours de travaux.

1.4.3 Pattes scellées

Les pattes, à condition d'être correctement dimensionnées, offrent l'avantage de résister à la fois à la traction et à la compression, et bien entendu à la flexion. De plus, elles autorisent un déport de la face intérieure des plaques de pierre suffisamment loin du support pour permettre l'interposition d'un isolant thermique. Enfin, elles offrent une possibilité de réglage à la pose en les rentrant plus ou moins et en les orientant à l'intérieur du trou de scellement ménagé dans le support.

Leur défaut principal réside dans la nécessité de ménager ces trous de scellement dans le support. Cette technique nécessite également un calage très soigné de toutes les pierres pendant toute la durée de prise du mortier de scellement et l'obligation de travailler rangée par rangée. L'utilisation de mortier à prise rapide permet de limiter les inconvénients de cette méthode, encore couramment utilisée dans certains pays comme l'Allemagne.

Ce système qui, comme les autres, prévoit généralement 4 points d'attache par plaque de pierre, permet de différencier les pattes selon leur fonction :

- les deux pattes porteuses qui reprennent la totalité du poids de la plaque (figure 9a) ;
- les deux pattes de retenue qui empêchent le déversement de celle-ci et reprennent une partie des sollicitations dues au vent (figure 9b).

On peut ainsi réaliser des économies sur la section des différentes pattes en fonction de leur destination.

Toutes ces attaches sont constituées soit de plats soit de cylindres métalliques formant le corps de l'attache, dont le scellement dans le support est assuré par l'intermédiaire de dispositifs appropriés (queue de carpe ou bosselage, etc.) (figure 9c).

Parfois une plaque de répartition permet de réduire la pression dans le support sous l'attache.

Des pièces assurent la liaison avec les plaques : ergot simple ou double (figure 9d).

Dans cette technique de pose, les joints (supérieurs ou égaux à 6 mm selon la norme NF P 65-202) doivent rester ouverts ou être calfeutrés au mastic souple afin de permettre le libre mouvement des plaques les unes par rapport aux autres.

1.4.4 Pattes mécaniques chevillées

Les années 1980 ont vu apparaître un autre type de pattes métalliques réglables. Il s'agit de pattes permettant un réglage des pierres les unes par rapport aux autres ainsi que par rapport au support. Ces attaches sont constituées de trois parties :

- une cheville métallique pour fixation dans le support ;
- un corps de patte en forme d'oméga avec une partie réglable (tige filetée et écrou ou tige à cône autobloquant) ;
- un dispositif de liaison à la pierre (ergot) (figure 10, page 9).

Ce type de patte permet, avec certaines précautions, d'éloigner les pierres jusqu'à 150 mm de leur support. Certaines variantes, à doubles chevilles, sont utilisées pour fixer des revêtements en plafond.

Nota : la pose horizontale n'étant cependant pas couverte par une norme, elle doit faire l'objet d'une étude particulière.

De même que pour les agrafes chevillées, ce mode de pose n'est autorisé que dans certains supports (maçonneries pleines ou béton).

1.4.5 Fixations sur ossature

Dans certains cas, la pose directe sur support résistant est impossible, le support étant trop éloigné (plus de 150 mm) ou bien sa résistance n'étant pas suffisante (exemple : parpaing creux ou béton cellulaire). Il est alors avantageux d'avoir recours à une ossature intermédiaire qui permet de fixer le revêtement en plaques de pierre indépendamment de la nature du support.

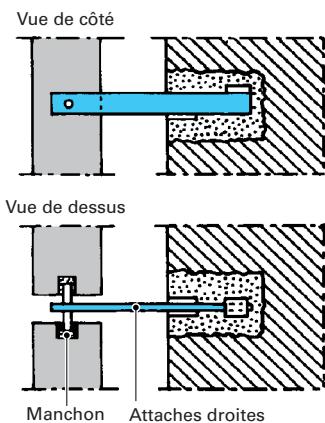
Cette ossature, en acier inoxydable ou en aluminium, doit faire l'objet d'une étude permettant de justifier sa stabilité et les limites de ses déformations. Elle est ancrée dans les zones résistantes du support telles que, par exemple, les nez de planchers lorsque les maçonneries de remplissage entre ces planches offrent une résistance insuffisante. Les plaques de pierre sont généralement fixées sur cette ossature à l'aide de pattes mécaniques adaptées (exemple : système Halfen, figure 11, page 9).

1.4.6 Préfabrication

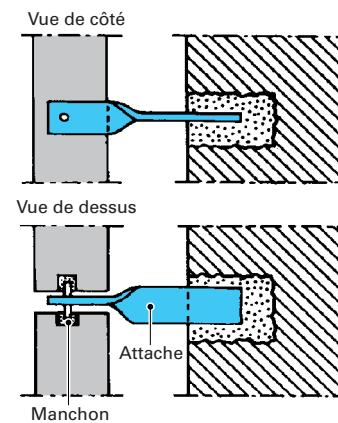
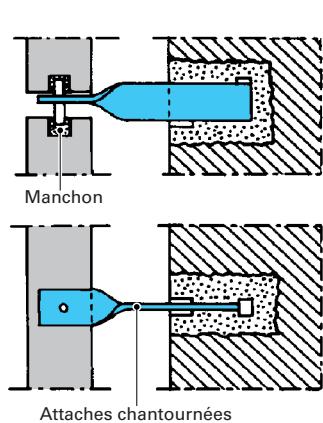
La pose « à fond de moule » de plaques de pierre mince en préfabrication lourde existe depuis plusieurs décennies. Elle s'est particulièrement développée entre les années 1960 et 1975. Cette technique de revêtements « coffrants » *in situ* ou utilisés en fond de moule de panneaux préfabriqués fait l'objet d'avis technique. Elle présente deux particularités :

- aucun vide d'air n'est, bien sûr, ménagé entre le dos de la pierre et le support en béton armé ;
- outre l'effet de collage procuré par le scellement (aléatoire), l'accrochage des plaques de pierre est assuré par l'intermédiaire d'agrafes ou de pattes « en culotte ».

