

Programmes d'irrigation

par **René CLÉMENT**

*Ingénieur en Chef du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Directeur Général de la Société du Canal de Provence
et d'Aménagement de la Région Provençale*

et **Alain GALAND**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble
Ingénieur à la Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale*

1. Données de base relatives au milieu naturel	C 4 250 - 2
1.1 Étude pédologique	— 2
1.2 Étude climatologique	— 3
1.3 Besoins en eau des cultures irriguées	— 4
1.4 Ressources et qualité des eaux	— 6
1.5 Topographie	— 7
2. Programme d'aménagement	— 7
2.1 Agriculture existante	— 7
2.2 Plan de développement agricole	— 8
2.3 Schéma d'aménagement	— 9
2.4 Choix d'une technique d'irrigation	— 9
3. Économie et gestion des périmètres irrigués	— 12
3.1 Évaluations économiques et financières d'un programme	— 12
3.2 Rentabilité économique	— 12
3.3 Rentabilité financière	— 14
3.4 Rentabilité au niveau des exploitations	— 15
3.5 Tarification des eaux d'irrigation	— 16
Pour en savoir plus	Doc. C 4 250

de 10 à 20 % ; par contre, les options techniques principales sont arrêtées, et l'opération est programmée en tranches de réalisation. Ces études décisionnelles sont appelées **études générales d'aménagement** ou encore **plan directeur** ou **études de faisabilité**, selon le degré de précision recherché et l'importance du périmètre étudié (de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers d'hectares).

■ Les **études de définition** des équipements sont entreprises dès lors que les études de la phase décisionnelle ont permis de porter une appréciation favorable sur l'opération et qu'un financement a pu être mis en place. Il s'agira de définir de manière détaillée les équipements à réaliser (avant-projets sommaire et détaillé, dossiers de consultation des entreprises, dossiers d'exécution).

L'élaboration des programmes d'irrigation (phase décisionnelle) fait l'objet du présent article. Les méthodes de définition des équipements mis en jeu font l'objet d'un autre article **Systèmes d'irrigation** [C 5 250]. Il s'agira des équipements individuels d'irrigation à la parcelle et des équipements collectifs de transport et de distribution des eaux d'irrigation.

1. Données de base relatives au milieu naturel

L'élaboration des données de l'aménagement concernant le milieu naturel fait appel à un certain nombre de disciplines spécialisées : pédologie, climatologie, agronomie et besoins en eau des plantes cultivées, hydrologie et qualité des eaux, topographie, etc.

Il n'est pas dans notre propos de présenter en détail les théories et les techniques concernées par chacune de ces disciplines. Nous insisterons essentiellement sur l'objectif de ces études spécialisées, en précisant les éléments à réunir et l'utilisation qui en sera faite. Pour des raisons évidentes de délais d'exécution et de prix de revient, il convient en effet de délimiter clairement le contour de ces études préliminaires.

1.1 Étude pédologique

1.1.1 Objectifs

L'étude pédologique du périmètre a pour objectifs :

- d'apprécier les potentialités des terres vis-à-vis de l'irrigation, en mettant l'accent sur une *hiérarchie d'aptitude* des différentes zones et sur l'existence de contraintes éventuelles pour l'aménagement (nécessité de drainage ou d'assainissement par exemple) ; cette étude permettra donc ultérieurement d'éliminer du périmètre équipé des zones dont les potentialités naturelles seraient insuffisantes pour valoriser un réseau d'irrigation ; elle fournit un premier éclairage spécifique pour le choix judicieux de l'implantation d'une première phase de travaux ;

- de fournir à l'ingénieur d'irrigation les *données fondamentales* caractérisant les relations entre le sol et l'eau, à savoir dose d'arrosage et vitesse de filtration.

1.1.2 Aptitude à la mise en valeur

■ L'appréciation des potentialités des terres passe généralement par l'établissement d'une carte des unités homogènes de sols, classifiées selon des critères pédogénétiques.

Au niveau de l'étude générale d'un programme d'aménagement cette étude pédologique s'effectue à la *précision* de 1/100 000 ou de 1/50 000.

Dire qu'une étude est effectuée à la précision de 1/100 000 signifie que, sur une carte du périmètre à l'échelle du 1/100 000, les limites des différentes unités de sols sont définies à la précision du millimètre, soit à 100 m près.

La cartographie s'effectue généralement au 1/25 000 comme pour les autres études qui seront menées ultérieurement.

Cette précision apparaît très suffisante au stade de l'étude générale, mais requiert cependant un travail extrêmement important.

Exemple : à titre d'ordre de grandeur, l'établissement d'une telle carte des sols à l'échelle du 1/100 000 nécessite un sondage à la tarière pour 50 ha de terres, et l'établissement d'un profil complet (avec analyse ultérieure de trois ou quatre échantillons par profil) pour 250 ha. Or une équipe pédologique comprenant un ingénieur, un adjoint technique et deux ouvriers réalise ces travaux de terrain au rythme journalier de 10 à 20 sondages et 5 profils. Le travail de bureau ultérieur (dépouillement et exploitation de ces données) peut nécessiter un délai du même ordre de grandeur.

■ L'importance de ce travail explique que l'on préférera souvent s'abstenir, au niveau de l'étude générale, de l'établissement d'une carte des sols classés selon des critères pédogénétiques. On pourra, en effet, atteindre le premier des objectifs proposés précédemment en différenciant les sols à l'aide de critères morphologiques et physiques, fondés sur des observations *in situ*, et de quelques analyses de laboratoire.

Les principales caractéristiques prises en compte seront :

- la profondeur du sol ou épaisseur des *horizons meubles* facilement accessibles aux racines (horizon = couche de sol à peu près parallèle à la surface et sensiblement homogène, dont toutes les parties sont au même stade d'évolution ou presque) ;

- la nature et le degré de dureté des *horizons profonds* ou sous-jacents, ou du *substratum* ;

- la texture et la charge caillouteuse des *horizons supérieurs* ;
- l'importance relative de la *réserve en eau* facilement utilisable, estimée à partir des textures et des mesures de l'humidité équivalente ([§ 1.1.3](#)) ;

- la *situation géomorphologique* et la pente naturelle des terrains, et donc les risques d'érosion.

Cette deuxième approche est évidemment beaucoup moins lourde que la précédente. Elle n'est possible que dans des territoires cultivés depuis longtemps, où un bouleversement complet des cultures pratiquées n'est pas envisagé. Elle débouche sur une cartographie des sols selon des critères assez pragmatiques, mais bien adaptés à l'objectif poursuivi.

■ Dans tous les cas, la cartographie des unités de sols sera accompagnée d'un document plus concret, directement utilisable par le projeteur de l'aménagement, et découpant le périmètre en grandes zones compactes et relativement homogènes. C'est en fonction des proportions de chaque unité de sols présents que sera établie une classification hiérarchisée de ces zones quant à leur aptitude à valoriser un équipement d'irrigation.

■ Au niveau de l'étude d'un projet de réalisation, l'étude pédologique des secteurs concernés est, bien sûr, réalisée à une échelle plus précise : la précision adoptée est celle du 1/20 000 ou 1/10 000, avec une représentation cartographique à l'échelle du 1/5 000 ou 1/2 000. Des études encore plus précises peuvent être envisagées pour des conseils aux exploitants.

1.1.3 Dose d'arrosage et vitesse de filtration

Les différentes zones homogènes cartographiées donneront lieu à une estimation des doses d'arrosage et des vitesses de filtration des sols. Ces éléments seront fondamentaux pour arrêter les caractéristiques de l'irrigation à la parcelle, et nous en rappellerons les définitions.

1.1.3.1 Dose d'arrosage

Après avoir été saturé d'eau, le sol se ressue par infiltration profonde ou évaporation. Ses pores non capillaires se vident de leur eau libre. L'eau liée résiduelle (eau capillaire et pelliculaire) est en partie disponible pour les plantes.

La *capacité de rétention* d'un sol est le rapport du poids de l'eau liée au poids du sol sec qui la contient. Pratiquement, c'est l'*humidité équivalente* H_e que l'on déterminera (rapport du poids de l'eau liée au poids du sol sec qui la contient pour un échantillon passant à la centrifugeuse à 1 000 g pendant deux heures) et qui donne une estimation par défaut de la capacité de rétention.

Le *coefficient de flétrissement* C_f est la teneur en eau du sol qui provoque le flétrissement définitif des plantes. On a pu observer expérimentalement que $C_f \approx 0,55 H_e$.

L'eau disponible pour les plantes (ou *réserve utilisable* RU) correspond sensiblement à la différence entre l'humidité équivalente et le coefficient de flétrissement. Ainsi, pour une profondeur arable P (en mètres) exploitable par les racines des plantes, et pour une densité apparente du sol de d_a , la réserve utilisable (en mètres) ressort à :

$$RU = P (H_e - C_f) d_a = 0,45 P H_e d_a$$

Pratiquement, l'irrigation consiste à remplir le réservoir que constitue le sol jusqu'à sa capacité de rétention (ou son humidité équivalente) et à renouveler cette réserve avant que le point de flétrissement ne soit atteint.

On considère généralement que la *réserve facilement utilisable* (RFU) correspond aux 2/3 de la réserve totale, d'où la *dose pratique d'arrosage* D en mètres cubes par hectare :

$$D = 3\ 000 P H_e d_a$$

La périodicité des arrosages sera fonction des besoins en eau des plantes, dont le tableau 1 ci-après donne des ordres de grandeur.

Tableau 1 – Quelques ordres de grandeur en fonction de la nature des sols

Sol	Humidité équivalente	Dose pratique d'arrosage (m ³ /ha)		
		pour 40 cm de profondeur <small>(1)</small>	pour 70 cm de profondeur <small>(2)</small>	pour 120 cm de profondeur <small>(3)</small>
très léger (sableux)	0,10	200	400	650
léger (limono-sableux)	0,15	300	500	900
moyen (limono-argileux-sableux)	0,20	400	700	1 200
battant (limoneux)	0,25	450	800	1 350
lourd (argilo-limoneux)	0,30	500	850	1 500

(1) Maraîchages, légumes, tournesol.

(2) Céréales, maïs, sorghos, fourrages, artichauts, tomates.

(3) Arbres fruitiers, luzerne.

1.1.3.2 Vitesse de filtration

C'est la vitesse avec laquelle l'eau s'infiltra dans le sol pour une pente motrice égale à l'unité.

Elle constituera le paramètre majeur de la détermination de la durée d'application de la dose. Ainsi, en irrigation par aspersion, la pluviométrie de l'arrosage devra être inférieure à la vitesse de filtration du sol.

Exemple : à titre d'ordre de grandeur, signalons que les vitesses de filtration sont de l'ordre de 5 mm/h en sol lourd ; elles dépassent 20 mm/h en sol léger.

1.2 Étude climatologique

1.2.1 Objectifs

Les études climatologiques ont pour objectifs :

- de fournir des informations relatives aux cultures envisageables, et en particulier vis-à-vis des risques de gelées ou de grêle aux différentes époques de l'année, pouvant éliminer certaines d'entre elles ; l'existence éventuelle de *microclimats* pourra constituer un des éléments d'appreciation dans la recherche de l'implantation d'une première tranche de réalisation ;

- de fournir les données climatologiques qui seront utilisées pour le calcul des besoins en eau des cultures ;

- d'apprécier la répartition des vents, qui pourraient constituer une contrainte pour l'irrigation.

1.2.2 Précipitations

L'étude des précipitations, en vue de l'estimation des apports naturels aux plantes, est effectuée période par période. La période adoptée (semaine, décade, mois) doit être homogène avec celle retenue pour le calcul des besoins en eau des cultures.

Deux points doivent être soulignés pour la réalisation de cette étude.

— La dispersion autour de la moyenne est souvent importante, ce qui nécessite une étude fréquentielle ; les valeurs des apports ultérieurement utilisées sont relatives à l'*année moyenne* et à l'année dite *sèche* correspondant généralement à une fréquence décennale ou quinquennale.

— La *pluie utile*, c'est-à-dire disponible pour la végétation, peut être notablement inférieure à la pluie tombée ; il faut en effet éliminer :

- la partie ruisselée des pluies violentes ;
- la partie des pluies de longue durée, dépassant la capacité de stockage du sol.

Exemple : à titre d'ordre de grandeur, on considère que, dans le sud de la France, la pluie utile est de l'ordre de 80 % de la pluie tombée pendant la période végétative, pour une fréquence environ biennale.

