

*Ecole Doctorale TERRE EAU ESPACE*  
Université Montpellier II

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur de l'ENGEES à Strasbourg, Mémoire du DEA  
de l'ENGREF *Science de l'Eau dans l'Environnement*  
*Continental*, Université Montpellier II

# Les externalités de l'irrigation gravitaire

*Identification – Quantification – Evaluation –  
Gestion*

*Série Irrigation «Mémoires de fin d'études» 2004-07 ; 1031*

Marwan Ladki

Maître de stage :

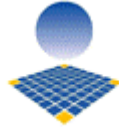
Patrice Garin

**Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement**  
Unité de recherche Irrigation

**Délégation régionale du Languedoc-Roussillon**  
361, rue Jean-François Breton, BP 5095  
34196 Montpellier Cedex 05  
Tél. : 04 67 04 63 00 - Fax : 04 67 63 57 95

*Septembre 2004*





*Ecole Doctorale TERRE EAU ESPACE*  
Université Montpellier II

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur de l'ENGEES à Strasbourg, Mémoire du DEA  
de l'ENGREF *Science de l'Eau dans l'Environnement*  
*Continental*, Université Montpellier II

# Les externalités de l'irrigation gravitaire

*Identification – Quantification – Evaluation –  
Gestion*

*Série Irrigation «Mémoires de fin d'études» 2004-07 ; 1031*

Marwan Ladki

Maître de stage :

Patrice Garin

**Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement**  
Unité de recherche Irrigation

**Délégation régionale du Languedoc-Roussillon**  
361, rue Jean-François Breton, BP 5095  
34196 Montpellier Cedex 05  
Tél. : 04 67 04 63 00 - Fax : 04 67 63 57 95

*Septembre 2004*



Que toutes les personnes m'ayant accueilli, aidé, enseigné, écouté, conseillé, guidé et suivi se sentent personnellement et sincèrement remerciées. Je pense ici même à *Alain Delacourt, Michel Desbordes, Lætitia Guerin-Schneider, Thierry Rieu, Olivier Barreteau, Nils Ferrand, Audrey Richard-Ferroudji, Géraldine Abrami*, ainsi que *Jean-Philippe Torterotot, Agnès Grandgirard et Rémi Barbier*, mais aussi *Olivier Alexandre, Jean-Marc Hoffmann, Gabriel Tandeau de Marsac, Bernard Baudot et Alain Vidal*, et ceux de la première heure, *Nicolas Faÿsse et Hervé Lévite*. Enfin, un grand grand merci à *Claude Millier*.

Je remercie pour finir tout particulièrement et d'autant plus chaleureusement *Patrice Garin, Marielle Montginoul, Yves Lunet de Lajonquière, Christelle Pezon, Michel Nakhla et Daniel Fixari* pour leur succulente maïeutique, passée et à venir.

Je n'ai que ma reconnaissance à offrir en retour,  
mais elle ne me quitte pas.

Marwan



## **Résumé**

---

Le monde de l'agriculture irriguée gravitaire connaît aujourd'hui d'importantes mutations économiques et sociales, ainsi que de fortes pressions pour réduire ses prélèvements d'eau. Les charges opérationnelles des associations syndicales s'accroissent et leur mission de service de l'eau se complexifie, alors que les capacités financières des agriculteurs irrigants s'amenuisent. La question de la durabilité des associations d'irrigation gravitaire et de leur réseau se pose donc. Or ces réseaux remplissent bien d'autres fonctions que la fourniture d'eau aux irrigants (ex. recharges de nappes, entretien de zones humides, collecte et évacuation des eaux pluviales, lutte contre la salinisation des sols...), ces externalités bénéficiant à de nombreux acteurs locaux, représentatifs du système socio-économique associé aux canaux. L'irrigation gravitaire génère cependant également des externalités négatives importantes (pollution des eaux, débordements...). Leur prise en compte nous fait élargir l'enjeu d'une diversification du revenu des ASA par la rétribution des externalités positives, à celui de la définition d'une nouvelle forme de gouvernance, basée sur la contractualisation des parties prenantes autour des « services d'externalités » que représentent le maintien/développement/ réduction des externalités positives/négatives.

La contractualisation de parties prenantes autour de ces externalités pose cependant plusieurs problèmes d'ordre différent. Leur caractérisation dépend pour beaucoup du contexte local, et leur quantification se révèle dans la très grande majorité des cas largement imprécise ou peu fiable. L'appréciation économique des bénéfices qu'elles génèrent, nécessaire à leur valorisation, se heurte au problème de l'évaluation monétaire de ces biens et services non marchands. Enfin, leur gestion dans une optique de service fourni soulève le problème du contrôle de l'offre, qu'il concerne la mesure du service, sa flexibilité ou sa zone de tarification. Si ces problèmes appellent une nouvelle forme, voire une nouvelle structure de gestion intégrant l'ensemble des usages, une telle structure pourrait néanmoins constituer un maître d'œuvre pertinent des politiques publiques locales d'aménagement du territoire.

**MOTS CLEFS :** Irrigation gravitaire, Association Syndicale, Externalité, Aménité, Effet induit, Identification, Quantification, Evaluation, Gestion, Biens et services non marchands, Gestion du territoire, Durabilité.

## **Abstract**

Surface irrigation system is nowadays affected by deep socio-economical evolutions, added to strong lobbies aiming at reducing its water pumping. Running costs of French surface irrigation water user associations are increasing, their water service provider mission is getting more complicated, while their economical capacities are decreasing. Surface irrigation water associations' sustainability is problematic. Nevertheless, these surface networks offer much more services than the strict irrigation water service (e.g. water sheets refill, wetlands sustain, gathering and evacuation of rain water sewage, prevention of salt intrusion in soils...). Many local stakeholders, representing the socio-economical system connected to the channels, take advantages from these positives externalities. Nevertheless, surface irrigation generates great negatives externalities too (water pollution, inundations ...). Their consideration lead us to enlarge the stake of an irrigation water associations' income diversification through positives externalities retribution, to the definition of a new governance system, based on stakeholders' contracting for "externalities services", through the increase/maintain/reduction of positives/negatives externalities.

Yet, externalities management encounters several different types of problems. Their characterisation is mostly depending on the local context, and their quantification is most often widely unprecise or unreliable. These externalities generate benefits, which economic valuation – necessary for their valorisation, has to go through the monetary valuation of the non market goods and services. At last, their management in a service oriented approach raises the problem of the service supply control, including the service measurement, its flexibility, and its charging area. If these problems ask for a new way, and perhaps a new structure of management, integrating the whole uses, such a structure could become a relevant operator for land management local public policies.

**KEY WORDS :** Surface irrigation, Water user association, Externality, Amenity, Unintended effect, Identification, Quantification, Evaluation, Management, Non market goods and services, Land management, Sustainability.

# SOMMAIRE

---

<i>Préambule</i>	- 15 -
<i>Introduction</i>	- 19 -
<b>1 Présentation des externalités de l'irrigation gravitaire</b>	<b>- 25 -</b>
<b>1.1 Concepts et définitions</b>	<b>- 25 -</b>
<b>1.2 La prise en compte des externalités de l'irrigation gravitaire dans le monde agricole</b>	<b>- 28 -</b>
1.2.1 L'origine de la mise en avant des externalités de l'irrigation gravitaire : la Redevance – prélèvements – restitutions de l'Agence de l'Eau	- 28 -
1.2.2 75% des volumes prélevés restitués à la nappe et en rivière	- 29 -
<b>1.3 Présentation générale des externalités</b>	<b>- 33 -</b>
<b>2 Les externalités liées au fonctionnement du système canal</b>	<b>- 37 -</b>
<b>2.1 Impacts sur la nappe phréatique</b>	<b>- 37 -</b>
2.1.1 La réalimentation de la nappe phréatique	- 37 -
2.1.2 La pollution des eaux souterraines	- 39 -
<b>2.2 Impacts sur les cours d'eau</b>	<b>- 44 -</b>
2.2.1 Les prélèvements en rivière	- 44 -
2.2.2 Les restitutions en rivières	- 46 -
2.2.2.1 Le soutien de débit et d'étiage	- 46 -
2.2.2.2 La pollution agricole diffuse depuis les restitutions de surface	- 49 -
<b>2.3 Impacts sur l'évacuation des eaux pluviales</b>	<b>- 49 -</b>
2.3.1 Le ressuyage des terres agricoles, une fonction ancienne des canaux	- 50 -
2.3.2 L'assainissement pluvial urbain et la lutte contre les inondations	- 51 -
2.3.2.1 Présentation	- 51 -
2.3.2.2 Mise en évidence de la contribution des canaux à l'assainissement pluvial urbain	- 51 -
2.3.2.3 L'Assainissement pluvial urbain et la Prévention des inondations, des fonctions nouvelles consécutives à l'évolution de l'occupation du sol	- 53 -
2.3.2.4 Le rôle des canaux lors d'évènements pluvieux exceptionnels	- 56 -
2.3.2.5 L'assainissement pluvial urbain et la lutte contre les inondations : des externalités mixtes ...	- 58 -
2.3.2.5.1 ... vis-à-vis des débordements et des inondations	- 58 -
2.3.2.5.2 ... vis-à-vis de la gestion du canal	- 59 -
2.3.2.6 Importance de la contribution des canaux à la lutte contre les inondations	- 60 -
<b>2.4 Impacts sur les écosystèmes et les paysages</b>	<b>- 61 -</b>
2.4.1 Le développement d'une faune et d'une flore spécifique aux canaux	- 61 -
2.4.2 Influence de l'irrigation gravitaire sur le paysage par la végétation spontanée	- 63 -
2.4.3 Les effets induits de cette végétation spontanée	- 67 -
<b>2.5 Impacts sur les sols</b>	<b>- 69 -</b>
2.5.1 La salinisation des terres agricoles et non agricoles	- 69 -

2.5.1.1	La salinisation secondaire _____	- 69 -
2.5.1.2	Les salinisations primaires _____	- 69 -
2.5.1.2.1	Les remontées de sels fossiles _____	- 69 -
2.5.1.2.2	La remontée du biseau salé en zone côtière _____	- 70 -
2.5.2	La lutte contre les tassements de sol _____	- 71 -
2.5.3	La lutte contre les affaissements de sol _____	- 71 -
<b>3</b>	<b><i>Les externalités liées à la présence du système canal</i></b> _____	<b>- 73 -</b>
<b>3.1</b>	<b>Les usages d'agrément liés à la présence du système canal</b> _____	<b>- 73 -</b>
3.1.1	Le patrimoine architectural des canaux d'irrigation _____	- 73 -
3.1.2	L'agrément paysager _____	- 74 -
3.1.3	Les usages récréatifs et touristiques _____	- 75 -
<b>3.2</b>	<b>La lutte contre les feux de forêts</b> _____	<b>- 78 -</b>
<b>4</b>	<b><i>Les externalités liées à l'entretien du système canal</i></b> _____	<b>- 81 -</b>
<b>4.1</b>	<b>Les résidus de curage et de faucardage sur les berges et dans le lit des canaux</b>	<b>- 81 -</b>
<b>4.2</b>	<b>Les pollutions consécutives aux pratiques de faucardage et d'éradication des algues</b> _____	<b>- 83 -</b>
<b>5</b>	<b><i>Les externalités liées aux fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation</i></b> ____	<b>- 85 -</b>
<b>5.1</b>	<b>La vente d'eau brute aux rurbains : un intérêt partagé</b> _____	<b>- 85 -</b>
<b>5.2</b>	<b>La vente d'eau brute aux usagers non domestiques</b> _____	<b>- 87 -</b>
<b>5.3</b>	<b>La dilution des pollutions en sortie de station d'épuration</b> _____	<b>- 88 -</b>
<b>5.4</b>	<b>L'assainissement urbain</b> _____	<b>- 89 -</b>
<b>6</b>	<b><i>Quantification des externalités de flux d'eau</i></b> _____	<b>- 91 -</b>
<b>6.1</b>	<b>La quantification des flux d'eau de surface</b> _____	<b>- 91 -</b>
6.1.1	Les méthodes de mesure des débits dans les canaux _____	- 91 -
6.1.1.1	Les méthodes globales _____	- 92 -
6.1.1.1.1	Seuils-jaugeurs et mesures de niveau d'eau _____	- 92 -
6.1.1.1.1.1	Les ouvrages calibrés (seuils-jaugeurs) _____	- 92 -
6.1.1.1.1.2	Les instruments de mesure de hauteur d'eau _____	- 94 -
6.1.1.1.2	La dilution chimique _____	- 95 -
6.1.1.2	Les méthodes complètes _____	- 96 -
6.1.1.2.1	Jaugeage par moulinet hydrométrique _____	- 96 -
6.1.2	Application au cas des externalités liées à des flux d'eau de surface ____	- 97 -
6.1.2.1	Les prélèvements en rivière _____	- 97 -
6.1.2.2	Les restitutions en rivière _____	- 100 -
6.1.2.3	L'assainissement pluvial urbain _____	- 102 -
6.1.2.4	La lutte contre les inondations _____	- 103 -
<b>6.2</b>	<b>La quantification des flux d'eau souterrains</b> _____	<b>- 103 -</b>
6.2.1	L'alimentation en eau de l'environnement terrestre _____	- 103 -
6.2.2	Le ressuyage des terres _____	- 105 -
6.2.3	La réalimentation de la nappe phréatique _____	- 108 -
6.2.3.1	Les méthodes de détermination directe _____	- 108 -
6.2.3.1.1	Par mesure directe du flux d'eau dans le sol _____	- 108 -

6.2.3.1.1.1	Le lysimètre _____	- 108 -
6.2.3.1.1.2	Le piézomètre _____	- 109 -
6.2.3.1.1.3	Le tensiomètre _____	- 109 -
6.2.3.1.2	A partir des mesures de charge hydraulique _____	- 110 -
6.2.3.1.2.1	La méthode du drainage interne _____	- 111 -
6.2.3.1.2.2	La méthode du Plan de Flux Nul (PFN) _____	- 111 -
6.2.3.1.2.3	Conclusion sur les méthodes utilisant les mesures de charge hydraulique _____	- 112 -
6.2.3.1.3	Par analyse isotopique _____	- 112 -
6.2.3.2	Les méthodes de détermination indirecte _____	- 114 -
6.2.3.2.1	Obtenir les restitutions profondes par déduction du Bilan Hydrique _____	- 114 -
6.2.3.2.1.1	Présentation de la méthode _____	- 114 -
6.2.3.2.1.2	Conclusion sur l'utilisation du bilan hydrique pour déterminer les restitutions en nappe _____	- 114 -
6.2.3.2.2	Mobiliser des ratio de restitutions eaux profondes / eaux de surface établis dans la littérature _____	- 115 -
<b>7</b>	<b><i>Quantification des externalités de flux de soluté</i></b> _____	<b>- 117 -</b>
<b>7.1</b>	<b>La quantification et la caractérisation des flux de solutés de surface</b> ____	<b>- 117 -</b>
7.1.1	Caractériser la pollution physico-chimique pour les usages consommateurs de la ressource : l'analyse physico-chimique des eaux _____	- 117 -
7.1.2	Caractériser la conséquence de la pollution pour les usages environnementaux et récréatifs : l'analyse hydrobiologique des eaux _____	- 119 -
7.1.3	Conclusion sur la quantification de la pollution de surface depuis le périmètre irrigué _____	- 122 -
<b>7.2</b>	<b>La quantification des flux de solutés de profondeur</b> _____	<b>- 122 -</b>
7.2.1	Pollution agricole diffuse et nappe phréatique _____	- 122 -
7.2.1.1	Caractériser et quantifier la pollution physico-chimique de l'eau souterraine _____	- 122 -
7.2.1.2	Procéder à un bilan d'azote _____	- 122 -
7.2.1.3	Mesurer la quantité d'azote présente dans le sol _____	- 123 -
7.2.1.3.1	Les bougies poreuses _____	- 123 -
7.2.1.3.2	Les cases lysimétriques _____	- 124 -
7.2.1.3.3	Les sondages à la tarière _____	- 124 -
7.2.2	Conclusion sur la mesure de la pollution de la nappe depuis le périmètre irrigué _____	- 126 -
<b>8</b>	<b><i>L'évaluation monétaire des biens et des services non marchands</i></b> _____	<b>- 127 -</b>
<b>8.1</b>	<b>Introduction</b> _____	<b>- 127 -</b>
8.1.1	L'Analyse Coûts Bénéfices (ACB) _____	- 127 -
8.1.2	Les différents types de méthodes d'évaluation monétaire des bénéfices et dommages non marchands _____	- 128 -
<b>8.2</b>	<b>Evaluations monétaires basées sur les préférences des décideurs et des experts</b> - 129 -	
8.2.1	La Méthode Indirecte de monétarisation des dommages physiques ____	- 129 -
8.2.2	La Méthode Indirecte des coûts de remplacement _____	- 130 -
<b>8.3</b>	<b>Evaluations monétaires basées sur les préférences individuelles</b> _____	<b>- 130 -</b>
8.3.1	Les Méthodes Indirectes, utilisant des marchés de substitution (Méthodes des préférences révélées) _____	- 130 -

8.3.1.1	La Méthode des Dépenses de Protection (MDP)	- 131 -
8.3.1.2	La Méthode des Prix Hédonistes (MPH)	- 131 -
8.3.1.3	Les Méthodes des Coûts de Déplacements (MCD)	- 136 -
8.3.2	Les Méthodes Directes, utilisant des marchés hypothétiques (Méthodes des préférences exprimées)	- 137 -
8.3.2.1	La Méthode d'Evaluation Contingente (MEC)	- 137 -
<b>8.4</b>	<b>Comment choisir la méthode à mettre en œuvre ?</b>	<b>- 139 -</b>
8.4.1	La nature de l'externalité	- 139 -
8.4.2	Les types de bénéfiques	- 140 -
<b>8.5</b>	<b>Les méthodes préconisées dans le cadre des externalités de l'irrigation gravitaire</b>	<b>- 140 -</b>
8.5.1	Conclusion	- 150 -
<b>9</b>	<b>Rétribuer les « services d'externalités »</b>	<b>- 155 -</b>
<b>9.1</b>	<b>Quelles informations retire-t-on d'une considération économique du problème ?</b>	<b>- 155 -</b>
9.1.1	Les externalités confrontées aux notions de biens et de services publics	- 155 -
9.1.2	Limites des outils existants et perspective dans le « contrat de canal »	- 156 -
<b>9.2</b>	<b>Quelles informations retire-t-on d'une considération JURIDIQUE du problème ?</b>	<b>- 157 -</b>
9.2.1	La nature juridique du fournisseur de bien ou de service	- 158 -
9.2.2	La nécessité d'intégrer les usagers non agricoles dans la gestion de l'association	- 159 -
9.2.2.1	L'intégration des rurbains	- 159 -
9.2.2.2	L'intégration des collectivités	- 161 -
9.2.3	Quelle structure gestionnaire privilégier ?	- 162 -
<b>9.3</b>	<b>Quelles informations retire-t-on d'une considération gestionnaire du problème ? La gestion des externalités dans une optique de service fourni</b>	<b>- 165 -</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>		<b>- 169 -</b>
<b><i>BIBLIOGRAPHIE</i></b>		<b>- 173 -</b>
<b><i>ANNEXES</i></b>		<b>- 177 -</b>
<b><i>Annexe 1 :</i></b>	<b>Solutions pouvant être apportées aux externalités négatives associées à l'assainissement pluvial et à la lutte contre les inondations</b>	<b>- 179 -</b>
<b><i>Annexe 2 :</i></b>	<b>Tableau récapitulatif des différentes études de flux analysées</b>	<b>- 185 -</b>
<b><i>Annexe 3 :</i></b>	<b>Synthèse des méthodes employées dans les 23 études de flux analysées</b>	<b>- 189 -</b>
<b><i>Annexe 4 :</i></b>	<b>Méthode de détermination de la réalimentation de la nappe par déduction du Bilan Hydrique</b>	<b>- 191 -</b>
<b><i>Annexe 5 :</i></b>	<b>Grilles d'analyse de la qualité de l'eau, des usages de l'eau, et des problèmes de pollution en nitrate et en phosphore</b>	<b>- 209 -</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de principe d'une gestion orientée vers le service .....	27 -
Figure 2 : Restitutions au milieu naturel en fonction du type de culture principale du périmètre .....	32 -
Figure 3 : Comparaison des volumes en entrée et en sortie du canal des Sables .....	52 -
Figure 4 : Pluviométrie et réaction du canal lors de l'événement pluvieux des 19 et 20 septembre 1999....	52 -
Figure 5 : Pluviométrie et réaction du canal lors de l'événement pluvieux des 21 et 22 octobre 1999....	53 -
Figure 6 : Distinction entre deux précipitations saturantes, selon qu'elles soient immédiatement saturantes (à droite) ou non (à gauche), sur la base d'un modèle d'infiltration de Horton .....	54 -
Figure 7 : Précipitation non saturante, sur la base d'un modèle d'infiltration de Horton .....	54 -
Figure 8 : Comparaison de la nature des confluences et de l'orientation de la pente globale entre un réseau hydrographique naturel et un réseau hydrographique artificiel, le réseau d'irrigation gravitaire.....	57 -
Figure 9 : Influence de la ripisylve sur les processus trophiques dans les écosystèmes d'eau courante .-	67 -
Figure 10 : Contribution de la végétation rivulaire à la qualité des milieux et au cadre de vie.....	68 -
Figure 11 : Cycle énergétique de la pollution organique.....	82 -
Figure 12 : Hydrogramme général de crue, comprenant les courbes de décrue et de tarissement. ....	106 -
Figure 13 : Evolutions du rapport isotopique de l' <sup>18</sup> O contenue dans l'eau au cours des différents changements de phases .....	113 -
Figure 14 : Schématisation des entrées et sorties d'eau prises en compte dans le bilan hydrique .....	194 -
Figure 15 : Evolution temporelle du coefficient cultural.....	199 -
Figure 16 : Relation empirique entre l'ETR et l'ETM, considérant le rapport entre les réserves hydrique et utile.....	199 -

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des restitutions d'eau en surface et en profondeur par l'irrigation gravitaire .....	29 -
Tableau 2 : Facteurs considérés dans les études de flux analysées.....	30 -
Tableau 3 : Restitutions d'eau au milieu naturel selon le mode de desserte.....	31 -
Tableau 4 : Tableau de synthèse des externalités de l'irrigation gravitaire .....	36 -
Tableau 5 : Débits jaugés en quelques points de la Durance (Octobre 1998).....	47 -
Tableau 6 : Volumes écoulés dans le canal des Sables de Mars à Décembre 2000.....	51 -
Tableau 7 : Analyse comparative des ouvrages calibrés de détermination de débit.....	98 -
Tableau 8 : Analyse comparative des instruments de mesure du niveau d'eau .....	98 -
Tableau 9 : Variables dépendantes rencontrées dans la MPH et conditions de validité du modèle.....	132 -
Tableau 10 : Liste des domaines où fut appliquée la méthode des prix hédonistes .....	132 -
Tableau 11 : Variables explicatives les plus généralement utilisées dans la MPH.....	133 -
Tableau 12 : Tableau de synthèse des méthodes préconisées pour l'évaluation monétaire des externalités de l'irrigation gravitaire .....	151 -
Tableau 13 : Les résultats des différentes études de flux analysées par [ENSAM, 2003] .....	187 -
Tableau 14 : Synthèse des méthodes employées dans les 23 études de flux analysées par [ENSAM, 2003].	190 -
Tableau 15 : Grille pour estimer la qualité générale de l'eau.....	210 -
Tableau 16 : Adéquation entre classes de qualité de l'eau et usages de l'eau.....	210 -
Tableau 17 : Grille pour signaler les problèmes d'azote.....	210 -
Tableau 18 : Grille pour signaler les problèmes de phosphore .....	210 -

## LISTE DES CADRES

Cadre 1 : Résumé des impacts du système canal sur l'évacuation des eaux pluviales.....	50 -
Cadre 2 : Rappel théorique et approximation méthodologique concernant l'infiltration de l'eau dans le sol ..	54 -
Cadre 3 : Le phénomène d'interception .....	105 -
Cadre 4 : Conclusion sur l'utilisation du bilan hydrique pour déterminer les restitutions en nappe...	115 -
Cadre 5 : Les demandes de non usage. ....	137 -
Cadre 6 : La mise en place d'une enquête par la méthode des programmes .....	153 -
Cadre 7 : Fonctionnement de la sonde à neutron et de la sonde TDR .....	201 -

## P R E A M B U L E

Le sud est de la France compte près de 80 000 ha de périmètres irrigués desservis par des réseaux d'irrigation gravitaire, la plupart vieux de plus d'un siècle. Dès leur conception, nombre de ces réseaux anciens eurent des vocations multiples, en plus de la fonction de distribution de l'eau d'irrigation : force motrice des moulins à eau, alimentation en eau pour les usages domestiques et l'élevage, etc. Avec la loi du 21 juin 1865 sur les Associations Syndicales, le cadre juridique de ces périmètres a été unifié et leur gestion a été confiée à des groupements de propriétaires fonciers, sous forme le plus souvent d'Association Syndicale Autorisée (ASA), plus rarement d'Association Syndicale Forcée (ASF). Ces groupements de propriétaires fonciers ont été constitués en vue de *permettre l'exécution et l'entretien à frais communs de travaux immobiliers*<sup>1</sup> tant d'utilité publique que d'utilité collective, énumérés dans l'article 1<sup>er</sup> de la Loi du 21 Juin 1865, parmi lesquels figurent l'irrigation, le drainage, la réalimentation de nappes phréatiques, la lutte contre les inondations, ..., et plus généralement toute amélioration agricole d'intérêt collectif. Mais si une association syndicale peut être à vocation multiple, elle ne peut effectuer d'autres travaux que ceux définis dans ses statuts au moment de sa création, à moins qu'elle ne décide de les réviser.

Les associations syndicales ont la particularité d'être *des associations de bien et non de personne*. Leur finalité est de garantir la propriété collective, plus que le propriétaire, puisque « Les obligations qui dérivent de la constitution de l'association syndicale sont attachées aux immeubles compris dans le périmètre et les suivent, en quelques mains qu'ils passent, jusqu'à la dissolution de l'association. »<sup>2</sup> Il en va ainsi de la taxe syndicale vis-à-vis de laquelle doivent s'acquitter tous les propriétaires terriens du périmètre irrigué, agriculteurs ou non, quel que soit l'usage de la terre et de l'eau qui est le leur.

Ces associations ont hérité du statut d'établissement public et ont bénéficié du soutien technique et financier de l'Etat qui s'est appuyé sur elles pour développer l'irrigation, considérée comme un pilier de la politique française de modernisation de l'agriculture et d'aménagement du territoire aux XIX et XX<sup>ème</sup> siècles. Les Associations syndicales autorisées sont aujourd'hui considérées comme des ***Etablissements publics à caractère administratifs (EPCA) non locaux***<sup>3</sup> [Garin et al., 2001] sous la tutelle du préfet du département (assisté si besoin par la DDAF), et jouissent à ce titre de subventions de la puissance publique pour les travaux de modernisation entrepris, traditionnellement à hauteur de 80% de l'investissement total. Près de 1900 ASA gèrent aujourd'hui 20% de la superficie irriguée en France, dont la moitié des superficies arrosées sur des périmètres collectifs [Garin et al., 2002a]. Cette technique d'irrigation particulière connut un fort essor dans les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, dans le but de s'adapter au climat méditerranéen, dont les importantes sécheresses et l'irrégularité des précipitations empêchent bien souvent la tenue d'autres cultures que celle de la vigne sans apport d'eau complémentaire.