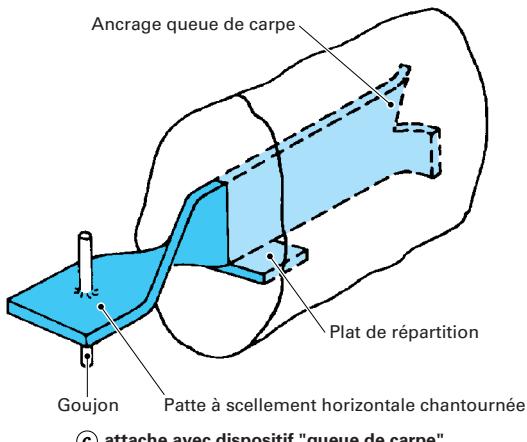
Cette technique (figure 12, page 10), rarement utilisée de nos jours, a conduit à de nombreux déboires, dus principalement à la poussée des armatures mal positionnées dans le béton armé (cf. § 3.1).



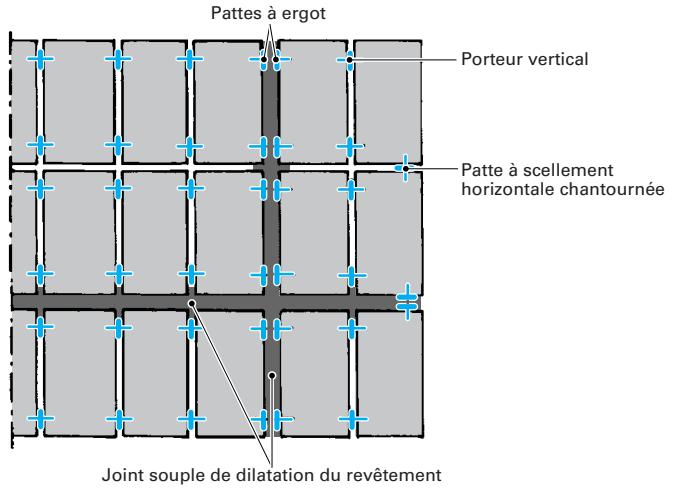
(a) exemples d'attachments porteuses



(b) exemples d'attachment de retenue



(c) attache avec dispositif "queue de carpe"



(d) fixation des plaques (dans les joints verticaux)

Ces schémas de principe proviennent du DTU 55-2 de décembre 1979. Ils ne sont donnés qu'à titre d'exemple et sont à adapter suivant chaque projet de construction pour les ouvrages auxquels ils se rapportent.

Figure 9 – Technique de pose des pattes scellées

2. Réglementation. Évolutions

2.1 Premiers documents

■ DTU 20 (janvier 1961)

Ce document technique unifié (DTU), qui traite des parois et murs en maçonnerie de petits éléments, évoque simplement les pierres minces agrafées avec lame d'air comme étant des murs « du type 3 non conformes au présent DTU ».

À cette époque, il n'existe donc pas de règlement sur ces techniques relativement récentes, et les seules règles applicables sont les règles professionnelles des marbriers.

■ Recommandations Securitas (novembre 1972)

Ces recommandations ont été rendues nécessaires par l'apparition de nombreux désordres, en particulier causés par la mise en compression des pierres.

Ce document introduit la notion du couple polochon-agrafe, fonctionnant comme une console dans laquelle l'agrafe jouerait un rôle de tirant et le polochon constituerait une bielle comprimée. On y trouve également, pour la première fois, des recommandations de calcul de dimensionnement des attaches.

Les dispositifs trop récents, tels que attaches mécaniques ou ossatures intermédiaires, ne figurent pas dans ces recommandations Securitas.

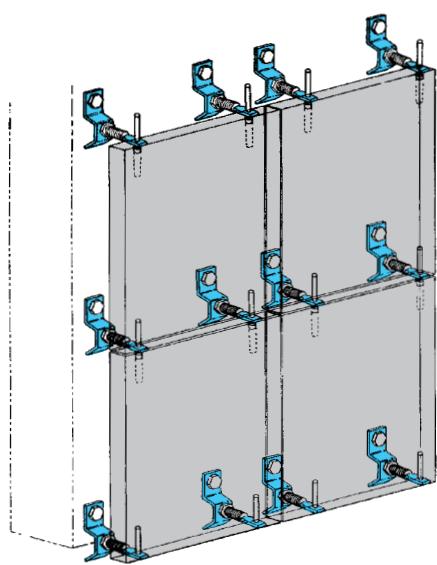


Figure 10 – Fixation par pattes métalliques chevillées.
Exemple de pose dans le joint horizontal



Figure 11 – Fixation sur ossature (doc. Halfen)

■ DTU 55.2 (décembre 1979)

Ce DTU a fait autorité pendant près de 20 ans (de 1979 à 2000). Il était composé de deux documents :

- un document de conception (pour les maîtres d'œuvre) ;
- un document de travaux (pour les entreprises).

Ces documents constituaient une base réglementaire très complète traitant, sans exception, de tous les modes de pose.

La norme NF P 65-202 (cf. § 2.4) s'inspirera très largement de ce DTU.

2.2 Norme NF B 10-514 (juillet 1981)

Cette norme expose la technique de l'essai de résistance aux attaches des plaques de pierre mince utilisées en revêtements muraux. Cet essai permet d'établir l'épaisseur de dalle nécessaire sous l'agrafe pour que la pierre résiste à une force d'arrachement de 50 daN.

Les épaisseurs peuvent être très différentes selon la nature de la pierre ; quelques millimètres seront suffisants pour des pierres très dures comme certains granits, alors qu'il faudra plusieurs centimètres pour des pierres calcaires tendres.

La figure 13 (page 12) donne les épaisseurs pour quelques calcaires d'origine française.

L'essai est réalisé à partir d'éprouvettes d'épaisseur conformes à celles de la pierre devant être mise en œuvre. Pour les pierres comportant des lits de carrières (ou couches géologiques), on distingue les éprouvettes sciées à passe et celles sciées à contre-passe.

Nota : la résistance aux attaches des pierres constitue très souvent le point faible des dispositifs et représente le point fondamental de vérification de la bonne tenue des revêtements agrafés.

La pierre doit, en chacun de ces points d'attache (ergot engagé dans le chant de la pierre), être capable de résister à la plus forte des valeurs suivantes :

- 50 daN (c'est l'essai normalisé en NF B 10-514) ;
- $6/5$ de P (P étant le poids total de la plaque de pierre) ;
- $V = Q \times S$ (S étant la surface de la plaque, Q la pression de vent extrême selon le DTU P 06-002 (Règles NV 65)).

Cette vérification de la résistance de la pierre à la liaison ergot/pierre se rapporte à chaque attache dans l'hypothèse d'une plaque fixée par 4 attaches (tableau 4, page 11).