1.2.3 Températures

On verra ci-après que la température moyenne mensuelle est l'une des données de base du calcul des besoins en eau des plantes par la méthode classique de Blaney-Criddle ([§ 1.3.2](#)).

Contrairement à la pluviométrie, l'étude statistique de la variable *température moyenne mensuelle* fait apparaître généralement une faible dispersion autour de la moyenne. Cette observation permet ainsi de limiter l'étude des températures mensuelles à l'établissement d'une moyenne arithmétique sur la durée statistique disponible.

L'étude des températures est complétée par l'examen des risques de gel pouvant conduire à interdire la pratique de certaines cultures.

1.2.4 Vents

L'analyse fréquentielle des vents portera sur leur intensité (vitesse en m/s) et leur direction. Les résultats obtenus gagneront à être visualisés sur le document graphique de la *rose des vents*.

Il sera nécessaire de définir :

— le temps pendant lequel l'intensité du vent interdit ou limite la pratique de l'irrigation par aspersion ; c'est la *période de pointe* des irrigations qui doit être ici étudiée de manière à déterminer la réduction de la durée disponible pour l'irrigation ;

— la direction préférentielle de ces vents, en vue d'une protection mécanique éventuelle (haies brise-vent, par exemple).

1.3 Besoins en eau des cultures irriguées

L'estimation des besoins en eau d'un hectare de chaque culture envisageable sur le périmètre utilisera les données résultant des études climatologiques.

Le plan cultural (répartition des cultures pratiquées) sur le périmètre ne sera arrêté dans une phase ultérieure de l'étude. C'est à ce moment-là seulement que les besoins *globaux* du périmètre pourront donc être calculés, en multipliant les besoins *unitaires* (calculés selon la méthode qui fait l'objet de ce paragraphe) par les superficies correspondantes.

1.3.1 Éléments à déterminer

Les besoins en eau de chaque culture doivent être estimées *période par période*, d'une part, et *en année moyenne et en année sèche* (fréquence décennale ou quinquennale, par exemple), d'autre part.

■ L'estimation période par période pour chaque culture permettra, en effet, ultérieurement, au niveau du calcul des besoins globaux du périmètre résultant du plan cultural, de définir le *mois de pointe* des irrigations. Avec le volume mensuel à apporter à la plante, on déterminera par ailleurs la valeur du *débit fictif continu de pointe* de l'irrigation, qui est le débit continu exprimé en litres/s · ha qu'il faudrait apporter dans l'hypothèse d'une irrigation fictive de 24 h sur 24 ; ce débit fictif continu de pointe est relatif à la période de pointe de l'irrigation (10 jours par exemple) et tient compte d'une éventuelle répartition irrégulière des besoins des plantes à l'intérieur du mois de pointe. C'est ce débit fictif continu de pointe qui constituera la base du calcul des débits à délivrer.

■ L'estimation des besoins en année moyenne et année sèche fournit :

— les valeurs des besoins à prendre en compte pour le dimensionnement des équipements (année *sèche*) ;

— les valeurs des besoins à prendre en compte pour le calcul des frais moyens d'énergie et du prix de revient de l'eau d'irrigation (année *moyenne*).

1.3.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle. Formule de Blaney-Criddle

Par définition, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est la consommation d'eau, sous l'action conjuguée de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes, d'un couvert végétal en plein développement occupant le sol en totalité, et sous les conditions optimales d'alimentation en eau sans l'influence d'aucun facteur limitant.

Plusieurs formules ont été proposées [1] pour donner une estimation de l'ETP, et nous présenterons en détail la formule de Blaney-Criddle, qui est la plus utilisée.

Cette formule semble être celle qui correspond le mieux au calcul des besoins en eau à l'échelon d'une petite région. Elle utilise, en effet des données facilement accessibles dans les périmètres étudiés, et introduit des coefficients culturaux susceptibles d'ajustements aux données locales éventuelles.

La formule de Blaney-Criddle est la suivante :

$$\text{ETP} = K (8,13 + 0,46 t) p$$

avec ETP (mm) évapotranspiration potentielle pour la période étudiée,

K coefficient variable avec les cultures et la région,

t ($^{\circ}\text{C}$) température moyenne pendant la période considérée,

P pourcentage de la durée d'éclairement pendant la période considérée.

L'ETP est généralement calculée mois par mois, période pour laquelle on peut disposer des données climatiques permettant de calculer la température moyenne.

Le *pourcentage d'éclairement mensuel* ne dépend que de la latitude du lieu considéré et est donné par le tableau 2.

Dans sa formulation initiale, le coefficient K était un coefficient d'ajustement relatif aux seules cultures envisagées (tableau 3).

Tableau 2 – Pourcentage de la durée d'éclairement mensuel [1]

Mois	Latitude nord					Latitude sud			
	50°	40°	30°	20°	10°	0°	10°	20°	30°
Janvier	5,94	6,76	7,29	7,75	8,13	8,49	8,86	9,28	9,70
Février	6,35	6,75	7,05	7,31	7,53	7,73	7,92	8,13	8,39
Mars	8,23	8,32	8,37	8,41	8,45	8,49	8,52	8,57	8,59
Avril	9,22	8,93	8,71	8,52	8,36	8,21	8,07	7,89	7,69
Mai	10,70	10,01	9,56	9,16	8,81	8,49	8,19	7,84	7,45
Juin	10,93	10,07	9,49	9,01	8,60	8,21	7,81	7,40	6,95
Juillet	10,97	10,21	9,66	9,25	8,85	8,49	8,13	7,75	7,29
Août	10,03	9,54	9,21	8,94	8,71	8,49	8,27	8,04	7,76
Septembre	8,46	8,39	8,34	8,29	8,25	8,21	8,18	8,13	8,08
Octobre	7,45	7,76	7,99	8,17	8,33	8,49	8,62	8,78	8,99
Novembre	6,08	6,73	7,20	7,57	7,92	8,21	8,53	8,87	9,25
Décembre	5,64	6,53	7,13	7,62	8,06	8,49	8,90	9,32	9,86

Tableau 4 – Facteur correctif de pointe en fonction de la dose d'arrosage [1]

Dose d'arrosage (mm)	Facteur correctif de pointe	Dose d'arrosage (mm)	Facteur correctif de pointe
30	1,60	90	1,23
40	1,48	100	1,20
50	1,40	110	1,17
60	1,34	120	1,15
70	1,30	130	1,12
80	1,26	140	1,10

Le calcul des débits à transiter par un réseau sera ainsi défini à partir de la valeur de l'ETP du mois de pointe, majorée par le facteur correctif de pointe.

1.3.3 Autres formules de calcul de l'ETP

La formule de Blaney-Criddle est sans doute la plus utilisée car les données climatologiques mises en jeu sont localement disponibles. Mais elle nécessite des ajustements région par région, pouvant être recherchés en utilisant les résultats régionaux fournis par une formule plus élaborée (Penman, par exemple) ou les données disponibles d'expérimentation [3].

Parmi les autres formules qui ont été proposées pour l'appréciation de l'ETP, il faut plus particulièrement signaler la version simplifiée de la formule de Penman, due à Brochet et Gerbier [4]. Celle-ci a été testée sur une dizaine d'années et donne des résultats satisfaisants pour de nombreuses cultures de la région méditerranéenne. Elle est très couramment utilisée dans le sud de la France pour la pratique des *avertissements* à l'irrigation, par laquelle des informations valables localement sont distribuées périodiquement aux irrigants afin de les conseiller sur les volumes d'eau à apporter aux plantes [5].

1.3.4 Quantité d'eau à apporter aux plantes

1.3.4.1 Quantités théoriques

Les quantités d'eau théoriques à apporter aux plantes sont calculées en soustrayant de l'ETP les valeurs de la pluie utile définie dans l'étude climatologique ([§ 1.2.2](#)).

1.3.4.2 Fonction de production de l'eau d'irrigation et quantités pratiques

D'une manière générale, on constate, dans les réseaux d'irrigation avec vente de l'eau au volume, que les irrigants apportent aux plantes des quantités d'eau inférieures aux valeurs théoriques. Cette pratique se justifie dès lors que l'on considère la *fondation de production de l'eau d'irrigation*.

On trouvera, à titre d'exemple, sur la figure 1 une courbe relative aux variations de la production de sorgho selon les quantités d'eau annuelles apportées. Les quantités maximales apportées correspondent à l'évapotranspiration mesurée ETM qui constitue l'évapotranspiration maximale de la culture dans les conditions locales. Cette valeur résulte d'une expérimentation où l'on assurait une humidité du sol proche de l'humidité équivalente ([§ 1.1.3.1](#)). Il s'agit donc d'une approximation par défaut de l'ETP.

L'examen de cette courbe met en évidence les deux points suivants :

- l'*optimum de production* (production maximale) est obtenu pour un apport d'eau inférieur à l'ETM (dans le cas présent pour 82 % de l'ETM) ;

Tableau 3 – Coefficient K pour la formule de Blaney-Criddle [1]

Cultures	Valeur de K	
	Zone côtière	Zone aride
Cultures maraîchères	0,60	
Tomates	0,70	
Haricots	0,60	0,70
Pommes de terre	0,65	0,75
Betteraves à sucre	0,65	0,75
Maïs	0,75	0,85
Blé, orge, avoine	0,75	0,85
Sorghos	0,70	
Luzerne	0,80	0,85
Trèfle blanc	0,80	0,85
Pâturages	0,75	
Arbres fruitiers à feuilles caduques	0,60	0,70
Citrons	0,50	0,65

Des études plus récentes [2] ont conduit à considérer le coefficient K comme produit de deux coefficients élémentaires :

$$K = K_t K_c$$

avec K_t coefficient *climatique* rattaché à la température moyenne de l'air t (en degrés Celsius) :

$$K_t = 0,031 t + 0,24$$

K_c coefficient *cultural* dépendant du stade végétatif de la culture, déterminé pour les cultures suivantes : vigne, céréales, sorgho et maïs, luzerne, prairie pâturée, pomme de terre, melon, tomate, haricot, plantes potagères diverses.

L'application de la formule précédente permet de déterminer les valeurs *mensuelles* de l'ETP. À l'intérieur d'un mois donné, les besoins sont inégalement répartis. Criddle a indiqué les valeurs du facteur de correction par lequel il convient de multiplier l'ETP journalière moyenne du mois de pointe pour obtenir le maximum journalier à envisager. Ce *facteur correctif de pointe* est fonction de la dose d'arrosage (tableau 4).

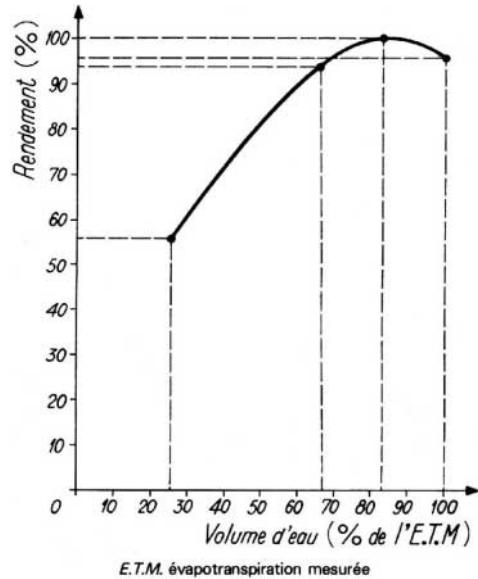


Figure 1 – Variation de la production de sorgho en fonction des quantités d'eau apportées

— l'*optimum économique* correspondrait à des apports encore inférieurs : au voisinage du point de production maximale, les derniers mètres cubes d'eau apportés impliquent des coûts (achat d'eau et mise en œuvre des irrigations) qui ne sont compensés que par des gains minimes sur la production.

Cela explique la surestimation fréquente des quantités d'eau qui seront effectivement apportées aux cultures. Et, pour les régions où l'eau constitue une ressource limitée, il semble économiquement souhaitable de concevoir les aménagements pour des apports annuels de l'ordre des 2/3 ou des 3/4 seulement des besoins théoriques [7].

1.4 Ressources et qualité des eaux

1.4.1 Ressources exploitables

L'étude des ressources exploitables constitue, bien sûr, une étude préliminaire fondamentale. Sous l'angle de l'examen des quantités disponibles, il s'agira d'études hydrogéologiques (exploitation de nappes souterraines, articles *Géophysique appliquée au génie civil* [C 224] et *Diographies et géophysique de forage* [C 225]) ou hydrologiques (exploitation des eaux de surface : fil de l'eau, barrages, retenues collinaires, article *Barrages* [C 5 555]) que nous ne développerons pas dans cet exposé.