---

<sup>1</sup> Article 1 de la loi du 21 juin 1865.

<sup>2</sup> Article 2 du décret du 18 décembre 1927.

<sup>3</sup> Arrêt Tatin du 12 juillet 1995.

Bien que le cadre juridique et institutionnel dessiné par la puissance publique pour ces associations leur ait conféré les conditions d'une durabilité déjà démontrée [Ostrom, 1990], leur pérennité pourtant séculaire est aujourd'hui remise en cause. Les associations d'irrigation gravitaire ne sont pas restées insensibles aux évolutions du contexte socio-économique, et elles doivent aujourd'hui faire face à de nouveaux défis, au premier rang desquels figurent une déprise agricole forte et soutenue, alliée à une périurbanisation croissante et souvent mal contrôlée. La déprise agricole réduit la demande en eau des irrigants, que ce soit par la diminution du nombre d'agriculteurs ou l'augmentation de la mise en jachère des parcelles, ce qui affecte les ressources financières des associations. Alliée aux contraintes économiques sur de nombreuses filières agricoles, cette déprise fragilise le monde agricole en limitant la capacité des associations d'assumer les coûts de fonctionnement, et par dessus tout d'entretien et de modernisation de leur réseau, quand dans le même temps les agriculteurs restant souhaiteraient une amélioration du service d'eau, par une modernisation radicale du système de distribution au profit de réseaux sous pression, plus adaptés à une irrigation à la demande et à des matériels d'irrigation modernisés.

De même, l'expansion des zones périurbaines sur les anciennes terres agricoles est un phénomène complémentaire à la déprise agricole dans les zones de plaine ou de littoral proches de centres urbains. L'abandon des parcelles agricoles au profit d'habitations périurbaines conduit à un morcellement important des parcelles dans le temps, et à une forte progression des propriétaires non agriculteurs au sein du périmètre irrigué. Ceci est à l'origine de deux problèmes structurels importants. D'une part l'accroissement de la vulnérabilité des zones périurbanisées face au risque d'inondation, par l'augmentation continue des surfaces imperméabilisées, parfois même au détriment de zones d'expansion de crues. D'autre part des difficultés liées à l'intégration de ces nouveaux usagers rurbains, non agricoles, dans des associations dont la vocation principale reste agricole. Cette demande émergente pour un service d'eau différent, tant sur ses aspects technique, financier, que gestionnaire, force aujourd'hui à une autre forme de modernisation des réseaux et des services de l'eau pour satisfaire ces nouveaux usagers rurbains, qui ne peuvent accepter le classique tour d'eau hebdomadaire avec une main d'eau de 25 l/s. Or cette modernisation est très coûteuse et ne peut être prise en charge entièrement par les propriétaires membres des associations.

Ces inadéquations sont à l'origine de dysfonctionnements croissants sur les périmètres gravitaires : désengagement des agriculteurs vis-à-vis de l'association (qualité de service jugée inacceptable et/ou refus des programmes de modernisation, à quoi suivent impayés, multiplication de forages individuels dans la nappe, etc.), manque de participation à la gestion des acteurs connexes au périmètre (usagers périurbains, acteurs publics locaux), incapacité pour l'association d'anticiper et d'assumer le maintien et le renouvellement du réseau, etc. Ces dysfonctionnements sont symptomatiques d'un besoin de diversification du revenu de ces associations, notamment par la modernisation et la multiplication des services qu'elles proposent. Que ce soit dans une logique purement agricole ou vis-à-vis des usagers non agricoles, le souhait d'une modernisation du réseau par un passage sous pression est largement revendiqué.

Cependant la demande agricole n'est que rarement solvable, et une telle modernisation reste inabordable financièrement sans une aide massive de l'Etat. Or, cela va à l'encontre de l'action entreprise par la puissance publique sur le sujet ces dernières années. D'un côté on constate un amenuisement de l'appui traditionnel des services de l'Etat, notamment de la DDAF, sur les plans techniques, administratifs et financiers, alors que les contraintes réglementaires relatives aux impacts environnementaux des activités des ASA se renforcent.

Au bilan, leurs charges opérationnelles s'accroissent, leur mission de service de l'eau devient plus complexe alors que les capacités financières des agriculteurs irrigants s'amenuisent et qu'elles restent incertaines pour les usagers périurbains. D'un autre côté, l'Etat et l'Agence de l'eau, principaux financeurs de travaux de maintenance et de modernisation des réseaux, ont fait part ces dernières années de leur souhait de voir les conditions d'obtention de leurs financements respectifs évoluer.

En contribuant traditionnellement à hauteur de 80% aux financements des programmes de réhabilitation ou de modernisation des canaux gravitaires, la puissance publique supporte financièrement pendant de longues années les conséquences sur le long terme de stratégies de maintenance pensées par les ASA sur le court terme. C'est ce qui la décide aujourd'hui à restreindre les conditions d'obtention de ses financements, pour les travaux de modernisation des réseaux, au critère de plus-value dégagée par la modernisation, le but étant que les propriétaires contribuent dans une plus grande mesure au financement de ces travaux. Dès lors, sans demande solvable, il n'y a pas d'autre alternative que le simple maintien en l'état des réseaux. De son côté, l'Agence de l'eau a manifesté sa volonté de conditionner ses financements pour tous travaux sur les réseaux à la signature d'un protocole de gestion de la ressource en eau entre l'ASA et les autres usagers de la ressource, afin d'assurer l'intégration de ces derniers et de permettre une gestion plus concertée et plus globale de l'eau.

En clair, si les logiques agricole et domestique convergent dans leur souhait de voir remplacer les réseaux d'irrigation gravitaire par des réseaux sous pression, cette transformation se heurte le plus souvent à son manque de justification économique. En conséquence, la tendance observée est aujourd'hui à l'abandon des réseaux gravitaires, que ce soit de la part des propriétaires non agriculteurs – qui refusent de payer la taxe syndicale pour un service d'eau mal adapté dont il n'ont pas l'usage – ou des agriculteurs, qui choisissent d'abandonner le réseau collectif gravitaire au profit d'une irrigation individuelle moins contraignante, au grand dam des gestionnaires d'ASA.

Néanmoins, en parallèle à ce mouvement d'abandon des acteurs agricole et domestique, on assiste depuis quelques années à un mouvement de soutien de la part des collectivités locales, qui souhaitent que soient maintenus ces réseaux gravitaires, afin que perdurent les effets induits positifs importants qu'ils génèrent sur le fonctionnement de la collectivité, sur les plans économique, social et environnemental. Les collectivités en tête, on a ainsi assisté à l'émergence de nouvelles demandes et de nouveaux acteurs dans la gestion de ces associations de propriétaires, soucieux de voir l'irrigation gravitaire au centre de la gestion du territoire qu'elle irrigue. Ces revendications ont trouvées un écho légitime chez les gestionnaires d'associations gravitaires, qui souhaitent aujourd'hui que soient reconnus et rétribués ces effets induits positifs, divers et variés, afin d'assurer la pérennité de leur association.

Autrefois co-gestionnaires avec les services du Ministère de l'Agriculture des réseaux gravitaires anciens, les associations d'irrigants ne peuvent subvenir dans leur forme actuelle à l'ensemble des coûts de maintenance lourde de ces infrastructures et à leur modernisation. Un double constat s'impose : la durabilité économique *et* institutionnelle de ses systèmes d'irrigation gravitaire est aujourd'hui problématique, et la question de l'avenir de l'organisation et du financement du système d'irrigation gravitaire est posée. Une évolution institutionnelle de leur fonctionnement, et de leurs interactions avec les autres acteurs de la politique locale de l'eau, s'avère inéluctable pour faire face aux évolutions des politiques

publiques de financements, dans le but d'assurer une durabilité économique certaine, plus qu'une certaine durabilité. En cela, ces associations gravitaires ont aujourd'hui un véritable défi institutionnel, économique et managérial à relever pour assurer leur pérennité [Garin et al., 2001], celui de rationaliser leur gestion, de diversifier leur revenu et de participer à une gestion intégrée des ressources en eau, tout en conservant leur vocation agricole.

Si l'on suppose que la contribution financière de ces nouveaux acteurs permettrait une diversification du revenu des ASA, et que leur implication à la gestion de l'association conduirait à ouvrir les portes de l'intégration aux usagers non agricoles, deux questions essentielles se posent alors :

*Comment est-il possible d'évaluer la pertinence du maintien des canaux aux yeux des collectivités ? En d'autres termes, comment est-il possible de qualifier les effets induits de l'irrigation gravitaire de telle sorte qu'ils puissent revêtir l'apparence de services rendus, au même titre que le service d'eau d'irrigation ?*

*Comment ensuite organiser les acteurs d'un territoire autour de cette notion d'effets induits, sur la base de quelles ententes ou de quels contrats ?*

## INTRODUCTION

### **Des effets induits positifs essentiels à la collectivité et à son environnement**

Si l'irrigation gravitaire fût introduite pour s'adapter au milieu méditerranéen, ces régions méditerranéennes furent en retour également transformées par cette pratique prélevant, transportant puis valorisant l'eau des rivières sur une vaste étendue de territoires. L'impact le plus fort, et pourtant le moins visible pour des populations ayant toujours connue ces canaux d'irrigation gravitaire, concerne le développement d'un paysage, d'une végétation, d'une faune et d'une flore exceptionnels compte tenu des conditions qui règnent naturellement dans ces régions méditerranéennes. L'irrigation gravitaire permit en effet au fil des siècles le développement d'un paysage arboré sur des sols naturellement secs, ainsi que le développement d'écosystèmes où siège aujourd'hui une grande biodiversité, dont la faune et la flore qui l'incarnent sont souvent spécifiques aux canaux d'irrigation. La réalimentation des nappes par l'irrigation conféra également des conditions propices au développement de cette végétation, par la proximité de la nappe et l'abondante présence d'eau offerte aux plantes, tout particulièrement en période estivale où l'eau se fait naturellement plus rare. Le territoire de la Crau en est un parfait exemple, puisque y contrastent terres sèches et arides au nord, révélatrices de la dureté du climat, et zones humides et riches au sud, consécutives à l'irrigation traditionnelle des prairies pour la production du foin de Crau.

De même, ces canaux d'irrigation furent traditionnellement à l'origine d'usages non agricoles de l'eau, et particulièrement d'usages industriels, vis-à-vis desquels la production d'huile ou de farine à partir de moulins hydrauliques était au premier plan. Beaucoup de canaux n'étaient d'ailleurs pas à vocation agricole au moment de leur création, mais le devinrent lorsque l'évolution de l'usage des terres le nécessita. Cette triple contribution des canaux à l'amélioration de la qualité de vie de la collectivité – vis-à-vis du cadre de vie, du cycle de l'eau et du fonctionnement même de la collectivité – se retrouve encore aujourd'hui vérifiée et accentuée :

- Les canaux jouent un rôle important dans le **cycle de l'eau**. Le ratio (volume mis à disposition des cultures/ volume prélevé) est faible, et très variable (5 à 60%) selon les caractéristiques du périmètre et son mode de gestion, le reste retournant au milieu naturel, via les nappes ou un réseau de colatures rejoignant les cours d'eau. Selon la localisation et la répartition de ces « pertes » pour le système d'irrigation, les effets induits sur le milieu sont très divers : recharge de nappes superficielles, soutien au débit d'un chevelu hydrographique ou de rivière en aval, entretien de zones humides sur des sites mal drainés, contrôle de la remontée du biseau salé pour des périmètres situés en zone côtière, etc.
- Les canaux sont intégrés au **fonctionnement de la collectivité**, et peuvent profiter à des activités ou des services identifiables, comme l'alimentation en eau potable pour les collectivités via les forages dans des nappes superficielles, l'évacuation des eaux pluviales quand le réseau intercepte les écoulements naturels (en l'absence d'infrastructures spécialisées), l'assainissement pour des collectivités n'ayant à proximité que les canaux d'irrigation pour évacuer l'eau en sortie des stations d'épuration, etc. D'autres effets indirects peuvent être cités, comme la réduction des coûts d'exploitation du pompage pour l'eau potable (par la recharge de la nappe qui permet d'atténuer les variations du toit de la nappe et de diminuer les hauteurs d'élévation de l'eau), ou encore comme la réduction des

investissements pour les réseaux d'eau potable par laminage du pic de demande en eau estivale pour les secteurs périurbains desservis par un réseau d'irrigation fournissant de l'eau brute pour l'arrosage des jardins, le remplissage des piscines, ... ; ou même dans certain cas la réduction des investissements pour la lutte contre les inondations, quand le réseau permet d'écarter le pic de crue en évacuant l'eau vers des plaines d'inondation ; ou encore en constituant des sources d'eau et des barrières de propagation pour la lutte contre les feux de forêt ; ou enfin par l'attrait touristique qu'ils suscitent de par leur richesse patrimoniale.

- Les canaux constituent un élément important du **cadre de vie**, à travers l'alimentation en eau d'un paysage arboré au sein et aux alentours du périmètre, les activités récréatives sur les berges des canaux (promenade, randonnée, pêche, etc.), ou encore à travers la structuration et la révélation du paysage qu'ils opèrent.

Les réseaux d'irrigation remplissent ainsi d'autres fonctions que la simple fourniture d'eau aux irrigants, d'ordres à la fois économique, social et environnemental. Les périmètres irrigués par des réseaux gravitaires ont ceci de particulier qu'ils constituent une sorte de réseau hydrographique anthropisé en forte interconnexion avec le réseau naturel. Mais bien que les canaux soient des éléments artificiels du paysage, le constat s'impose qu'ils font partie intégrante de celui-ci et du système socio-économique qui lui est associé dans de nombreuses régions.

C'est ce qu'ont souhaité mettre en avant certaines associations d'irrigation gravitaire lorsque l'Agence de l'Eau programma la hausse des redevances pour prélèvements d'eau dans le milieu naturel. Si les associations paient une taxe à l'Agence de l'Eau pour les prélèvements qu'elles effectuent, au nom du principe « préleveur – payeur » sur la base du principe pollueur – payeur, pourquoi cette dernière ne les rétribuerait-elle pas pour les restitutions d'eau qu'elles opèrent ? Ce pari osé fût à l'origine de la redevance – prélèvements – restitutions que l'Agence de l'Eau institua en 1996 lors de son 7<sup>ème</sup> programme. Les gestionnaires d'associations d'irrigation gravitaire souhaitent aujourd'hui que soient reconnus et rétribués une plus large gamme d'effets induits positifs, produits en direction des territoires concernés, dans le but de *mutualiser les coûts de l'irrigation gravitaire*.

### **Mutualiser les coûts de l'irrigation gravitaire**

Ces périmètres irrigués bénéficient donc à un large panel d'acteurs locaux (collectivités, services publics, services déconcentrés, associations, etc.) et de politiques locales (urbanisme, environnement, gestion de l'eau, tourisme, etc.), mais ne sont que rarement rétribués directement par ces bénéficiaires. Si nous aurons l'occasion de détailler en quoi ces bénéfices sont appréciables pour ces derniers, nous verrons également en quoi ces services rendus ont un coût réel qui n'est aujourd'hui supporté que par les associations d'irrigants. Dans le contexte d'une durabilité économique et institutionnelle problématique pour ces associations, *faire contribuer les bénéficiaires de ces externalités positives pour le maintien en service de ces canaux pourrait être une opportunité de consolidation et de diversification du revenu des associations d'irrigation gravitaire*.

Ce nouveau partage des charges, encore peu exploré dans la pratique, est justifié d'une part par la prise de conscience de la collectivité d'effets induits positifs essentiels de ces réseaux, mais plus encore par le fait que l'incapacité du monde agricole (agriculteurs et services agricoles de l'Etat) à assumer les coûts de maintenance et de renouvellement conduira à terme à l'abandon de ces réseaux, et donc à la perte de ces effets induits.

### **Prendre en compte les effets induits négatifs**

Néanmoins, si la présence et le fonctionnement des réseaux d'irrigation gravitaire génèrent des effets induits positifs importants, ils sont également à l'origine d'effets induits négatifs tout aussi prépondérants. La réduction des débits des cours d'eau au droit de la prise du canal principal a des conséquences importantes sur la qualité de l'hydrosystème d'une part, et sur les activités situées à l'aval d'autre part (pêche, canoë kayak, ...). Le dépôt des résidus de faucardage et de curage sur les berges et dans le lit des cours d'eau nuit à la qualité des eaux (apport de matière organique pouvant perturber l'hydrosystème), à l'utilisation des canaux comme support d'activités récréatives (promenade, pêche, etc.), ainsi qu'aux riverains de ces canaux. Les pratiques de faucardage, à base de désherbants chimiques, et de désalguage, par le biais de produits à base de cuivre, ont des effets majeurs sur les hydrosystèmes, qu'il est important de maîtriser. Enfin et surtout, la pollution diffuse (pesticides, fertilisants), et à travers cela la qualité des eaux restituées au milieu, demeure un problème sérieux tant sur le plan environnemental, qu'économique (pour les usages ultérieurs de l'eau nécessitant une eau de bonne qualité, comme la production d'eau potable par exemple). Il paraît dès lors difficile pour le monde de l'irrigation gravitaire de revendiquer une rétribution des effets induits positifs produits en laissant dans l'ombre ses effets induits négatifs. *C'est pourquoi le concept de mutualisation des coûts de l'irrigation gravitaire doit être élargi aux coûts perçus par la collectivité toute entière.*

### **Voir l'irrigation gravitaire comme un maître d'œuvre des politiques locales d'aménagement du territoire**

Le rôle prépondérant que jouent ces associations dans le territoire amène à de nombreuses interpellations. Schématiquement, si ces associations ont un tel impact sur le territoire, pourquoi ne pas en profiter pour, par exemple, mieux gérer les nappes et s'assurer d'une plus grande sécurité d'alimentation ? Pourquoi ne pas profiter de ces canaux, réseau hydrographique artificiel, pour conduire une politique de lutte contre les inondations plus performante ? Et même pourquoi tout simplement ne pas laisser périlcliter ces associations et n'utiliser les réseaux que dans ces buts, puisqu'elles n'apparaissent plus suffisamment compétitives et qu'elles génèrent une pollution que l'on souhaite voir disparaître ? Derrière cette question "sournoise" se cache une vraie question : quelle politique d'aménagement du territoire souhaite-t-on aujourd'hui mettre en œuvre et selon quels objectifs ? Il serait tout à fait concevable de faire de ces associations d'irrigation gravitaire des maîtres d'œuvre de politiques publiques locales de gestion du territoire. Et soutenir ces structures d'irrigation gravitaire pour les effets induits positifs qu'elles génèrent ne serait-il pas un excellent moyen de maîtriser aussi leurs effets induits négatifs ?

Rétribuer les "services rendus" par les associations d'irrigation gravitaire nécessite de définir une relation multilatérale entre un collectif d'agriculteurs (l'association) et les acteurs socio-économiques d'un territoire, autour de laquelle se construit une réciprocité d'intérêts. Allant plus loin dans le concept de mutualisation des coûts de l'irrigation gravitaire, il est également possible de rétribuer des efforts entrepris par une association pour maîtriser les effets induits négatifs qu'elle génère, à l'instar de ce qui se fait individuellement dans les Contrats territoriaux d'exploitation. Ce serait dès lors l'occasion d'étendre leur vocation environnementale aux gênes/ contraintes/ pertes/ dégâts occasionnés par la présence ou le fonctionnement de ces périmètres, et ainsi de mettre à nouveau en pratique la vocation environnementale de l'agriculture telle qu'elle est rappelée à l'article premier de la loi d'orientation agricole du 9 juillet 1999. *L'enjeu serait alors de définir un nouveau mode de gouvernance, basé sur la contractualisation des parties prenantes autour du bien ou du*

*service que peut représenter le maintien, le développement, ou la réduction d'une externalité positive ou négative. Si nous pouvons toujours parler de mutualisation des coûts de l'irrigation gravitaire, c'est parce que ces coûts ne sont cette fois plus définis vis-à-vis de la seule association d'irrigation, mais également vis-à-vis de la communauté toute entière, (la pollution engendre un coût pour cette dernière). En cela, il s'agit de voir les associations d'irrigation gravitaire comme un maître d'œuvre des politiques locales d'aménagement du territoire. Utilisées comme un outil de gestion du territoire, ces associations gravitaires permettraient, en plus de l'entretenir, de le cultiver.*

### **Objectif de l'étude**

Ce sont les questions que nous serons amené à traiter lors d'un travail de thèse pour lequel ce rapport constitue l'étape préliminaire. ***L'objectif principal de ce travail est de poser les bases d'une gestion des externalités qui soit orientée dans une optique de service fourni, à l'instar des autres services d'eau (eau potable, brute, d'irrigation sous pression).*** Introduire une telle gestion, à travers un principe d'usager – payeur, requiert nécessairement que soient vérifiées trois conditions [Renault et al., 2003] :

- i) la condition de *coûts de transaction appropriés pour mesurer le service fourni*
- ii) une certaine *flexibilité dans le choix des paramètres du service* par l'usager, et
- iii) la possibilité pour le fournisseur du service de *contrôler l'offre*.

Pour réaliser l'objectif de ce travail, celui de révéler les bases d'une gestion du service d'externalité, nous nous poserons tout au long de ce travail la question de la véracité de ces conditions. Son déroulement sera dès lors opéré en 4 phases, respectivement relatives à l'identification, la quantification, l'évaluation monétaire et la gestion/contractualisation des externalités de l'irrigation gravitaire.

Dans l'idée d'**identifier** ces externalités, il s'agit de faire le point sur les croyances, les idées préconçues, les tendances plausibles et les réalités qui entourent la notion d'externalités associées à l'irrigation gravitaire, c'est-à-dire les effets induits positifs et négatifs qu'elle génère. Pour cela, après avoir fait une présentation globale des externalités dans le **Chapitre 1**, nous décrirons dans les **Chapitres 2, 3, 4 et 5** ces effets induits, dans le but d'en établir un état de l'art le plus exhaustif possible, même si cette tâche est particulièrement difficile et sujet à controverse.

Ensuite, nous penserons ces externalités dans l'optique qu'en ont les gestionnaires d'associations gravitaires : mettre en place des contrats avec les acteurs du territoire concernés par ces effets induits, dans le but qu'une rétribution puisse s'opérer. Cela pose le délicat problème de la **quantification** de ces effets induits, puisque de tels contrats supposent un paiement pour un service rendu préalablement caractérisé, donc quantifié. Nous nous attacherons alors dans les **Chapitres 6 et 7** à recenser brièvement les systèmes d'information qui permettent une telle caractérisation, en soulignant ceux appliqués ou applicables en pratique pour les associations gravitaires, et à dégager les zones d'ombres de la connaissance, c'est-à-dire les informations manquantes auxquelles science et technique ne permettent pas d'accéder avec précision ou fiabilité. Les incertitudes de l'information aujourd'hui disponible sur ces externalités seront ainsi détaillées, et nous essayerons au possible de proposer des systèmes d'information alternatifs permettant d'accéder à une information jugée trop coûteuse ou trop difficilement accessible, au détriment d'une caractérisation précise de ces effets induits.

Cependant quantifier ne suffit pas, et il faut être capable de donner une **valeur socio-économique** à la fourniture de ces biens et services, afin de comparer les bénéfices d'un projet de valorisation de ces effets induits aux coûts qu'il suppose, et ce, dans le but d'en évaluer la « désirabilité sociale » dans le cas d'un bien, ou de définir une tarification appropriée dans le cas d'un service. Mais leur caractère de biens et de services non marchands rend leur évaluation monétaire extra-ordinaire. Comment donner une valeur au paysage créé sous l'influence des canaux, à l'attrait récréatif suscité par ces canaux, comme la pêche par exemple, ou encore à la biodiversité ? Nous exposerons et confronterons alors dans le **Chapitre 8** les méthodes d'évaluation monétaire des biens et des services non marchands au cas des effets induits produits par les canaux gravitaires.

Enfin, nous aborderons les enjeux et les difficultés intrinsèques liés à la **gestion/contractualisation** de ces effets induits, et nous considérerons le problème de leur rétribution sous les angles économique, juridique, et gestionnaire, dans le but de savoir par quel type de structure, avec quel appui de la puissance publique, et selon quel mode de gestion il est possible de mener une gestion de ces effets induits qui soit orientée dans une optique de service. Tout ceci nous permettra dès lors de poser les bases d'une gestion de ces « services d'externalités ». Ce sera l'objet du **Chapitre 9**.

*Nous allons maintenant identifier ces externalités, c'est-à-dire étudier plus en détail quelles sont ces externalités en question, en quoi elles constituent un bénéfice ou une perte, et envers qui.*



# 1 PRESENTATION DES EXTERNALITES DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE

*La finalité de ce travail n'est pas de recenser uniquement les externalités, mais plus généralement toutes les fonctions que peuvent revêtir les canaux afin de cibler des voix de diversification du revenu des ASA. Cela comprend donc les externalités et les fonctionnalités alternatives, que nous allons maintenant définir.*

## 1.1 Concepts et définitions

### ***L'irrigation gravitaire***

On distingue le transport de l'eau de la desserte au niveau du champ. Le terme d'irrigation gravitaire se réfère en réalité au moyen par lequel l'eau est transportée, c'est-à-dire par la force de gravité dans des canaux à ciel ouvert, contrairement aux réseaux sous pression où l'eau est transportée sous les forces de pression. Au sein de l'irrigation gravitaire, on dénombre trois principales méthodes de desserte à surface libre d'eau aux plantes :

- L'irrigation à la raie (méthode la plus courante)
- L'irrigation à la planche (encore appelée irrigation aux calans)
- L'irrigation par submersion (ou irrigation au bassin)

L'irrigation gravitaire, mode de transport, peut également être le support de modes de dessertes sous pression, comme l'aspersion ou l'irrigation localisée (goutte à goutte)<sup>4</sup>. Par souci de simplification, nous n'utiliserons tout au long de ce rapport que le terme générique d'irrigation gravitaire, sans donner plus de précision sur le mode de desserte. Dans la majorité des cas, nous sous-entendons un mode de desserte à la raie, parce que le plus courant et surtout le plus propice à la production d'externalités (ex : recharge de nappe). Cette simplification se retrouve par ailleurs dans les études de flux qui furent réalisées pour le compte d'associations d'irrigation gravitaire afin d'estimer la part d'eau consommée et celle restituée au milieu naturel pour le calcul de la nouvelle redevance – prélèvements – restitutions de l'Agence de l'Eau (AE). Ces études font la même simplification sémantique, l'irrigation à la raie étant quasiment toujours le mode de desserte dominant des périmètres étudiés, mais a contrario ne prennent que très rarement en compte la disparité des modes de desserte.

### ***Externalité***

Les effets induits des activités de production que sont l'irrigation et l'agriculture sont définis dans la littérature sous le terme d'externalités. Nous retiendrons dans ce travail la définition que [Montginoul et al., 2003] donnent des externalités :

« Externalities [...] are broadly defined here as the unintended effects of a production or a consumption activity on a third party not participating in that activity. Externalities are negative when the third party incurs costs and positive when the activity generates some benefits for him/her. »<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> Cela peut notamment être le cas dans des périmètres irrigués de montagne, pour lesquels les fortes pentes observées permettent une mise sous pression naturelle dans les conduites, sans que cela ne nécessite d'appareillage et de station de pompage spécifiques.