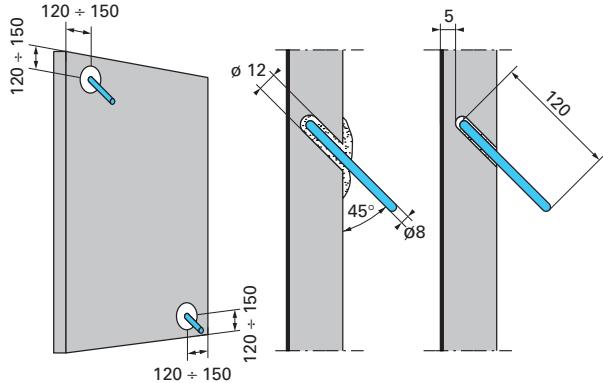
2.3 Norme XP B 10-601 (novembre 1995)

Cette norme a été longtemps très attendue par la profession et a constitué une avancée certaine dans la réglementation de l'utilisation des pierres naturelles destinées à la construction. Elle distingue la pierre massive de revêtement et les dallages.

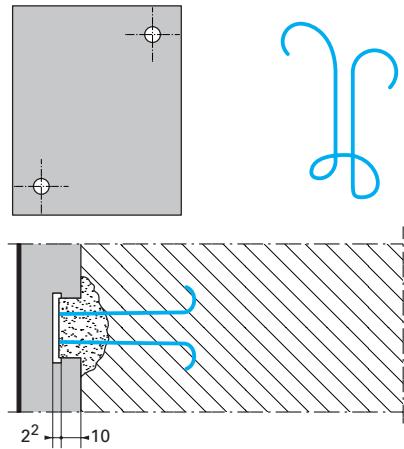
Sa principale innovation réside dans l'introduction de trois zones climatiques en France discriminant un gel faible, modéré ou sévère, mais chaque canton est classé individuellement dans la norme (figure 14, page 12).

Chaque pierre doit posséder une fiche d'identité qui comporte le nom commercial de la pierre, sa nature pétrographique, le pays, la commune et le numéro d'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation, les caractéristiques d'aspect, la masse volumique apparente, la porosité, la vitesse de propagation du son et, également, les résultats d'essais définis afin de déterminer l'aptitude à l'emploi de la pierre naturelle, compte tenu de sa destination (figure 15, page 12).

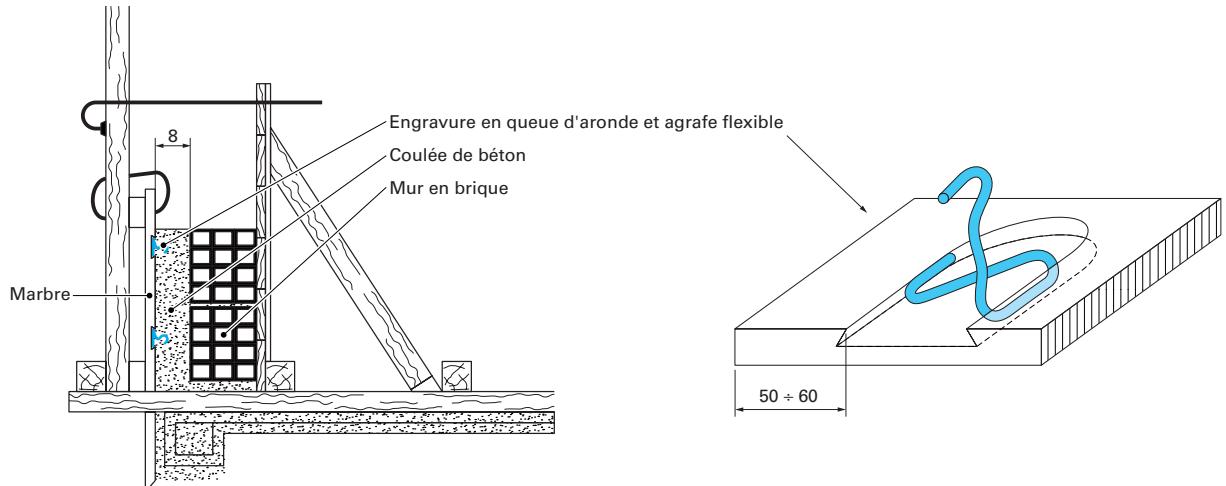
La norme définit, en fonction du nombre N de tenue au cycle gel-dégel, l'aptitude à l'emploi des pierres, qu'elles soient destinées à une façade en pierres massives ou à un revêtement mural. (tableau 4, page 11).



(a) schéma du système Pierre Banche de la firme Guinet & Cie



(b) schéma du système foliulaire de la firme Civet-Pommier & Cie



(c) schéma du revêtement à coffrage pelliculaire (brevet Jean Portail) de la firme Derville

Les cotes sont en millimètres
+ tolérance (variable entre 120 et 150 par exemple)

Figure 12 – Préfabrication

Cette norme introduit donc trois progrès fondamentaux :

- une véritable « carte d'identité » de chaque pierre (en dépit des noms fantaisistes parfois utilisés pour nommer les pierres) ;
- des critères scientifiques d'utilisation des pierres en fonction de leur situation ;
- une procédure d'approbation d'échantillons (qui tend à atténuer toute subjectivité en la matière).

2.4 Norme NF P 65-202

Le DTU 55-2 fait l'objet d'une révision (NF P 65-202) dont l'objectif est de renforcer les règles de conception et les procédures de mise en œuvre.

Pour cela, le nouveau document normatif se veut extrêmement descriptif et donc un peu moins exigeantiel.

Exemple : certaines pierres ne sont plus utilisables, comme les marbres cristallins, en raison du risque de décohésion granulaire, ou les pierres clivées qui présentent un plan de décohésion préférentielle au niveau des attaches. Par ailleurs, les pans horizontaux ne sont plus acceptés et certaines parties de façades comme les soubassements sont dotées de plaques de 40 mm d'épaisseur au lieu de plaques de 30 mm, pour mieux résister aux chocs.

Autres modifications : toutes les pièces métalliques en contact avec la pierre sont en acier inoxydable comme les douilles de fixation dans le support en béton.