1.4.2 Conditions juridiques du prélèvement

Il ne suffit pas de constater que la ressource existe et est disponible pour que l'eau puisse être prélevée pour l'irrigation. Selon les pays, les réglementations diffèrent en ce domaine, mais les textes existants sont d'autant plus anciens, détaillés et complexes que l'eau y est un bien plus précieux.

Le droit français [18] [19] soumet à autorisation administrative le prélèvement des *eaux courantes*. Les conditions de prélèvement sont déterminées en fonction de la nature du cours d'eau (domaniale ou non domaniale) et compte tenu des autres usages de l'eau. Dans certains cas, l'autorisation de prélèvement peut être assortie de l'obligation de constituer des réserves de régulation du débit écoulé.

Pour ce qui concerne les *eaux souterraines*, les textes en vigueur soumettent à déclaration tout prélèvement d'un débit supérieur à 8 m³/h. Pour certaines nappes souterraines particulièrement sollicitées, les textes (décret-loi du 8 août 1935 et textes subséquents) ont prévu un régime d'autorisation préalable des prélèvements. Le propriétaire du fonds sur lequel jaillit une *source* peut l'utiliser comme bon lui semble, sous réserve de préserver les droits des propriétaires des fonds inférieurs.

Les *eaux pluviales* appartiennent au propriétaire du fonds sur lequel elles tombent. Celui-ci a donc toute faculté pour les recueillir, les emmagasiner et les employer comme bon lui semble.

Au niveau national, les attributions en matière de prélèvement d'eau ont été confiées au ministre de la Qualité de la Vie, qui utilise pour leur exercice les services centraux, régionaux, et départementaux des ministères de l'Agriculture, de l'Équipement et de l'Industrie. Il conviendra donc de s'adresser à ces services pour éclairer plus complètement les questions réglementaires susceptibles de se poser dans la mise au point d'un projet.

1.4.3 Qualité des eaux d'irrigation

1.4.3.1 Problème de la salinité

Parmi les différents caractères physico-chimiques d'une eau, la salinité en constitue l'aspect le plus important en irrigation [6].

Les eaux chargées de sels dissous se trouvent confrontées, lors de leur épandage, au complexe absorbant du sol ayant sa propre concentration en sels. Une accumulation des sels dans le sol peut se produire, qui est susceptible de ralentir la croissance des végétaux avec baisse des rendements, pouvant entraîner le dépérissement.

1.4.3.2 Limites admissibles

Deux paramètres permettraient d'apprécier, pour une étude sommaire, les risques dus à la salinité.

— La *conductivité électrique* mesurée à 25 °C rend compte de la salinité globale des eaux, et le tableau 5 présente les contraintes résultant pour l'irrigation des différentes plages de salinité.

Tableau 5 – Contraintes liées à la salinité des eaux

Conductivité électrique CE (S/m)	Salinité des eaux	Contraintes
$CE \leq 0,025$	C_1 faible salinité	Utilisables pour la plupart des cultures et la plupart des sols.
$0,025 < CE \leq 0,075$	C_2 moyenne salinité	Utilisées avec lessivage modéré. Pas de précautions spéciales pour les plantes moyennement tolérantes aux sels.
$0,075 < CE \leq 0,225$	C_3 forte salinité	Même avec drainage convenable, surveiller la salinité du sol. Utilisables pour les cultures tolérantes aux sels.
$0,225 < CE \leq 0,5$	C_4 très forte salinité	Pas utilisables normalement. Lessivage des sols nécessaire.
$0,5 < CE \leq 2$	C_5 extrême salinité	Utilisables seulement pour l'irrigation des sables.
$2 < CE \leq 2,25$		Seulement pour les palmiers.
$CE > 2,25$		Strictement inutilisables.

— Si l'eau est riche en sodium, celui-ci peut se fixer dans le complexe du sol et exercer alors une action défloculante. On évalue la proportion de sodium ou *sodium absorption ratio* (SAR) pour connaître le risque alcalin, en comparant la concentration de Na^+ et celle des ions Ca^{++} et Mg^{++} qui sont bénéfiques :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Le *risque alcalin* est lié à la concentration totale de sels, et l'on a pu définir quatre catégories liées au risque alcalin (tableau 6).

Tableau 6 – Contraintes liées au risque alcalin

Risque alcalin	Contraintes
S_1 eaux faiblement sodiques	Utilisables partout. Danger faible.
S_2 eaux moyennement sodiques	Danger pour tous les sols à texture fine. Utilisables pour les sols à texture grossière ou les sols organiques très perméables.
S_3 eaux fortement sodiques	Dangereuses, exigent : — bon drainage ; — fort lessivage ; — addition de matière organique.
S_4 eaux très fortement sodiques	Inutilisables, sauf cas particuliers.

Le diagramme (figure 2) permet une classification des eaux d'irrigation par croisement des valeurs obtenues pour la conductivité et le SAR.

1.5 Topographie

1.5.1 Documents topographiques nécessaires

Au niveau d'une étude générale d'un aménagement, on pourra se contenter d'un plan coté à l'échelle du 1/20 000 ou du 1/25 000. Des photographies aériennes en constituent un complément précieux. À cette échelle, on pourra dégrossir le tracé et l'implantation des ouvrages principaux, et esquisser le schéma d'alimentation des différents casiers du périmètre.

Au niveau de l'élaboration d'un projet de réalisation, il sera nécessaire de disposer :

— pour les **ouvrages principaux** : d'un levé topographique à l'échelle du 1/2 000 d'une bande de terrain le long du tracé préliminaire retenu, bande d'autant plus large que le terrain sera plus plat ; ce document sera accompagné de levés de détail au 1/500 de points particuliers de l'ouvrage ;

— pour les **réseaux** : un levé au 1/5 000 sera suffisant pour les réseaux de distribution par canalisation sous pression et irrigation par aspersion ; un levé au 1/2 000 est nécessaire pour les réseaux à distribution gravitaire ; dans les deux cas, les implantations définies sur le plan coté sont à compléter par un levé précis des profils en long sur le tracé des conduites ou canaux ; enfin, des levés détaillés au 1/500 peuvent être nécessaires pour l'implantation d'ouvrages particuliers.

1.5.2 Étude topographique

Dès l'étude générale, une étude des documents topographiques disponibles peut permettre de dégager des orientations ou des contraintes pour la conception de l'aménagement. Ainsi, on pourra

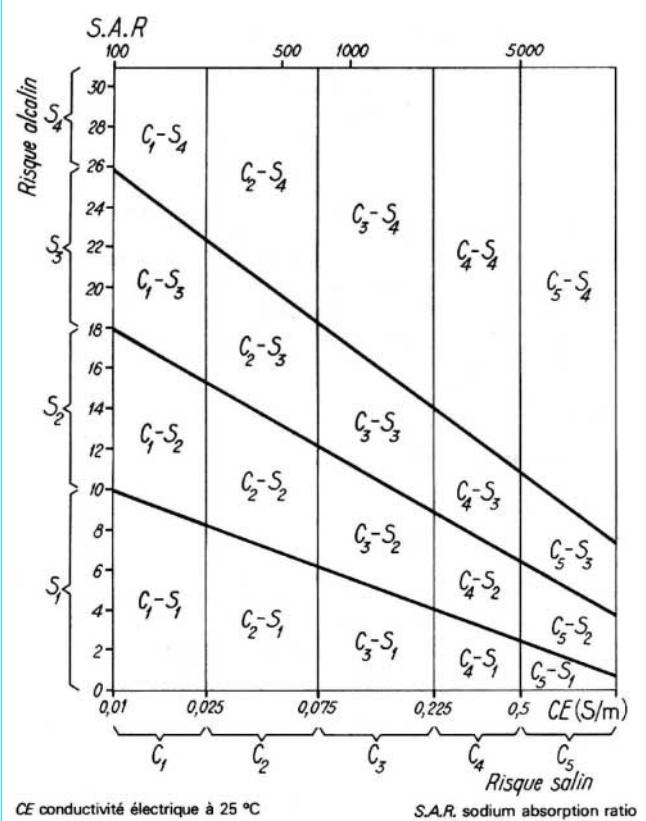


Figure 2 – Diagramme de classification des eaux d'irrigation

porter une appréciation sommaire sur le coût relatif de la desserte des différentes zones du périmètre, qui sera d'autant plus élevé que seront importantes la distance à la ressource en eau et la côte du terrain.

L'histogramme des surfaces en fonction des cotes de desserte (établi pour l'ensemble du périmètre, et éventuellement des sous-ensembles de celui-ci) pourra mettre en évidence des zones marginales de faible surface et de cote élevée pour lesquelles des solutions particulières doivent être envisagées (station de reprise, desserte à faible pression dans le cas d'une irrigation par aspersion, non-desserte).

2. Programme d'aménagement

2.1 Agriculture existante

2.1.1 Objectifs

Les études et enquêtes de terrain relatives à l'agriculture existante ont pour objets :

— de fournir de nouveaux éléments d'appréciation sur les aptitudes relatives des différentes zones du périmètre à une mise en valeur par l'irrigation ;

— de définir la situation de référence, par rapport à laquelle une nouvelle situation créée par un aménagement devra être appréciée.

2.1.2 Enquêtes agricoles et foncières

Les enquêtes agricoles et foncières comporteront trois volets principaux :

- la **structure agricole**, analysée essentiellement à travers le mode de faire-valoir (direct, fermage, métayage), la dimension des exploitations et le morcellement ;
- l'**occupation actuel du sol** avec les cultures pratiquées ;
- l'**accueil à l'irrigation** apprécié par sondages.

Les éléments obtenus par les enquêtes agricoles et foncières seront cartographiés. Une carte de synthèse pourra être établie, présentant un découpage du périmètre en zones à potentialités homogènes et hiérarchisées, sous cet angle spécifique.

2.1.3 Exploitations types

Cette connaissance du milieu débouchera sur l'établissement d'une typologie sommaire des exploitations, rendant compte de manière schématique de la diversité des situations rencontrées.

Pour ces exploitations types, une étude d'économie fermière ([§ 3.4](#)) établira le budget type d'exploitation dans la situation actuelle, avec l'évolution éventuelle prévisible sans aménagement. Il s'agit là de la situation de référence pour toute hypothèse d'aménagement nouveau.

2.1.4 Contexte économique

Tout projet important doit, bien sûr, être replacé dans le contexte économique régional ou national dans lequel il s'insère. L'étude des relations entre le projet et son environnement portera en particulier sur les marchés potentiels susceptibles de constituer un débouché pour un accroissement de production agricole et sur l'adéquation des circuits existants de transformation et de commercialisation.

2.2 Plan de développement agricole

2.2.1 Hypothèses

Les objectifs assignés à un aménagement ne sont pas réductibles au seul développement de la production agricole ([§ 3.2.1](#)). Mais ce sont les hypothèses adoptées pour le plan cultural du périmètre qui conditionnent la conception des équipements.

Ces hypothèses fondamentales comportent deux aspects :

- le système de production après la période d'adaptation ;
- le rythme de développement dans le temps des irrigations pendant la période d'adaptation.

2.2.2 Superficies mises en jeu

Précisons tout d'abord quelques définitions relatives aux superficies mises en jeu par un aménagement.

■ La **surface totale** ou géographique d'un périmètre est la superficie située à l'intérieur d'un contour définissant le périmètre d'étude ; elle est obtenue par planimétrage.

■ La **surface dominée** est la surface située à l'intérieur du périmètre d'étude, et dont les limites sont fixées pour un type donné d'équipement hydraulique ; elle concerne toutes les zones pouvant techniquement être desservies en eau par le système hydraulique envisagé.

■ La **surface agricole utile** (SAU) est la partie de la surface dominée concernant des terres susceptibles de porter des cultures.

Au niveau d'une étude générale, la SAU est estimée à partir de la surface dominée, avec abattement de l'ordre de 15 % pour les chemins, habitations, équipements divers. Les zones boisées éventuelles ou pédologiquement inaptes à la culture ne font pas partie de la SAU.

Au niveau d'un projet, la SAU est calculée par le cumul de la surface des parcelles cadastrales de la zone étudiée susceptibles de porter des cultures.