<sup>5</sup> « les externalités sont ici globalement définies comme les effets induits d'une activité de production ou de consommation sur un tiers ne participant pas à cette activité. Les externalités sont négatives lorsqu'elles induisent des coûts pour le tiers, et positives lorsqu'elles lui engendrent des bénéfices » (p.117).

Nous compléterons cette définition en définissant comme étant une « *externalité mixte* », une externalité qui peut être tantôt positive, tantôt négative, en fonction de caractéristiques déterminant l'évolution ou l'impact du phénomène générant l'externalité. Par exemple les canaux d'irrigation ont une influence sur les inondations consécutives à une crue, en détournant les écoulements vers les zones situées à l'aval du périmètre. Si les inondations se font sur des zones d'expansion de crue (espaces naturels), ou même sur des parcelles agricoles dont on pourra ensuite indemniser les propriétaires, l'externalité est positive car les canaux auront contribué à la sécurité des biens et des personnes (on aura atteint l'équilibre parétien). Si ces zones d'inondation sont des zones habitées, qui n'auraient peut être pas été inondées sans l'influence des canaux, l'externalité sera négative. En cela, l'influence des canaux dans les inondations est une externalité mixte, dont une des caractéristiques est l'occupation du sol des zones à l'aval du périmètre irrigué.

### ***Aménité***

Le terme d'aménité est souvent utilisé lorsqu'il s'agit de parler des effets induits positifs de l'agriculture, particulièrement sur les paysages. Cela provient du sens originel du mot (ex : un paysage amène), mais son sens économique est aujourd'hui différent. La différence entre une externalité et une aménité réside dans le destinataire des conséquences de l'effet induit. Dans le cas d'une externalité, ce dernier est une tierce personne ne participant pas à l'activité de production ou de consommation. Dans le cas d'une aménité, ce dernier est l'un des participants de l'activité de production ou de consommation.

### ***Fonctionnalité alternative***

Nous utiliserons également le terme de fonctionnalité alternative, qui désigne toutes les fonctions que peut revêtir le « système canal », que ce soit du fait de son fonctionnement ou de sa simple présence. Le terme « alternative » est employé par opposition à la fonctionnalité première des canaux, qui est l'alimentation en eau des cultures.

### ***Le « système canal »***

Le système que nous considérerons tout au long de cet exposé sur les externalités de l'irrigation gravitaire sera ce que nous appelons le « *système canal* ». Le système canal est composé :

#### ➤ **Des canaux.** Il s'agit :

- du *canal de transport*, appelé encore canal primaire, qui assure les fonctions de collecte, de stockage et de transport d'eau ;
- des *canaux de distribution* : canaux secondaires, tertiaires, quaternaires..., permettant de distribuer l'eau transportée sur les parcelles ;
- des *canaux de décharge*, permettant d'extraire du système les volumes techniques ;
- et des *filiolles d'assainissement*, ou *réseau de colatures*, qui sont de petits fossés en terre, végétalisés, récupérant les volumes non utilisés en bout de parcelle pour les évacuer vers les exutoires naturels.

#### ➤ **De terres.**

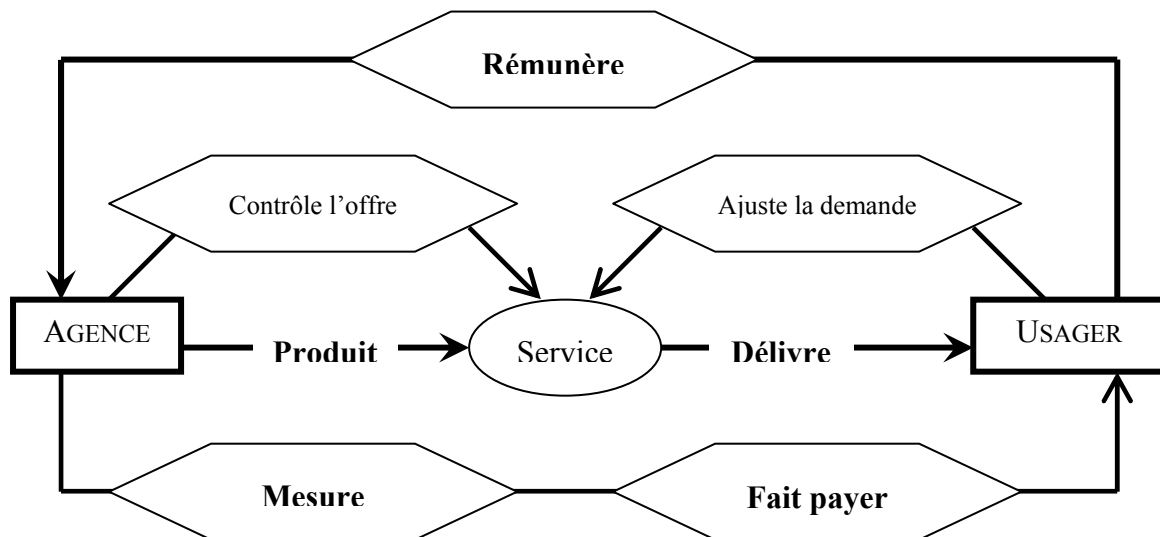
Il s'agit de la *zone d'influence* des canaux précédemment cités, c'est-à-dire de la partie du territoire bénéficiant d'une alimentation en eau depuis le réseau d'irrigation : les parcelles agricoles, ainsi que les terres non agricoles influencées par les canaux (bandes rivulaires). Ses limites sont donc spécifiques à chaque périmètre, en fonction des interconnexions qu'il entretient avec le territoire qui l'entoure.

Enfin, étant donné que l'objectif principal est de déterminer dans quelle mesure il est possible de mener une gestion des externalités dans une optique de service fourni, voyons sur quelles notions repose la gestion classique d'un service.

### **La gestion classique d'un service**

La gestion classique d'un service suppose une interface fournisseur de service / usager définie, synthétisée par la Figure 1 ci-dessous. Cette interface, illustrant la gestion d'un service classique, repose sur trois principes de base [Renault et al., 2003] :

- i) une identification précise des utilisateurs,
- ii) une dénomination claire des services fournis aux utilisateurs, et enfin
- iii) une politique de tarification et de recouvrement des coûts appropriée, basée sur le principe d'utilisateur – payeur.



**Figure 1 : Schéma de principe d'une gestion orientée vers le service**  
(Source : [Renault et al., 2003], p. 172).

Proposer la fourniture d'un service quelconque suppose au préalable l'existence d'une demande vis-à-vis de ce service, qu'elle soit économique ou sociale. Ensuite, d'une manière générale, la mise en place d'une gestion orientée service à travers un principe d'utilisateur – payeur requiert que soient vérifiées trois conditions [Renault et al., 2003] :

1. la condition de *coûts de transaction appropriés pour mesurer le service* fourni
2. une certaine *flexibilité dans le choix des paramètres du service* par l'utilisateur, et
3. la possibilité pour le fournisseur du service de *contrôler l'offre*.

Il est essentiel de penser chacune des fonctions de la Figure 1 dans le cadre informel des externalités. Néanmoins, c'est particulièrement au regard de ces trois conditions que nous analyserons dans le détail chaque externalité, afin *in fine*, de déceler en quoi et comment une externalité donnée est susceptible d'être le support de l'offre d'un « service d'externalité ».

Après avoir défini les différentes notions qui seront utilisées tout au long de ce rapport, ainsi que la gestion classique d'un service et le concept de « système canal », voyons comment s'est faite la prise en compte des externalités de l'irrigation gravitaire, et surtout jusqu'où va cette considération, c'est-à-dire quelles sont les externalités aujourd'hui considérées, sur la base de quelles études, etc.

## **1.2 La prise en compte des externalités de l'irrigation gravitaire dans le monde agricole**

### ***1.2.1 L'origine de la mise en avant des externalités de l'irrigation gravitaire : la Redevance – prélèvements – restitutions de l'Agence de l'Eau***

Toutes les structures d'irrigation doivent s'acquitter de redevances auprès de l'Agence de l'Eau (AE) en conséquence des perturbations du milieu naturel qu'elles génèrent par leurs prélèvements d'eau (principe pollueur – payeur décliné en préleveur – payeur). Ces redevances ne sont généralement pas payées directement par les agriculteurs irriguant collectivement, mais par le biais de l'association syndicale, qui intègre cette redevance dans les taxes qu'elle prélève auprès des usagers propriétaires.

La tarification appliquée par l'AE dès l'origine de cette redevance était une tarification forfaitaire, basée sur les volumes prélevés (ou dérivés), et non sur les volumes réellement consommés par les cultures. Pour l'irrigation gravitaire, cette redevance fonctionnait de la sorte :

- La consommation en eau pour l'irrigation gravitaire est fixée à 25 000 m<sup>3</sup>/ha/an.
- Le montant de la redevance est fixé à [ 1.27 € / 1000 m<sup>3</sup> ] x Facteur Zone.

Le Facteur Zone est un coefficient régional qui caractérise la rareté de la ressource en eau dans la région considérée. Pour exemples, il est égal à 1 dans le Rhône, 2 dans les Hautes Alpes et 3 en Provence, où l'eau est plus rare.

Suite aux revendications du monde de l'irrigation gravitaire pour que soient pris en compte les restitutions d'eau au milieu naturel, l'AE conduisit des études sur l'importance de ce phénomène de restitution. Ces études s'attachaient à quantifier les volumes i) prélevés dans le milieu naturel, ii) mis à disposition des cultures, iii) réellement consommés par ces dernières, et enfin les volumes restitués iv) en surface (rivières) et v) en profondeur (nappe). Il en ressortit qu'effectivement, l'eau restituée au milieu naturel avait un réel impact positif sur ce dernier. L'AE intégra alors ces restitutions dans le calcul de la redevance lors de son 7<sup>ème</sup> programme en 1996, fixant a priori les valeurs moyennes des coefficients considérés dans la base de calcul des rétributions (coefficients de consommation, d'usage, de milieu), sur la base des études ainsi réalisées. L'étude [ENSAM, 2003] s'est par ailleurs attachée à montrer comment *cette prise en compte des volumes restitués au milieu permettait une diminution très importante de la redevance payée à l'AE par les associations d'irrigation gravitaire, particulièrement de PACA*. Elle n'est cependant possible qu'à condition que l'ASA qui souhaite adopter ce mode de tarification réalise un bilan hydrique sur son périmètre, afin de déterminer au minimum les volumes prélevés et consommés par les cultures. Ces études, financées en grande partie par l'AE<sup>6</sup>, permirent par ailleurs à cette dernière d'ajuster a posteriori les moyennes des coefficients de restitution adoptées a priori.

---

<sup>6</sup> L'achat des appareils de mesure et leur installation sont financés par l'AE à hauteur de 80%.

C'est ainsi que les restitutions en rivière et à la nappe furent les premières externalités à avoir été prises en compte. Nous allons maintenant présenter une brève synthèse des premiers résultats relatifs aux taux de restitutions qui furent dégagés de ces études.

### 1.2.2 75% des volumes prélevés restitués à la nappe et en rivière

L'étude [ENSAM, 2003] a synthétisée les résultats de 27 études de flux menées sur différents périmètres irrigués gravitaires, dont 25 seulement présentaient des restitutions de surface et de profondeur chiffrées (cf. Tableau 13 de l'Annexe 2). Ces études de flux sont principalement basées sur l'évaluation des différents termes du bilan hydrique effectué à l'échelle du périmètre irrigué. Les méthodes d'évaluation de ces termes furent très variées (cf. Tableau 14 de l'Annexe 3), selon la taille de l'association en question, ses capacités financières, son degré d'automatisation existant avant l'étude, les particularités des périmètres en question, etc. Les résultats des études des flux de restitution de surface et en profondeur sont synthétisés dans le Tableau 1.

	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
<b>Restitutions au milieu naturel</b> (nappe + eaux de surface)	76% <sup>(1)</sup>	14%	44%	97%
<b>Restitutions à la nappe</b>	40%	15%	20%	70%
<b>Restitutions aux eaux de surface</b>	36%	16%	4%	60%

(1) les pourcentages s'entendent par rapport aux volumes prélevés.

**Tableau 1 : Synthèse des restitutions d'eau en surface et en profondeur par l'irrigation gravitaire**  
(source : [ENSAM, 2003], p.73)

Ces résultats confirment le chiffre courant selon lequel seul 25% des volumes prélevés par l'irrigation gravitaire sont effectivement consommés par les plantes, 76% des volumes prélevés retournant ici, en moyenne, au milieu naturel. Si les restitutions à la nappe représentent 40% des eaux prélevées, elles représentent également 54% des volumes d'eau restitués au milieu naturel, contre 46% pour les restitutions de surface. On constate cependant entre les périmètres irrigués une certaine hétérogénéité des résultats, que ce soit dans l'importance des volumes globaux restitués, ou encore dans les proportions entre restitutions de surface et de profondeur. Des facteurs propres aux périmètres irrigués influencent donc l'importance de ces restitutions, et la façon dont elles sont menées. Pour les déterminer, les auteurs s'intéressèrent aux paramètres qui avaient été pris en compte dans ces études de flux (cf. Tableau 2).

Type de facteurs	Facteurs	Nombre d'étude prenant en compte le facteur considéré	
<b>Milieu physique</b>	Climat	<b>23</b>	
	Végétation	<b>25</b>	
	Sol	7	
	Ressource en eau	Nappe	3
		Cours d'eau	9
	Topographie	5	
<b>Caractéristiques de l'irrigation</b>	Aspects quantitatifs	Surfaces irriguées	<b>24</b>
		Réseau de canaux	10
		Débit moyen	7
		Débit de pointe	8
		Volumes prélevés	<b>22</b>
	Mode d'irrigation	<b>22</b>	
	Mode de desserte	<b>23</b>	
	Caractéristiques des canaux	8	
Origine des eaux	<b>21</b>		
<b>Résultats</b>	Pourcentage d'eau restituée au milieu naturel	<b>25</b>	
	Pourcentage d'eau restituée à la nappe	<b>24</b>	
	Pourcentage d'eau restituée aux eaux de surface	<b>24</b>	
	Pourcentage d'eau consommée par les plantes	<b>25</b>	
	Voie de réalimentation	<b>19</b>	

**Tableau 2 : Facteurs considérés dans les études de flux analysés**  
(source : [ENSAM, 2003], p.73)

Parmi l'ensemble de ces paramètres, les auteurs ne conservèrent pour analyse que les seuls paramètres relevés dans au moins la moitié des études (cf. valeurs en gras dans le Tableau 2) :

- le climat
- la culture dominante
- les surfaces irriguées
- les volumes prélevés
- les modes d'irrigation (à la raie, par aspersion, localisée, etc.)
- les modes de desserte (au tour d'eau ou à la demande)
- les origines des eaux

L'analyse des 27 études consultées ne leur ont pas permis de tirer des conclusions probantes concernant l'influence des facteurs étudiés sur les restitutions globales au milieu naturel, et sur les proportions entre restitutions de surface et de profondeur. Plusieurs raisons à cela. Les paramètres sélectionnés pour en évaluer l'influence sur les restitutions n'étaient pas forcément les plus pertinents. Ils ne pouvaient, de plus, être étudiés indépendamment les uns des autres. Beaucoup de ces facteurs étaient également mal renseignés dans les études qui les prenaient en compte. Dans d'autres cas, bien qu'une relation existe réellement entre un facteur considéré et les restitutions d'eau au milieu naturel, cette relation ne pu être mise en évidence. C'est par exemple le cas du climat dont on sait qu'il influe sur les restitutions, que ce soit par le biais de la pluviométrie locale (qui n'est souvent pas précisée dans ces études), ou de la demande climatique. La zone géographique concernée par ces études (région méditerranéenne) constitue une unité climatique qui empêche de fait toute comparaison avec

d'autres types de climats. C'est également le cas pour le mode d'irrigation (à la raie, par aspersion, localisé, par submersion, etc.) pour lequel on sait qu'il joue directement sur les volumes d'eau mis en circulation (donc sur l'importance des volumes restitués), ainsi que sur le ruissellement et les pertes par percolation. En effet, les études de flux prennent en compte uniquement l'irrigation à la raie comme mode de desserte principal, et jamais ne sont pris en compte les surfaces irriguées par d'autres modes de desserte. Or, force est de constater que les restitutions au milieu naturel ne sont pas le seul fait de l'irrigation à la raie, mais également des autres modes d'irrigation.

Enfin, à côté de ces biais ou de ces approximations, certains facteurs ne peuvent être étudiés parce qu'ils ne sont pas suffisamment décrits dans les études, bien qu'ils aient un rôle certain. C'est par exemple le cas de la topographie du périmètre et de ses alentours. Si le relief n'a pas de conséquence sur le volume global d'eau restitué au milieu, il conditionne fortement la répartition de ce volume entre restitutions de surface et restitutions en profondeur vers la nappe, puisque la pente locale conditionne en grande partie le taux d'infiltration, à l'instar de la nature des sols. C'est aussi le cas de l'état et du type de revêtement des différentes sections du canal, puisque des canaux en terre ont des fuites pouvant atteindre 20% du débit nominal, alors que pour les canaux revêtus en béton, les fuites sont bien plus faibles car elles ne proviennent que des fissures présentes dans les canaux. Or, les particularités relatives à l'état des canaux sont difficiles à considérer, et ne l'ont généralement pas été dans le cadre des études de flux. Enfin, un dernier facteur insuffisamment renseigné dans ces études concerne l'irrigation des jardins en zone urbaine et les prélèvements d'eau industriels, qui peuvent constituer des flux non négligeables dans le bilan hydrique du périmètre irrigué (nous aurons l'occasion d'y revenir).

Quelques relations entre les facteurs pris en compte et les restitutions observées ont cependant pu être dégagées [ENSAM, 2003] :

- **Le mode de desserte** (à la demande ou au tour d'eau) ne conditionne pas l'importance des restitutions au milieu naturel d'une façon générale. Il a par contre une influence nette sur l'importance relative qu'ont les restitutions aux eaux de surface par rapport aux restitutions vers les eaux souterraines (Tableau 3).

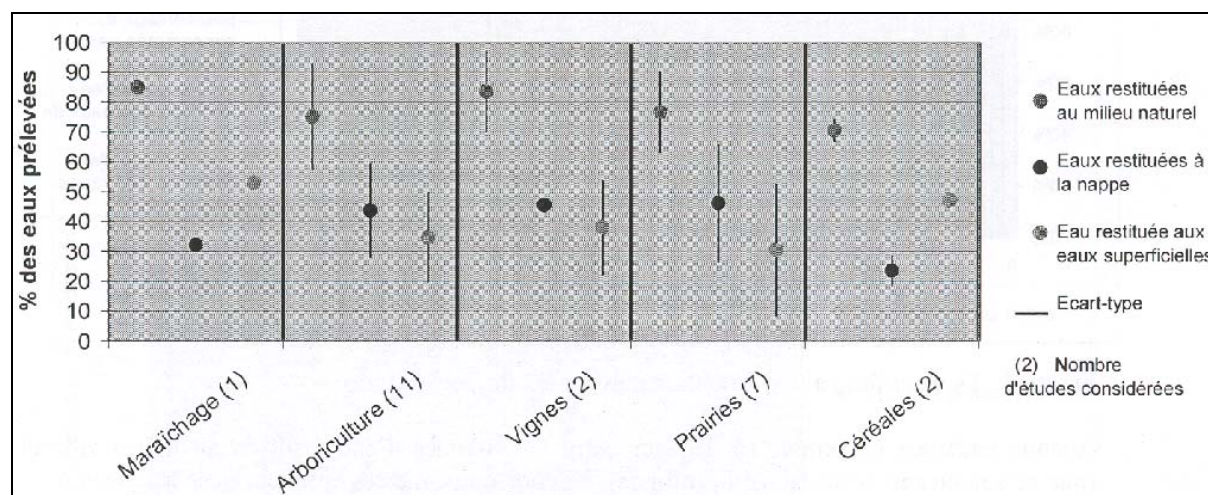
			<b>Restitution au milieu naturel</b> (nappe + surface)	<b>Restitution à la nappe</b>	<b>Restitution aux eaux de surface</b>	<b>Consommation par les plantes</b>
<b>Mode de desserte</b> (1)	<i>A la demande</i>	<b>Moyenne</b>	81,1%	42,3%	38,8%	20,6%
		Ecart-type	9,7%	17,9%	14,3%	12,3%
	<i>Au tour d'eau</i>	<b>Moyenne</b>	75,8%	43,1%	32,7%	24,0%
		Ecart-type	14,0%	14,5%	18,7%	14,2%

(1) les seuls types de desserte observés dans les études en tant que type de desserte principal sur le périmètre est l'irrigation à la raie.

**Tableau 3 : Restitutions d'eau au milieu naturel selon le mode de desserte**  
(source : [ENSAM, 2003], p.77)

La fiabilité de ces résultats est créditée par la répartition équilibrée observée entre les deux modes de desserte dans les études concernées (sur 20 études, 9 concernent l'irrigation à la demande<sup>7</sup>, et 11 au tour d'eau, en tant que mode de desserte principal du périmètre).

- **La culture dominante** joue sur la nature des restitutions. Lorsqu'il s'agit de l'arboriculture, des prairies et de la vigne, les restitutions se font majoritairement par percolation vers la nappe, alors que pour les cultures maraîchères et céréalières, les restitutions de surface l'emportent sur celles en profondeur (cf. Figure 2).



**Figure 2 : Restitutions au milieu naturel en fonction du type de culture principale du périmètre**  
(source : [ENSAM, 2003], p.74)

La prudence vis-à-vis de ces chiffres s'impose cependant, particulièrement vis-à-vis des cultures de maraîchage, de céréales et de vigne, vis-à-vis desquelles seuls peu de cas furent étudiés. Ces différences dans les restitutions peuvent aussi provenir d'une différence dans la nature des sols, élément rarement pris en compte dans ces études. Enfin, pour les auteurs il n'est pas possible de dégager de relation entre la nature des restitutions et la densité de recouvrement du sol par les cultures, puisque notamment les cultures de prairies et celles arboricoles montrent des restitutions analogues, alors que les premières sont des cultures couvrantes, contrairement aux secondes qui ne le sont que peu. De même, il faut souligner que dans ces études les cultures dominantes sont supposées recouvrir entièrement les périmètres, puisque ne sont pas prises en compte outre mesure les hétérogénéités de l'occupation du sol.

<sup>7</sup> Rappelons que l'irrigation à la demande n'est pas uniquement possible en irrigation sous pression, mais également en irrigation gravitaire, même si cela concerne préférentiellement les moyennes et surtout les grandes ASA.

## CONCLUSION

Les études de flux menées jusqu'à aujourd'hui ont permis d'affirmer définitivement le rôle positif que jouait l'irrigation gravitaire par rapport aux restitutions d'eau qu'elle opère vers le milieu naturel, plus ou moins également réparties entre eaux de surface et eaux souterraines. Si quelques relations ont pu être mises en évidence entre certains facteurs et les restitutions d'eau, elles imposent la vigilance et doivent faire face à la très grande hétérogénéité des méthodes de quantification employées sur les différents périmètres, dont nous allons largement parlé dans la partie de ce rapport consacrée à la quantification des externalités. L'importance de ces restitutions tient beaucoup aux spécificités du climat méditerranéen, qui ont fait de l'irrigation gravitaire dans ces zones ce que l'on pourrait appeler une spécificité hydraulique. Néanmoins, il serait réducteur de ne voir comme effets positifs de l'irrigation gravitaire sur le milieu naturel que les seules restitutions. Ces effets sont variés et d'une importance plus ou moins grande pour les territoires irrigués par ces associations. Pour les gestionnaires d'ASA, les externalités produites ne s'arrêtent pas simplement aux différentes restitutions au milieu naturel, mais s'étendent de manière beaucoup plus large à la gestion des territoires. Nous allons maintenant nous attacher à présenter de manière globale l'ensemble des externalités positives et négatives que nous avons pu recenser, en donnant une importance toute particulière aux éléments qui permettent de les caractériser.