Tableau 4 – Aptitude à l'emploi des pierres naturelles de revêtement mural (1)

Destination dans l'ouvrage	Essais	Référence de la norme correspondante	Prescriptions imposées
Revêtement intérieur attaché	Résistance aux attaches (6)	NF B 10-514	$R_a \geq 25 \text{ daN}$ et $\geq 6/5 P(2)$ (P étant le poids de la plaque en décanewtons)
Revêtement extérieur attaché (3)	Porosité	NF EN 1936	$\leq 47 \%$
Élévation en partie courante (y compris rejaillissement autre que le soubassement)	Gélivité	NF B 10-513	Pas de valeur limite en zones de gel faible et de gel modéré
	Résistance aux attaches (6)	NF B 10-514	$N \geq 24 (4)$ en zone de gel sévère $R_a \geq 50 \text{ daN}$ et $\geq 6/5 P(2)$
Bandeau Appui de balcon Appui de fenêtre	Capillarité (7)	NF EN 1925	$C_1 \leq 15 (8)$
	Gélivité	NF B 10-513	$N \geq 24 (4)$ en zones de gel faible $N \geq 48 (4)$ en zone de gel modéré et sévère
	Résistance aux attaches (6)	NF B 10-514	$R_a \geq 50 \text{ daN}$ et $\geq 6/5 P(2)$
Soubassement (5)	Capillarité (7)	NF EN 1925	$C_2 \leq 15 (9)$
	Gélivité	NF B 10-513	$N \geq 48 (4)$ en zone de gel faible et modéré $N \geq 96 (4)$ en zones de gel sévère
	Résistance aux attaches (6)	NF B 10-514	$R_a \geq 50 \text{ daN}$ et $\geq 6/5 P(2)$
Élément mince de couronnement d'acrotère ou autre ouvrage similaire	Capillarité (7)	NF EN 1925	$C_1 \leq 7 (8)$
	Gélivité	NF B 10-513	$N \geq 96 (4)$ dans les trois zones de gel

(1) Pour les revêtements scellés ou collés, les essais à effectuer ainsi que les spécifications imposées sont ceux des revêtements attachés, à l'exception de la résistance aux attaches. Pour les revêtements collés s'ajoutent les spécifications propres aux produits de collage.
(2) Cette valeur minimale de $6/5 P$ est donnée pour une plaque de poids P fixée par quatre attaches.
(3) Pour les immeubles de hauteur supérieure à 50 m, les plaques doivent faire l'objet d'une justification particulière, prenant en compte la résistance au vent.
(4) N est la valeur médiane des nombres de cycles de tenue au gel des cinq éprouvettes.
(5) Soubassement : toute pierre dont le chant inférieur est à moins de 15 cm du sol fini.
(6) R_a : résistance aux attaches.
(7) L'essai de capillarité est décrit dans la norme NF EN 1925.

Le coefficient de capillarité est défini par l'expression : $C = 100 \frac{M}{St^{1/2}}$
avec M masse d'eau (g) absorbée depuis le contact pierre-liquide,
 S section de la face de contact (cm^2),
 t temps depuis l'origine de la mise en contact avec l'eau (min).

(8) C_1 mesure effectuée perpendiculairement au lit de carrière (par exemple, pour une pierre dont la base est en contact avec l'eau).
(9) C_2 mesure effectuée dans le sens du lit de carrière (par exemple, pour une pierre dont le parement est exposé à la pluie).

Nous reprenons ci-après, en les résumant, quelques modifications apportées par cette norme :

- exclusions : façades inclinées, matériaux clivables (schistes, ardoises, etc.) ou sensibles à la décohésion granulaire (marbres cristallins...), revêtements soumis aux actions sismiques ;
- choix des pierres : référence à la norme X P B 10-601 (cf. § 2.3) ;
- précautions particulières : épaissements à 40 mm pour certains soubassements, épaissements pour les plaques avec « joint de refend », joint de fractionnement, points singuliers ;
- agrafes et attaches : métal inoxydable dans la masse, marquage des attaches, épaulement de l'ergot, manchon coulissant facultatif, tiges indémontables ;
- vérification des supports : incombe à l'entreprise de revêtement avec établissement d'un dossier technique complet ;
- compatibilité des supports : certaines attaches peuvent être admises (notamment sur blocs creux) sur justification particulière ;
- dimension des joints courants : 5 à 10 mm pour les revêtements agrafés avec polochon ;
- précision sur le choix des mastics à employer ;

- condition de flèche pour les ossatures intermédiaires et dispositif antiglisement à prévoir ;
- charges à prendre en compte pour le calcul de la résistance aux attaches (cf. § 2.2).

3. Pathologies spécifiques

Certains sinistres, survenus sur des revêtements de façades en pierres agrafées de constructions célèbres, ont défrayé la chronique en sement le doute sur la fiabilité et la sécurité de ce type de technique de pose.

Il convient cependant de relativiser les risques car, dans nos villes, il est plus fréquent de voir chuter sur la voie publique des corniches de pierres massives ou des éclats de béton sous la poussée d'armatures corrodées, plutôt que des plaques de pierres agrafées.

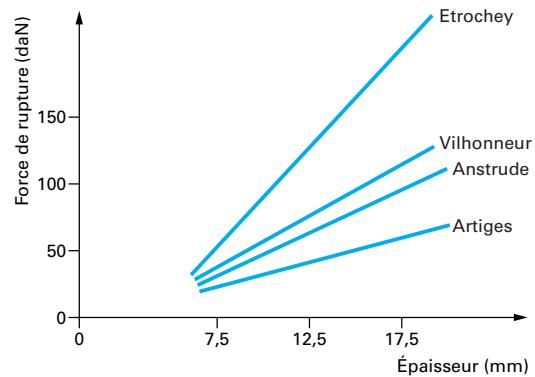


Figure 13 – Épaisseur de pierre nécessaire sous l'agrafe pour qu'une plaque de pierre résiste à une force d'arrachement de 50 daN (doc. CEBTP)

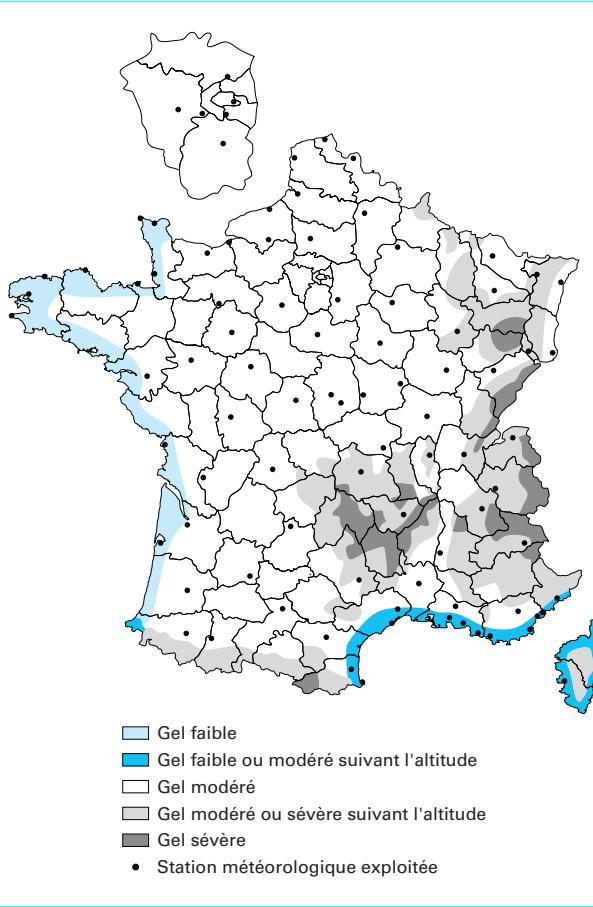


Figure 14 – Liste des cantons avec indication de leur zone de gel suivant l'annexe 17 de la norme XP B 10-601