■ La **surface équipée** est la partie de la SAU que le système hydraulique projeté ou réalisé permet de desservir (sans aucun équipement collectif complémentaire) ; il s'agit donc là d'une surface spatialement définie, à l'intérieur de laquelle seront localisées les irrigations.

La surface équipée est souvent égale à la SAU, mais peut lui être inférieure : n'en feront pas partie les zones de la SAU pédologiquement peu aptes à valoriser un réseau d'irrigation.

La surface équipée est une notion dynamique, pouvant évoluer dans le temps au fur et à mesure des travaux réalisés.

■ La superficie irriguée

● Au niveau de la *conception d'un aménagement*, la superficie irriguée n'a pas de définition spatiale ; il s'agit simplement de la valeur maximale qui, par hypothèse, est susceptible d'être effectivement mise à l'irrigation. La superficie irriguée est à définir selon les deux modalités suivantes :

- superficie irriguée chaque année : il s'agit d'un cumul des superficies prévues pour chaque culture irriguée de l'assoulement annuel ; cette première estimation prend en considération les hypothèses éventuelles relatives à la pratique de plusieurs cultures successives sur un même sol ; elle peut donc, en théorie, être supérieure à la superficie équipée ; elle permettra de calculer les besoins annuels en eau d'irrigation ;

- superficie irriguée à la période de pointe : il s'agit des superficies relatives aux seules cultures irriguées pendant la période de pointe ; la superficie irriguée à la période de pointe est toujours inférieure à la SAU ; le rapport de la superficie irriguée en pointe à la SAU dépasse rarement 80 % ; c'est cette définition de la superficie irriguée qui sera utilisée pour calculer les besoins en eau de la période de pointe des irrigations.

● Au niveau de l'*exploitation d'un réseau d'irrigation*, la superficie irriguée peut être définie annuellement par enquêtes, afin de suivre l'évolution du réseau ; la notion de superficie irriguée fait alors référence à des parcelles spatialement définies chaque année, qui auront bénéficié d'au moins une application d'eau.

2.2.3 Système de production après la période d'adaptation

La typologie des exploitations du périmètre, établie pour caractériser la situation de l'agriculture actuelle, sera généralement utilisée comme base de travail. Pour chacune de ces exploitations types, on cherchera à définir l'évolution des systèmes de production rendue possible par l'aménagement, et compte tenu des contraintes qui les concernent.

Ce travail constitue, en fait, l'étude d'économie fermière qui sera traitée ultérieurement ([§ 3.4](#)).

À partir des hypothèses retenues pour les exploitations types, on passera facilement à l'ensemble du périmètre. Les hypothèses globales de répartition culturelle seront souvent ramenées à l'hectare avec :

- le rapport S_i/S_e de la superficie irriguée à la superficie équipée (estimation pour l'année, et pour la période de pointe) ; ce ratio est caractéristique de l'intensification envisagée ;

- la proportion occupée par chaque culture dans le total irrigué.

Ces hypothèses seront valables pour l'ensemble du périmètre si celui-ci est suffisamment homogène. Elles seront établies zones par zones dans le cas où les études préliminaires auraient mis en

évidence des disparités importantes d'aptitude. Il conviendrait alors de synthétiser l'ensemble des critères d'appréciation (pédologie, climatologie, enquêtes agricoles et foncières, § 1.1, 1.2 et 2.1.2) pour proposer un découpage en zones homogènes.

2.2.4 Rythme de développement pendant la période d'adaptation

Il est nécessaire de tenter d'apprécier le délai d'adaptation qui sera requis pour atteindre la situation finale envisagée. Cette hypothèse rejaillit directement :

- sur l'estimation de la rentabilité de l'aménagement ;
- sur la conception technique des équipements, lorsque l'on anticipe un développement assez lent de la demande (possibilité de fractionnement dans le temps des équipements tels que stations de pompage, conduites de gros diamètres, réservoirs en béton).

Le développement du périmètre doit être apprécié à travers les deux aspects suivants :

- la progression des superficies irriguées, traduite par l'évolution du rapport d'intensification S_i/S_e ;
- la progression des rendements, liée aux délais nécessaires aux agriculteurs pour maîtriser la technique d'irrigation utilisée.

La rapidité du développement d'un périmètre sera fonction d'un ensemble de paramètres interdépendants, et relatifs au contexte socio-économique. Citons en particulier les points suivants :

- adaptation des marchés et circuits de commercialisation ;
- existence d'institutions financières permettant aux agriculteurs le financement des investissements complémentaires et des fonds de roulement nécessaires pour le passage à la culture irriguée ;
- disponibilité en main-d'œuvre suffisante ;
- existence ou non d'une tradition régionale de la pratique de l'irrigation, d'organismes de vulgarisation et de formation adéquats.

La diversité des conditions locales et les difficultés d'appréhension des paramètres en jeu rendent fort délicate l'élaboration des hypothèses relatives au rythme de développement des aménagements.

Une étude de la Banque Européenne d'Investissement [8] analysant des données statistiques d'exploitation relatives à différents périmètres du bassin méditerranéen conduisait aux conclusions suivantes :

- d'une manière générale, les superficies irriguées après la période d'adaptation portent sur les deux tiers seulement, et au maximum les 85 %, du territoire équipé ;
- un délai de l'ordre de 6 à 10 ans est à envisager pour atteindre ce niveau d'intensification.

En ce qui concerne la progression des rendements [7], il faut envisager, pour les cultures annuelles, un niveau initial de production de l'ordre de 50 % des niveaux prévus après la période d'adaptation. Pour les cultures permanentes, ces pourcentages sont de l'ordre de 10 à 30 %. Le délai nécessaire à l'obtention d'un niveau optimal sera de 5 à 15 ans selon le type de production.

2.3 Schéma d'aménagement

2.3.1 Études techniques

On trouvera dans l'article *Systèmes d'irrigation* [C 5 250] les méthodes de calcul permettant de dimensionner un aménagement et d'en établir le projet détaillé. Au stade de l'élaboration d'un programme, les études techniques seront plus légères et pourront s'appuyer sur des méthodes approchées. Il ne s'agit, en effet, que d'établir un schéma de l'aménagement permettant :

- de programmer les réalisations selon un rythme compatible avec les possibilités financières, d'une part, et les possibilités techniques, d'autre part (potentiel de réalisation des entreprises, capacité de contrôle de l'organisme responsable de l'aménagement) ;

- d'examiner les options techniques envisageables, et de choisir celle qui fera l'objet d'une étude détaillée ;
- d'estimer les coûts prévisionnels de l'aménagement, ce qui suppose des prédiminements sommaires permettant l'utilisation de *prix d'ordre*.

2.3.2 Estimation des coûts

Afin de permettre une estimation rapide des différentes variantes envisagées, il sera nécessaire d'élaborer deux types de prix d'ordre d'équipement :

- des prix d'ordre relatifs à chaque type d'équipement (canaux, galeries, station de pompage, réservoirs, etc.), où l'on cherchera à exprimer le coût de l'équipement en fonction d'une ou deux dimensions caractéristiques (diamètre d'une conduite ou d'une galerie, puissance d'une station de pompage, volume et hauteur d'un réservoir, etc.) ;
- des prix d'ordre relatifs au coût à l'hectare équipé de l'aménagement complet d'une zone du périmètre d'importance limitée (de l'ordre de la centaine ou de quelques centaines d'hectares) ; ce coût sera apprécié à partir d'une étude détaillée portant sur une zone pilote représentative des conditions moyennes de la mise en valeur.

Ainsi, les études de dimensionnement sommaire des équipements pourront, pour l'ensemble du périmètre, être limitées aux ouvrages principaux et à la partie amont des réseaux de distribution (canalisations de diamètre supérieur ou égal à 450 mm dans le cas des réseaux sous pression, canaux secondaires dans le cas des réseaux de surface). La partie aval des réseaux de distribution et le coût d'aménagement des parcelles seront estimés forfaitairement à partir des résultats de l'étude détaillée portant sur la zone pilote.

2.3.3 Échéancier prévisionnel des investissements

Les estimations du coût de l'aménagement donneront lieu à l'établissement de l'*échéancier prévisionnel des investissements* à consentir, compte tenu de la programmation envisagée pour la réalisation. Afin de permettre les calculs économiques et financiers ultérieurs, cet échéancier devra être ventilé :

- selon le **type de financement** des ouvrages ; ainsi, on regroupera souvent de manière séparée les investissements relatifs :
 - aux équipements hydrauliques collectifs (ouvrages généraux et réseaux de distribution),
 - aux équipements concernant les exploitations agricoles (préparation du terrain, matériel d'irrigation),
 - à la mise en place éventuelle de l'organisme de gestion de l'aménagement,
 - aux équipements éventuels d'infrastructure générale (voies de communication, etc.) ;
- selon la **nature des ouvrages** vis-à-vis des charges de maintenance à prévoir ; on verra, en effet, ultérieurement (§ 3.2.2.1) que les frais de maintenance sont appréciés par catégorie d'ouvrage. Les équipements seront donc regroupés par catégories homogènes. À titre d'exemple, on trouvera au tableau 7 la ventilation adoptée par les sociétés françaises d'aménagement régional.

2.4 Choix d'une technique d'irrigation

2.4.1 Techniques d'irrigation et conception d'ensemble

Parmi les différentes options techniques qui sont à envisager lors de l'élaboration d'un schéma d'aménagement, le choix de la technique d'irrigation constitue un point primordial. D'abord parce que l'adéquation de celle-ci aux conditions du milieu naturel et du milieu socio-économique conditionne la réussite de l'aménagement.

Tableau 7 – Ventilation des investissements par catégories homogènes vis-à-vis des frais de maintenance

N°	Désignation de la rubrique	Nomenclature des ouvrages et matériels
1	Génie civil	Ouvrages partiteurs, cheminées d'équilibre, galeries, canaux revêtus, chemins d'exploitation, ouvrages d'art, barrages en terre ou en béton, puits et forages, aqueducs.
2	Bâtiment et petit génie civil	Centre de télécommande, stations de pompage et de traitement, cités d'exploitation, bureaux, réservoirs semi-enterrés et surélevés, canaux préfabriqués autoportants.
3	Canaux en terre non revêtus	Canaux et rigoles, fossés d'assainissement.
4	Canalisations	Conduites de toutes natures, siphons.
5	Gros appareillage	Ponts roulants, dégrilleurs sur ouvrages généraux, vannes secteurs ou wagons, vannes sur grosses conduites (par exemple $\varnothing \geq 400$ mm), batardeaux, appareils de protection et compteurs généraux, appareils de commande des gros matériels hydrauliques (sur ouvrages généraux et réserves), réservoirs métalliques.
6	Petit appareillage	Vannes et robinetterie des réseaux et des stations de pompage, bornes d'irrigation, compteurs, branchements particuliers, appareils de protection des réseaux (antibâliers, clapets, ventouses, etc.), appareillage hydraulique des stations de pompage, filtres rotatifs et crépines à dégrillage automatique.
7	Matériel tournant en utilisation continue	Moteurs et pompes des stations de pompage fonctionnant toute l'année, servomoteurs des vannes régulatrices, groupes compresseurs.
8	Matériel tournant en utilisation discontinue	Moteurs et pompes des stations de pompage ne fonctionnant qu'une partie de l'année pour l'irrigation, moteurs et pompes de secours, groupes électrogènes.
9	Matériel d'automatisme et de régulation, appareillage électrique, filerie et câblerie	Appareils électroniques de télémesure, de contrôle, de télécommande et de régulation ; capteurs ; relais ; appareillage électrique de distribution ; interrupteurs, disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs ; matériel téléphonique.

Ensuite parce que la technique adoptée pour l'irrigation à la parcelle conditionne partiellement la conception du réseau collectif de distribution et des ouvrages de transport.

■ Les réalisations existantes relatives à l'**irrigation de surface** correspondent généralement à des réseaux de distribution par canaux à surface libre, avec distribution au *tour d'arrosage* (ou *tour d'eau*) et adduction par des ouvrages de transport en régulation par l'amont. On peut cependant envisager des ouvrages de transport équipés d'une régulation plus élaborée (régulation dynamique ou régulation par l'aval) afin de limiter les pertes en eau de l'aménagement (article *Systèmes d'irrigation* [C 5 250]).