### 1.3 Présentation générale des externalités

Le Tableau 4 ci-dessous offre un récapitulatif des externalités associées au système canal, à travers une typologie basée sur l'origine de ces externalités, selon qu'elles proviennent de la présence, du fonctionnement ou de l'entretien du système canal. *C'est en fonction de cette origine que nous procéderons dans les parties suivantes à la présentation des externalités.*

FAMILLES	FONCTIONS	DECLINAISONS	EXTERNALITES POSITIVES	EXTERNALITES NEGATIVES	
Flux d'eau  ( <i>Fonctionnement du Système Canal</i> )	Prélèvement	Rivière		Diminution de la qualité de l'hydrosystème par la baisse de son pouvoir auto-épurateur et la concentration des pollutions	
				Dégradation des usages non consommateurs de la ressource	
				Indisponibilité de la ressource pour usages consommateurs	
	Alimentation	Nappe		Disponibilité accrue de la ressource pour les usages consommateurs. Recharge maximale en période estivale. Baisse des coûts de pompage pour l'AEP, par stabilisation des variations du toit de la nappe à un niveau élevé	
				Maîtrise de la salinisation des sols par la <i>maîtrise de la remontée du biseau salé pour des périmètres en zone côtière</i>	Salinisation des sols par <i>remontées de sels fossiles</i> suite à la remontée de la nappe
				Maîtrise des tassements de sol (surexploitation de la nappe)	

<b>Flux d'eau</b> <i>(suite)</i>  <b>( Fonctionnement du Système Canal )</b>	<b>Alimentation</b> <i>(suite)</i>	<b>Rivière</b> (soutien de débit et d'étiage)	Amélioration de la qualité de l'hydrosystème par l'augmentation de son pouvoir autoépurateur et la dilution des pollutions	Les restitutions en rivière peuvent contribuer à leur débordement lors de crues (inondation)	
			Amélioration des usages non consommateurs de la ressource		
			Disponibilité accrue de la ressource pour les usages consommateurs		
		<b>Environnement terrestre</b> (flore et faune)		Paysage arboré dans des régions méditerranéennes naturellement sèches et monotones	Développement d'espèces nuisibles (ex :Jussie)
				Augmentation de la biodiversité de la faune et de la flore terrestres	Végétation éventuellement sans intérêt réel et/ou consommant beaucoup d'eau
				Consolidation de berges par les systèmes racinaires, évitant leur affaissement en cas de crue	Fragilisation de berge éventuelle si développement d'arbres à système racinaire superficiel plan (ex : peuplier)
				Augmentation de la qualité des habitats aquatiques par le biais de la ripisylve (création d'ombre, filtre à pollution en cas d'écoulements d'eau depuis les parcelles vers les canaux lors de précipitations, ...)	
				Alimentation en eau de zones humides (biodiversité)	
		<b>Usagers d'eau brute</b>  (rurbains, collectivités, industries, activités de loisir)		Ecrêtement du pic de consommation d'eau potable pendant la période estivale Baisse des coûts d'exploitation du service d'eau potable	
				Prévention des forages domestiques individuels dans la nappe	
Développement de jardins d'agrément Embellissement et attractivité accrue de la commune Renchérissement du foncier Développement économique					
<b>Collecte</b>	<b>Ressuyage</b> des terres agricoles	Les cultures ne souffrent pas d'asphyxie	Contraintes et surcoûts d'exploitation		

	<b>Collecte (suite)</b>	<b>Evacuation des eaux de ruissellement urbain</b>	Charge hydraulique moindre dans les réseaux d'assainissement et en entrée des stations d'épuration, les canaux jouant le rôle d'un réseau séparatif de substitution pour les communes  Prévention des inondations	La qualité et le volume des rejets peuvent perturber le service d'irrigation (débordements, dépôts de sédiments urbains perturbant l'écoulement, ...) Contraintes et surcoûts d'exploitation Augmentation de la fréquence et des coûts de curage Responsabilité juridique du gestionnaire engagée en cas d'inondation
		<b>Evacuation des eaux de crue</b>	Lutte contre les inondations dans certaines situations	Dégâts lourds sur les canaux Aggravation des risques d'inondation dans certaines situations Responsabilité juridique du gestionnaire engagée
<b>Flux de solutés  ( Fonctionnement du Système Canal )</b>	<b>Pollution</b>  Fertilisation, Produits phytosanitaires	<b>Nappe</b>		Présence de pollutions d'origine agricole (fertilisants, pesticides) Atteinte aux usages consommateurs de la ressource Risques sanitaires liés aux prélèvements domestiques
		<b>Rivière</b>		De fortes précipitations peuvent conduire à des restitutions de surface chargées en pollution (azote, pesticides), par lessivage des parcelles
<b>Présence des canaux  ( Présence du Système Canal )</b>	<b>Patrimoniale</b> Ouvrages hydrauliques anciens	Amélioration de la qualité de vie Développement économique par le biais d'activités récréatives ou touristiques Attractivité des communes abritant les canaux, vis-à-vis de futurs administrés et des touristes Augmentation du prix du foncier	Coûts d'entretien très élevés	
	<b>Paysagère</b> Révélation du paysage			
	<b>Récréative et touristique</b> Pêche, chasse, randonnée, ...		Responsabilité juridique du gestionnaire engagée	
	<b>Lutte contre les feux de forêt</b>	Barrière de propagation Source d'alimentation en eau pour les pompiers dans des zones isolées	Coûts liés aux factures d'eau et à l'endommagement des bornes d'irrigation (matériel mal adapté)	
	<b>Prévention des glissements de terrain</b>	Prévention des glissements de terrains en situation de fortes pentes		
<b>Présence (et entretien) de l'espace agricole</b>	<i>DOMAINE DES AMENITES RURALES (cf. CTE, mesures agri-environnementales, etc.)</i>			

<b>Opérations de curage et de faucardage</b>  <i>( Entretien du Système Canal )</i>	Dépôts des résidus de curage et de faucardage sur les berges et le lit des canaux.		Augmentation de la charge nutritive dans le canal, perturbation énergétique du milieu. Perte en qualité des hydrosystèmes. Atteinte à la qualité des activités récréatives menées sur les berges
	Mécanisation de la tâche  Pratique de faucardage et d'éradication des algues		Fragilisation des berges (matériel mal adapté) Destruction d'habitats pour la faune associée aux berges  Désherbage chimique direct sur les berges. Baisse de la qualité des hydrosystèmes. Pollution retrouvée en aval en rivière. Utilisation de produits à base de cuivre. Atteinte à la vie piscicole.

**Tableau 4 : Tableau de synthèse des externalités de l'irrigation gravitaire**

Après avoir effectué cette présentation globale des externalités positives et négatives associées au système canal, nous allons entrer dans le détail en les abordant individuellement, selon qu'elles sont liées au fonctionnement (Chapitre 2), à la présence (Chapitre 3) ou à l'entretien du système canal (Chapitre 4), avant d'étudier dans le Chapitre 5 les externalités liées aux fonctionnalités alternatives des canaux (ex : service d'eau brute pour les usagers non agricoles).

## 2 LES EXTERNALITES LIEES AU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME CANAL

### 2.1 Impacts sur la nappe phréatique

#### 2.1.1 *La réalimentation de la nappe phréatique*

Un tiers des territoires dispose de ressources en eaux superficielles ou souterraines de qualité, et près des deux tiers possèdent des ressources souterraines [DATAR, 2002]. On compte en France environ 450 aquifères, allant de 100 à 100 000 km<sup>2</sup>, dans lesquels sont puisés chaque année près de 7 milliards de m<sup>3</sup>. La moitié de ces volumes prélevés servent à l'alimentation en eau potable (AEP), ce qui permet au final de couvrir 65% des besoins domestiques, 20% des besoins agricoles et 25% des besoins industriels. Dans ce cadre, la réalimentation de la nappe par les infiltrations profondes depuis les périmètres irrigués ne doit pas être vue comme l'apanage de quelques périmètres.

#### **Présentation du phénomène**

Les infiltrations profondes peuvent, selon le contexte, soit réalimenter une nappe déjà existante, soit créer une nappe (nous ne considérerons que le premier cas, pour simplifier, puisqu'une fois la nappe créée, l'irrigation la réalimente). La réalimentation de la nappe phréatique se fait depuis le système canal par trois voies :

- les infiltrations d'eau depuis les canaux de transport (primaire), de distribution (secondaire, tertiaire), de décharge et enfin d'assainissement (réseau de colatures), qui collectent les eaux excédentaires en sortie de parcelle ;
- Les infiltrations depuis les parcelles irriguées
- Les infiltrations diffuses des eaux de précipitations dans le sol. Ces infiltrations qui réalimentent la nappe s'opèrent sur tout le périmètre irrigué, ainsi qu'à l'extérieur du périmètre.

Le premier facteur d'infiltration de l'eau dans le sol depuis les canaux tient au revêtement de ces derniers. Il conditionne l'importance des volumes restitués au milieu, ainsi que l'importance relative des restitutions à la nappe vis-à-vis des restitutions de surface (cf. 1.2.2). Le revêtement des canaux permet ainsi de privilégier un type de restitution en particulier. Par exemple lorsque les restitutions d'eau dans des cours d'eau aval (différents de la rivière de prélèvements amont) se révèlent être d'un point de vue environnemental, social ou économique, bien plus importantes que des restitutions en nappe, il est possible de privilégier les restitutions de surface en aval par un revêtement en béton. De même, lorsqu'il s'agit de privilégier la présence d'eau dans la rivière de prélèvements amont, le revêtement des canaux permet de conduire d'importantes économies d'eau sur le périmètre. Le canal de Gignac compte par exemple réaliser 10 millions de m<sup>3</sup>/an d'économies par cette voie.

Ensuite, de nombreux paramètres entrent en jeu dans ces restitutions en profondeur, notamment les caractéristiques du sol (porosité, texture), qui vont déterminer leur importance. Un paramètre jouant de manière trompeuse sur les infiltrations est le niveau d'eau et le débit dans les canaux. L'idée selon laquelle d'importants débits véhiculés conduisent à d'importants taux d'infiltration est fautive, au moins en partie. Le taux d'infiltration dépend de la charge hydraulique appliquée sur les parois des canaux. Pour un même volume transité dans les canaux, plus le débit sera faible, plus la charge hydraulique (=ligne d'eau pour des

canaux à ciel ouvert) sera élevée et plus les infiltrations seront importantes<sup>8</sup>. Ainsi, les infiltrations vers la nappe depuis les canaux eux-mêmes sont maximales pendant la période de pointe des irrigations, durant laquelle la ligne d'eau dans les canaux est la plus haute.

De plus, il est certain que la part la plus importante des infiltrations d'eau vers la nappe provient de l'irrigation des parcelles. Si la saison d'irrigation voit les débits dans les canaux augmenter, les volumes transités augmentent également de beaucoup, ainsi que ceux appliqués sur les parcelles (demande climatique plus importante). Il en ressort que *les infiltrations en profondeur depuis le système canal sont prépondérantes pendant la période estivale, caractérisant la pointe des irrigations.*

Enfin, les infiltrations sont favorisées par l'importance des surfaces mouillées, c'est-à-dire des zones de contact eau – sol. En cela, *la sectorisation des terrains par le réseau de colature permet l'optimisation des infiltrations. Les filioles ont ainsi un rôle non négligeable dans les restitutions vers la nappe, même si leur faible dimension conduit à penser le contraire.*

### **Externalités recensées**

L'externalité principale est une disponibilité accrue de la ressource pour les usages consommateurs, dont l'exploitation d'eau pour l'alimentation en eau potable (AEP) des communes est le plus important<sup>9</sup>. A cet effet positif sur la disponibilité de l'eau, s'ajoute un effet positif sur les coûts d'exploitation de la ressource. La réalimentation estivale de la nappe, au moment où celle-ci est la plus sollicitée, permet de limiter au maximum les variations de niveau d'eau dans la nappe, donc dans les puits de captage de l'eau brute destinée à l'AEP. Ces variations perturbent l'exploitation du service d'eau et, en nécessitant de disposer d'un pompage s'adaptant aux variations de niveau, entraîne des coûts supplémentaires significatifs. Enfin, un niveau d'eau plus élevé dans la nappe permet de diminuer les coûts de pompage, très fortement dépendant des hauteurs d'élévation de l'eau.

### **Bénéficiaires**

Les bénéficiaires de cette réalimentation de la nappe sont variés. Ils peuvent le cas échéant être :

- des irrigants individuels (insatisfaits du service d'eau fourni par l'ASA, ou ne pouvant en bénéficier car leurs parcelles ne sont pas inscrites dans le périmètre syndical de l'association) ;
- des communes ou des syndicats intercommunaux pour l'AEP. A titre d'exemple, 29 communes, dont Cavaillon, sont alimentées à hauteur de 10 Mm<sup>3</sup>/an par le Syndicat intercommunal des eaux potables Durance-Ventoux, qui prélève l'eau des nappes alluviales de la Durance, elles-mêmes alimentées depuis le réseau dense de canaux présent sur le territoire de la plaine Cavaillonnaise [*Chambre d'agriculture PACA, 2000*] ;
- ou encore des industriels, pour leurs besoins spécifiques (refroidissement des machines, nettoyage de grandes surfaces, etc.).

---

<sup>8</sup> De même il serait faux de penser que la présence d'une végétation sur les versants des berges est un obstacle à l'infiltration. En s'opposant à l'écoulement, elle fait augmenter la ligne d'eau et donc la charge hydraulique.

<sup>9</sup> On estime qu'un français consomme de 150 à 200 litres d'eau potable par jour, dont l'origine provient à 60% d'eaux souterraines, à 30% d'eaux de surface, et à 10% d'eaux « mixtes » (source : *Hervé Capra, cours d'hydroécologie animale, ENGEES, 2003*).

### **Opportunité du bénéfice**

La recharge de nappe depuis le système canal intervient logiquement pendant la période des irrigations (mars à décembre), et plus particulièrement lors de la période de pointe des irrigations (mai à septembre), lorsque le canal véhicule ces plus importants volumes. Cette réalimentation principalement estivale est d'autant plus précieuse qu'elle intervient lorsque la ressource souterraine (et superficielle) est le plus sollicitée. Ce surplus de consommation estival s'explique par les 'usages de saison'. Concernant l'agriculture, il s'agit principalement des irrigations individuelles, qui concernent en moyenne 60% des surfaces irriguées en France (ce chiffre diminue cependant beaucoup dans le cas des régions d'irrigation gravitaire, comme en Languedoc-Roussillon où l'irrigation individuelle ne concerne que 30% des surfaces irriguées). Au niveau domestique, ces usages de saison concernent l'arrosage des jardins surtout, depuis le réseau d'eau potable, ainsi que d'autres usages annexes (lavage des voitures, remplissage des piscines, ...). Il peut enfin s'agir pour les communes d'arroser les espaces verts, les terrains de sport ou d'autres espaces verts communaux (ronds points...). Cette fonction de réalimentation depuis les canaux permet ainsi de maintenir à tout moment de l'année un niveau d'eau élevé dans la nappe, ce qui confère une certaine durabilité d'exploitation de la ressource par ses différents usagers – consommateurs.

### **Le cas particulier des nappes stagnantes**

Dans ce qui précède, nous avons implicitement considéré que la nappe était une *nappe circulante*, que les infiltrations avaient créé ou simplement réalimenté (cas d'une nappe préexistante). Or, un deuxième type de nappes doit aussi être considéré, les *nappes stagnantes*, pour lesquelles il n'existe aucune circulation souterraine permettant un brassage de l'eau. La stagnation de l'eau présente dans ces nappes crée les conditions propices à des réactions chimiques réductrices entraînant une anaérobiose (absence d'oxygène), puis la formation sur l'horizon supérieur à la nappe d'un *sol à GLEY* (ou *réductisol*). Ce type de sol ne permet pas le développement de l'appareil végétatif souterrain des cultures, et n'est par conséquent que peu utilisable en agronomie, contrairement aux nappes circulantes (la remontée de ce type de nappe à la surface conduit à la formation d'une tourbière).

L'irrigation au dessus d'une nappe stagnante peut donc induire la remontée de cette nappe réductrice, et la dégradation des cultures (inhibition ou incapacité de développement). Dans ce cas très précis, l'effet induit généré correspondrait à une externalité négative du fonctionnement des canaux. Lutter contre ce phénomène nécessite d'abaisser le toit de la nappe, que ce soit par la mise en place d'un système de drainage souterrain, ou par un revêtement des canaux minimisant les infiltrations souterraines.

## **2.1.2 La pollution des eaux souterraines**

### **Présentation de la pollution agricole diffuse**

L'agriculture est la cause première des pollutions diffuses<sup>10</sup>. La pollution d'origine agricole se divise en cinq types de polluants : les fertilisants, les pesticides (herbicides, fongicides, insecticides), les polluants organiques fermentescibles, les métaux et les métalloïdes. Nous ne considérerons ici que les plus fréquents, pesticides et fertilisants. Les engrais sont

---

<sup>10</sup> Une pollution diffuse est caractérisée par une émission faible de polluants par source, un grand nombre de sources, des coûts d'observation de la pollution élevés et de grandes difficultés pour vérifier l'application des normes.

particulièrement riches en azote, dont l'excès peut passer dans les eaux souterraines et superficielles. L'augmentation de la teneur en nitrate des eaux est d'une part l'un des problèmes actuels les plus préoccupants sur le plan écologique, et, d'autre part, a des incidences sanitaires sérieuses. Concernant les pesticides, également largement utilisés, ils sont plus considérés dans leur globalité, comme des « polluants types » [Bontoux, 1993]. En effet, la très grande variété des produits employés ne permet pas de dégager des caractéristiques précises et systématiques, mais uniquement des caractéristiques communes. Leur rémanence dans les eaux est par exemple très variable selon le type de pesticide employé, et dépend avant tout de la structure moléculaire de ce dernier.

L'irrigation gravitaire à la raie est un phénomène en apparence propice au transport des pollutions vers les nappes souterraines. Les importants volumes d'eau appliqués sur les parcelles se chargent en polluants, qui sont ensuite mis à disposition de la plante et transférés vers la nappe par percolation. Les sols n'ont généralement pas une capacité d'adsorption suffisante pour filtrer ces pollutions. Mais si l'irrigation gravitaire favorise le transport des polluants vers la nappe, les importants volumes d'eau déversés sur les cultures lors de l'irrigation provoquent a contrario une dilution importante de ces pollutions. En clair, l'irrigation gravitaire à la raie présente l'inconvénient de maximiser le transport de polluants vers la nappe, mais également l'avantage d'accroître leur dilution.

### **Caractérisation physico-chimique des eaux avant et après passage sur les parcelles**

[Chambre d'agriculture PACA, 2000]

Les flux de substances physico-chimiques en entrée (eau prélevée dans le milieu amont et appliquée sur la parcelle) sont constitués :

- *de substances minérales* :
  - particules en suspension (argiles, limons)
  - d'ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc.
- *de substances organiques* : débris de végétaux, molécules organiques en suspension ou solubilisées, ..., notamment provenant des végétaux sur les berges des cours d'eau et des canaux. La biodégradation rapide de la matière organique ne permet pas d'engendrer une accumulation notable de cette matière organique sur les parcelles, même dans le cas où ces apports ne sont pas négligeables.

Après l'application de l'eau sur les parcelles, les volumes infiltrés rejoignent la nappe, et les eaux excédentaires – appelées volumes techniques – sont collectées en aval de la parcelle par le réseau de colatures. Ces eaux excédentaires chargées en pollution diffuse peuvent, selon le cas, constituer un apport conséquent de pollution au milieu naturel (ex : forte précipitation après application des fertilisants, conditions topographiques propices au ruissellement, etc.), même si c'est par les infiltrations d'eau en profondeur que la pollution diffuse se propage généralement de manière privilégiée.

D'une manière générale, l'importance des flux de polluants en provenance de la parcelle irriguée ont comme déterminants essentiels :

- Les pratiques de fertilisation
- Les pratiques d'irrigation, où l'on distingue :

- *la conduite de l'irrigation* (choix des paramètres d'arrosage : débit, temps et mode d'arrosage). Le principal risque est lié à des apports d'eau excessifs qui peuvent générer des flux de pollution selon deux mécanismes :
  - le ruissellement à la surface du sol dû à des *intensités d'apports d'eau* trop importantes ;
  - le drainage en profondeur, sous la zone racinaire, dû à des *volumes d'apports d'eau* trop importants.<sup>11</sup>
- *Le pilotage de l'irrigation* (relatif à la décision d'irriguer)

Le lieu de pollution privilégié (eaux de surface ou nappe) est de plus lié au type de polluant. Les nitrates sont préférentiellement emportés vers la nappe par lixiviation (lessivage) des sols, alors que les produits phytosanitaires seraient préférentiellement emportés vers les eaux superficielles par le ruissellement [Tiercelin, 1998]. Les flux de substances en sortie sont, eux, constitués :

- *de substances minérales* : essentiellement sous forme d'ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ )
- *de substances organiques* : il s'agit de la matière organique soluble provenant de la décomposition des végétaux, mais également de résidus de pesticides, qui existent sous de multiples formes.

### **Perdants**

La présence dans la nappe de doses trop élevées d'agents polluants (nitrates, phosphates, etc.) pose des problèmes à deux niveaux. Cette pollution des eaux conduit d'une part les collectivités à devoir assurer des traitements de potabilisation de l'eau plus poussés, en ajoutant des compartiments de traitement spécifiques à cette pollution (ex : station de nitrification/dénitrification). Ce traitement, qu'il soit biologique ou physico-chimique, représente une part importante des coûts d'exploitation du service de potabilisation. La collectivité a donc un intérêt réel à voir cette pollution diminuer à sa source (méthode préventive), plutôt que d'utiliser des méthodes palliatives ou curatives coûteuses, d'autant que les surcoûts qu'elle génère sur le service d'eau potable se répercutent directement sur les factures d'eau de leurs administrés.

La pollution des eaux souterraines soulève ensuite un problème important en terme de santé publique. Beaucoup d'usagers domestiques possèdent des forages individuels pour leurs besoins en eau brute, et la plupart non pas conscience des dangers de cette pollution invisible pour l'organisme. Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) se réduisent en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) dans l'organisme, dont l'effet majeur est de se substituer de manière très efficace à l'oxygène lors de sa fixation sur l'hémoglobine des cellules rouges du sang. Le transport d'oxygène dans les tissus est réduit, le corps est privé d'oxygène, et le sang devient bleu. Les conséquences de ce transport réduit d'oxygène se manifestent particulièrement chez les jeunes enfants de moins de 6 mois, par ce que l'on nomme la méthémoglobinie (*Methaemoglobinaemia*), encore appelé le syndrome du bébé bleu (*blue-baby syndrome*). De plus, dans l'estomac les nitrites peuvent former des nitrosamides, dont la plupart ont un pouvoir cancérigène reconnu. Les nitrates se sont également révélés être cancérigène chez l'animal, mais ce fait reste encore à démontrer chez

---

<sup>11</sup> Notons que des flux de polluants peuvent également être transférés en rivière en dans des nappes peu profondes par écoulements hypodermiques.

l'homme. La norme européenne (CEE, 1980) de qualité des eaux souterraines fixe un seuil maximal admissible de 50 mg/L de nitrate, pour une valeur seuil recommandée de 25 mg/L. Le phénomène décrit au dessus n'a été observé qu'à des doses de nitrates significativement supérieures à la valeur maximale admissible. Si le risque reste réduit, il ne peut être pris, et reste posé dans le cas des usagers domestiques qui utilisent cette eau brute souterraine dans leur vie courante. Concernant les autres polluants, rangés dans la catégorie des ingrédients actifs des pesticides ainsi que de leurs métabolites et les produits de réaction, leur seuil maximum admissible est fixé par les mêmes normes de qualité des eaux souterraines à 0,1 µg/L (cf. Annexe 5).

### **L'importance de l'irrigation et de la fertilisation**

La pollution agricole diffuse constitue une externalité négative du fonctionnement du système canal. La conduite et le pilotage de l'irrigation, jouent un rôle prépondérant dans le lessivage des nitrates. En général, l'application de l'azote se fait avant la confection des raies. Quand celles-ci sont confectionnées, l'azote se concentre naturellement sur les billons (=ligne de terre entre deux raies), ce qui crée une très forte hétérogénéité spatiale de l'azote entre raies et billons. Dans le cas d'une sous-irrigation, les hauteurs d'eau dans les raies sont trop faibles, et l'azote reste sur les billons (il s'agit d'une des causes principales de l'hétérogénéité de la localisation de l'azote). On observera alors, en fin de campagne, un lessivage des reliquats d'azote vers la nappe suite aux précipitations hivernales, constituant une des formes contributives les plus importantes de la pollution des nappes [Mailhol *et al.*, 2004]. En cela, le pilotage de l'irrigation (le choix d'irriguer) revêt une importance primordiale. Gérer le lessivage de l'azote est d'autant plus difficile quand les précipitations sont régulières, car elles constituent une irrigation naturelle non maîtrisée. Cependant, dans la région méditerranéenne, si les précipitations sont très irrégulières, elles sont également très ponctuelles, ce qui facilite le pilotage de l'irrigation.

Si les pratiques d'irrigation ont une importance primordiale dans les processus de pollution des nappes, il en va de même concernant les pratiques de fertilisation. Il a par exemple été expérimenté sur du maïs que pour un apport d'azote d'environ 200 Kg.N/ha<sup>12</sup>, et une irrigation de fort tirant d'eau (240mm la première saison d'irrigation puis 200mm les suivantes), soit des conditions d'une fertilisation raisonnée et d'une irrigation générant volontairement un risque environnemental, le lessivage des nitrates atteignait 22 Kg/ha, soit près de 10% de la quantité d'azote appliquée [Mailhol *et al.*, 2004]. De même, toujours sur du maïs, il a été montré que pour une irrigation raisonnée et une fertilisation excessive, de 400 Kg.N/ha, le lessivage des nitrates atteignait 42 Kg/ha, soit également près de 10% de la quantité d'azote appliquée ; mais que lorsque la quantité d'azote était ramenée à une dose normale de 200 Kg/ha sous la même irrigation, seul 7% des nitrates étaient lessivés, c'est-à-dire 14 Kg/ha, soit trois fois moins que précédemment pour une quantité d'azote appliquée deux fois moindre [Popova *et al.*, 2000a; Popova *et al.*, 2000b].

Les pratiques d'irrigation et de fertilisation sont aussi importantes en irrigation à la raie qu'en aspersion. En effet, l'effet d'un mauvais pilotage de l'irrigation est susceptible d'avoir des conséquences tout aussi néfastes dans le cas de l'irrigation par aspersion, voir même plus néfastes, du fait que ces mêmes quantités d'azote présentes sur le sol y demeurent pendant un temps plus long, puisque l'eau est appliquée de façon plus parcimonieuse et étalée dans le temps. Si l'on suppose une irrigation et une fertilisation optimales (i.e. les quantités d'azote

---

<sup>12</sup> Pour référence, le maïs nécessite en moyenne 260 Kg.N / ha.

sont apportées en début de cycle, puis au moment voulu dans les quantités qu'il faut), et si l'on se base sur des conditions agro-pédo-climatiques identiques, alors l'impact de ces trois types de desserte au niveau de la pollution par les nitrates sera à peu près équivalent, particulièrement entre aspersion et irrigation à la raie. Concernant le goutte à goutte, on peut dire que ses effets sur l'environnement sont moindres du fait que la fertilisation peut être menée conjointement à avec l'irrigation, en ajoutant l'engrais directement dans l'eau. Ce bénéfice permet de n'observer aucun reliquat, et ainsi de minimiser au minimum la pollution azotée, en plus d'effectuer des économies d'eau. Cependant, il s'agit là de pratiques plus expérimentales que réelles. Cette technique est avant tout très délicate à mettre en œuvre, et nécessite des expérimentations préalables, difficultés d'application vis-à-vis desquelles les agriculteurs sont généralement réticents, d'autant que leur volonté de faire des économies d'eau et de diminuer les pollutions n'est pas toujours effective.

Ainsi, la qualité des eaux restituées au milieu n'est pas un problème strictement lié à la technique d'irrigation employée (à la raie, par aspersion, etc.). Ce fût l'idée communément admise lors des premières décennies d'expansion forte de l'irrigation (1960-1980), durant lesquelles l'irrigation localisée était considérée comme la technique la moins polluante, après l'irrigation par aspersion et enfin l'irrigation à la raie [AFEID, 2001]. Cette classification est aujourd'hui beaucoup plus nuancée. Cela tient à ce que la communauté scientifique a pris conscience qu'un élément essentiel résidait dans la maîtrise de l'irrigation et de la fertilisation, c'est-à-dire des apports d'eau et de fertilisants à la plante. La tendance actuelle de la lutte contre les pollutions diffuses focalise donc moins sur les techniques d'irrigation proprement dites, que sur le pilotage de l'irrigation et des apports d'intrants (ex : programmes d'aide au pilotage de l'irrigation IRRIMIEUX et de la fertilisation FERTIMIEUX). Cette maîtrise conditionne à la fois le rendement des cultures et la maîtrise des pollutions diffuses.

### ***Remarques***

Une première remarque concerne la prise en compte du type de sol sur lesquels sont appliqués les intrants. Selon la nature des sols, l'impact de cette pollution sur la nappe sera plus ou moins accentué. C'est particulièrement le cas des sols karstiques pour lesquels les ressources souterraines sont très sensibles aux pollutions de surface.

Une seconde remarque est relative aux conditions particulières de la pratique de l'irrigation gravitaire à la raie dans les régions PACA et Languedoc-Roussillon, où l'on observe de fortes pentes (et des raies généralement ouvertes), ce qui a une incidence sur le devenir des nitrates. En effet, ce sont des conditions propices à ce qu'une part importante de l'eau d'irrigation ruisselle, ce qui accroît le flux de polluants transportés en rivière. Néanmoins, ce n'est qu'en cas de forte précipitation que la pollution restituée en surface est réellement notable. D'une manière générale, la pollution occasionnée par l'irrigation gravitaire par le biais des restitutions de surface reste limitée.