Examinons cependant les principales pathologies qui peuvent affecter ce type de revêtement, que certains qualifient malicieusement de « pierre du pauvre », par comparaison avec la pierre massive.

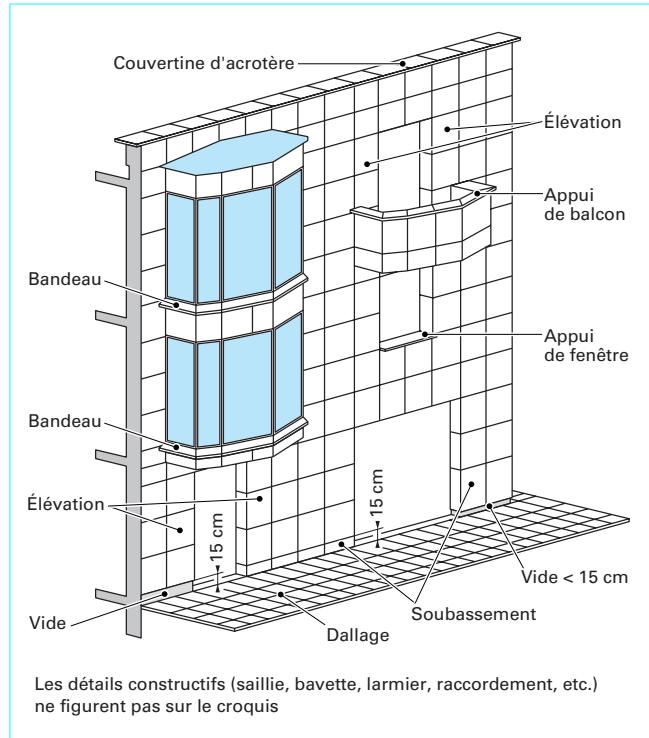


Figure 15 – Revêtement mural de façade en pierre naturelle

3.1 Pathologies liées à la mise en œuvre

■ Joints insuffisants - Mise en compression (cales non retirées, etc.)

Ce désordre peut affecter les 2 systèmes de pose (avec et sans polochons).

● Pose avec polochons

On distingue les joints courants entre plaques et les joints de dilatation et de fractionnement.

Les joints courants entre plaques engendrent peu de désordres hors utilisation de mortiers trop dosés en ciment qui peuvent contribuer aux effets indiqués ci-après. Rappelons néanmoins l'interdiction de réalisation de joints « marbriers » (pierres en contact).

Les joints de dilatation doivent être respectés de même que la pose d'une même plaque sur deux supports différents est interdite, mais ce sont les joints de fractionnement qui posent les problèmes les plus fréquents. Ils sont destinés à ménager une certaine liberté entre le support et le revêtement, permettant d'accepter des mouvements différentiels de différentes natures (thermique, retrait et fluage des bétons, légers mouvements de structures...).

La réglementation prévoit des joints de fractionnement horizontaux (tous les 3 m) et verticaux (tous les 8 m) avec des valeurs restrictives pour des cas particuliers. Le non-respect de ces distances entre joints conduit à des mises en compression et ruptures par flambage telles que montrées sur la figure 16. Toutefois, et fréquemment, les joints, visiblement existants, ne remplissent pas leur rôle. En effet, ces joints doivent exister jusqu'au support, y compris dans le polochon. La difficulté de réalisation d'un tel joint conduit à ce que ce dernier « court-circuite » le fractionnement, le rendant totalement inefficace et provoquant les mises en compression précitées.

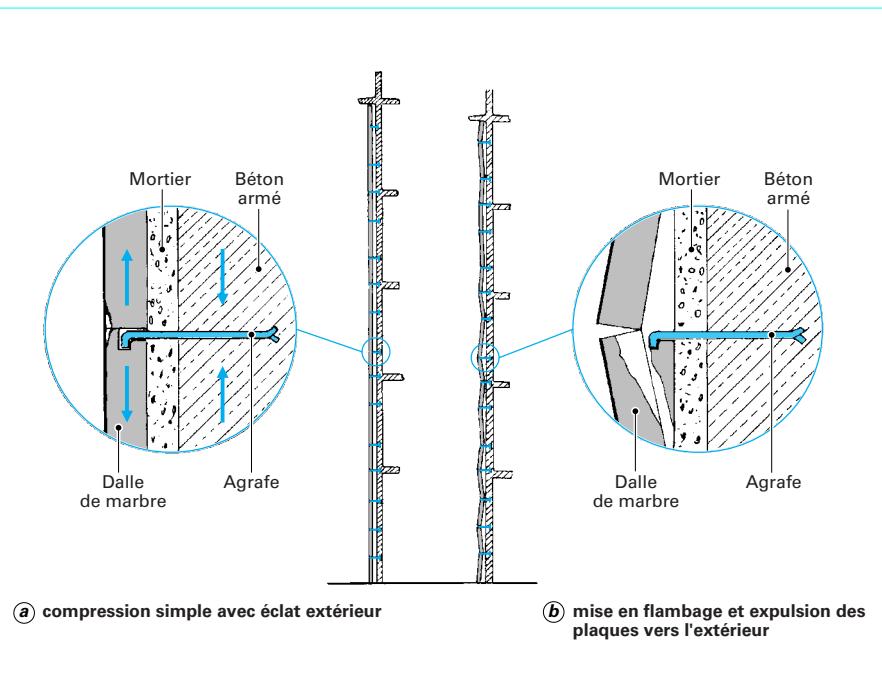


Figure 16 – Mise en compression du revêtement en pierre par contraction du béton

La mise en compression peut également être due à l'absence de joint sous avancées telles que balcons, appuis de fenêtres, etc.