Dans la même optique, les réseaux de distribution pourraient être réalisés avec des conduites livrant l'eau sous très faible pression (quelques dixièmes de bar) à l'entrée des parcelles à irriguer. Mais, même dans ce dernier cas, il n'est guère envisageable de concevoir une distribution à la demande, étant donné l'importance des débits mis en jeu.

■ L'**irrigation par aspersion** s'est développée avec des réseaux collectifs constitués par des conduites en charge, livrant l'eau à la demande et sous des pressions élevées (de l'ordre de 4 bar). Les ouvrages de transport sont généralement équipés d'une régulation élaborée, permettant de faire face aux fluctuations de la demande.

À côté de ce schéma courant, on peut songer à d'autres solutions d'ensemble : ainsi, le réseau de distribution, tout en restant constitué de canalisations sous pression élevée, pourrait être conçu pour un fonctionnement au tour d'arrosage en vue de diminuer les investissements.

Dans le cas de parcelles à desservir de grande taille (plusieurs dizaines d'hectares), on peut aussi songer à livrer l'eau sans pression en tête de chaque parcelle ou petit groupe de parcelles, qui seront alors irriguées avec surpresseur permettant le choix des appareils d'aspersion les mieux adaptés (par exemple, appareils automoteurs nécessitant des pressions de fonctionnement très élevées : 6 à 9 bar). Avec un tel principe de livraison, le réseau collectif peut alors être constitué soit de canaux, soit de conduites en charge, selon les conditions économiques locales et l'importance accordée au problème des pertes en eau.

■ Avec l'**irrigation localisée**, l'eau d'irrigation doit être disponible en tête de parcelle sous moyenne pression (de l'ordre de 1 à 2 bar). Elle serait délivrée par un réseau de distribution avec conduites en charge pour une irrigation localisée généralisée sur tout le périmètre.

2.4.2 Critères d'appréciation

Chaque technique d'irrigation (de surface, par aspersion, localisée ; article *Systèmes d'irrigation* [C 5 250]) comporte en fait une large gamme de modalités de mise en œuvre, au sein de laquelle devront être recherchés les dispositifs les mieux adaptés à des conditions spécifiques données. Nous nous limiterons ici à l'examen d'un certain nombre de critères d'appréciation à prendre en considération.

■ L'irrigation localisée n'est économiquement envisageable que pour des cultures à faible densité de pieds : vergers, vigne. Mais elle est seule adaptée à des eaux à très forte salinité.

En dehors de ces conditions particulières, c'est entre irrigation de surface et irrigation par aspersion qu'un choix devra être effectué.

■ Il peut arriver que des contraintes techniques déterminent ce choix. Ainsi l'irrigation de surface sera obligatoire pour le *riz* (bassins). Elle sera à préférer à l'aspersion avec des eaux salées sur des plantes au feuillage sensible au sel ; de même pour des zones qui seraient trop ventées.

Par contre l'irrigation par aspersion s'imposera pour des terrains très vallonnés. Elle sera à préférer sur des sols très perméables.

■ Dans la grande majorité des cas, irrigation de surface et irrigation par aspersion constituent deux options techniquement envisageables. Le choix se portera sur la technique la mieux adaptée au contexte socio-économique du projet. Les éléments fondamentaux de ce choix seront les suivants.

2.4.2.1 Valeur économique de l'eau

Comme on le verra ultérieurement dans l'article *Systèmes d'irrigation* [C 5 250], les irrigations de surface conduisent à mobiliser des quantités d'eau nettement plus importantes, à l'unité de surface, que les irrigations par aspersion.

Ainsi, dans les zones arides, où les ressources en eau sont limitées et constituent un goulot d'étranglement dans le développement des superficies mises à l'irrigation, le choix de l'aspersion permet d'accroître la taille des aménagements.

Le problème peut se poser en termes différents dans des pays industrialisés où, du fait de la concurrence des différents secteurs d'activité économique pour l'utilisation des ressources en eau, il existe un *coût d'opportunité* de l'eau, ayant pour conséquence la recherche d'une économie sur les volumes utilisés.

C'est le cas, par **exemple**, de l'aménagement du Canal de Provence, dans le sud-est français, qui dérive au maximum 40 m³/s du Verdon, affluent de la Durance. Chaque mètre cube d'eau dérivé est transféré hors du bassin versant, et ainsi définitivement exclu des possibilités de turbinage sur la chaîne des usines hydroélectriques daval. Sur le plan énergétique, la valeur potentielle de l'eau dérivée avait pu être estimée à plusieurs centimes par mètre cube, ce qui fixe le coût d'opportunité de l'eau dérivée et implique la mise en œuvre de méthodes efficaces d'utilisation de l'eau.

Dans la perspective d'une économie de l'eau dérivée pour les irrigations, l'aspersion présente l'avantage non seulement d'une meilleure efficience, mais encore de faciliter une tarification fondée sur le comptage des débits et volumes effectivement utilisés par chaque irrigant. Ce dernier point est déterminant pour obtenir des agriculteurs une valorisation maximale des eaux dérivées.

2.4.2.2 Personnel d'exploitation du réseau et de mise en œuvre des irrigations

L'irrigation par aspersion avec réseau de distribution par canalisations sous pression nécessite en général moins de main-d'œuvre que l'irrigation de surface avec réseau de distribution par canaux.

■ Au niveau de la **parcelle**, la mise en œuvre de l'irrigation par aspersion nécessitera 2 à 3 h de travail par hectare pour la réalisation d'un arrosage complet, dans le cas d'une installation classique avec une couverture en matériel correspondant à 5 ou 6 postes par arrosage. Ces temps de travaux peuvent être considérablement réduits avec des équipements plus évolués : par exemple, moins d'une demi-heure par hectare et par arrosage, avec arroseurs automoteurs en grande culture.

En irrigation de surface, les temps de travaux nécessaires à la conduite des irrigations seront, eux aussi, très variables, selon la nature du dispositif (bassins, planches, raies, etc.) et la main d'eau mise en œuvre (article *Systèmes d'irrigation* [C 5 250]).

L'irrigation à la planche de cultures fourragères pourra n'exiger qu'une heure de travail effectif par hectare et par arrosage si la main d'eau utilisée est de plusieurs centaines de litres par seconde. Ce temps de travail atteindra deux à trois heures par hectare et par arrosage si le module disponible est limité à quelques dizaines de litres par seconde. Pour l'irrigation à la raie avec des mains d'eau courantes (30 à 50 l/s), les temps de travaux effectifs pourront atteindre 3 à 6 h par hectare et par arrosage selon les caractéristiques des raies.

Outre la conduite des irrigations, l'irrigation de surface nécessitera l'entretien ou la création annuelle des rigoles et levées de terre.

■ Au niveau de la gestion du **réseau collectif**, on peut admettre qu'un réseau d'irrigation par canalisations sous pression peut être exploité par un agent pour 1 000 ha de réseau.

Les réseaux d'irrigation de surface nécessitent un personnel dont le nombre est très fluctuant selon les modalités retenues pour la gestion du réseau et selon la densité des prises à desservir.

On peut citer les chiffres de 10 agents pour 1 000 ha desservis, dans le cas de réseaux à tour d'arrosage avec module fixe et forte densité de prises (de l'ordre de une à deux prises par hectare).

Mais le personnel d'exploitation pourrait être notablement réduit avec un tour d'eau organisé à module variable et une faible densité de prises que permettraient des exploitations de taille importante et peu morcelées. À la limite, pour un réseau desservant des parcelles de taille suffisante pour qu'une distribution continue puisse être mise en place, le personnel d'exploitation pourra être réduit à un niveau comparable à celui d'un réseau par canalisations sous pression.

Ainsi l'*extrême diversité des conditions de l'irrigation* rend inutiles des normes passe-partout permettant de comparer les niveaux de main-d'œuvre requis par les différents types de réseaux. Ceux-ci devront être appréciés cas par cas.

Il reste que, dans la majorité des situations, les systèmes d'irrigation conçus en vue de la pratique de l'irrigation par aspersion nécessitent moins de main-d'œuvre que les systèmes gravitaires. Le coût d'opportunité de cette main-d'œuvre pourra ou non donner à cet aspect du choix à effectuer un caractère décisif. Dans les pays industrialisés, et particulièrement en France, le niveau élevé de la rémunération du travail a constitué l'un des facteurs importants de l'évolution vers la généralisation des réseaux collectifs d'irrigation par aspersion. Dans le cadre même de l'aspersion, on note d'ailleurs une tendance très nette au renforcement du matériel d'irrigation à la parcelle en vue de diminuer les temps de travaux de manutention du matériel.

La charge de travail nécessaire pour conduire l'irrigation à la parcelle doit d'ailleurs être appréciée quantitativement, mais aussi qualitativement : l'irrigation par aspersion nécessite un travail intensif pour le déplacement du matériel, mais peut être effectuée pratiquement sans surveillance pendant le poste d'arrosage. L'irrigation de nuit peut ainsi être pratiquée facilement, dès lors que la pluviométrie et la dose arrosage permettent de réaliser des postes suffisamment longs. Par contre, l'irrigation de surface nécessite, outre le travail effectif de mise en eau des éléments d'irrigation, une *astreinte permanente* de l'irrigant (nuit et jour, semaine ou dimanche) pour une surveillance périodique du dispositif d'arrosage en cours. Et les temps de travaux effectifs, pour lesquels nous avons donné précédemment des ordres de grandeur, se trouvent ainsi répartis sur la totalité des vingt-quatre heures de la journée et des sept jours de la semaine, ce qui est jugé de plus en plus inacceptable.

2.4.2.3 Rapidité de mise en production et formation des irrigants

Les données concernant les *rendements* des cultures obtenus en irrigation gravitaire et par aspersion sont contradictoires. Les résultats d'études comparatives effectuées en Italie et en Israël (mais grain, tomates précoces, luzerne) faisaient état [15] d'une différence de rendement de 7 à 13 %, en faveur de l'aspersion pratiquée à la demande.

Des essais menés sur des tomates en France (zone maraîchère de l'Étang de Berre) conduisaient [16] à une différence de 30 % en faveur de l'aspersion. Plus récemment [17], des études très fouillées relatives au maïs et au soja en Bulgarie ont montré que, *pour des quantités d'eau annuelles égales et un nombre d'arrosage donné, la méthode d'irrigation n'a presque aucune influence sur les rendements*.

C'est, en fait, l'arrosage à faible dose et forte périodicité qui est le facteur déterminant de l'accroissement des rendements (pouvant atteindre 10 à 15 %). Les arrosages par irrigation de surface au tour d'eau sont ainsi pénalisés par rapport aux possibilités de l'irrigation par aspersion à la demande.

En fait, dans le cadre d'une comparaison économique des différentes solutions, la question des rendements maximaux susceptibles d'être atteints est secondaire devant le problème de la *rapidité de mise en production optimale du périmètre* ; dans un bilan actualisé, les premières années de vie interviennent, en effet, avec un poids déterminant.

Les réseaux d'irrigation par aspersion se développent-ils plus vite que les réseaux d'irrigation de surface ? C'est là une hypothèse couramment adoptée dans les études de faisabilité, avec un délai de mise en production optimale de l'ordre de 50 % plus élevé en irrigation par aspersion qu'en irrigation de surface.

Il est vrai que la mise en œuvre de l'irrigation de surface requiert une grande expérience : il faut *conduire* la main d'eau dans les éléments d'irrigation, apprécier visuellement les débits à admettre et assurer leur réglage, détecter et corriger les déficiences du système de répartition (rioles, levées de terre). À l'inverse, la mise en œuvre de l'irrigation par aspersion ne nécessite que des manipulations de matériel, et permet d'obtenir facilement une bonne uniformité de l'arrosage.

Dans les régions où l'irrigation ne constitue pas une tradition culturelle, la rapidité de mise en production d'un périmètre sera liée aux capacités de formation des agriculteurs par l'administration ou l'organisme de gestion concerné. Et il ne paraît pas impossible qu'un réseau d'irrigation de surface se développe aussi vite qu'un réseau d'irrigation par aspersion, dès lors que des moyens importants pourraient être consacrés à la formation des irrigants.

2.4.2.4 Distribution au tour d'eau ou à la demande

L'institution d'un tour d'eau rigide, généralement associé aux irrigations de surface, constitue pour les irrigants une contrainte d'autant plus mal acceptée :

— qu'il s'agit de périmètre constitué d'une majorité de petites exploitations individuelles pratiquant une polyculture : sur le plan technique, les normes de distribution retenues à l'échelle du réseau ne peuvent être adaptées à chaque situation spécifique ; l'obligation d'arroser aux jours et aux heures fixés constituera une gêne dans l'organisation du travail sur l'exploitation ;

— que l'évolution du contexte socio-économique conduit à rejeter des conditions de travail difficiles : irrigation de nuit ou pendant les jours fériés, nécessitant une astreinte de l'irrigant, sinon un travail effectif permanent.