Une dernière remarque concerne les infiltrations d'eau depuis les canaux. La première cause de pollution d'un périmètre irrigué correspond aux infiltrations d'eau et d'intrants sur la parcelle agricole. Les infiltrations d'eau depuis les canaux sont, elles, exemptes de pollution car ces eaux ne transitent pas sur les parcelles où siège la pollution. En rejoignant la nappe, ces importants volumes d'eau diluent les pollutions présentes, qu'elles proviennent de la percolation des eaux depuis les parcelles, ou d'ailleurs. Cette dilution des pollutions souterraines permet ainsi d'atténuer l'effet induit négatif que génère le périmètre irrigué vis-à-vis de la pollution de ces eaux.

Deux questions restent toutefois en suspens. La première concerne l'importance relative des volumes infiltrés depuis les canaux par rapport aux volumes provenant des parcelles. Une telle donnée permettrait d'évaluer l'importance de cette dilution, cependant seules peu d'études quantifient les infiltrations depuis les canaux, et ces quantifications relèvent plus de l'estimation grossière que de mesures précises. La seconde question concerne les volumes d'eau infiltrés depuis le réseau de colature, qui, eux, ont transité sur les parcelles. Si la faible dimension des filioles laisse à penser que ces infiltrations sont minimales, la sectorisation des terrains par le réseau de colature optimise ces infiltrations, qui constituent alors une contribution non négligeable au drainage profond vers la nappe. Or, quantifier ces infiltrations est très difficile, et relève parfois de la gageure (grande densité du réseau, taille des filioles trop petite pour pouvoir y mener des mesures, etc.). Nous verrons plus tard les méthodes existantes permettant une telle quantification, et les imprécisions qui les accompagnent. Pour le moment, nous ne sommes qu'en mesure de nous prononcer sur les rôles bénéfiques des infiltrations d'eau depuis les canaux vis-à-vis de la pollution souterraine, sans pour autant pouvoir nous prononcer sur l'importance de ce rôle. Insistons sur le fait que la dilution des pollutions ne constitue en rien une externalité positive, puisque cette dilution n'a pas lieu d'être sans la pollution générée par le périmètre irrigué. Il s'agit donc uniquement d'un effet d'atténuation de l'externalité négative qu'est la pollution de la nappe.

Après avoir vu les impacts quantitatifs et qualitatifs qu'un périmètre irrigué en gravitaire entretenait avec son territoire par le biais de la réalimentation de la nappe phréatique, nous allons maintenant nous intéresser à ses impacts sur les cours d'eau.

## **2.2 Impacts sur les cours d'eau**

### ***2.2.1 Les prélèvements en rivière***

#### **Présentation**

Il est couramment admis que l'irrigation gravitaire à la raie prélève en rivière 4 à 5 fois plus d'eau que les stricts besoins des cultures, ce qui a été globalement démontré dans les études de flux analysées dans la partie précédente (24% d'eau prélevée consommée par les cultures en moyenne). Cet écart entre eau prélevée et eau réellement consommée par les cultures fait de l'irrigation gravitaire, menée collectivement ou individuellement, une des causes premières de surexploitation des ressources.

#### **Externalités négatives recensées et perdants**

##### **Impacts sur l'hydrosystème**

En intervenant sur la dilution des pollutions, la réduction du débit au droit de la prise d'eau est à l'origine d'une baisse du pouvoir autoépurateur<sup>13</sup> de l'hydrosystème, ce qui concourt à concentrer la pollution<sup>14</sup> qui s'y trouve, ou qui est amenée à s'y trouver (à l'aval). Cela engendre une dégradation de la qualité de l'hydrosystème, et particulièrement de la vie piscicole. La pollution conduit à la simplification des biocénoses dans un ordre donné de

---

<sup>13</sup> L'autoépuration correspond au retour d'un milieu à un état antérieur à la pollution, avec recouvrement de tous les paramètres, par un phénomène biologique auquel participe toute la biocénose (invertébrés, poissons, matière organique et producteurs primaires). Les principaux facteurs de l'autoépuration sont l'oxygène dissout, la dilution des pollutions, le rayonnement solaire (les UV sont bactéricides) et la biocénose (les bactéries consomment la pollution).

<sup>14</sup> La pollution correspond à l'altération d'un écosystème sous l'action d'agents polluants produits directement ou indirectement par l'homme et ses activités.

polluo-sensibilité des groupes faunistiques, et à la prolifération des espèces résistantes. L'effet de la pollution dépend du type d'hydrosystème. Des hydrosystèmes lotiques (vitesses élevées, températures fraîches) ne seront que peu affectés par les pollutions, contrairement aux hydrosystèmes lenticques qui seront plus rapidement pollués, et aux hydrosystèmes stagnants, qui sont des pièges à polluants.

Pour que tel ne soit pas le cas, la loi « Pêche » de 1984 oblige les maîtres d'ouvrage au maintien, en aval des aménagements, d'un débit réservé égal au dixième du module annuel du cours d'eau, de manière à garantir en tout temps la vie aquatique et la salubrité des cours d'eau. Il arrive néanmoins fréquemment que les prélèvements pour l'irrigations fassent baisser les débits des cours d'eau sous ce seuil référence. En Languedoc-Roussillon par exemple, la quasi-totalité des rivières ont de juin à septembre des débits inférieurs au dixième du module annuel [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000]. Ceci s'explique entre autre par le très fort taux d'utilisation des réseaux collectifs<sup>15</sup> et l'importance des droits d'eau anciens sur les rivières qui ont pu être accordés à l'irrigation gravitaire.

#### Impacts sur les usagers aval

Les prélèvements en rivière ont un double impact, quantitatif et qualitatif, sur les usagers aval, qu'ils soient consommateurs ou non consommateurs de la ressource. Les prélèvements agricoles affectent la disponibilité et la qualité de la ressource aval. En contribuant significativement à la baisse du niveau d'eau dans les rivières, les prélèvements perturbent la tenue des activités touristiques ou de loisir (canoë kayak, baignade, etc.). Ils ont également un impact qualitatif sur le bien être de ces usagers non consommateur de la ressource, pour qui la qualité de la ressource est le centre d'intérêt (pêcheurs, les pratiquants de sports nautiques, le secteur du tourisme directement rattaché, etc.). Concernant les usagers consommateurs, les prélèvements sont autant de volumes d'eau qui leur sont rendus indisponibles, et la baisse de la qualité de l'eau peut affecter certains de ces usages comme par exemple les prélèvements pour l'alimentation en eau potable des communes (30% des volumes prélevés pour l'AEP le sont depuis les rivières).

#### **Importance et opportunité du préjudice**

D'une manière générale, les prélèvements agricoles conduisent ainsi à une dégradation des usages consommateurs et non consommateurs de la ressource. Ils s'opèrent logiquement pendant la période des irrigations (période estivale), lorsque la ressource superficielle est la plus sollicitée par les autres usages. L'importance économique que peuvent revêtir certains usages comme les usages touristiques accentue d'autant le préjudice subit (la valeur économique de l'eau est un bon indicateur de l'opportunité du préjudice, mais il n'est pas le seul). L'importance de ces impacts quantitatifs et qualitatifs dépend néanmoins directement des restitutions d'eau depuis le périmètre irrigué. Ces impacts seront plus importants si les activités visées sont menées entre le point de prélèvement et le point de restitution, lorsque ces points sont situés sur la même rivière. Plus généralement l'importance des impacts dépendra des facteurs suivants :

- Lieu(x) des restitutions, c'est-à-dire si les restitutions ont lieu pour tout ou partie dans la rivière où s'opèrent les prélèvements, ou non ;
- Importance des volumes restitués ;
- Pluralité des lieux de restitution en rivière, homogénéité spatiale et volumique de ces restitutions ;

---

<sup>15</sup> En moyenne sur la région 70% des surfaces irriguées le sont à partir des eaux de surface dans le cadre de réseaux collectifs.

La période estivale des prélèvements et l'importance économique que peuvent revêtir certains autres usages expliquent en partie la pression qui s'exerce sur les irrigants pour que soient menés des programmes d'économie et de réallocation de la ressource, d'autant que dans beaucoup de cas un changement du mode de desserte peut conduire à des économies d'eau importante. Par exemple, l'irrigation à la raie sur le canal de Gignac nécessite de prélever 26 000 m<sup>3</sup>/an/ha irrigués. Un passage en conduites sous pression ou basse pression pourrait conduire à une économie d'eau de 10 000 à 12 5000 m<sup>3</sup>/an/ha irrigués, soit près de 10 millions de m<sup>3</sup>/an [BRL, 2002a]. Il faut alors savoir dans le détail la valorisation que l'on apporte à cette eau que l'on pourrait potentiellement économiser. Si elle permet de soutenir le débit d'une rivière à l'aval, il est nécessaire de réfléchir à l'opportunité de cette restitution, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

## 2.2.2 Les restitutions en rivières

### 2.2.2.1 Le soutien de débit et d'étiage

#### **Présentation**

Les restitutions en rivière sont composées d'apports directs et indirects d'eau depuis le système canal.

- ✓ *Les apports directs* sont composés :
  - des « coups perdus » de l'irrigation. Ce sont les volumes techniques restitués au milieu naturel par les canaux de décharge, répartis tout au long du transport de l'eau dans le canal principal pour permettre les régulations de hauteur et de débit. Ces volumes techniques sont donc liés de façon structurelle à la conduite de l'irrigation gravitaire, et constituent la grande majorité des apports directs ;
  - des eaux excédentaires après irrigation des parcelles, récupérées en bout de parcelle par le réseau de colatures ;

La pluralité des canaux de décharge et des colatures permet de répartir les restitutions sur des linéaires importants de rivière. Le soutien de débit est ainsi homogénéisé le long du cours d'eau récepteur, ce qui bénéficie à l'hydrosystème<sup>16</sup>.

- ✓ *Les apports indirects* sont composés :
  - Des connexions qu'entretien la nappe avec le réseau hydrographique. Les infiltrations profondes depuis le système canal contribuent à la remontée de la nappe. Si celle-ci entre en connexion hydraulique avec le réseau hydrographique, une part des eaux infiltrées peut être transférée dans les cours d'eau, et contribuer à leur débit.

#### **Importance du bénéfice**

D'une manière générale, les restitutions en rivière contribuent au bon état écologique de l'hydrosystème qui les accueille. Les impacts sur le milieu aval sont l'inverse de ceux causés par les prélèvements en rivière (cf. 2.2.1). Alors que les prélèvements réduisent le pouvoir autoépurateur de la rivière et y font se concentrer les pollutions, une restitution d'eau peut diluer ces pollutions et empêcher que la rivière n'atteigne un état critique qui mette en péril la

---

<sup>16</sup> Il est généralement préférable de restituer un même volume d'eau avec un débit modéré pendant un temps plus important qu'avec un débit très important pendant un temps plus court. Cela permet de maintenir la continuité des habitats, qui dépendent entre autre du débit et de la hauteur d'eau.

vie piscicole, particulièrement lors des étiages. Les prélèvements se passant pendant la même période que les restitutions, on peut schématiquement dire que les perdants de l'amont sont les bénéficiaires de l'aval (même si les usages / usagers ne sont pas identiques, et que le lieu de restitution n'est pas forcément le même que le lieu de prélèvement).

Illustrons l'importance que peut revêtir ce bénéfice dans le cas de la rivière Durance. Depuis Loi du 5 janvier 1955 sur l'aménagement la Durance et les aménagements hydroélectriques consécutifs d'EDF, la Durance ne bénéficie plus que d'un débit réservé égal au 1/40<sup>ème</sup> de son module naturel (débit moyen annuel), soit un débit de l'ordre de 4,5m<sup>3</sup>/s pour la basse Durance (module naturel de 180m<sup>3</sup>/s). La majorité des eaux de la Durance ne circulent aujourd'hui plus dans son lit naturel mais dans son canal usinier. Une étude a été réalisée par le Syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance (SMAVD) pour mesurer les restitutions de l'irrigation à la rivière (Etude globale de la moyenne et de la basse Durance). Les campagnes de jaugeage dans le bras vif de la basse Durance ont révélé l'importance des restitutions en rivière : pendant la période des mesures (Octobre 1998), des débits supérieurs au débit réservé théorique transitaient dans la rivière pour chacun des points de mesure.

	<b>Débits jaugés (m3/s)</b>	<b>Débit réservé sur le tronçon (m3/s)</b>
Manosque	8,67	3,6
Cadarache	8,91	4,5
Cadenet	13,5	4,5

**Tableau 5 : Débits jaugés en quelques points de la Durance (Octobre 1998)**

(source : [Chambre d'agriculture PACA, 2000], p.94)

On constate que les débits relevés sont 2 à 3 fois plus importants que le débit réservé de la rivière, ce surplus provenant pour l'essentiel des apports directs et indirects d'eau depuis le système canal. Un autre exemple est celui du canal Saint-Julien, dans la région de Cavaillon (Vaucluse). Les restitutions depuis les canaux d'irrigation se font sur deux cours d'eau, la Durance et le Coulon. L'étude de flux menée sur le périmètre irrigué montre que pendant la période des mesures, le canal rejetait dans la Durance 19.51 Mm<sup>3</sup> entre mars et début août, et contribuait ainsi à hauteur de 60% au débit du Coulon [ENSAM, 2003].

### **Opportunité des restitutions en rivière**

Une restitution d'eau en rivière sera d'autant plus opportune que le soutien de son débit sera valorisé d'un point de vue économique, social ou environnemental. Cette valorisation sera d'autant plus importante que la ressource est sollicitée, donc d'autant plus forte que le soutien de débit sera un soutien d'étiage, particulièrement vis-à-vis des cours d'eau méditerranéens, sujets en été à des assecs<sup>17</sup> ou des périodes de pénurie d'eau marqués, ainsi qu'à des pollutions par les rejets des stations d'épuration, aggravées par les prélèvements d'eau sur la rivière.

Il n'est cependant pas possible de dire a priori si les restitutions de rivières constituent des externalités positives, des atténuations de l'effet négatif des prélèvements, ou même des externalités négatives. Cette notion de valorisation impose en effet d'être particulièrement vigilant quant au milieu récepteur de ces eaux. Lorsque la rivière de prélèvement (rivière amont) est la même que la rivière de restitution (rivière aval), alors l'effet positif des

<sup>17</sup> Période pendant laquelle le cours d'eau est totalement sec.

restitutions sur le milieu correspond en réalité à une atténuation de l'effet négatif des prélèvements effectués en amont (environ 25% de l'eau prélevée en amont est manquante en aval). Lorsque la rivière amont est différente de la rivière aval, l'importance des impacts des prélèvements et des restitutions sur ces rivières respectives doit être pesé. Toute restitution d'eau ne rime pas avec valorisation. Cette valorisation peut être dérisoire, comme c'est le cas pour certains canaux de basse Durance qui restituent une part importante de leurs eaux excédentaires dans le Rhône, ce qui n'apporte aucune valorisation à l'eau, que ce soit sur le plan quantitatif ou qualitatif, ces apports restant dérisoires vis-à-vis des volumes qui transitent dans le Rhône. Lorsque l'eau est bien plus précieuse dans la rivière amont qu'aval, il peut être préférable de mener des économies d'eau sur le périmètre, afin que les volumes économisés soient restitués en amont (i.e. qu'ils ne soient pas prélevés). Dans ce cas, on parlera de restitutions non valorisées.

Les restitutions en rivière constituent des externalités positives dans le cas où l'eau prélevée sur la rivière amont n'occasionne que peu de perturbations sur l'hydrosystème (rivière puissante), alors que les restitutions opérées en aval ont un réel impact positif qualitatif et quantitatif sur le milieu.

### **Cas particulier des restitutions en période de crue**

De même que toute restitution ne rime pas avec valorisation aval de l'eau, elle ne rime pas forcément avec bénéfice aval. Lors de fortes précipitations, il peut arriver qu'un canal déchargeant des débits trop importants dans un cours d'eau de faible capacité hydraulique soit la cause de débordements du cours d'eau récepteur, et d'inondation à l'aval. Ce fût par exemple le cas lors de la crue du Coulon de 1994, où des débordements survinrent suite aux délestages trop importants du canal Saint-Julien. Dans cette situation, d'une part les restitutions ne sont pas opportunes, mais elles correspondent à une externalité négative du fonctionnement du système canal. En cela, les restitutions en rivière peuvent être qualifiées d'externalité mixte, dont un des paramètres déterminants est le régime des précipitations.

La qualification de l'effet des restitutions doit donc être considérée au cas par cas, en fonction des typologies de prélèvements et de restitutions décrites ici. Pour la description des bénéficiaires, nous ne nous placerons que dans le cas où ces restitutions constituent une externalité positive.

### **Bénéficiaires**

Des restitutions destinées à l'usage environnemental, c'est-à-dire au bon état écologique de l'hydrosystème (préconisé par l'AE) bénéficient à la communauté toute entière. Une collectivité peut également être intéressée par de telles économies. Elle pourrait utiliser l'eau rendue disponible pour augmenter sa production d'eau potable, ou comme marge de sécurité pour cette dernière. Elle pourrait aussi préférer une valorisation environnementale, économique et sociale en laissant cette eau dans la rivière pour permettre d'assurer une qualité de la ressource pour les usages non consommateurs que sont i) les activités récréatives (baignade, pêche, promenade), ii) les activités de loisir et touristiques (randonnée, canoë kayak ...), ou encore iii) les usages d'agrément (volonté d'une mairie de voir des débits plus importants transiter dans le cours d'eau qui traverse sa commune, fontaine communal, ...). Dans ce sens une collectivité pourrait rétribuer une ASA pour ses économies d'eau, contribuer à ses coûts de maintenance, ou lui rendre toute sorte de services (financier, matériel, politique, etc.).

### 2.2.2.2 La pollution agricole diffuse depuis les restitutions de surface

La qualité de l'eau restituée en rivière n'est généralement pas un problème puisqu'elle reste quasiment inchangée depuis le prélèvement jusqu'à la restitution. L'eau restituée provient très majoritairement des canaux de décharge, chargés d'évacuer les eaux devenues excédentaires suite aux opérations de régulation. Mis à part les volumes d'eau collectés en bout de parcelle par les filioles, l'eau restituée n'a donc à aucun moment pu se charger en polluant car elle ne transite jamais sur les parcelles. Enfin, l'eau collectée après son passage sur les parcelles possèdera une charge polluante fonction des trois paramètres caractéristiques que sont les apports d'eau, les pratiques d'irrigation, et les pratiques de fertilisation. Pour un apport d'intrants donné, le flux de polluant se retrouvant en aval des parcelles dans les filioles sera d'autant plus important que les apports d'eau sur la parcelle se font de manière intense (forts débits). Dans le cas d'apports d'intrants importants, de pratiques d'irrigation mal réfléchies et de forts débits d'alimentation en eau des parcelles, l'apport de pollution dans les rivières depuis le réseau de colature peut être important. C'est également le cas lorsque de fortes précipitations lessivent les nitrates vers la rivière dans des périmètres irrigués localisés dans des zones de pente importante (ruissellement).

Après ce tour d'horizon sur les impacts de l'irrigation gravitaire sur les cours d'eau, nous allons continuer avec les externalités de flux d'eau et de solutés, en nous intéressant aux impacts du système canal sur l'évacuation des eaux pluviales.

### **2.3 Impacts sur l'évacuation des eaux pluviales**

*Ces impacts sont à la fois divers et complexes. Nous commencerons par les résumer afin de donner une vue d'ensemble au lecteur, avant d'entrer plus dans le détail. Le terme d'évacuation des eaux pluviales comprend i) le ressuyage des terres, ii) l'assainissement pluvial urbain, et iii) la lutte contre les inondations.*

#### ***Résumé***

Les canaux d'irrigation jouent un rôle important dans le fonctionnement hydraulique du bassin versant qui les héberge. En tant que réseau hydrographique artificiel, les canaux contribuent à l'évacuation des eaux pluviales, qu'elles soient urbaines (ruissellement sur les surfaces imperméabilisées) ou rurales (ruissellement sur les surfaces naturelles). Cette contribution diffère selon l'intensité des précipitations d'une part, et au cours du temps lors d'une même pluie d'autre part, puisque après avoir collecté et évacué les eaux de ruissellement, les canaux contribuent au **ressuyage des terres**.

La périurbanisation a conduit à l'augmentation des surfaces imperméabilisées, qui a comme conséquence d'augmenter les volumes ruisselés et les vitesses d'écoulement. Les canaux se sont alors *transformés* à leur insu en réseau d'**assainissement pluvial** alternatif, lors de précipitations courantes. Ces volumes supplémentaires posent cependant des difficultés dans la gestion du canal, et peuvent être à l'origine de débordements et d'inondations localisés vis-à-vis desquelles la responsabilité du gestionnaire du canal est engagée. Ces rejets d'eaux urbaines doivent donc au possible être officialisés, quantifiés et réglementés, ce qui nécessite la mise en place d'un système d'information adéquat.

La périurbanisation a également modifié l'occupation du sol, ce qui a accru la vulnérabilité de ces nouvelles habitations face au risque d'inondation lors de précipitations plus exceptionnelles, et a contribué à intégrer dans la fonction globale des canaux une fonction de

*Suite de l'encadré ...*

prévention des inondations visant à assurer la sécurité des biens et des personnes. Dans certains cas, les canaux contribuent effectivement à la **prévention des inondations**, mais dans d'autres cas, ils peuvent aggraver le risque d'inondation, voire même le créer. Là encore la responsabilité du gestionnaire est engagée. Dans tous les cas, les canaux doivent faire l'objet d'une étude approfondie pour comprendre leur influence réelle sur les risques d'inondation.

L'augmentation des volumes et de la vitesse des écoulements collectés par les canaux conduit à une sollicitation plus importante des ouvrages, déjà fragilisés par des défauts de maintenance généralement avérés, pouvant conduire à des risques de rupture et de débordement. En plus de problèmes juridiques, viennent se greffer des difficultés économiques pour ces ASA, qui ne peuvent être assurées contre le risque d'inondation.

**Cadre 1 : Résumé des impacts du système canal sur l'évacuation des eaux pluviales**

### **2.3.1 Le ressuyage des terres agricoles, une fonction ancienne des canaux**

Lors de précipitations importantes, l'eau s'infiltré dans les sols jusqu'à leur saturation. Pour que les cultures ne souffrent pas d'asphyxie par la stagnation des eaux dans leur zone racinaire, il est important d'évacuer l'eau excédentaire hors du périmètre le plus rapidement possible. Le ressuyage des terres est un phénomène de drainage naturel qui se fait sous l'effet combiné de la topographie et des conditions hydrodynamiques du sol, mais qui reste le plus souvent lent, ce qui peut ne pas empêcher l'asphyxie partielle ou totale des cultures. Les canaux sont alors susceptibles d'assurer un ressuyage artificiel des terres plus rapide, qui dépend essentiellement des facteurs suivants [ENSAM, 2003] :

**i) le positionnement du canal**, qui doit être en contrebas des terres adjacentes, puisque les volumes ressuyés correspondent à des flux souterrains rejoignant le canal à travers l'interface constituée par les berges et le lit du canal ;

**ii) la géomorphologie du bassin versant**, définissant les zones d'accumulation des eaux. Elle doit permettre que le ressuyage se fasse de manière naturelle vers les canaux ;

**iii) l'entretien des canaux** (curage et faucardage), qui doit être régulier pour favoriser l'infiltration de l'eau depuis les terres adjacentes ;

**iv) la densité de drainage des canaux**. La contribution des canaux sera d'autant plus importante que le réseau est dense et bien répartie dans l'espace. Cela comprend les canaux primaires et secondaires, mais aussi et surtout le réseau de colatures, qui est généralement celui qui draine le plus de surfaces agricoles.

Le ressuyage pose des contraintes et des surcoûts d'exploitation pour les gestionnaires des canaux, similaires à ceux causés par l'assainissement pluvial. Cependant l'association est également le principal bénéficiaire de cette externalité positive, ce qui en fait une aménité positive, puisque les bénéfiques concernent ceux qui participent à l'activité de production en question (l'irrigation).

## 2.3.2 L'assainissement pluvial urbain et la lutte contre les inondations

### 2.3.2.1 Présentation

Les réseaux d'irrigation gravitaires jouent indirectement le rôle de collecteur artificiel des eaux de ruissellement, qu'elles proviennent des routes, des chemins, des ravins, des flancs de montagne, des zones urbanisées, etc. En l'absence d'infrastructures spécialisées, ces réseaux sont souvent les seules structures existantes permettant d'assurer un assainissement pluvial. Cette collecte des eaux de ruissellement se fait grâce aux canaux de desserte (principal, secondaire, tertiaire, ...), de décharge, ainsi qu'au réseau de colatures. Leur rôle est en réalité triple puisqu'ils permettent i) la collecte des eaux, ii) leur stockage (rôle tampon joué par les canaux), et iii) le transport des eaux vers des émissaires naturels. Ce triple rôle permet dans certains cas de diminuer la vulnérabilité des zones plus en aval, et de contribuer ainsi à la sécurité des biens et des personnes.

La collecte des eaux de ruissellement est favorisée par la position qu'occupent les canaux par rapport aux écoulements naturels. Alors que les écoulements naturels suivent préférentiellement les lignes de plus grande pente (paradigme du moindre effort), les canaux suivent généralement des lignes proches au possible des lignes de niveau, afin de rendre l'eau disponible sur de plus grandes distances (cf. Figure 8, p.- 57 -). Ce positionnement des canaux est très favorable à la collecte des eaux de ruissellement. De même, le positionnement non systématique des canaux en contrebas (canaux encaissés) contribue à la collecte des eaux. Cette collecte s'opère aussi bien en milieu rural, où elle concerne les écoulements naturels sur des surfaces étendues, qu'en zone urbaine, où des ouvrages de collecte des eaux urbaines de chaussée (rigole, fossé bétonné...) permettent de concentrer ces eaux avant de les transférer de manière localisée dans les canaux d'irrigation.

### 2.3.2.2 Mise en évidence de la contribution des canaux à l'assainissement pluvial urbain

Ce phénomène a été mis en évidence à l'échelle de l'évènement pluvieux, ainsi qu'à l'échelle annuelle, lors d'une étude menée sur le canal des Sables, dans la région de Cavaillon ([ENSAM, 2003], d'après l'étude [Hydrosol Ingénierie, 2001], réalisée sur le canal Saint-Julien). Le canal des Sables prélève son eau depuis le canal Saint-Julien et la restitue ensuite dans le Coulon. Pour mesurer le rôle de collecteur d'eau pluviale à l'échelle annuelle, les volumes en entrée et en sortie du canal des Sables ont été déterminés par mesure directe de débits sur les fuyants (colatures) et sur l'exutoire principal, ainsi que par extrapolation des débits mesurés depuis certaines filioles « de référence » (le réseau compte 24 filioles au total). On peut voir sur le Tableau 6 et la Figure 3 la différence des volumes écoulés en entrée et en sortie, de mars à décembre 2000.