● Pose sans polochons

Chaque joint entre plaque est considéré comme un joint de fractionnement. Le non-respect des tolérances peut conduire à la mise en charge (horizontale ou verticale selon la disposition des pattes dans les joints verticaux ou horizontaux) du revêtement.

■ Trous d'agrafes ou d'ergots mal exécutés

Le perçage de ces trous est généralement réalisé sur chantier. Cela conduit à l'exécution de trous pouvant être désaxés dans l'épaisseur des plaques, oblongs ou de diamètres trop importants ; dans tous les cas, la matière active entre le trou et le parement intérieur ou extérieur de la plaque est réduite, cause d'une faiblesse mécanique certaine par rapport à un trou de bon diamètre, correctement centré.

■ Difficultés de pose aux points singuliers

Les plaques en voussure, en tableaux d'ouverture, en retour d'avancée de faible largeur... constituent des points singuliers entraînant des difficultés de pose dont la pathologie ultérieure est autant à attribuer au concepteur qu'au poseur. On rencontre alors des poses :

- avec polochon sans agrafe ou avec agrafe qui ne passe pas dans l'œillet de la fixation, ou agrafe pénétrant très peu dans le trou ;
- avec polochon, mais dont le polochon est parfois très réduit et enrobe insuffisamment l'agrafe ;
- sans polochon avec fixation en 2 points pour les éléments de faible largeur laissant une possibilité de pivotement.

■ Éclats au niveau des attaches

Ils sont rencontrés principalement avec la pose avec pattes métalliques (figure 17).



Figure 17 – Éclat aux agrafes et pivotement dû à l'insuffisance d'attache

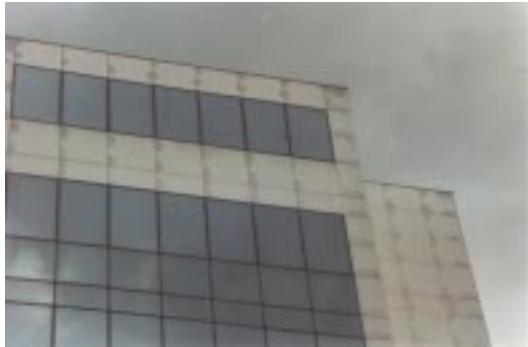


Figure 18 – Spectres huileux provenant du mastic

Les éclats extérieurs sont souvent liés à des chocs en soubassement. Selon leur importance, le risque de chute de plaque est faible. Les éclats intérieurs sont plus dangereux car invisibles (sauf à l'examen fibroscopique), la tenue des plaques vers l'extérieur pouvant ne plus être assurée. Ces éclats sont créés le plus souvent lors de la pose.

■ Spectres des polochons

Pour coiffer les polochons (en particulier ceux de mortier de ciment qui mettent un certain temps à faire prise), il convient d'utiliser des matériaux qui ne tachent pas comme du polystyrène, par exemple.

Si l'on utilise le papier des sacs de ciment vides qui traînent sur le chantier, le tanin que renferment ceux-ci risque de provoquer des taches à la surface de la pierre. Il en est de même si l'on utilise de la paille.

Pendant la prise du mortier des polochons, les plaques de pierre sont souvent calées par des cales de bois qui sont retirées par la suite. Le bois de ces cales peut, dans certaines conditions d'humidité, provoquer des taches visibles sur la pierre.

Des spectres d'humidité sont également rencontrés sur des matériaux où, après ruissellement de pluie (en face extérieure ou intérieure), il y a séchage retardé au droit des polochons. C'est le cas de certains granits à faible porosité mais fort coefficient d'absorption qui retiennent l'eau plus longtemps au droit des polochons.

■ Taches « huileuses » dues aux mastics élastomères

Sur les façades modernes en pierres attachées, de tous les spectres, ce sont sans doute ceux qui proviennent des mastics élastomères qui sont les plus répandus.

Il est facile de les reconnaître car ils sont caractéristiques : ils se présentent sous forme de taches grasses claires ou noires (si les salissures s'y sont collées). Ces taches sont situées aux emplacements des attaches et n'apparaissent généralement, sur une pierre, que d'un seul côté du joint, car le mastic n'est mis en principe que d'un seul côté (figure 18).

On trouve parfois ces taches disgracieuses en plein milieu d'une plaque. Il s'agit alors de la trace d'une attache dite « en culotte ». On rencontre également ce type de tache sous forme de traînées linéaires le long et de part et d'autre des joints de calfeutrement exécutés avec des mastics inadéquats.



Figure 19 – Polochon continu créant un défaut de ventilation de la lame d'air

Rappelons que l'utilisation de mastic dans les trous de logement des ergots remplace, par habitude et facilité, le coulis mentionné dans le DTU 55-2. Cette pratique n'était pas précisée dans le DTU 55-2, elle n'est d'ailleurs pas inscrite dans la norme NF P 65-202 qui souligne notamment le risque de tachabilité des mastics au niveau des joints.

Le problème a pour origine la migration des huiles méthylsilicones contenues dans de nombreux mastics utilisés en construction. Ce corps gras migre dans la pierre poreuse, la rendant très légèrement transparente, ce qui fait ressortir les particules plus sombres à hauteur des attaches. Ce phénomène est souvent accentué par le fait que ces huiles peuvent retenir les microparticules noires véhiculées par l'atmosphère.

Certains emplâtres à base de méthyléthylcétone (MEC) avec une charge minérale de carbonate de calcium (craie micronique) permettent d'atténuer ce type de phénomènes disgracieux.

■ Défaut de ventilation du vide d'air

Soit les polochons sont continus et forment un barrage à l'air, soit l'isolant thermique, mal mis en œuvre, vient en contact avec le dos des pierres, et l'on obtient une lame d'air mal ventilée, propice aux formations de points de condensation qui finissent par être visibles sur la belle face des pierres (figure 19).

3.2 Pathologies liées à la nature des matériaux

■ Résistance aux attaches insuffisante

Définie au paragraphe 2.2, cette caractéristique est généralement nettement satisfaita. L'utilisation de pierres relativement tendres a conduit assez rarement à se situer en deçà des valeurs limites.

■ Modification du matériau dans le temps

Le matériau utilisé peut présenter des évolutions réduisant ses caractéristiques dans le temps.

Les deux cas les plus couramment rencontrés sont la décohésion granulaire des marbres et la révélation des stylolithes.