L'irrigation associée à la distribution à la demande peut ainsi apparaître comme une solution adaptée à de nouvelles exigences des irrigants.

2.4.2.5 Achats en devises

Dans la comparaison économique des solutions alternatives, le coût en devises de l'investissement à mobiliser pourra constituer un critère d'appréciation important : pour des pays non industrialisés, les aménagements fondés sur la pratique de l'aspersion pourront ainsi entraîner des importations considérables (asperseurs, canalisations, équipement des réseaux, électromécanique des stations de pompage).

2.4.2.6 Conclusion

Lorsque ces solutions alternatives sont techniquement envisageables, le choix entre système d'irrigation par aspersion et système d'irrigation de surface peut être axé sur l'analyse économique de la rentabilité des variantes en compétition. Mais la rentabilité directe ne constituera qu'un critère de décision parmi d'autres ; l'insertion du projet dans son contexte socio-économique devra être examinée à travers un certain nombre de critères d'appréciation qui pourront être décisifs.

3. Économie et gestion des périmètres irrigués

3.1 Évaluations économiques et financières d'un programme

Les évaluations économiques et financières constituent l'aboutissement de l'étude générale d'un périmètre hydroagricole, en permettant d'apprecier la faisabilité de l'opération. Celle-ci doit être envisagée à trois niveaux différents.

— Au niveau des **exploitations agricoles**, il convient d'examiner le niveau d'intensification qu'il sera possible d'atteindre, et de comparer les charges nouvelles résultant de la modification de la structure de production à l'accroissement de la valeur de production ; la marge dégagée doit être suffisante pour constituer une forte incitation au passage à l'agriculture irriguée ; ce type d'étude concerne directement l'agriculteur qui souhaiterait mettre en place une irrigation à partir d'une ressource en eau autonome. Dans le cadre d'aménagements collectifs, il s'agira en particulier d'examiner si un niveau de tarification donné est acceptable par les irrigants. Ce volet constitue l'étude d'*économie fermière* ([§ 3.4](#)).

— Au niveau de l'**organisme de gestion** de l'aménagement, il faut étudier à quelles conditions (subventions, tarification, etc.) peut être obtenu un équilibre financier à long terme ; celui-ci permettra une saine gestion du périmètre, en dégageant en particulier les ressources nécessaires à l'entretien et la maintenance des équipements. Cette partie constitue l'étude de *rentabilité financière* de l'opération ([§ 3.3](#)).

— Au niveau de la **collectivité**, on examinera la *rentabilité économique* du programme ([§ 3.2](#)) ; celle-ci ne se réfère plus à un agent économique spécifique, mais tente au contraire d'établir un bilan global de l'opération, tous agents économiques confondus et intervenant avec un même poids. Il s'agira de comparer la totalité des coûts mis en jeu par l'opération à la totalité des avantages qui en résultent.

Alors que les deux premières optiques (étude d'*économie fermière*, étude de *rentabilité financière*) font apparaître des résultats fonctions du niveau de tarification envisagé, l'étude de *rentabilité économique* est indépendante de celle-ci : les redevances d'irrigation constituent des dépenses pour les irrigants et des recettes pour l'organisme de gestion, qui s'annulent dans le bilan global. De même, le mode de financement des investissements initiaux (*qui paie quoi*) n'intervient pas dans cette étude.

L'étude de *rentabilité économique* apparaît comme le principal critère de décision de réalisation d'un aménagement, alors que les études d'*économie fermière* et de *rentabilité financière* ont pour objet majeur de vérifier qu'une décision globalement souhaitable au niveau collectif peut être effectivement prise en charge par les agents économiques moteurs de l'opération.

Il reste que la démarche classique, consistant à valoriser les effets directs des aménagements et à les agréger en un ratio unique, ne rend compte que d'une manière extrêmement schématique des effets d'un projet. Et le calcul du taux de *rentabilité économique* doit être accompagné d'une appréciation des impacts du projet sur chacun des objectifs poursuivis.

3.2 Rentabilité économique

3.2.1 Principe de l'étude

L'étude de *rentabilité directe* sera menée en recensant l'ensemble des coûts et avantages concernant directement la réalisation de l'aménagement et la production agricole. Sur l'horizon économique considéré (généralement 50 ans), on obtient deux chroniques temporelles qui seront comparées par la technique de l'actualisation.

Le bénéfice actualisé résultant de l'aménagement sera :

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^N \frac{A_i - C_i}{(1+a)^i}$$

avec \bar{B} bénéfice actualisé sur l'horizon économique de N années,
 A_i avantages à l'année de rang i ,
 C_i coûts à l'année de rang i ,
 a taux d'actualisation.

Les coûts et avantages annuels sont supposés concentrés à la fin de l'année courante. Ces valeurs sont actualisées à la fin de l'année de rang zéro.

Le *taux de rentabilité économique interne* est le taux d'actualisation qui annule le bénéfice actualisé. Ce taux, caractéristique du projet, représente le rendement direct du capital investi dans l'opération. Il est à comparer au taux d'actualisation national défini dans le cadre d'un Plan, qui correspond à la productivité marginale du capital (en France, 10 % en francs constants, dans le cadre du 6^e Plan).

Nous exposerons ci-après le principe de l'évaluation des coûts et avantages directs d'un aménagement à leur valeur économique. Mais il convient de bien noter le caractère partiel de l'indication fournie par le taux de rentabilité interne :

- il ne prend en considération que les effets directs de l'opération ; les effets indirects et induits de l'aménagement ne sont généralement pas valorisés étant donné la complexité des mécanismes en cause ;

- il ne prend pas en considération ou ne traduit pas de manière explicite les aspects non marchands du développement, qui pourtant peuvent constituer des objectifs assignés au programme (par exemple, redistribution des revenus, augmentation du nombre d'emplois, revitalisation de régions déprimées, etc.).

3.2.2 Coûts du programme

3.2.2.1 Structure des coûts

Les coûts de l'aménagement comportent deux volets :

- les **coûts d'investissement**, qui ont été estimés lors de la phase de conception ([§ 2.3](#)) ;
- les **charges de gestion**, pour lesquelles il est d'usage de distinguer frais d'exploitation et frais de maintenance.

Les **frais de maintenance** sont ceux qui se rapportent au maintien des ouvrages en bon état de fonctionnement, c'est-à-dire :

- petit entretien courant effectué soit par le personnel propre de l'exploitant, soit par une entreprise (et en particulier visites périodiques d'entretien préventif) ;
- remplacement des pièces défectueuses ;
- grosses réparations ;
- renouvellement partiel ou total d'un ouvrage.

L'appréciation des frais prévisionnels de maintenance (entretien et renouvellement) s'effectue sur la base d'un taux moyen annuel applicable à l'investissement initial, et fonction de la nature des équipements envisagés. On trouvera ainsi au tableau 8 les taux envisagés dans les Sociétés d'aménagement régional en France, et qui correspondent aux différentes natures d'ouvrages spécifiées au tableau 7.

Les **frais d'exploitation** sont ceux qui sont nécessaires pour assurer le *mouvement des eaux* et la gestion administrative, financière et commerciale du périmètre.

— Les **frais fixes** d'exploitation (essentiellement frais de personnel) doivent être appréciés par référence à des aménagements existants comparables.

Tableau 8 – Frais de maintenance (entretien et renouvellement)

N°	Désignation de la rubrique	Durée de vie (années)	Taux annuel de renouvellement (%)	Taux annuel d'entretien (%)	Taux annuel de maintenance (%)
1	Génie civil	50	0	1	1
2	Bâtiment et petit génie civil	50	0	2	2
3	Canaux en terre non revêtus	50	0	5	5
4	Canalisations	50	0	1	1
5	Gros appareillage	50	0	2	2
6	Petit appareillage	20	5	5	10
7	Matériel tournant en utilisation continue	10	10	5	15
8	Matériel tournant en utilisation discontinue	20	5	5	10
9	Matériel d'automatisme et de régulation, appareillage électrique, filerie et câblerie	10	10	5	15

Exemple : à titre d'ordre de grandeur, on signalera que, dans le sud-est français, le personnel d'exploitation comprend environ un agent pour 1 000 ha de réseau moderne sous pression, et un agent pour 100 ha de réseau traditionnel d'irrigation de surface, avec une exploitation très suivie.

— Les **frais proportionnels** d'exploitation (essentiellement achat d'énergie de pompage) sont définis cas par cas et année par année, en fonction des volumes prévisionnels transités.

3.2.2.2 Coûts nominaux et coûts réels

Les estimations du coût du schéma d'aménagement sont des **coûts nominaux**, correspondant à des dépenses qui seront effectivement engagées pour la réalisation du projet. Mais les coûts réellement mis en jeu par la collectivité (et donc à considérer dans cette analyse économique) peuvent être notablement inférieurs aux coûts nominaux. Le calcul des coûts réels, à partir des coûts nominaux, s'effectuera en examinant les points suivants.

■ **Transferts** : certaines parties des coûts nominaux ne constituent en fait que des transferts entre agents économiques ; c'est essentiellement le cas pour les taxes et impôts divers qui ne représentent pas une consommation réelle de ressources et dont le produit revient à l'État.

■ **Coût d'opportunité** : l'appréciation des coûts des biens et services sur la base des prix du marché peut ne pas correspondre au coût économique réel chaque fois que des réglementations ou interventions économiques influent sur le processus de formation des prix. Des corrections sont souvent envisagées sur les points suivants :

— **coût d'opportunité de la main-d'œuvre** : dans les régions où le sous-emploi de la main-d'œuvre est important, le personnel non spécialisé qui sera utilisé dans le cadre de la réalisation du programme d'aménagement n'est pas détourné d'autres emplois productifs ; ainsi, les charges salariales correspondantes peuvent être supérieures au coût économique de l'utilisation de ce personnel, ce qui conduira à définir un coût d'opportunité de la main-d'œuvre banale inférieur à son coût nominal ; il en résultera des corrections dans le calcul des coûts réels, qui seront particulièrement importantes pour les travaux de génie civil ;

— **dépenses en devises** : dans les économies où la monnaie n'est pas librement convertible, les biens d'équipements importés devront être estimés, en coût réel, sur la base d'un taux de change éventuellement corrigé afin de prendre en considération la valeur réelle de la monnaie.

3.2.3 Avantages du programme

Dans le cadre d'une étude de rentabilité directe, les avantages du programme correspondront à l'accroissement de la valeur nette de la production agricole.

Par **valeur nette** de la production agricole, on entend le produit brut diminué des coûts de production qui comportent :

- les achats de biens et services (frais variables et frais fixes) ;
- les amortissements techniques ;
- la rémunération de la main-d'œuvre.

L'étude d'économie fermière ([§ 3.4](#)) conduit à une estimation de ces différents éléments pour chacune des exploitations types. On pourra donc calculer facilement les valeurs globales concernant l'ensemble du périmètre, compte tenu de la typologie sommaire des exploitations établie au début de l'étude ([§ 2.1](#)). Mais, comme pour le calcul des coûts réels, des corrections devront intervenir dans l'estimation de la valeur nette de la production agricole à prendre en considération dans cette étude économique.

■ Évaluation du produit brut : les prix courants des produits sur le marché national doivent être examinés, afin de déterminer s'ils correspondent à leur valeur économique réelle ou s'ils sont réglementés. Des prix de référence, différents des prix du marché, pourront être introduits dans l'évaluation de la valeur économique du produit brut.

■ Frais d'achat d'eau d'irrigation : les frais d'achat d'eau d'irrigation par les agriculteurs font partie lors de l'étude d'économie fermière du poste *achat de biens et services* ; or il ne s'agit là que d'un transfert entre agriculteurs et organisme de gestion du réseau collectif ; pour l'étude économique, les frais d'achat d'eau d'irrigation ne seront pas déduits du produit brut.