	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	TOTAL
Entrée (Mm3)	2,69	8,5	10,2	14,6	17,3	17,19	17,1	14,7	10,1	6,35	1,26	119,93
Sortie (Mm3)	3,09	6,47	6,59	6,44	5,76	6,92	6,95	9,18	9,59	8,33	2,65	71,97
Sortie/Entrée (%)	<b>115%</b>	<b>76%</b>	<b>64%</b>	<b>44%</b>	<b>33%</b>	<b>40%</b>	<b>41%</b>	<b>63%</b>	<b>95%</b>	<b>131%</b>	<b>210%</b>	<b>60%</b>

**Tableau 6 : Volumes écoulés dans le canal des Sables de Mars à Décembre 2000**  
(source : [ENSAM, 2003], p.30)

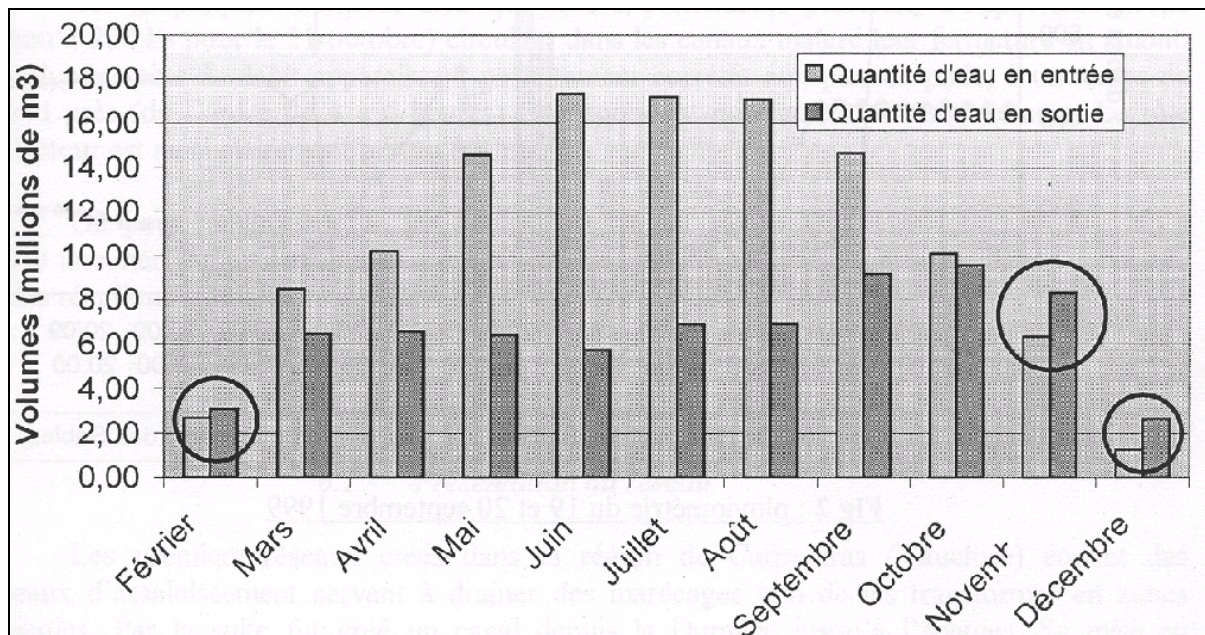


Figure 3 : Comparaison des volumes en entrée et en sortie du canal des Sables (source : [ENSAM, 2003], p.30 ; d'après [Hydrosol Ingénierie, 2000])

Le rôle de collecteur est mis en évidence à l'échelle annuelle, puisque de novembre à février les volumes mesurés en sortie sont plus importants que ceux mesurés en entrée. Cette collecte des eaux pluviales ne se cantonne cependant pas à cette période précisément. Elle s'étend sur le reste de l'année, mais elle y est moins visible (en période estivales la pointe des irrigations est atteinte et d'importants volumes transitent dans le réseau, ce qui masque la contribution des canaux à l'assainissement pluvial, d'autant plus que les précipitations sont occasionnelles et très ponctuelles à cette période). Pour analyser le rôle de collecte d'eau pluviale lors d'évènements ponctuels, des relevés de débits ont été effectués lors de deux évènements pluvieux, respectivement de 85mm d'eau pendant 12h, soit 7mm/h (cf. Figure 4), et de 80mm d'eau pendant 15h, soit 5,3mm/h (cf. Figure 5).

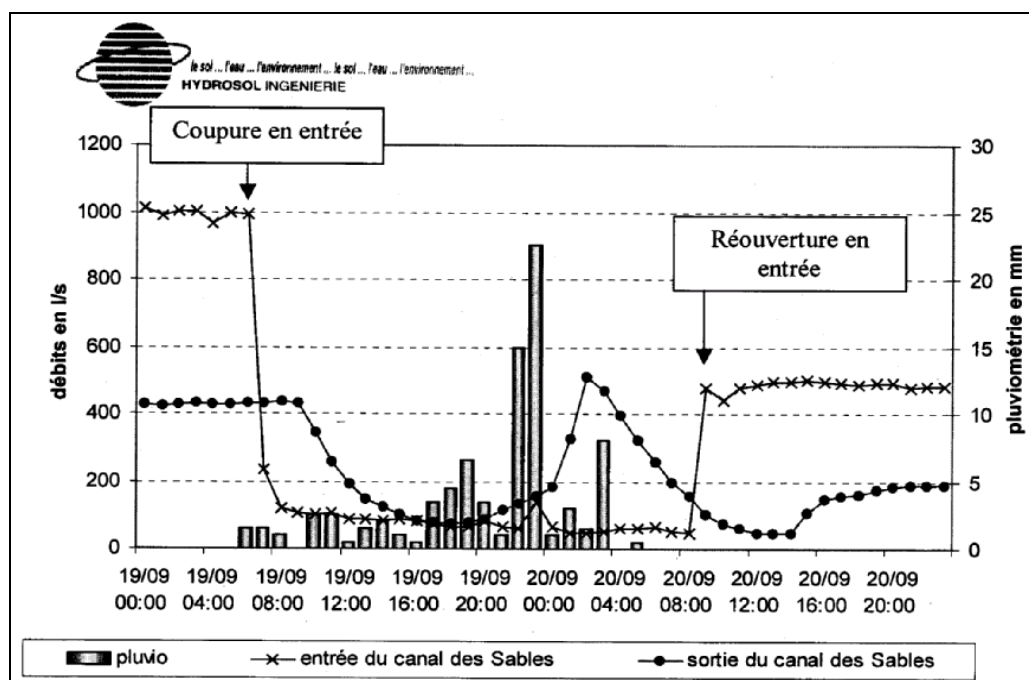


Figure 4 : Pluviométrie et réaction du canal lors de l'évènement pluvieux des 19 et 20 septembre 1999 (source : [ENSAM, 2003], p.31 ; d'après [Hydrosol Ingénierie, 2000])

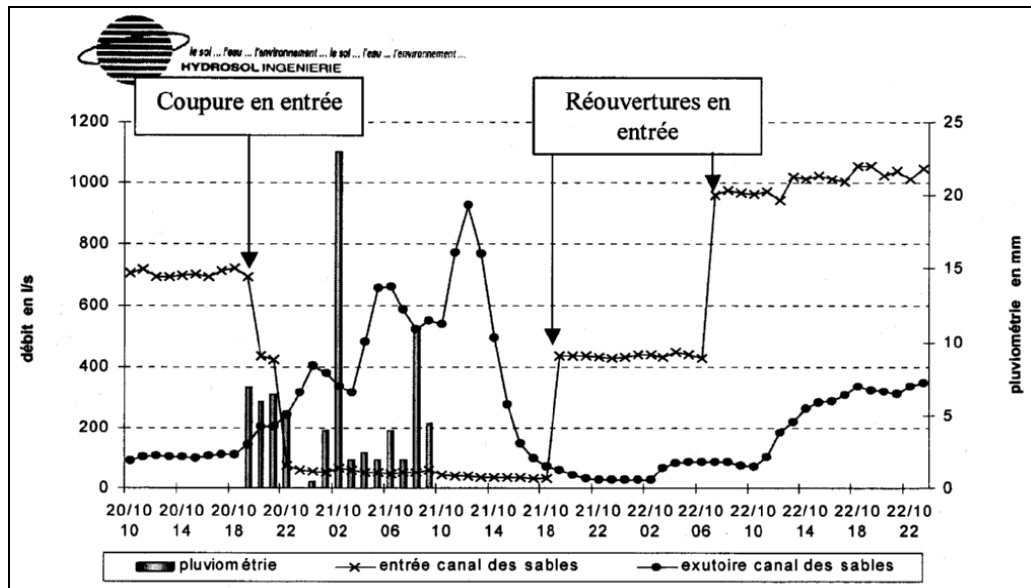


Figure 5 : Pluviométrie et réaction du canal lors de l'événement pluvieux des 21 et 22 octobre 1999  
 (source : [ENSAM, 2003], p.32 ; d'après [Hydrosol Ingénierie, 2000])

Le rôle de collecteur est également mis en évidence à l'échelle de l'évènement pluvieux, puisque l'on constate sur la Figure 4 et la Figure 5 que des débits importants, de l'ordre de 900 l/s, transitent dans le canal des Sables quand l'alimentation d'eau en entrée est coupée, et que l'on observe une corrélation manifeste entre les pics de précipitation et les pics de débit dans les canaux, avec un temps de retard de l'ordre de 4 à 6h.

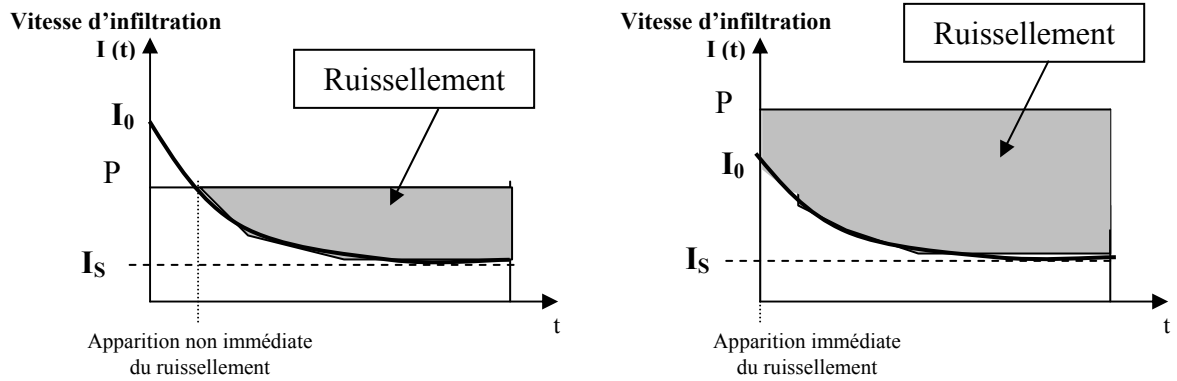
### 2.3.2.3 L'Assainissement pluvial urbain et la Prévention des inondations, des fonctions nouvelles consécutives à l'évolution de l'occupation du sol

Bien que les canaux d'irrigation aient toujours recueillis les eaux de pluie, le poids de cette fonction alternative s'est considérablement accentué sous l'effet de l'augmentation importante et régulière des surfaces imperméabilisées. Dans ce problème, il est important de différencier les eaux issues du ruissellement sur des surfaces naturelles (couvert végétal), que nous appellerons les « eaux rurales », des eaux urbaines provenant du ruissellement sur des surfaces anthropisées (même si dans les faits elles sont collectées conjointement). Nous allons proposer une typologie de précipitation pour pouvoir ensuite la prendre en compte comme facteur déterminant le rôle des canaux dans l'évacuation des eaux de pluie.

#### **RAPPEL THEORIQUE CONCERNANT L'INFILTRATION DE L'EAU DANS LE SOL**

Toute précipitation tombant sur un sol non imperméabilisé se divise en une part infiltrée et une part ruisselée. L'importance relative des eaux infiltrées et ruisselées dépend de trois principaux facteurs : i) l'intensité et la durée de la précipitation, ii) les caractéristiques du sol (perméabilité, porosité...), et iii) les conditions initiales d'humidité du sol.

Suite de l'encadré ...

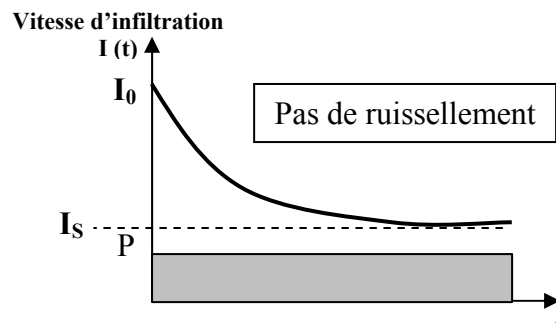


Précipitation non immédiatement saturante :  $P < I_0$

Précipitation immédiatement saturante :  $P > I_0$

Avec  $I_0$  = infiltration maximale et  $I_s$  = infiltration à saturation

**Figure 6 : Distinction entre deux précipitations saturantes, selon qu'elles soient immédiatement saturantes (à droite) ou non (à gauche), sur la base d'un modèle d'infiltration de Horton**



Précipitation non saturante :  $P < I_s$

Avec  $I_0$  = infiltration maximale et  $I_s$  = infiltration à saturation

**Figure 7 : Précipitation non saturante, sur la base d'un modèle d'infiltration de Horton**

**Approximation méthodologique concernant l'infiltration de l'eau dans le sol**

Le régime des précipitations en région méditerranéenne a trois caractéristiques : la *très forte intensité* des précipitations (précipitation de volumes d'eau très importants sur des *temps très courts*) et leur hétérogénéité spatiale. *En première approximation, nous considèrerons que les précipitations sont soit immédiatement saturante, soit non saturante (que ce soit dans l'immédiat ou par la suite). Nous ferons donc abstraction de l'état intermédiaire dans lequel une précipitation n'est pas immédiatement saturante, mais le devient au bout d'un certain temps.*

**Cadre 2 : Rappel théorique et approximation méthodologique concernant l'infiltration de l'eau dans le sol**

**Lors de précipitations non saturantes**, la très forte progression des surfaces urbanisées/imperméabilisées au sein du périmètre rend souvent les eaux de ruissellement urbain prépondérantes vis-à-vis des eaux rurales. Les eaux tombant sur les surfaces naturelles ne contribuent alors que peu au ruissellement global car elles sont préférentiellement infiltrées. Ces eaux urbaines engendrent une augmentation importante des volumes transitant dans les canaux, augmentation vis-à-vis de laquelle nous parlons d'une nouvelle fonction assumée par le réseau d'irrigation, *l'assainissement pluvial* des zones urbanisées.

**EN BREF :** L'assainissement pluvial est une fonction nouvelle qu'assurent les canaux d'irrigation lors de précipitations non saturantes, du fait du phénomène non naturel d'augmentation des surfaces imperméabilisées.

**Lors de précipitations immédiatement saturantes**, les précipitations ruissellent immédiatement sur l'intégralité des surfaces naturelles concernées. L'importance des surfaces naturelles et agricoles par rapport aux surfaces urbaines imperméabilisées fait que les volumes collectés par les canaux sont majoritairement constitués d'eaux rurales, et non d'eaux urbaines. Les canaux collectent les eaux sur une partie importante de leur linéaire, et non plus de façon localisée, comme c'est généralement le cas pour les ruissellements urbains. Les eaux urbaines ont cependant toujours une influence sur les écoulements puisque les surfaces imperméabilisées accélèrent l'écoulement des eaux.

Il reste que lors de précipitations immédiatement saturantes, les canaux jouent un rôle d'assainissement pluvial principalement vis-à-vis des eaux rurales. L'évolution de l'occupation du sol (imperméabilisation) n'a plus réellement d'influence directe et forte sur cette fonction d'assainissement pluvial. Elles ont en revanche une influence indirecte, prépondérante, concernant la question du devenir des eaux collectées, puisqu'elles rendent nécessaire que soit assurée la sécurité des biens et des personnes. Le rôle de lutte contre les inondations que doivent jouer les canaux (rôle curatif) prend le pas sur celui d'assainissement pluvial (rôle préventif).<sup>18</sup>

**EN BREF :** Lors de précipitations saturantes, les eaux rurales sont prépondérantes par rapport aux eaux urbaines. L'évacuation des eaux est alors une fonction ancienne qu'assurent les canaux d'irrigation, mais la lutte contre les inondations est un rôle nouveau, également né de l'évolution de l'occupation du sol (augmentation des zones à risque). Les volumes en jeu sont beaucoup plus importants. Le rôle de lutte contre le risque d'inondation (rôle curatif) que doivent jouer les canaux prend le pas sur celui d'assainissement pluvial (rôle préventif).

Cependant, si généralement les canaux permettent effectivement l'assainissement pluvial, leur rôle effectif contre le risque d'inondation est beaucoup plus aléatoire, nuancé et polémique.

---

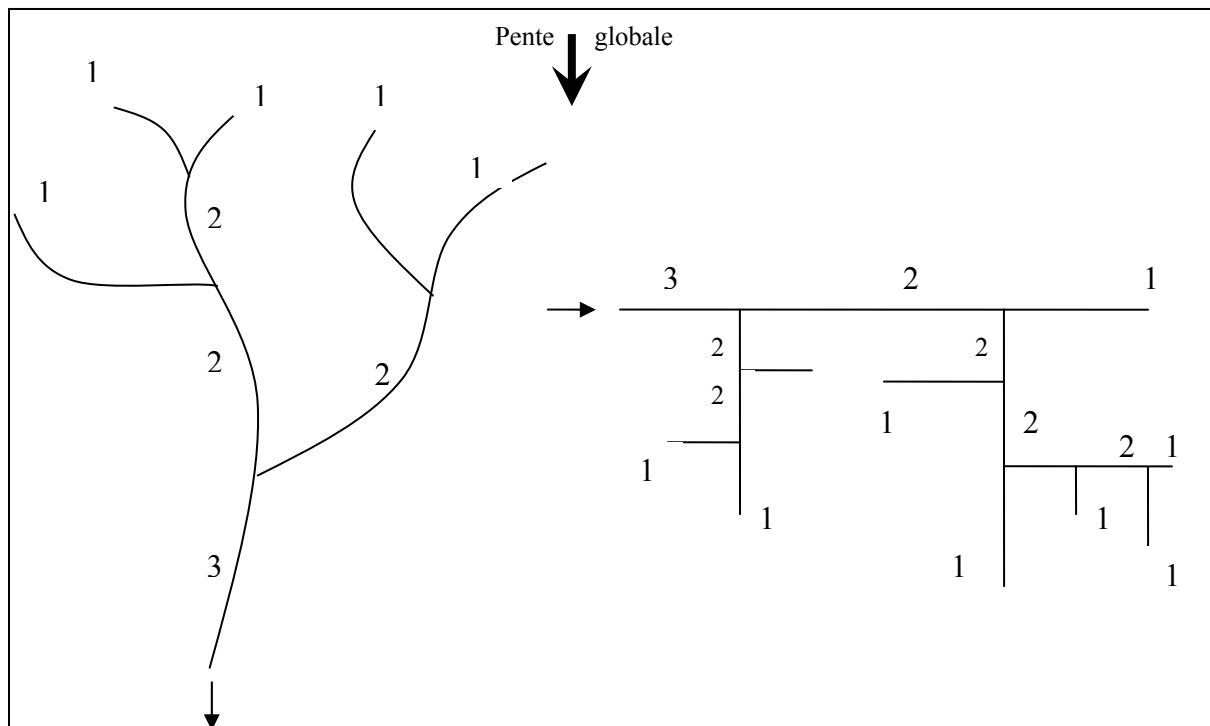
<sup>18</sup> L'assainissement pluvial est une mesure préventive contre le risque d'inondation, puisqu'il s'agit de prévenir l'accumulation d'eau à l'aval, potentiellement source d'inondation. La lutte contre les inondations est une mesure curative qui permet d'éviter qu'une crue déjà formée ne se transforme en inondation.

#### 2.3.2.4 Le rôle des canaux lors d'évènements pluvieux exceptionnels

Lors d'un évènement pluvieux très intense ou encore exceptionnel, les canaux ont généralement une influence néfaste sur l'évacuation des eaux. Les débits que peuvent véhiculer les canaux sont bien en deçà de ceux en question lors de tels évènements pluvieux, et les canaux ne peuvent jouer qu'un rôle de collecte et de stockage des eaux négligeable. Le problème se pose au niveau du transport de l'eau. Si une part très faible de la crue est véhiculée à l'intérieur des canaux, ces derniers créent des zones d'écoulement privilégiées pour une proportion beaucoup plus importante des eaux de crue. Chaque singularité du réseau (courbures, ouvrages de régulation, nœuds de ramification du réseau...) sera dès lors potentiellement un lieu de débordement.

De même, une caractéristique structurelle des réseaux argumente en faveur d'un rôle aggravant sur les inondations : **la nature des confluences**. La formation d'une crue dans un bassin versant dépend des caractéristiques du bassin, notamment des caractéristiques du réseau hydrographique, qu'il soit naturel ou artificiel. Dans le cas d'un réseau hydrographique naturel, les confluences se font de l'amont vers l'aval (les cours d'eau vont convergeant de l'amont vers l'aval). Dans le cas des canaux d'irrigation, les confluences se font de l'aval vers l'amont, puisque les canaux vont divergeant de l'amont vers l'aval (principe des canaux primaires, secondaires, tertiaires...), ce qui correspond à une multitude de goulots d'étranglement. En effet, les capacités hydrauliques des canaux tertiaires sont beaucoup plus faibles que celles des canaux secondaires, qui elle-même sont plus faibles que celles du réseau primaire. En outre, la capacité de transport hydraulique totale du réseau va diminuant de l'amont vers l'aval, puisque les canaux de décharge et l'alimentation en eau des parcelles font que de moins en moins d'eau transite de l'amont vers l'aval. Un réseau d'irrigation est donc, dans sa structure même, à l'opposé de ce que doit être un réseau d'évacuation de crue.

Enfin, la divergence des canaux d'irrigation de l'amont vers l'aval crée autant de chemins privilégiés d'écoulement de crue. Si cela permet de partitionner les volumes de crue sur différentes zones, cela contribue également à y « répandre » le risque de débordement (d'autant que la capacité hydraulique de chaque divergence s'amointri). Pour caractériser cette propension à « répandre » le risque, on peut, par analogie avec les réseaux hydrographiques naturels, caractériser la répartition spatiale du réseau de canaux par le rapport de confluence. Basons-nous sur une *classification de Schumm*, que nous aurons au préalable inversé afin de l'adapter à la nature de confluence d'un réseau d'irrigation : en partant de l'aval et en remontant vers l'amont (afin d'avoir une confluence conforme à celle d'un réseau hydrographique naturel), est d'ordre  $x+1$  tout tronçon de canal formé par la réunion de deux tronçons d'ordre  $x$ . Dans le cas d'une réunion de deux tronçons d'ordre différent, la confluence amont conservera l'ordre le plus grand.



A gauche, réseau hydrographique naturel et classification de Schumm correspondante (confluence de l'amont vers l'aval). A droite, réseau de canaux d'irrigation et classification de Schumm inversée (confluence de l'aval vers l'amont).

**Figure 8 : Comparaison de la nature des confluences et de l'orientation de la pente globale entre un réseau hydrographique naturel et un réseau hydrographique artificiel, le réseau d'irrigation gravitaire**

Pour un réseau hydrographique naturel, le rapport de confluence  $R_c$  d'ordre  $x$  est égal au quotient du nombre de talwegs d'ordre  $x$  par celui des talwegs d'ordre supérieur ( $x+1$ ). Pour un réseau de canaux, le rapport de confluence  $R_c'$  est égal à  $1/R_c$ . La valeur du rapport de confluence renseigne sur la forme générale du réseau de canaux et sa répartition dans l'espace, au même titre que pour un réseau hydrographique naturel. Schématiquement, plus le rapport de confluence est grand ( $R_c > 10$ ), plus les confluences sont concentrées dans l'espace, et plus le réseau de canaux sera développé en longueur et non en largeur (type couloir). Dans cette configuration, l'écoulement préférentiel de crue sera spatialement concentré le long d'un couloir, les inondations seront plus importantes, mais sur une zone plus faible. Plus le rapport de confluence est petit ( $R_c < 5$ ), mieux les confluences seront réparties dans l'espace et auront un espacement régulier. Dans cette configuration, l'écoulement préférentiel de crue sera spatialement étendu, les inondations moins importantes, mais sur des zones plus vastes.

*Remarque :* Il est également possible d'utiliser un rapport de confluence basé sur une classification classique en canaux primaire, secondaire, tertiaire, ..., qui serait analogue à une classification de Horton<sup>19</sup> inversée. Le rapport de confluence d'ordre 2,  $R_c'(2)$ , est égal au nombre de canaux tertiaires sur le nombre de canaux secondaires. Les rapports les plus caractéristiques sont alors  $R_c'(1)$  et  $R_c'(2)$ . Les analyses restent inchangées.

<sup>19</sup> Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1, tout cours d'eau ayant un affluent d'ordre  $x$  est d'ordre  $x+1$ , et garde cet ordre sur toute sa longueur. A la confluence de deux talwegs d'importance égale, on donne l'ordre supérieur au plus long.

Toutes ces caractéristiques ne peuvent néanmoins juger de l'influence des canaux vis-à-vis du risque d'inondation, car il manque une considération de base qui est l'occupation du sol dans les zones vers lesquelles sont détournées les eaux.

Deux cas de figures se présentent. Soit les canaux détournent les eaux vers des zones où l'expansion de crue est possible (espaces naturels, parcelles agricoles pouvant être dédommagées pour le service rendu...), et l'externalité est positive. Soit les canaux détournent les eaux vers des zones habitées et génèrent des inondations. Les canaux peuvent même provoquer l'inondation de zones qui ne sont normalement pas à risque. Les canaux d'irrigation peuvent donc jouer selon le cas un rôle positif ou négatif (le plus fréquent) dans la lutte contre les inondations.

*Remarque : Ce qui est exposé ici concerne les ASA dont l'objet est l'irrigation gravitaire uniquement (de plus dans un cadre général et très théorique). Les canaux restent susceptibles de lutter efficacement contre les inondations, puisqu'il existe de nombreuses ASA ayant pour objet la lutte contre les inondations (combiné ou non avec l'irrigation).*

**EN BREF :** Les canaux offrent un écoulement privilégié pour les crues. La capacité hydraulique d'un réseau d'irrigation gravitaire va s'amenuisant de l'amont vers l'aval, ce qui n'argumente pas en faveur d'un effet positif des canaux vis-à-vis du risque d'inondation. Les confluences d'un réseau gravitaire sont de plus inversées par rapport à celles d'un réseau hydrographique naturel : le réseau est d'autant plus répandu spatialement que l'on va vers l'aval, ce qui peut être à l'origine d'une multiplication des zones inondées, mais par des volumes divisés. Ces considérations restent cependant générales et théoriques, et le facteur principal reste l'occupation du sol vers lesquelles les eaux sont détournées.

#### 2.3.2.5 L'assainissement pluvial urbain et la lutte contre les inondations : des externalités mixtes ...

Nous avons vu comment la contribution des canaux à la lutte contre les inondations pouvait se révéler en réalité tout aussi bénéfique que néfaste. Cet effet induit variable que peuvent jouer les canaux sur le risque d'inondation, tantôt positif, tantôt négatif, fait de *la contribution des canaux d'irrigation gravitaire à la lutte contre les inondations une externalité mixte. Il en est de même pour l'assainissement pluvial vis-à-vis du risque de débordement et d'inondation, ainsi que vis-à-vis de la gestion du canal.*

##### **2.3.2.5.1 ... vis-à-vis des débordements et des inondations**

Les apports d'eau par le ruissellement urbain sont une gêne et une contrainte fortes pour le gestionnaire du canal dans sa prévision volumétrique de l'eau transitant dans les canaux. Particulièrement en période estivale où les violentes et brèves précipitations méditerranéennes imposent des temps de réaction très courts, les eaux urbaines peuvent, par l'importance de leur volume et si le gestionnaire n'y est pas vigilant, être à l'origine de débordements localisés des canaux, qui peuvent causer l'inondation (modérée) de certaines zones. Cette situation, assez courante, fait du rôle d'assainissement pluvial joué par les canaux d'irrigation une externalité mixte.