● Décohésion granulaire des marbres

Des déformations importantes et inexplicées avaient été remarquées depuis longtemps sur certains marbres utilisés, notamment, dans le secteur funéraire. En matière de façades agrafées, les marbres blancs n'ont été que rarement utilisés, et il a fallu attendre les sinistres de la Finlandia House à Helsinki en 1990 et de la Tour Amoco à Chicago en 1993 pour que les scientifiques commencent à étudier le phénomène.

On a alors découvert que les désordres trouvaient leur origine dans les propriétés de dilatation anisotropique du cristal de calcite qui, sous l'effet de chocs thermiques, rendaient la structure du marbre poreuse et fragile (« maladie du sucre »). De nombreuses publications et conférences ont rendu publiques ces découvertes dès 1995.

À la même époque, le CEBTP mettait au point un essai de vieillissement accéléré par choc thermique avec humidification, pour déterminer la sensibilité à la décohésion granulaire des marbres.

La plupart des immeubles européens comportant du marbre blanc en revêtement de façade pelliculaire (épaisseur 2 ou 3 cm) ont été progressivement affectés des mêmes désordres. Les désordres visibles apparaissent généralement entre la 10^e et la 20^e année (parfois plus tôt sur les façades les plus exposées). Les marbres affectés sont ceux qui sont les plus purs, c'est-à-dire ceux qui sont composés essentiellement de calcite. On y retrouve principalement les marbres blancs : le marbre de Carrare, les marbres blancs de Turquie ou de Grèce (blanc Sivec, Thassos, Naxos), le marbre blanc espagnol de Macael, etc.

Dans ces conditions, et également sous la pression des compagnies d'assurances, qui ont enclenché le dispositif d'alerte de l'AQC (assurance qualité construction) dès novembre 1998, on comprend pourquoi la nouvelle norme a introduit une nouvelle exigence de limitation d'emploi pour les matériaux utilisables à l'extérieur, à savoir :

« Les marbres cristallins ne peuvent pas être utilisés à l'extérieur sauf s'ils peuvent justifier de leur tenue à la décohésion granulaire ».

Avant parution de la nouvelle norme, les bureaux de contrôle (Socotec, CEP Véritas, etc.) avaient d'ailleurs pris l'initiative d'émettre des avis défavorables sur tous les projets proposant du marbre blanc en revêtement de façade, et ce depuis 1998.

Ces nouvelles recommandations tiennent compte des décisions de la Commission européenne CEN/TC 246 qui reconnaissait, en mai 1999, l'importance des risques de déformation des plaques de marbre sous l'effet de la décohésion granulaire.

Sur le plan pratique, des déformations importantes peuvent être constatées (flèche atteignant 3 cm sur des plaques de 3 cm d'épaisseur et de 150 cm de long). Mécaniquement, on assiste à des

chutes de caractéristiques qui peuvent être très significatives en vitesse de propagation du son, résistance en flexion et résistance aux attaches.

Mais, dans tous les cas observés jusqu'à présent, les valeurs notamment de résistance aux attaches se sont toujours révélées supérieures aux valeurs minimales normatives.

● Discontinuités d'origine géologique

Certaines roches présentent des discontinuités d'interface soit entre des strates (stylolithes stratigraphiques), soit en relation avec des contraintes tectoniques (stylolithes tectoniques généralement sécants aux précédents).

Les pierres comportant ces stylolithes, stratigraphiques notamment, sont éliminées en carrière lorsque ceux-ci sont importants. Les plus fins passent le plus souvent inaperçus car ils sont colmatés par une sorte de ciment. Celui-ci présente cependant des caractéristiques plus faibles que la pierre et l'action de l'eau et du gel entraîne leur déchaussement. Ils se révèlent alors facilement à l'œil d'autant plus que ces minicrevasses se remplissent de salissures. Ces stylolithes peuvent partiellement affaiblir les caractéristiques mécaniques de la pierre mais, au niveau d'une plaque entière, les capacités demeurent souvent suffisantes.

Les pierres clivables (ardoise principalement) présentent un risque de rupture à mi-épaisseur des plaques à partir des trous latéraux. La norme NF P 65-202 révisée interdit désormais l'utilisation de matériaux clivables.

■ Matières humiques ou sels tachants

Si l'on n'a pas pris soin de choisir un ciment à faible teneur en alcalis (ciment alumineux, ciment blanc, ou produits recommandés par le fournisseur de pierres), les sels alcalins (solubles) du ciment se dissolvent dans l'eau du mortier, pénètrent dans la pierre où ils rencontrent des matières organiques (matières humiques) ; un dépôt brunâtre ou rougeâtre des plus visibles apparaît alors en surface après évaporation de l'eau.

Ces taches peuvent parfois s'éliminer par lavage avec de l'eau de Javel à 10 % ou par ponçage. Cependant, elles reparaissent bien souvent tant que la pierre contient des traces de matières humiques et le ciment des alcalis.

Certains documents normatifs prévoient un essai de compatibilité entre les colles et les pierres calcaires. Il est prudent de s'y référer.

■ Présence de pyrites et d'oxydes métalliques

Les traces jaunâtres, qui apparaissent sur certaines pierres de façades, sont souvent attribuées, à tort, à un outillage rouillé qui aurait été utilisé lors de la découpe des pierres ou du perçage des chants. Or, sauf exception, les outils sont constitués de métal ou de poudre abrasive qui ne se corrodent pas.

Ces taches sont en réalité dues aux inclusions d'oxydes métalliques dans la pierre qui, même en très faibles quantités, sont la source de pigmentations extrêmement visibles.

Une neutralisation à l'acide permet de supprimer les colorations légères (on utilise souvent une solution saturée de phosphate d'ammonium avec un pH ajusté à 6 par ajout d'acide phosphorique).

3.3 Diagnostic des pathologies

En fonction des pathologies rencontrées, le diagnostic portera sur des constatations visuelles (relatives à la pose ou aux manifestations appréciables à l'œil) ou sur la vérification de caractéristiques physiques, mécaniques ou géologiques.

Outre les critères minimaux définis dans la norme NF B 10-601 (résistance aux attaches - gélivité - capillarité), d'autres essais peuvent aider à la compréhension des désordres :

- mesures par ultrasons ;
- résistance au choc ;
- résistance à l'arrachement (essais à la ventouse, à la dépression).

L'examen visuel nécessite souvent des déposes locales mais, dans certains cas, des examens endoscopiques ou fibroscopiques par les joints des pierres permettent de visualiser l'arrière des plaques et les éclats au niveau des attaches.