■ Coût d'opportunité du travail : comme lors des estimations relatives aux coûts réels de l'aménagement ([§ 3.2.2.2](#)), les appréciations relatives à la valeur nette de la production pourront prendre en considération un coût d'opportunité du travail. Ainsi, si l'on considère que l'aménagement intervient dans une zone où la main-d'œuvre agricole était nettement sous-employée, on pourra admettre qu'aucune main-d'œuvre supplémentaire n'est soustraite à d'autres secteurs de l'économie ; le coût d'opportunité de la main-d'œuvre agricole utilisée après réalisation du programme est alors égal à son revenu global actuel (coût d'opportunité nul pour le travail agricole supplémentaire créé).

Compte tenu des hypothèses retenues en ce qui concerne le développement dans le temps des irrigations ([§ 2.2](#)), on bâtira l'échéancier prévisionnel de la valeur nette de la production agricole résultant de l'aménagement. En soustrayant, année par année, la valeur nette de la production agricole obtenue sans aménagement, on obtient l'échéancier des avantages.

3.2.4 Taux de rentabilité économique interne et étude de sensibilité

L'actualisation des échéanciers de coûts et d'avantages permet de définir :

- le bénéfice actualisé du programme pour un taux d'actualisation donné ;
- le taux de rentabilité économique interne ([§ 3.2.1](#)).

Il est important de mesurer la sensibilité du résultat obtenu aux hypothèses adoptées. Compte tenu du caractère approximatif d'un grand nombre de celles-ci, il est en effet plus réaliste de proposer une fourchette de résultats.

Parmi la série de tests à effectuer, les points primordiaux concernent :

- les prix des produits agricoles ;
- la durée de la période d'adaptation.

3.3 Rentabilité financière

3.3.1 Principe de l'étude

L'étude de rentabilité financière a pour objet d'examiner les conditions dans lesquelles l'organisme de gestion de l'aménagement pourra, sous l'angle financier, assurer sa mission. Il est clair que la démarche de cette étude sera fonction de la nature juridique d'un tel organisme et de son domaine de compétence qui peut être ou non étendu aux attributions du maître d'ouvrage.

Nous nous placerons dans le cadre des hypothèses suivantes : l'organisme de gestion constitue une organisation autonome sur les plans juridique et financier ; il finance les investissements par des subventions de l'État et des emprunts à long terme ; les frais de gestion de l'aménagement et les annuités de remboursement des emprunts à long terme doivent être couverts par les recettes de vente d'eau, de manière à obtenir un équilibre financier à long terme ; des emprunts à court terme peuvent être mobilisés pour couvrir d'éventuels déficits initiaux d'exploitation.

La démarche de l'étude consistera à tester les conséquences d'un jeu d'hypothèses données concernant les taux de subvention, les caractéristiques des prêts, le niveau de tarification.

L'étude comportera quatre volets.

3.3.1.1 Plan de financement des investissements

L'échéancier des investissements (coûts nominaux) est ventilé selon le mode de financement :

- échéancier des subventions ;
- échéancier des fonds propres engagés ;
- échéancier des prêts à mobiliser.

3.3.1.2 Taux de rentabilité financière interne

L'organisme de gestion doit directement financer des investissements (partie non subventionnée des investissements), consentir des dépenses de gestion (frais de maintenance, frais d'exploitation) et encaisser des recettes (ventes d'eau).

L'actualisation de l'échéancier résultant permet de calculer le taux de rentabilité financière interne de l'opération : c'est le taux d'actualisation qui annule la valeur actualisée de l'échéancier résultant.

L'intérêt de ce calcul réside dans le fait que ce taux est indépendant du mode de financement de la partie non subventionnée des investissements. Le taux de rentabilité financière interne obtenu caractérisera :

- soit la rémunération des fonds propres engagés par l'organisme de gestion (cas où aucun prêt ne serait mobilisé) ;
- soit le taux maximal des emprunts à long terme qui doivent lui être consentis (cas où l'organisme de gestion ne dispose pas de fonds propres).

3.3.1.3 Comptes prévisionnels d'exploitation

Une fois arrêté le plan de financement, et définies les caractéristiques des emprunts éventuels contractés (taux d'intérêt, délai de remboursement, différé d'amortissement), on établira les comptes prévisionnels d'exploitation sur une période de l'ordre de 30 ans. Année par année, il s'agit de calculer le résultat brut d'exploitation défini par :

- recette de vente d'eau de l'année ;
- moins annuités de remboursement des emprunts à long terme ;
- moins annuités des frais de maintenance ;
- moins annuités des frais d'exploitation.

L'échéancier résultant comporte généralement des déficits pendant les premières années ; en effet, les systèmes de tarification retenus conduisent à adapter les redevances payées par les agriculteurs au niveau d'utilisation du réseau, qui croît pendant la période d'adaptation.

La chronique des résultats bruts d'exploitation peut être actualisée pour plusieurs taux d'actualisation. Le taux qui annule ce bilan a une signification concrète : c'est le taux maximal des emprunts à court terme qui doivent être consentis à l'organisme de gestion pour qu'un équilibre financier à long terme puisse être atteint.

3.3.1.4 Financement des découverts initiaux

Les découverts initiaux doivent donc être financés par des emprunts à court terme qui commenceront à être remboursés lorsque les résultats d'exploitation dégageront des soldes positifs.

Pour une hypothèse donnée sur le taux d'intérêt des emprunts à court terme mobilisables, on pourra établir :

- l'échéancier des emprunts à court terme ;
- l'échéancier des intérêts versés ;
- l'échéancier des remboursements en capital.

L'équilibre financier est assuré dès lors que les emprunts à court terme sont intégralement remboursés sur une durée raisonnable.

3.4 Rentabilité au niveau des exploitations

Pour chacune des exploitations types du périmètre, l'étude d'économie fermière analysera la situation actuelle et son devenir possible.

3.4.1 Structure d'un budget type

La situation économique d'une exploitation est représentée à travers un *budget type* correspondant à un compte d'exploitation schématique (tableau 9).

Tableau 9 – Structure d'un budget type

Produit brut	P	160 000
Ventes, autoconsommation, variation des stocks		
Frais d'achat de biens et services	F_1	105 000
— Frais variables des cultures, engrains, produits de traitement divers		
— Frais fixes (frais généraux, location de machines, réparations et entretiens, carburant, assurances)		
— Frais d'irrigation		
Valeur ajoutée brute	$V = P - F_1$	55 000
Amortissements techniques et impôts	F_2	12 000
Valeur ajoutée nette ou revenu d'exploitation	$R = V - F_2$	43 000
Salaires, fermage, intérêts	F_3	5 000
Revenu familial	$R' = R - F_3$	38 000
Rémunération forfaitaire du travail familial et de l'exploitant	F_4	38 000
Bénéfice d'exploitation	$B = R' - F_4$	0

Au produit brut des ventes (P), on soustraira les achats de biens et services (F_1) pour obtenir la valeur ajoutée brute (V) dégagée par l'exploitation. Les achats de biens et services comportent des frais spécifiques à chaque culture (frais variables) et des frais fixes qui ne sont pas attribuables directement à une spéculation donnée. Les frais d'irrigation peuvent, selon le système de tarification, faire partie des frais fixes, des frais variables, ou même comporter une partie fixe (fonction des surfaces équipées) et une partie variable (fonction des volumes utilisés).

En déduisant de la valeur ajoutée brute les amortissements et les impôts (F_2), on obtient le revenu d'exploitation (R). C'est le solde positif qui permettra de rémunérer les facteurs de production : travail, capital, terre.

La répartition de ce solde positif (R) permet de définir successivement le revenu familial de l'exploitant (R') et le bénéfice d'exploitation (B).

3.4.2 Établissement des budgets types

Si les budgets types relatifs à la situation avant aménagement peuvent être établis à partir d'enquêtes, les budgets types correspondant à une situation future résulteront d'une analyse :

— **agronomique** : spéculations (production végétale et animale) possibles, compte tenu des conditions du milieu naturel et des perspectives offertes par l'irrigation ; rendements possibles ; contraintes de rotation, etc. ;

— **économique** : prix de vente escompté pour les différentes productions envisageables : accroissement des frais fixes et des fonds de roulement liés à la modification de la structure de production ;

— **sociologique** : attitude des agriculteurs devant les risques de certaines productions, attachement *culturel* à certains types de productions traditionnelles.

L'élaboration des budgets types prévisionnels peut être envisagée selon deux types de méthodes d'approche.

3.4.2.1 Méthodes de simulation

Mises en œuvre soit manuellement, soit par ordinateur, elles requièrent une participation active du chargé d'étude qui définit par approximations successives les grandes lignes de la situation future ; partant d'une hypothèse qu'il juge *raisonnable* sur le système de production de l'exploitation type étudiée (cultures pratiquées, proportion irriguée, production animale envisagée), on calculera les temps de travaux nécessaires, période par période, et le budget prévisionnel correspondant. L'analyse des résultats conduira à modifier les hypothèses initiales :

— pour mieux adapter la charge de travail et sa répartition aux possibilités de l'exploitation ;

— pour accroître les marges dégagées, tout en respectant les contraintes pratiques du problème.

Une telle méthode d'approximations successives permet de proposer des systèmes de production :

— de bonne efficience économique ;

— réalisables par rapport aux contraintes déterminantes de l'exploitation (main-d'œuvre disponible, possibilités financières nécessitées par une modification du système de production vers l'intensification) ;

— réalistes, car les solutions envisagées tiennent compte de l'expérience du chargé d'étude quant au comportement des agriculteurs vis-à-vis du changement et de l'environnement.

3.4.2.2 Méthodes d'optimisation

Elles visent à déterminer l'organisation optimale de l'exploitation. La programmation linéaire est parfaitement adaptée à cet objectif et permet de représenter le comportement des agriculteurs cherchant à rendre leur revenu maximal, tout en restant soumis à diverses contraintes relatives aux ressources disponibles (terre, travail, capital) ou aux impératifs de rotation des cultures.

Mais la recherche mathématique de l'optimum s'effectue sans l'intervention du chargé d'étude qui éliminerait d'emblée certaines solutions inadéquates grâce à son expérience et sa connaissance du contexte économique et local. Il est donc nécessaire d'introduire dans le modèle de nombreuses *contraintes* pour adapter les résultats théoriques aux réalités concrètes de l'exploitation agricole et au processus de décisions des agriculteurs. Les *matrices* représentant le fonctionnement des exploitations comportent ainsi plusieurs centaines d'inconnues et plusieurs centaines d'inéquations.

Ainsi, les modèles d'optimisation basés sur la programmation linéaire, dès lors qu'ils sont suffisamment élaborés pour prendre en compte la complexité de la réalité et garantir des solutions non utopistes, se révèlent d'un maniement assez lourd (article [H 3 008] *Programmation* dans le traité Informatique).

3.5 Tarification des eaux d'irrigation

3.5.1 Principes de la tarification

Plusieurs optiques différentes peuvent être envisagées pour établir une tarification. Deux d'entre elles sont les plus courantes.

■ Dans une première optique, on considère comme objectif majeur d'obtenir un équilibre financier à long terme pour l'organisme de gestion ; l'eau d'irrigation sera alors vendue à son *prix de revient*, compte tenu des facilités de financement ou des subventions d'exploitation qui sont offertes au gestionnaire. Le calcul d'un niveau de tarification (prix moyen du mètre cube distribué, ou redevance moyenne perçue à l'hectare desservi) s'effectue alors dans le cadre de l'étude de rentabilité financière, par approximations successives ; il convient ensuite de vérifier que ce niveau de tarification est acceptable par les irrigants, ce qui apparaîtra dans l'étude d'économie fermière ([§ 3.4](#)).

■ Dans une deuxième optique, on considère que le rôle premier d'une tarification est d'orienter dans le sens de l'intérêt général les décisions des consommateurs, en vue d'une utilisation optimale du facteur de production que constitue l'eau d'irrigation ; cette perspective se relève à la théorie de l'optimum économique collectif, qui montre que l'obtention d'une situation d'optimum (au sens de Pareto) suppose que tous les biens et services soient vendus à leur *coût marginal de production*.

Un service public doit facturer ses prestations à leur coût marginal de manière à concourir à une gestion *optimale* de l'économie. La tarification au coût marginal est ainsi mise en œuvre à l'Électricité de France sous la dénomination bien connue de *tarif vert*.