### **2.3.2.5.2 ... vis-à-vis de la gestion du canal**

#### **Le problème de qualité des eaux urbaines posé par l'assainissement pluvial**

Les eaux urbaines collectées sont chargées de pollution, qu'elle provienne des activités humaines (hydrocarbures, déchets de consommation, ...), de l'advection atmosphérique, des espaces verts, etc. ; et qu'elle soit sous la forme de matières en suspension (MES), d'éléments très fins retenant la pollution (métaux lourds, composés organochlorés, ...), etc. L'assainissement pluvial pose donc des problèmes en terme de qualité des eaux d'irrigation, ce qui peut conduire certaines ASA acceptant les eaux de ruissellement de communes voisines à exiger des normes de rejet prédéfinies (cf. Annexe 1). De même, les eaux urbaines contiennent beaucoup de sédiments grossiers, dont les importants dépôts dans le canal au cours du temps perturbent les écoulements, ce qui nécessite de mener des opérations de curage plus fréquentes et plus lourdes. Cette charge de travail supplémentaire induit des coûts d'entretien supplémentaires, ce qui constitue autant d'effets induits négatifs affectant l'association d'irrigants.

#### **Les dégâts occasionnés sur les canaux**

Les crues occasionnent des dégâts très lourds aux berges des canaux collecteurs, d'autant plus qu'ils sont positionnés à la quasi perpendiculaire des écoulements de crue (selon les lignes de plus faible pente). La puissance du choc lors de la collecte peut être à l'origine d'une rupture ou d'un affaissement des berges, souvent déjà fragilisées par des défauts d'entretien et de maintenance. Les débits exceptionnels qui transitent dans les canaux attaquent et endommagent chaque singularité du réseau. Ces dégâts sont économiquement considérables pour les associations. Suite à la crue du Coulon en 1993, les dégâts représentaient près d'un demi million d'euros. Bien que 80% des dépenses furent subventionnées, la somme restante demeure une dépense très lourde pour l'association, d'autant que les associations syndicales ne peuvent en aucun cas être assurées contre le risque d'inondation [ENSAM, 2003] :

« [...] les ASA sont assurées en responsabilité civile pour les dégâts causés aux tiers, elles ne sont en revanche pas assurées pour les débordements dus aux eaux pluviales ni pour les inondations même lorsque l'Etat déclare l'état de catastrophe naturelle. En effet, d'après les conditions des contrats d'assurance, ne peuvent être indemnisés que les biens étant couvert par une police d'assurance « incendie », hors cette police d'assurance n'est jamais accordée aux canaux puisqu'elle ne se justifie pas... » (p.46)

#### **Les risques juridiques encourus**

La périurbanisation croissante et soutenue des périmètres des ASA, particulièrement en région PACA, conduit ces dernières à devoir faire face à des ruissellements urbains importants parmi les volumes transités dans les canaux. Ce phénomène tend ainsi à officialiser un rôle joué par les canaux dans l'assainissement pluvial auparavant considéré comme tacite. Or, la loi ne permet pas aux ASA d'avoir comme objet l'évacuation des eaux pluviales. Elles n'ont pas le droit de faire transiter ces volumes dans les canaux, et encore moins de se voir rétribuées pour ce service. Aucun cadre juridique ne prévoit cette rétribution pour service rendu. Pour que tel soit le cas, ASA et communes doivent passer des ententes tacites (la commune prend par exemple en charge l'entretien des canaux, mais aucun document contractuel n'officialise cette situation). C'est par exemple le cas de l'ASA de Vernet et Pia qui a passé un simple accord moral (entente tacite) avec la commune de Saint Estève : l'ASA accepte le rejet des eaux pluviales de la commune, en échange d'indemnités et d'une participation aux travaux d'aménagements. Ces ententes non formalisées posent cependant la question d'éventuels abus dans les rejets (en quantité ou en qualité) ainsi que

celle de la responsabilité juridique en cas d'inondations consécutives à ces rejets. Les ASA peuvent sinon passer par le biais de structures intermédiaires telles que des syndicats mixtes. Si ces structures sont habilitées à percevoir ces rétributions financières, elles ne peuvent les retourner directement à l'ASA. Le retour est alors le plus souvent indirect, le syndicat mixte assurant par exemple la maintenance du réseau gravitaire, après que l'ASA lui ait donné ce service en affermage.

De plus, le propriétaire du canal est juridiquement responsable en cas de débordement de ce dernier, et d'inondation de zones urbaines ou agricoles. Or, d'une part les gestionnaires ont des difficultés à gérer ces importants volumes d'eau pluviale collectés, et, d'autre part, les gestionnaires n'ont souvent pas les moyens de prévenir les inondations qu'engendrent ces « volumes clandestins ». La responsabilité du gestionnaire est engagée même lors de débordements consécutifs à un défaut d'entretien des berges des canaux secondaires et des filiales, dont les propriétaires riverains ont la charge, la jurisprudence sur la question jouant en faveur des propriétaires lésés [ENSAM, 2003].

Faisons remarquer néanmoins que la nouvelle ordonnance, qui se met en place au moment où se rapport est écrit, permettra aux ASA de poursuivre une très grande variété d'objets.

#### 2.3.2.6 Importance de la contribution des canaux à la lutte contre les inondations

Dans le cas où l'externalité est négative, c'est-à-dire que les canaux aggravent une inondation ou sont la cause d'inondations sur des zones normalement pas sujets à ce risque, l'importance de l'externalité dépend des dommages causés sur les biens et les personnes.

Dans le cas où l'externalité est positive, c'est-à-dire que les canaux ont effectivement permis d'éviter une inondation, l'importance de l'externalité dépendra de considérations aval et amont. Les **considérations aval** sont relatives aux dégâts qui ont pu être évités sur les zones aval. L'importance de l'externalité dépendra de paramètres tels que la valeur sociale et/ou économique des zones ayant échappées à l'inondation, leur densité de population, etc. Mais cela dépendra surtout du risque qui était encouru, c'est-à-dire de l'ampleur de la crue sur laquelle les canaux ont joué un rôle positif. L'ampleur d'une crue dépend de deux paramètres : l'ampleur des précipitations et la réponse du bassin versant à ces précipitations, c'est-à-dire de la façon dont celui-ci transforme les pluies en débits. Ces deux paramètres constituent les **considérations amont**. Le premier, l'ampleur des précipitations, est caractérisée par sa période de retour, et le second, la réponse du bassin versant, est caractérisée par :

- *Ses caractéristiques géométriques du bassin versant* : aire, périmètre et forme du bassin versant (caractérisée par l'indice de compacité et le rectangle équivalent) ;
- *Ses caractéristiques topographiques du bassin versant (ou morphométriques)* : relief (courbe hypsométrique du bassin versant), pentes (orographique, topographique, hydrographique et stratigraphique) et indices de pente (indice de pente de Roche et indice global de pente) ;
- *Les caractéristiques du réseau hydrographique* : rapport de confluence, densité de drainage ;
- *Les caractéristiques du terrain (sol, manteau et substratum)*. Pour les sols : perméabilité, infiltration et absorption. Situation initiale des sols avant les précipitations (humidité) ;

- *Les caractéristiques de la couverture du sol* : types de couvertures (végétale [5 types : forêt/prairie/culture/tourbière/végétation désertique] ou artificialisée), efficacités de celles-ci face aux aléas météorologiques, comportement hydrologique propre et extension spatiale.

Une discussion sur les solutions qui peuvent être apportées à ces externalités négatives est proposée au lecteur dans l'Annexe 1, discussion vis-à-vis de laquelle nous ferons référence à plusieurs reprises au cours de ce rapport.

Il est maintenant temps de passer à un autre type d'impacts majeurs liés à l'irrigation gravitaire : les impacts sur les écosystèmes et les paysages.

## **2.4 Impacts sur les écosystèmes et les paysages**

### ***2.4.1 Le développement d'une faune et d'une flore spécifique aux canaux***

#### **Diversité de la faune et de la flore aux alentours des canaux**

Les canaux ont une influence certaine sur la faune et la flore. Le canal Saint-Julien est par exemple peuplé de haies monospécifiques (cyprés, peuplier blanc) et mixtes (orme, sole blanc, peuplier blanc pour la strate arborée ; troène, noisetier, frêne pour la strate arbustive) constituant des écosystèmes très riches. Un autre exemple est celui de la Camargue gardoise, où les canaux permettent l'alimentation des rizières et des marais, ce qui confère au site des caractéristiques de zones humides. Ces marais et ces rizières sont le support d'une production de roselières permettant tout à la fois de produire des roseaux pour la construction locale (toitures traditionnelles en roseaux) et de constituer des zones propices à la chasse. Les canaux peuvent héberger des espèces rares, telle que la nivéole d'été, qui contribue à la richesse floristique des canaux puisqu'elle constitue l'unique représentation de cette variété dans le Gard. Les canaux peuvent également être le foyer d'espèces exotiques, d'intérêt limité, telles que les cannes de Provence. Enfin, bien que les canaux conduisent souvent à accroître la richesse floristique et la biodiversité du territoire qu'ils irriguent, ils peuvent être le siège du développement d'espèces nuisibles telles que la Jussie, qui est une plante aquatique qui affecte la biodiversité et la qualité des eaux, et qui perturbe les activités de pêche et de chasse, ainsi que l'irrigation et le drainage [ENSAM, 2003].

Concernant la faune, on constate la présence en Camargue<sup>20</sup> de deux espèces prioritaires de la directive Habitats, la Cistude d'Europe (tortue d'eau douce dont l'habitat principal est le canal d'irrigation<sup>21</sup>) et le castor. Pour la protection de la Cistude, une tentative d'intégrer les canaux de Camargue à la ZSC de la Camargue (zone humide d'importance internationale d'après la convention RAMSAR) avait cependant échoué, et la protection de l'habitat principal de la Cistude n'est pas assurée [ENSAM, 2003]. Hormis ces espèces classées, on constate plus généralement que les canaux sont utilisés par de nombreuses espèces comme lieu de reproduction. Ils sont aussi le siège d'une diversité piscicole et amphibie importante.

<sup>20</sup> Zone humide également alimentée par les canaux d'irrigation.

<sup>21</sup> D'après les scientifiques de la Tour du Valat, organisme privé en charge du suivi, de la protection et de la valorisation de la Camargue, en tant que zone humide d'importance internationale au sens de la convention RAMSAR.

[Poizat *et al.*, 1998] montrent par exemple que de nombreuses espèces piscicoles arrivent dans les canaux d'irrigation depuis les installations de pompage dans le Rhône (près de 98 000 individus par an, parmi lesquels certaines espèces ont un intérêt manifeste pour les pêcheurs), les pompes d'irrigation et de drainage constituant actuellement les seules connexions hydrauliques existantes entre le Rhône et la Camargue. Les auteurs notent de plus une différenciation faunistique entre les canaux d'irrigation (qui prélèvent les eaux dans le Rhône) et de drainage (qui les y rejettent).

Plus généralement, l'influence de l'irrigation gravitaire sur la végétation spontanée contribue à la diversité faunistique de ces zones. La partie suivante (cf. 2.4.2) montre comment la végétation rivulaire des canaux est une mosaïque d'espèces dominantes réparties par tronçon sur le linéaire de canaux (ex : roselière, jonçaille, ...). Cette configuration multiplie les surfaces de contact entre ces types de végétation spontanée contrastés (écotones), ce qui bénéficie largement à la biodiversité faunistique des milieux, quelque soit l'échelle faunistique où l'on se place (insecte, mammifères, ...). Cette faune peut de plus présenter un intérêt cynégétique accrue (chasse). La diversité de cette mosaïque de milieux augmente ainsi l'intérêt global d'un territoire.

### **L'alimentation en eau d'écosystèmes et de zones humides**

En plus d'assurer dans une certaine mesure le soutien au débit de cours d'eau, les pertes d'irrigation peuvent également servir à alimenter en eau des écosystèmes et des zones humides. Ces écosystèmes peuvent être soit terrestres, soit aquatiques (hydrosystèmes). Cette alimentation en eau d'hydrosystèmes peut être le résultat d'un soutien au débit d'une rivière, ou bien encore l'alimentation en eau de branches secondaires de rivières (annexes latérales).

Voici quelques exemples d'influence importante et positive des canaux sur des écosystèmes et des zones humides [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000]. Ces exemples concernent l'alimentation en eau d'annexes hydrauliques latérales du bras principal de la Durance. Beaucoup de ces branches secondaires ne sont plus alimentées depuis les réaménagements de la Durance (passage de la majorité de l'eau dans le canal usinier), et ne sont que rarement en eau suite aux crues. Les exemples ci-dessous sont des cas où les pertes d'irrigation sont venues préserver, et parfois améliorer, la richesse floristique et faunistique de ces annexes, qui contribuent aujourd'hui fortement à la richesse biologique globale de la Durance.

- ✓ L'étang de Saint Estève Janson : il est alimenté à partir de la nappe phréatique de la Durance, elle-même alimentée par les pertes d'irrigation, ainsi que par les apports directs des surplus d'eau d'irrigation conduits par une filiole du Canal de Peyrolles. Cet apport d'eau supplémentaire a permis que se développe autour de l'étang une biodiversité aujourd'hui au cœur d'une Réserve Naturelle Volontaire, que le Ministère de l'environnement agréa en 1987, sur proposition du Conseil Scientifique de la Durance.
- ✓ La lône de Restégat : elle présente en son sein des roselières et une végétation aquatique dont certaines espèces sont rares pour la région. Cette lône est également alimentée par drainage de la nappe et perte d'eau superficielle de l'irrigation. En conséquence, elle connaît des apports d'eau maximum en été, qui permettent de constituer des habitats estivaux adaptés pour la faune aquatique. De plus, la connexion qu'entretient cette lône avec la queue de retenue du barrage de Mallemort permet d'observer une biodiversité exceptionnelle, particulièrement concernant l'avifaune, ce

qui permis à la zone d'être classée en 1992 par un arrêté de conservation du biotope, toujours sur proposition du Conseil Scientifique de la Durance.

- ✓ Le marais de Redortier : il est alimenté par un émissaire de décharge du canal Saint-Julien, qui a permis d'humidifier toute une zone de ripisylve et de créer un marais, peuplé de nombreux roseaux, et alimentant en aval une ancienne lône. Cette zone, connue pour la faune et la flore qui s'y sont installés, a fait l'objet d'une extension vers l'aval au titre des zones de compensation aménagées en bord de Durance par la SNCF dans le cadre des travaux du TGV Méditerranée.

#### **2.4.2 Influence de l'irrigation gravitaire sur le paysage par la végétation spontanée**

Les canaux d'irrigation gravitaire ont une influence très variée sur la végétation spontanée, et donc sur le paysage. Un réseau d'irrigation influe de plusieurs façons sur cette végétation :

- au niveau du captage de l'eau en rivière ;
- au niveau du lit et des berges intérieures des canaux ;
- au niveau des infiltrations latérales et en profondeur le long du linéaire de canaux ;
- au niveau des parcelles agricoles.

Nous allons voir qu'elles sont ces influences, pour ensuite nous pencher sur le cas particulier du développement de la végétation à proximité de nappes salées.

#### **L'impact d'un captage en rivière sur la végétation spontanée**

Deux cas de figure se présentent concernant les prélèvements en rivière : soit le captage se fait au moyen d'un barrage sur la rivière, soit le pompage s'opère au moyen d'une simple dérivation des eaux.

Dans le premier cas, la présence d'une masse d'eau à faible courant à l'amont du barrage est propice au développement d'espèces hygrophytiques (poussant dans une atmosphère et sur des sols humides), et même hydrophytiques (poussant dans l'élément liquide) si le plan d'eau est permanent. Le ralentissement de l'eau en amont du barrage peut de plus favoriser le développement d'espèces végétales inféodées aux zones lenticques (écoulements lents), alors que l'accélération de l'écoulement en aval du barrage peut être propice au développement d'espèces se développant de manière privilégiée en zones lotiques (écoulements rapides).

Dans le second cas, le captage dans le cours d'eau par dérivation engendre une diminution des débits et des hauteurs d'eau qui peut être à l'origine d'une réduction des surfaces colonisées par des espèces hygrophytiques et hydrophytiques, en bordure et dans les canaux [Chambre d'agriculture PACA, 2000].

*Remarque : En contribuant à l'abaissement du toit de la nappe, les pompes en nappe conduisent à l'assèchement des horizons supérieurs du sol. Les espèces qui se développent alors sont de type xérophytique (habitant les lieux très secs), plus que hydrophytique ou mésophytique (qui se plaisent dans les habitats d'humidité moyenne), ce qui diminuera la biodiversité de la zone.*

### **L'influence des caractéristiques des canaux et des eaux véhiculées sur les sols alentours**

Les propriétés des sols constituant et bordant le canal vont être influencées par deux paramètres, les *caractéristiques physico-chimiques de l'eau* qui transite dans les canaux, qui vont agir sur les propriétés des berges et du lit des canaux, et *la répartition entre parties émergées et immergées du canal*, qui va dépendre des hauteurs d'eau moyennes transitant dans le canal et des caractéristiques morphométriques du canal (longueur, largeur, profil transversal, profondeur, pente, ramifications, nature des parois, etc.) [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000].

Les parties immergées vont conditionner en partie les transferts d'eau en profondeur. Dans le cas où des eaux boueuses occupent suffisamment longtemps un canal, les parois et le lit immergés peuvent se colmater et empêcher les infiltrations d'eau en profondeur. Le comportement hydrique des sols avoisinants devient alors indépendant de la mise en eau du canal. La végétation spontanée ne sera par conséquent plus alimentée par ses infiltrations. L'effet inverse peut se passer dans le cas où la dégénérescence de l'appareil végétatif souterrains (racines), présent sur les parois et le lit, conduit à la formation de cavités qui, si elles sont colonisées par des eaux claires et non boueuses, peut devenir des zones d'infiltration privilégiées qui iront s'intensifiant.

Lorsque les parties immergées permettent l'infiltration, les parties émergées sont le siège de remontées d'eau par capillarité permettant l'alimentation en eau de la végétation spontanée. Son développement, puis sa dégénérescence, permet ensuite l'accumulation de matière organique sur le sol. Cette matière organique subit un processus de minéralisation (cycle de l'azote), permettant d'offrir les éléments minéraux nutritifs nécessaires à la croissance végétative (pouvant rester sur place ou être emportés par les eaux). Une fraction de la matière n'est pas minéralisée, mais transformée en humus, ce qui contribue à améliorer les caractéristiques du sol. D'une manière générale, le fonctionnement du canal contribue à l'amélioration des propriétés du sol et au développement de la végétation spontanée.

Enfin, une dernière considération doit être apportée au regard de la mise en eau des canaux. La végétation occupant les parois et le lit des canaux diffère selon que cette mise en eau est permanente ou temporaire :

*Dans le cas d'écoulements permanents*, les écoulements contribuent très fortement à la dissémination des espèces végétales, par le transport de graines ou de boutures (surtout pour les hydrophytes). Cette dissémination est complétée par le vent (cas des héliophytes, végétaux dont la base est immergée), ainsi que par la faune terrestre ou amphibie. Ceci explique pourquoi la plupart des espèces habitant des milieux mis en eau de manière permanente ont une multiplication végétative très importante. Cette rapidité de prolifération conduit à ce que des espèces dominent certaines parties des canaux, comme la roselière, la jonçaille, ... Pour l'auteur, « Une mise en eau permanente ou quasi permanente des canaux, crée des conditions propices à l'installation et à la survie d'espèces végétales d'affinités méditerranéennes ou atlantiques, au sein de la région méditerranéenne. » Cette végétation peut cependant poser des problèmes dans la gestion des canaux, principalement vis-à-vis des débordements et des opérations de curage et de faucardage (cf. 2.4.3).

*Dans le cas d'écoulements temporaires*, les seules espèces qui peuvent se maintenir sont celles qui peuvent survivre avec comme uniques apports d'eau les ressuyages des sols, ou encore les espèces qui peuvent résister à une dessiccation marquée des horizons supérieurs du sol.

## **L'impact des infiltrations profondes et latérales sur la végétation spontanée**

*Tiré de [Chambre d'agriculture PACA, 2000].*

Les infiltrations d'eau dans le sol peuvent donner lieu à trois types de phénomènes : l'apparition de zones de suintements (par exemple lorsque les canaux sont situés sur des coteaux, et plus généralement lorsqu'ils sont surélevés par rapport à la topographie générale du terrain), l'apparition de nappes phréatiques, et la remontée de nappes phréatiques préexistantes. Il faut distinguer les zones de suintement et des zones à nappe pour comprendre l'influence des infiltrations sur la végétation spontanée.

### Les zones à nappe

Dans le *cas d'une nappe stagnante*, nous avons vu comment les infiltrations profondes et les remontées de nappe consécutives pouvaient avoir une conséquence néfaste sur le développement de l'appareil végétatif souterrain (formation d'un sol à Gley), et par conséquent sur la vitalité voire la viabilité de la végétation en surface. Cette vitalité du couvert végétal dépendra alors en grande partie de la profondeur de sol prospectable par les racines, sans que ces dernières ne soient affectées par les processus de réduction anaérobie, même temporaires. Enfin, notons que plus le système racinaire d'un type de végétation se développe naturellement en profondeur, et plus ce type de végétation connaîtra une faible vitalité, ce qui est le cas des arbres et des arbustes.

Dans le *cas d'une nappe circulante* (suffisamment oxygénée pour être favorable au développement des végétaux), ces infiltrations profondes concourent à une remontée de la nappe qui, lorsqu'elle arrive proche de la surface, devient accessible aux racines de beaucoup d'espèces végétales qui peuvent alors l'explorer et en retirer l'eau et les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance. Les remontées d'eau par capillarité deviennent plus faciles pour la végétation, qu'elle soit spontanée ou de culture. Il s'agit d'un bénéfice tant pour la végétation spontanée que pour les cultures menées sur le périmètre. La végétation qui apparaît est alors une végétation de milieux plus ou moins humides, différente selon la position et la variation du toit de la nappe. Ces paramètres détermineront la prédominance relative des espèces mésohygrophytiques (plus hygro que méso), hygromésophytiques (plus méso que hygro) et hygrophytiques.

### Les zones à suintements

Dans le cas où les terres irriguées sont sur des coteaux, les infiltrations peuvent donner naissance à des résurgences sous forme de suintement sur ces coteaux. Le type de végétation sujet à se développer dans ces zones de suintement dépend en premier lieu de la fréquence et de la durée des suintements. Selon le cas, pourront se développer des espèces mésophytiques, voire des espèces plus ou moins hygrophytiques. Cependant, si les suintements proviennent d'un substrat non, ou très peu, fissuré et situé à très faible profondeur, ce même substrat réduit la profondeur de sol prospectable par les racines, ce qui a pour conséquence de limiter la croissance de la végétation spontanée dans ces zones de suintement.

Les zones à suintement peuvent également être des zones à eaux stagnantes, néfastes pour la végétation. Selon l'auteur, et toujours dans le cas d'une résurgence sur un coteau, « La recharge périodique en eau des sols superficiels conduit à l'apparition de substrats subissant des alternances d'imbibition et de dessiccation. Selon le modèle pris par la surface de la couche imperméable, de petites nappes superficielles peuvent voir le jour et devenir stagnantes à partir du moment où il n'y a plus d'infiltrations en amont (cessation temporaire

de l'irrigation). » Un risque d'anaérobiose est alors encouru sur ce type de nappes stagnantes, qui peut mettre en péril la végétation spontanée présente sur ces coteaux.

### **Le développement de la végétation sur les terres agricoles**

L'apparition d'une végétation spontanée suite aux infiltrations concerne également les parcelles agricoles, en bordure et entre les plantes desquelles peuvent se développer les mauvaises herbes, qui, si aucun traitement herbicide n'est appliqué, peuvent se pérenniser tout au long de l'année (hormis période de travail du sol). La composition floristique des mauvaises herbes dépend alors de paramètres tels que le type de culture, la texture et la structure du sol, le régime hydrique, le pH et la quantité de minéraux présents sur le sol.

### **Cas particulier du développement de la végétation à proximité de nappes salées**

La remontée du biseau salé, en colonisant de nouvelles parties de sol puis en atteignant la zone racinaire, entraîne la destruction des racines et l'affaiblissement de la végétation spontanée et cultivée. Lorsque cette remontée atteint la surface, ou est proche de l'atteindre (dans le cas d'une dépression par exemple), cela peut engendrer une évolution de l'occupation végétative du sol, à la faveur d'espèces halophytiques (qui ont besoin d'un substrat plus ou moins salé pour se développer) ou halorésistantes (qui résistent plus ou moins à la salinité du milieu lors de son développement, poussant également en milieu non salé).

### **CONCLUSION SUR LE ROLE D'ALIMENTATION EN EAU DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE**

Dans les régions méditerranéennes françaises, et particulièrement Languedoc-Roussillon et PACA, l'irrigation est à l'origine de la diversification floristique du couvert végétal qui d'ordinaire demeure beaucoup moins riche, ceci par l'apport de grands volumes d'eau, surtout lors des périodes de sécheresse sur des terres qui ont alors été humidifiées de façon pérenne. L'impact de l'irrigation gravitaire sur le couvert végétal est surtout visible à l'extérieur des surfaces irriguées, ainsi que sur les berges et le lit des canaux. Il varie néanmoins d'un territoire à l'autre. *Au final, l'irrigation gravitaire a permis la diversification de la végétation (les paysages peuvent changer rapidement sur de courtes distances) et l'alimentation en eau de paysages arborés dans des régions naturellement sèches et monotones. L'évolution de la faune, de la flore et du paysage par des siècles de pratique de l'irrigation gravitaire est un héritage qui pour beaucoup prend aujourd'hui l'aspect d'un patrimoine, un **patrimoine environnemental**, qui contribue au cadre de vie et aux activités de la population vivant à ses alentours.* Cette vision, bien que partagée par la population ancienne de ces régions, doit encore faire l'objet d'une valorisation accrue auprès des populations plus jeunes, établies depuis peu d'années dans ces zones, afin que cette notion d'héritage environnemental soit admise, et que des actions de protection et de valorisation de ces ouvrages hydrauliques soient entreprises.