4. Techniques de remplacement et de consolidation

■ Technique de la patte « en culotte » ou du « portemanteau »

Lorsque l'agrafage sur les chants est impossible, comme dans le cas du remplacement d'une pierre isolée après tronçonnage des ergots, par exemple, des trous borgnes inclinés (agrafes en « culotte ») peuvent être exécutés sur la face arrière de la pierre. L'attache « en culotte » est une attache ayant son extrémité inclinée pour pénétrer dans le dos de la plaque et la supporter à la manière d'un « portemanteau ».

L'inclinaison de l'attache est comprise entre 45° et 60°. La longueur de pénétration de l'attache dans la plaque doit être au minimum de 25 mm pour des plaques de 30 mm et de 17 mm pour des plaques de 20 mm. Un minimum de 10 mm de pierre doit subsister en fond de culotte.

Le logement de l'attache dans la plaque est réalisé par perçage ou par sciage suivant que l'attache est cylindrique ou de section rectangulaire. Il est déboussié.

Les attaches devant être scellées dans le mur support sont préalablement assemblées aux plaques par collage à la résine de synthèse ou par scellement au mortier colle. Les attaches, préalablement fixées au mur support, nécessitent un ajustage soigné et une mise en place avant remplissage du logement au dos des plaques par un produit de collage non coulant et cela avant mise en place des plaques sur les attaches.

Le croquis de la figure 20 illustre ce mode de pose qui ne doit cependant être utilisé qu'exceptionnellement, compte tenu des aléas liés à sa mise en œuvre.

■ Technique de l'« ergot coulissant » ou « retroussé »

Il n'est pas rare de rencontrer une technique astucieuse, mise au point par les poseurs et qui ne présente pas les inconvénients du système de la patte « en culotte ». C'est la technique de l'« ergot coulissant ».

Cette technique remplace les ergots sciés par des ergots neufs que l'on escamote tout d'abord dans les pierres latérales au fond de trous percés plus profondément, avant de les ramener par coulissemement dans les trous de la pierre de remplacement. Il est alors intéressant de remplacer les ergots lisses par de la tige filetée en acier inoxydable qui est plus facilement manipulable à l'aide d'un tournevis.

■ Techniques par fixations traversantes ou « cloutage »

La fixation de plaques peut parfois être réalisée par des tiges traversant la plaque de part en part, mais ce dispositif reste plus ou

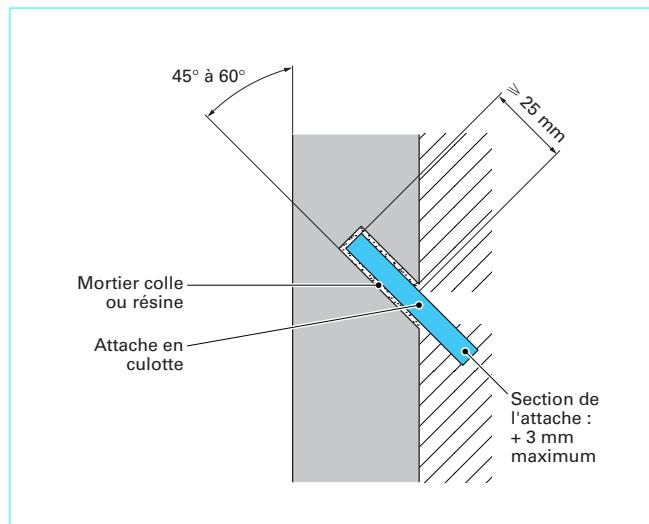


Figure 20 – Technique de la patte « en culotte » ou en « portemanteau »

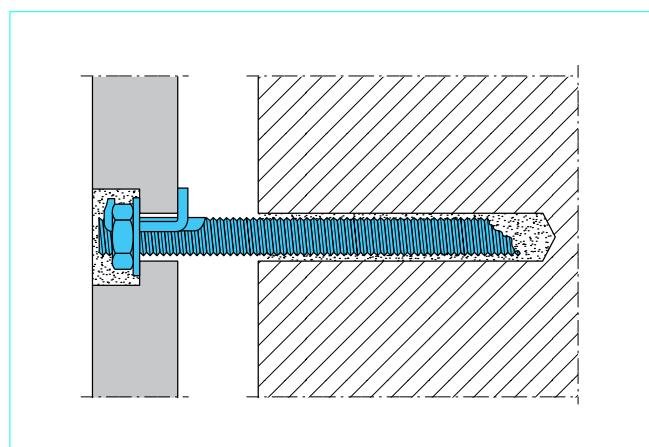


Figure 21 – Technique de fixation traversante (doc. Halphen)

moins apparent. Il est réservé pour le traitement des points singuliers ou dans le cas de réparation.

Ce dispositif nécessite une étude pour justifier les limites des déformations et des contraintes dans la pierre et dans la fixation.

La figure 21 donne un exemple mis au point par la société Halphen.

5. Conclusion

Le tableau 5 résume les principaux critères de choix de techniques de pose de revêtements de façades en pierres agrafées.

Tableau 5 – Principaux critères de choix des techniques de pose (1)

Technique	Agrafes + Polochons		Pattes		Pattes sur ossatures	Pose à fond de moule
	Scellées	Chevillées	Scellées	Chevillées		
Paragraphe concerné	§ 1.4.1	§ 1.4.2	§ 1.4.3	§ 1.4.4	§ 1.4.5	§ 1.4.6
Épaisseurs de pierres inférieures ou égales à 20 mm sans vide d'air						A
Préfabrication	A	A	A	A	A	A
Distance du support supérieure à 150 mm					A	
Support de résistance insuffisante					A	
Distance du support généralement comprise entre 40 et 150 mm (<i>présence éventuelle d'isolant thermique</i>)			A	A	A	
Distance du support comprise entre 20 et 50 mm (<i>absence d'isolant</i>)	A	A				
Joints ouverts ou fermés au mastic souple			A	A	A	
Joints fermés rigides (<i>sauf joints de fractionnement et de dilatation</i>)	A	A				A
Support béton ordinaire	A	A	A	A	A	A
Support béton léger	A	AJP	A	AJP	A	
Support briques ou blocs pleins	A	AJP	A	AJP	A	
Support briques ou blocs creux				AJP	A	
Support pierre naturelle	A	AJP	A	AJP	A	
Support blocs de béton cellulaires				AJP	A	
Support bois				AJP	A	
Support métal				AJP	A	
Hauteur supérieure à 28 m			A	A	A	A
Joints de 5 à 10 mm	A	A				A
Joints de 6 à 25 mm			A	A	A	A

(1) A = admissible ;
AJP = admissible avec justification particulière.