Dans une telle optique, le prix de vente est donc établi sans référence directe au prix de revient. Pour les productions à coût marginal croissant, le coût marginal est supérieur au coût moyen et l'exploitation du service sera bénéficiaire. Par contre, les productions à coût marginal décroissant enregistrent des coûts marginaux inférieurs aux coûts moyens, et la vente au coût marginal entraîne des pertes d'exploitation. C'est le cas des aménagements d'irrigation où, par suite de l'existence d'une infrastructure de base importante, le coût global croît moins que proportionnellement avec les quantités d'eau distribuées. Si donc on se fixe comme objectif second de mettre en place les conditions nécessaires à l'obtention d'un équilibre financier à long terme pour l'organisme de gestion, on est conduit à définir ensuite les conditions de financement (taux de subvention, prêts bonifiés) qui seront compatibles avec une tarification au coût marginal.

3.5.2 Tarification au coût marginal

Précisons l'approche théorique de la tarification au coût marginal dans le cas d'ouvrages exclusivement réservés à l'irrigation, dont la demande est plafonnée dans le temps.

Considérons un aménagement hydro-agricole, conçu pour véhiculer un débit Q correspondant à la saturation des besoins prévisionnels. Les coûts de gestion de cet ouvrage se décomposent en deux parties :

- un *coût fixe*, indépendant des débits transportés (amortissements, frais d'entretien pour partie, frais fixe d'exploitation, etc.) ;
- un *coût proportionnel* aux débits transportés (pompages, achats d'eau, frais d'exploitation proportionnel, etc.), C_p .

Le coût marginal, qui est représenté par la dépense supplémentaire incomptant à l'exploitant, du fait du transport d'un litre/s supplémentaire, est donc d'abord égal à C_p tant que le débit à transporter n'atteint pas Q , puis infini puisque tout dépassement de Q est impossible physiquement. Quant le débit est exactement Q , le coût marginal est indéterminé.

La tarification optimale est obtenue en prenant l'intersection de la courbe d'offre, ou courbe du coût marginal, et des courbes de demande (figure 3).

Tant que la demande est représentée par une courbe du type I, le tarif reste égal à C_p . Lorsque la demande devient du type II, le tarif est donné par l'ordonnée du point A.

En général, les premières années de la mise en service de l'ouvrage, les courbes de demande seront du type I, et le tarif pratiqué doit être égal à C_p . Dès que l'ouvrage approche de la saturation, la demande reste du type I en période hors pointe, mais devient du type II pendant les mois de pointe de l'irrigation. Ainsi la demande de la période de pointe d'été doit être tarifée à un prix supérieur à C_p et contribue ainsi à couvrir une partie des investissements initiaux. Le tarif pratiqué doit être tel qu'il ramène la demande à un niveau compatible avec l'offre, c'est-à-dire Q .

On peut montrer que, si l'ouvrage est dimensionné d'une manière optimale, le *tarif à saturation* est égal au coût de développement de l'ouvrage, ou coût marginal à long terme, c'est-à-dire aux dépenses nécessaires pour agrandir la capacité de l'ouvrage de l'unité de débit choisie.

Dire que l'ouvrage est *optimal* signifie, en effet, qu'une petite modification de la taille de l'ouvrage coûte exactement ce qu'elle rapporte.

La courbe représentative du coût de développement passe donc par le point A (figure 4). Le coût de développement permet ainsi de déterminer le tarif à saturation de l'ouvrage.

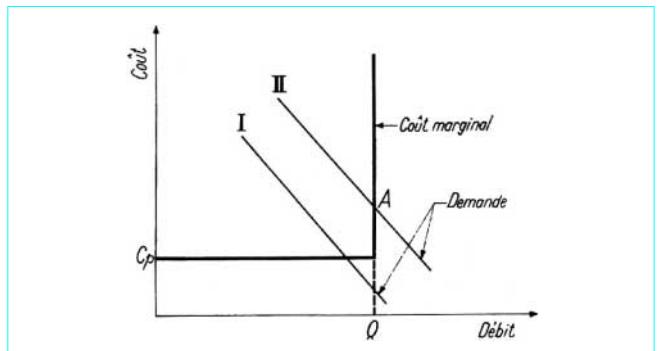


Figure 3 – Tarification au coût marginal

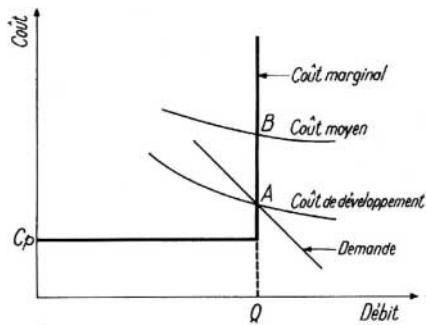


Figure 4 – Tarification et coût de développement

Par souci de clarté de l'exposé, nous n'avons raisonné jusqu'à présent que sur les débits. Mais, en fait, débits et volumes doivent être considérés comme deux variables indépendantes, et il convient de rapporter les tarifs aux unités dont ils dépendent.

Ainsi, très généralement, le coût proportionnel C_p se rapporte aux volumes (sauf peut-être certains frais d'énergie électrique dépendant de la puissance souscrite, c'est-à-dire du débit d'équipement). Par contre, ainsi que le montrerait une analyse plus détaillée, le coût de développement se rapporte pour une part aux débits et pour une autre part aux volumes. Sont C_{dd} et C_{dv} ces deux coûts.

Les calculs conduisent à un tarif binôme avec une prime annuelle dépendant du débit de pointe souscrit par l'usager, contrôlé par limiteur, et une prime proportionnelle au volume consommé.

Finalement, le tarif théorique à appliquer, que nous appellerons *tarif binôme complexe*, est celui donné par le tableau 10.

Ces tarifs théoriques constituent des valeurs repères sur la base desquelles sera établie une tarification pratique.

3.5.3 Modalités pratiques de la tarification

3.5.3.1 Réseaux d'irrigation de surface

Les réseaux d'irrigation de surface, avec transport de l'eau par canaux à surface libre, sont généralement tarifés sur la base de *forfaits* annuels, perçus en une seule fois.

Tableau 10 – Tarif binôme complexe

Période	Prime fixe de débit	Prime proportionnelle de volume
1 ^{re} période : non saturation des ouvrages	0	C_p
2 ^e période : saturation des ouvrages pendant la période de pointe d'été — hors période de pointe — pendant période de pointe	C_{dd}	$C_p + C_{dv}$

La redevance peut être basée :

- sur la surface souscrite ;
- sur le débit continu souscrit (débit fictif continu) ;
- sur les surfaces effectivement irriguées chaque année.

3.5.3.2 Réseaux d'irrigation par aspersion

Dans les réseaux collectifs d'irrigation par aspersion, les équipements mis en place sur les prises d'arrosage permettent de contrôler à la fois le débit maximal d'utilisation (limiteur de débit) et le volume consommé (compteur) pour chaque prise.

La redevance annuelle correspond, de manière très générale, à l'application d'un *tarif binôme* comprenant deux termes :

- un terme *fixe* (appelé *prime fixe*), proportionnel au débit souscrit par l'usager, à l'intérieur d'une gamme normalisée qui lui est proposée, et qui correspond au débit maximal utilisable ;
- un terme *variable*, proportionnel à la consommation annuelle décomptée au compteur de la prise.

Des aménagements du tarif binôme simple sont souvent adoptés. Citons :

— le tarif binôme *avec franchise* : le paiement de la prime fixe permet l'utilisation d'un volume d'eau fixé (fonction du débit souscrit) ne donnant pas lieu à paiement d'une redevance proportionnelle; il ne s'agit que d'une amélioration sur le plan psychologique de la tarification binôme simple : le paiement de la redevance fixe, donnant droit à un certain volume gratuit constitue pour l'agriculteur une prestation plus concrète que le simple fait de disposer d'un débit déterminé ;

— le tarif binôme *dégressif* : au-delà d'un certain volume fixé (fonction du débit souscrit), les mètres cubes supplémentaires utilisés sont facturés à un prix inférieur ; cette disposition permet de favoriser l'irrigation des cultures de faible rentabilité mais nécessitant de gros apports d'eau d'irrigation (fourrages, par exemple).

Programmes d'irrigation

par **René CLÉMENT**

*Ingénieur en Chef du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Directeur Général de la Société du Canal de Provence
et d'Aménagement de la Région Provençale*

et **Alain GALAND**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble
Ingénieur à la Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale*

Bibliographie

Références

- [1] *Évaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations.* Collection Techn. Rurales en Afrique, n° 1, 170 p., Ministère Agriculture (1964).
- [2] *Besoins en eau pour l'irrigation.* Communiqué techn., n° 21 du Soil Conservation Service, 41 p. + courbes (1964).
- [3] *Besoins en eau des cultures. Résultats d'expérimentation. Années 1964 à 1975.* Soc. Canal Provence Aménagement Région Provençale.
- [4] BROCHET (P.) et GERBIER (N.). – *L'évapotranspiration. Monographie,* n° 65, 95 p., Météorologie Nationale (1975).
- [5] ISBERIE (C.). – *Avertissement. Irrigation et automatisme à la parcelle.* Bull. Techn. Inf. (F.), Spécial Irrigation (1977).
- [6] *Diagnostic and improvement of saline and alkali soils.* Agriculture Handbook, n° 50, Traduction Cie Nat. Aménag, Région Bas-Rhône Languedoc, 34 p. (1965).
- [7] BERGMANN (H.). – *Guide de l'évaluation économique des projets d'irrigation.* 139 p., OCDE (1973).
- [8] BERGMANN (H.). – *Aspects économiques des projets d'irrigation.* 19 p., Banque Européenne d'Investissement (1970).
- [9] CLEMENT (R.). – *Considérations sur la rentabilité des ouvrages d'irrigation et la tarification*

- des eaux.* 20 p., Soc. Canal Provence Aménagement Région Provençale (1967).
- [10] BUSSERY (A.). – *Méthodes d'appréciation des projets dans les pays moins développés.* 68 p., OCDE (1973).
- [11] BOUSSARD (J.M.) et PETIT (M.). – *Problèmes de l'accès à l'irrigation.* 214 p., INRA-SCP (1966).
- [12] BOUSSARD (J.M.) et BRUN (A.). – *L'adaptation de l'agriculture à l'irrigation.* 138 p., INRA (1970).
- [13] PELLISSIER (F.). – *La tarification des eaux d'irrigation en France. Méthodes et principes.* 12 p., FAO (1971).
- [14] POMMERET (H.). – *Entretien, fonctionnement et exploitation des réseaux d'irrigation sous pression.* 41 p., in Rapports des 8^e Journées Européennes de la CIID Assoc. Franç. Étude Irrigations Drainage (1971).
- [15] DARLOT (A.) et DARVES-BORNOZ (R.). – *Les techniques modernes d'irrigation.* 10 p., in Rapports du 4^e Congrès des Irrigations et du Drainage AFEID (1960).
- [16] NIEL (P.) et PORTIER (J.). – *Irrigation à la raie et irrigation par aspercion sur une culture de tomates précoces dans la région de l'Etang de Berre.* 12 p., L'Irrigant (F), n° 40, déc. 1967.
- [17] VELEV (D.), VARLEY (I.), KRAFTY (G.) et GORANOV (Ch.). – *Comparative studies on the effects of irrigation method and frequency on crop yields.* 12 p., in Rapports du 9^e Congrès des Irrigations et du Drainage CIID (1975).
- [18] *L'eau.* Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment (F), n° hors série, sept. 1974.
- [19] *Le droit de l'eau.* Revue Adour Garonne (F) n° spécial : sept.-déc. 1976.

Ouvrages généraux

- BAUZIL (V.). – *Traité d'irrigation.* 413 p., Eyrolles (1952).
- BONNAL (C.). – *Manuel d'irrigation collective par aspercion.* 120 p., OCDE (1963).
- D'AT de SAINT FOULC (J.). – *Irrigation par aspercion.* 230 p., Eyrolles (1967).
- ISRAELSEN (O.W.) et HANSEN (V.E.). – *Traité pratique de l'irrigation.* 370 p., Les Éditions d'Organisation (1965).
- JEAN (M.). – *Cours d'irrigation.* Titres I et II – 190 p., École Nat. Génie Rural Eaux et Forêts (1973).
- POIREE (M.) et OLLIER (Ch.). – *Irrigation : Les réseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie des arrosages.* 420 p., Eyrolles (1962).
- REBOUR (H.) et DELOYE (M.). – *Irrigation de surface et par aspercion.* 230 p., La Maison Rustique (1971).
- ROLLEY (P.). – *Améliorations agricoles. Irrigation.* 475 p., Nouvelle Encyclopédie Agricole, Ballière (1953).