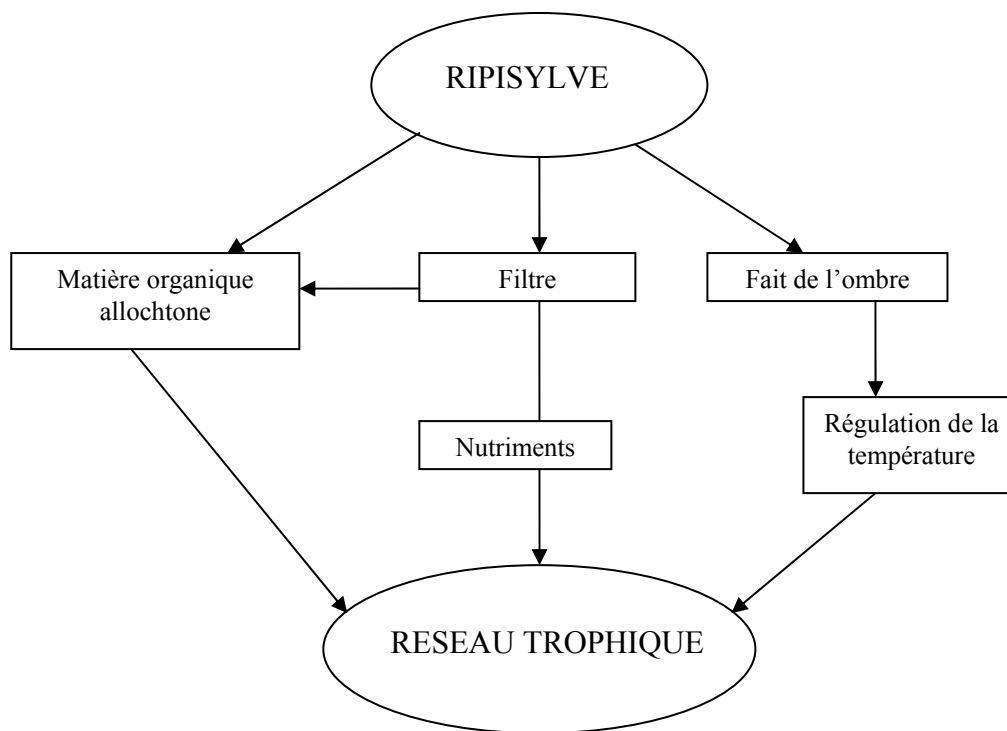
Si l'irrigation gravitaire joue un rôle certain sur le paysage par le biais de la végétation spontanée, cette dernière, en retour, affecte également le l'hydrosystème des canaux, l'association d'irrigation, et plus généralement la collectivité de par ses effets induits.

### 2.4.3 Les effets induits de cette végétation spontanée

#### Sur l'environnement

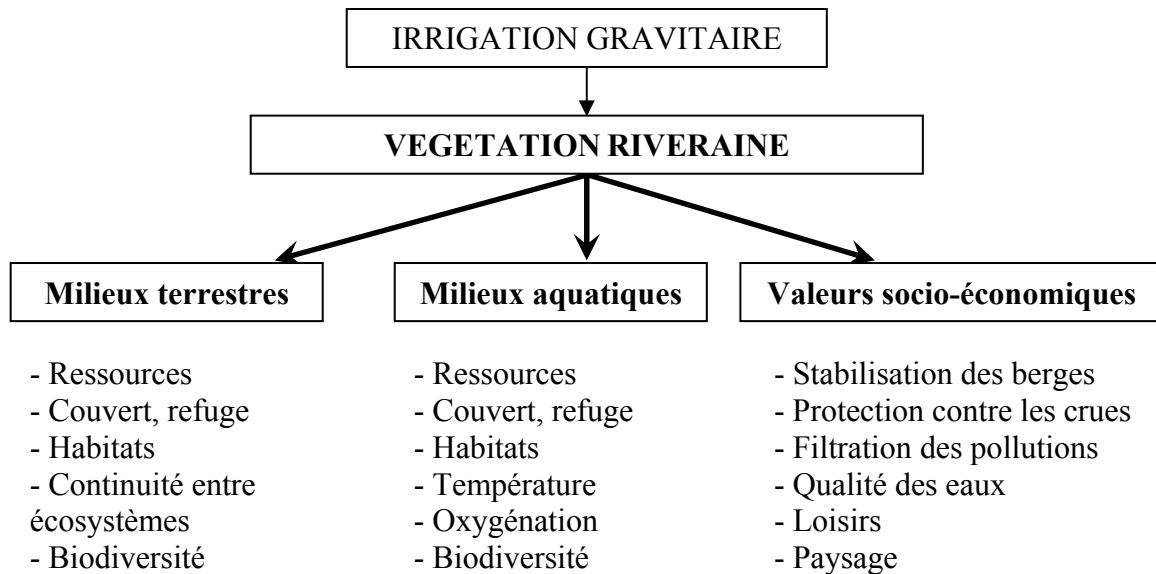
Les pertes en eau des canaux conduisent à la formation d'une végétation rivulaire le long des canaux : la ripisylve (haies, platanes, peupliers, arbustes...). La ripisylve joue un rôle essentiel sur les écosystèmes, notamment par l'altération de leurs réseaux trophiques (le maillage alimentaire qui les caractérise) (cf.

Figure 9). En effet, en plus de jouer un rôle important sur le paysage, la végétation permet de créer de l'ombre sur les canaux, ce qui limite la prolifération d'algues et l'eutrophisation du cours d'eau. Cela conduit également à une baisse de la température de l'eau, rendant les habitats aquatiques plus favorables à une vie piscicole diversifiée et de qualité. Cette végétation, et notamment les haies, constituent d'une part des niches écologiques importantes, particulièrement pour les insectes, et d'autre part des barrières contre le vent et le ruissellement, qui sont deux facteurs importants de l'érosion des sols. Enfin, le rôle de filtre à pollution joué par la végétation de bord de parcelle agricole, de canal ou de rivière (haies, herbes, ...), est largement reconnu.



**Figure 9 : Influence de la ripisylve sur les processus trophiques dans les écosystèmes d'eau courante**  
(source : Hervé Capra, cours d'hydroécologie animale, ENGEES, 2003, d'après [Piegay et Maridet, 1994])

La ripisylve rend d'importants services à la collectivité, tant sur le plan social, économique, qu'environnemental, en agissant sur les milieux terrestres aquatiques, et en ayant une valeur socio-économique aux yeux de la collectivité (cf. Figure 10). C'est par ailleurs ce qui explique que la reconstitution de ces milieux de transition fait l'objet de mesures agri-environnementales dans le cadre des Contrats territoriaux d'exploitation (CTE), nouvellement transformés en Contrats d'agriculture durable (CAD).



**Figure 10 : Contribution de la végétation rivulaire à la qualité des milieux et au cadre de vie**  
 (source : Hervé Capra, cours d'hydroécologie animale, ENGEES, 2003)

### Sur les canaux d'irrigation

*Le développement de la végétation spontanée sur les berges des canaux permet de stabiliser les berges lors de fortes crues, grâce à l'action des systèmes racinaires en place (cf. Figure 10). Cet effet positif peut cependant se voir inversé dans le cas d'arbres à système racinaire superficiel plan, tel que le peuplier, qui résistent très mal aux tempêtes et dont la chute est à l'origine de dégâts lourds sur les berges (effondrements, etc.).*

*Le développement de la végétation spontanée dans le lit des canaux et sur les berges peut cependant poser des problèmes dans la gestion des canaux. Sa simple présence et les débris qu'elle produit dans les canaux après sa dégénérescence contribuent à ralentir l'écoulement et à augmenter la ligne d'eau. Cela accroît les risques de débordements, augmente la fréquence des opérations de faucardage, et accroît par conséquent les charges d'entretien du canal. Cette tendance est d'autant plus marquée que les espèces qui constituent cette végétation spontanée ont une prolifération très rapide.*

Nous abordons maintenant le dernier type d'impacts consécutifs à l'irrigation gravitaire, les impacts sur les sols.

## **2.5 Impacts sur les sols**

Les impacts sur les sols se regroupent en deux catégories : les impacts liés aux problèmes de salinisation des terres, et ceux liés aux affaissements de terrain.

### ***2.5.1 La salinisation des terres agricoles et non agricoles***

On distingue deux types de salinisation des terres agricoles, selon que le sel est d'origine endogène (présent dans le sol ou à travers une nappe salée) ou exogène (apportée par les eaux d'irrigation). Dans le premier cas, il s'agit d'une *salinisation primaire*, parce que le sel était présent dans le sol avant que les irrigations ne commencent (le sel était là en premier). Dans le second cas, il s'agit d'une *salinisation secondaire*, parce qu'elle intervient suite à la salinité des eaux d'irrigation appliquées sur les parcelles (le sel arrive de l'extérieur). Nous commencerons notre étude par ce second type de salinité, parce qu'il correspond moins à la France (où l'eau est relativement abondante et où les ouvrages nécessaires à sa mobilisation sont économiquement envisageables) qu'aux autres pays méditerranéen (particulièrement ceux du Maghreb, où les eaux sont plus rares et les ressources financières plus difficiles à mobiliser, ce qui pousse une population vivant de l'agriculture beaucoup plus importante à utiliser des eaux salines).

#### **2.5.1.1 La salinisation secondaire**

La salinisation secondaire provient de la salinité des eaux d'irrigation appliquées sur les parcelles. Cette salinisation exogène des terres est une externalité négative de l'irrigation gravitaire, mais qui ne lui est pas spécifique, et qui affecte l'appareil végétatif des cultures et inhibe leur croissance (zones racinaire exploitable réduite). Mais cela concerne également la végétation présente au sein du périmètre, et plus encore celle située à l'extérieur.

Pour minimiser les quantités de sel présentes dans la zone racinaire des cultures, on applique d'importants volumes d'eau (salée ou non) sur les parcelles, que l'on collecte ensuite en profondeur à l'aide d'un système de drainage. Au lieu d'augmenter la salinité de la zone racinaire, une réaction physico-chimique conduit à y faire diminuer les concentrations de sels observées dans la pratique. En cela, la salinisation secondaire est un phénomène réversible dans une certaine mesure. Cette réaction ne s'observe cependant que sur les zones irriguées. Sous l'effet de ce flux d'eau, la nappe sous jacente au périmètre prend une forme concave, se rapprochant de la surface dans les zones extérieures au périmètre, affectant d'autant plus le système racinaire de la végétation qui s'y trouve. Cette dernière s'adapte alors en se transformant (cf. 2.4.2).

Les agriculteurs sont les principaux perdants de cette externalité (dans une certaine mesure seulement puisque cette eau reste nécessaire à l'amélioration des rendements).

#### **2.5.1.2 Les salinisations primaires**

##### ***2.5.1.2.1 Les remontées de sels fossiles***

Les sels proviennent des couches de sels fossiles du sol, et sont ramenés à la surface par la remontée de la nappe phréatique consécutive à l'irrigation. Lorsque la nappe remonte au point d'atteindre la zone d'extraction racinaire de la végétation superficielle, la demande bioclimatique en eau fait remonter par capillarité les sels fossiles jusqu'au niveau de l'appareil végétatif, ce qui concourt à la dégradation des récoltes, voire à leur perte. Ce phénomène est très peu rencontré en France, et trouve son illustration la plus forte sur les périmètres irrigués de la mer d'Aral en Ouzbékistan.

Un moyen de lutter contre la remontée de sels fossiles est de faire percoler d'importants volumes d'eau non salée dans le sol, afin que les sels soient emportés par l'eau douce en profondeur, hors de la zone bioclimatique (= zone racinaire + zone non racinaire soumise à la remontée capillaire). L'eau salée qui percole doit ensuite être évacuée hors du périmètre par un système de drainage. Ce type de salinisation est donc également réversible.

Le phénomène de remontée des sels fossiles n'est pas directement lié à l'existence d'une nappe phréatique, mais apparaît directement sous l'influence des remontées capillaires salées (demande bioclimatique), ou indirectement suite à la création et/ou à la remontée d'une nappe, sous l'effet des irrigations, qui se charge en sel lors de son ascension vers la surface. Les perdants de cette externalité négative sont analogues à ceux de la salinisation primaire, avec comme différence que la salinisation n'est pas la conséquence directe d'un choix de l'agriculteur.

#### **2.5.1.2.2 La remontée du biseau salé en zone côtière**

##### **Présentation**

Cette dernière externalité saline est, elle, largement rencontrée sur les périmètres irrigués français situés dans les zones côtières. Sous l'effet des forces de pression marines, l'eau salée colonise une partie des terres littorales souterraines. Ce phénomène, appelé intrusion marine, est commun à toute zone littorale. Lorsque ces sols ont la particularité de présenter une nappe d'eau douce en profondeur, un équilibre s'établit entre ces masses souterraines d'eau douce (continentale) et d'eau salée. La position du plan d'équilibre dépend avant tout de la pression respective de chacune de ces masses d'eau. Cette surface de transition entre l'eau de mer et l'eau douce se nomme *le biseau salé*.

La pression exercée par la masse d'eau de mer reste plus ou moins constante dans le temps, alors que la pression exercée par la nappe d'eau douce dépend, elle, de son exploitation, c'est-à-dire des prélèvements et des restitutions qui y sont menés. On distingue deux cas, selon que l'eau utilisée pour l'irrigation provienne ou non de la nappe d'eau douce.

##### *L'influence de pompages agricoles dans la nappe phréatique sur la remontée du biseau salé*

Dans le cas où la nappe d'eau douce est exploitée par des pompages destinés à l'irrigation, celle-ci s'amincit et exerce une pression plus faible sur la nappe salée. Par effet hydrostatique, on assiste à la remontée du biseau salé. En remontant vers la surface, l'eau de mer provoque la salinisation quasi-irréversible des sols colonisés. Lorsque le sel atteint la zone bioclimatique (voire la zone racinaire), les remontées capillaires de sel engendrent la destruction des racines profondes, ce qui conduit à l'affaiblissement des cultures et à la dégradation des récoltes. Cette remontée, freinée par les percolations d'eau depuis les parcelles irriguées, s'observe lorsque la nappe est exploitée de telle sorte que son renouvellement n'est pas assuré, ce qui est fréquent lorsqu'il s'agit d'irrigation individuelle, puisque le contrôle des forages individuels reste très difficile et que les irrigants individuels n'ont pas toujours conscience de l'effet collectif qu'ils ont individuellement sur la remontée du front salin. Ce phénomène est par exemple observé en France sur la plaine d'Hyères, à l'embouchure du Gapeau dans le département du Var, sur la nappe de l'Astien dans l'Hérault, sur la nappe du Roussillon, mais également au Maroc (à Eloualidya dans la plaine du Doukkala au sud d'Eljadida), en Algérie (le long de la connexion entre la grande nappe de la Mitidja et la baie d'Alger), au Liban (sur toute la zone côtière où est concentrée la

production d'agrumes), ..., et plus généralement dans la majorité des pays pratiquant l'agriculture irriguée intensive en zone côtière.

*L'influence des prélèvements  
en rivière sur la remontée du biseau salé*

Dans le cas de l'irrigation gravitaire, collective, le renouvellement de la nappe est plus facilement atteint. Cela tient à ce que d'importants volumes d'eau sont prélevés en surface dans les cours d'eau, pour être ensuite transférés en profondeur vers la nappe d'eau douce. Les percolations repoussent en profondeur le biseau salé, ce qui permet aux cultures de se développer sans inhibition. *Le contrôle de la remontée du biseau salé qu'assure l'irrigation gravitaire est une externalité positive importante du fonctionnement du système canal.* On observe par exemple sur la plaine de la Crau, ou encore en Camargue, que la réduction des superficies rizicoles irriguées par submersion avait favorisé les remontées de sel, ce qui eut pour conséquence de perturber l'écosystème du delta.

Des effets négatifs existent cependant. Le territoire occupé par les nappes salées et douces va bien au delà du simple territoire irrigué, mais seule cette petite partie du territoire contribue à repousser le front salin en profondeur. Cette baisse du niveau des eaux salines sous le périmètre irrigué se répercute par effet hydrostatique sur les territoires non irrigués voisins, pour lesquels l'effet est inverse : le biseau salé remonte. *L'externalité devient alors négative, et concerne principalement la végétation et les jardins privatifs voisins (cf. 2.4.2). Les impacts de l'irrigation gravitaire sur le biseau salé constituent donc une externalité mixte du fonctionnement du système canal. Néanmoins, la balance des effets positifs et négatifs penche dans le sens d'un effet majoritairement positif de l'irrigation gravitaire vis-à-vis de la remontée du biseau salé en zone côtière. Nous abordons pour finir le deuxième type d'impacts : ceux liés aux tassements et aux affaissements de sols.*

### **2.5.2 La lutte contre les tassements de sol**

Lorsqu'une nappe est surexploitée par des prélèvements individuels, le déficit d'eau souterraine, et donc de pression ascendante sur la couche supérieure de l'aquifère, ne permet plus que soit maintenue une pression hydraulique suffisante sur le sol en place. Cela peut être à l'origine d'un tassement du sol en surface. En assurant une réalimentation de la nappe, l'irrigation gravitaire contribue à lutter contre ce type de tassements de sol, particulièrement observés sur les périmètres irrigués d'Etat de la plaine du Tadla au Maroc. Les bénéficiaires de cette externalité positive sont la collectivité toute entière, ce qui confère au bénéficiaire un intérêt général.

### **2.5.3 La lutte contre les affaissements de sol**

Un autre impact sur les sols s'observe dans les zones de montagnes, caractérisées entre autre par leur forte pente. Les canaux, positionnés le long des courbes de niveau, s'opposent à ces fortes pentes et permettent d'éviter les glissements de terrain qui peuvent y être observés. Les canaux constituent en quelque sorte un ouvrage de maintien des sols.



### 3 LES EXTERNALITES LIEES A LA PRESENCE DU SYSTEME CANAL

La simple présence des canaux, de leurs ouvrages hydrauliques et des parcelles agricoles qui les entourent est génératrice de bien être (agrément lié au paysage, au patrimoine architectural, environnemental, ...) et d'activités récréatives et touristiques variées (pêche, promenade, randonnée, ...), qui concourent à l'attractivité et à l'essor du "territoire irrigué", comme nous allons le voir maintenant.

#### 3.1 Les usages d'agrément liés à la présence du système canal

##### 3.1.1 *Le patrimoine architectural des canaux d'irrigation*

Certains canaux d'irrigation sont des ouvrages très anciens, datant parfois du XII<sup>ème</sup> siècle, comme le canal Saint-Julien qui est le plus vieux canal dérivant les eaux de la Durance. Ils recèlent de nombreux ouvrages remarquables pour leur qualité architecturale ou leur ingéniosité (martellières, ponts, ouvrages de dérivation, ...), qui témoignent de l'histoire hydraulique, et par là même économique et sociale d'un territoire. Ils constituent plus généralement un **patrimoine à la fois architectural, historique et culturel**. Le canal Saint-Julien recèle par exemple un grand nombre d'ouvrages remarquables tels que des aqueducs (l'ouvrage qu'est la *Canau* en est un exemple remarquable), des partiteurs d'eau, des moulins anciens, des vannes et d'autres ouvrages en pierre. Le patrimoine du canal de Craponne est, lui, connu pour ses martellières et ses moulins à farine.

Ces ouvrages font partie du patrimoine d'un territoire, et sont considérés comme tel par les populations vivant à proximité des canaux, ou encore par les tenants d'un tourisme rural qui exploite cette richesse dans le cadre d'activités de loisir. Il existe de multiples déclinaisons locales de ce patrimoine, selon les territoires et leur culture. Ces déclinaisons peuvent se faire dans les ouvrages hydrauliques associés aux canaux, comme c'est le cas dans la région de plaine de Cavaillon, dont nous avons exposé quelques exemples ci-dessus. Il peut aussi concerner les canaux d'irrigation en eux-mêmes, comme le reflète l'histoire de l'hydraulique agricole des montagnes ardéchoises, où est pratiquée depuis des siècles l'irrigation par béalières<sup>22</sup> [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000]. Les canaux avaient également pour vocation d'alimenter de nombreuses sources et fontaines de villages de montagnes, dont certaines sont toujours en activité (village de Braux depuis le canal de Braux, village de Jausiers depuis le canal du Clos de Gueynier) [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000].

Si certains ouvrages du patrimoine font l'objet d'une mobilisation pour leur sauvegarde, comme c'est le cas pour les béalières, d'autres sont abandonnés ou en passe de l'être, souvent du fait de l'incapacité pour les ASA qui en ont la charge d'assumer les coûts très importants de pérennisation et de valorisation de ces ouvrages. C'est le cas des canaux de montagne des Alpes de Haute-Provence, qui comptaient en 1934 dans le département près d'une quinzaine de moulins à huile et plus de soixante moulins à farine.

---

<sup>22</sup> Les béalières sont de petits canaux creusés dans le sol, de trente à cinquante centimètres de largeur et de profondeur, disposés en peigne dans le territoire.

### 3.1.2 L'agrément paysager

#### **La structuration, la révélation et la diversification du paysage**

En jouant un rôle majeur sur le couvert végétal, les canaux contribuent à la formation du paysage. Cette contribution se fait à deux échelles de temps. Alors qu'une première contribution se manifeste par l'évolution de la végétation spontanée dans le court terme, une seconde, de long terme, résulte de l'action séculaire des canaux sur des territoires naturellement secs. Cette fonction structurante sur le long terme s'est traduite par l'apparition progressive de paysages verts, humides et arborés, constituant un patrimoine environnemental hérité de l'irrigation gravitaire.

Mais l'action des canaux ne se limite pas à cette **fonction de structuration** du paysage. Ils ont également une **fonction de révélation** du paysage. Ils transportent une eau d'une grande valeur hédoniste, à travers des territoires en relief et *suivant les lignes de niveau, sur les distances les plus longues possibles. Les canaux d'irrigation révèlent ainsi le paysage en accentuant les traits et la morphologie.* Ils ont en outre une **fonction de diversification** des paysages, en alimentant en eau certaines zones plutôt que d'autres. La région PACA est un excellent exemple où alternent zones irriguées et zones non irriguées, zones humides et zones sèches, paysages de garrigue et paysages verdoyants et ombragés. La Crau fait figure de prou en la matière, puisqu'elle fut largement irriguée sur la partie sud (Crau humide), où les paysages sont marqués par le foin de Crau, et laissée intacte sur la partie nord, marquée par les coussouls (Crau sèche).

#### **Les aménités de l'agriculture**

A côté des canaux et des ouvrages hydrauliques, les parcelles agricoles jouent également un rôle primordial dans le paysage. Le territoire français, recouvert pour plus de la moitié de sa superficie par des terres agricoles, reste historiquement, culturellement, économiquement et visuellement marqué par l'agriculture et la ruralité. Le paysage rural est façonné par un grand nombre d'acteurs : forestiers, agriculteurs, carriers, collectivités, aménageurs. Parmi ceux-ci, les agriculteurs ont un rôle majeur dans l'identité que confère l'agriculture au territoire. L'évolution des paysages ruraux est intimement liée aux évolutions des systèmes de production, des types de cultures et surtout des pratiques agricoles. Cultiver la terre, dans le respect de l'environnement, conduit à entretenir les paysages, maintenir la biodiversité, contribuer à la production de ressources naturelles (eau, air, sol) et être attentif à la qualité des milieux terrestres et aquatiques. C'est produire des externalités positives qui contribuent à une qualité de vie pour laquelle existe aujourd'hui une réelle demande sociale, qu'elle se traduise par le développement d'un « tourisme vert » ou par le déplacement d'une population urbaine qui choisit la ruralité comme lieu et mode de vie. De plus en plus de citoyens aspirent au retour à la nature (importance du phénomène urbain et accroissement du temps libre), ce qui se traduit par un accroissement continu de la demande sociale en faveur d'activités de loisirs, culturelles ou sportives pratiquées dans les espaces naturels.

La diversité du paysage constitue un caractère identitaire et patrimonial important, tant sur le plan du cadre de vie que sur celui du développement économique, touristique ou culturel. Cette diversité du paysage se retrouve dans les déclinaisons locales des grandes structures paysagères caractéristiques (bocage, terrasse, champs ouverts, marais, vallée, montagne, ...). Or cette diversité est aujourd'hui érodée par trois phénomènes forts, variables selon les régions :

- *la déprise agricole*, conduisant à la fermeture des paysages par l'abandon des parcelles agricoles au profit de boisements ou de friches ;
- *la périurbanisation, et plus précisément l'urbanisation mal maîtrisée*, conduisant à la dégradation du paysage par l'avancée du front urbain, ou suite au développement mal contrôlé d'aménagements touristiques ;
- et enfin *l'intensification des cultures* pour la production agricole, fondée sur la simplification des systèmes, l'agrandissement des parcelles et la suppression de nombreux éléments fixes du paysage, liés à l'eau, à la végétation ou aux sols, affectant d'autant la biodiversité de ces territoires.

Les politiques publiques ont d'ores et déjà pris en compte ces aménités rurales dans la gestion des territoires. Cette agriculture à vocation environnementale, rappelée à l'article premier de la Loi d'orientation agricole (LOA) du juillet 1999, et inscrite dans le cadre de la Politique agricole commune (PAC) était l'objectif de la mise en place des Contrats territoriaux d'exploitation (CTE), contrats qui permettent d'aider financièrement les agriculteurs qui s'engagent dans des actions de protection de l'environnement et de production de biens environnementaux que le marché ne rémunère pas.

La littérature abonde dans le domaine des aménités rurales, qui n'est plus au stade de sa reconnaissance. Nous n'aborderons pas dans ce rapport le champ des aménités rurales, bien qu'elles constituent à part entière des externalités de l'irrigation gravitaire, mais qui ne lui sont pas propres puisqu'elles sont communes à l'agriculture en général. Cependant, les aménités de l'agriculture contribuent à d'autres usages essentiels, tels que les usages récréatifs et touristiques suscités par les canaux d'irrigation.

### 3.1.3 *Les usages récréatifs et touristiques*

#### **La fonction sociale des canaux gravitaires**

Les canaux sont des *lieux de découverte et d'échange*. Les berges des canaux sont des lieux d'expression privilégiée d'activités récréatives et touristiques telles que la promenade, la pêche, le cyclisme, la randonnée, les sentiers de découverte du patrimoine, ... Si les canaux peuvent être le support d'activités touristiques, ils représentent avant tout des composantes essentielles du bien être des personnes habitants à proximité des canaux. Les berges ont par conséquent une fonction sociale, comme lieu de mixité sociale (jeunes, personnes âgées, pêcheurs, cyclistes, etc.). Le canal du Midi en constitue l'exemple le plus fort. Les réseaux d'irrigation gravitaire remplissent ainsi une **fonction sociale d'aménagement et d'animation du territoire**, en étroite relation avec la demande des populations locales.

Les usages de loisir et touristiques sont intimement liés aux agréments paysagers et patrimoniaux décrits plus haut. Tout ceci contribue au bien être de ces usagers non consommateurs de la ressource, par la qualité paysagère et la sérénité des parcours au fil de l'eau, le long desquels la présence d'une végétation importante et diversifiée, alimentée directement depuis les pertes latérales des canaux, permet d'apporter de l'ombre, du rafraîchissement, et d'aller à la découverte de la flore et de la faune associées aux canaux, qui, comme nous l'avons vu, abritent des espèces variées d'animaux (avifaune, ragondins, libellules, insectes, ...). L'importance de l'activité de pêche sur les canaux nous conduit maintenant à aborder ce point de manière spécifique.

### **La pêche, une activité économique à part entière**

Les canaux d'irrigation sont le siège d'une activité piscicole importante, qu'elle soit directement implantée dans les canaux, ou indirectement dans les zones alimentées en eau depuis ces derniers. Les exemples donnés sur l'alimentation en eau des étangs et l'ônes montrent en effet l'intérêt des apports d'eau dans les étangs pour la pisciculture.

La pêche est une activité économique qui participe à l'entretien des milieux. Les nombreux pêcheurs qui occupent les berges sont la plus souvent des pêcheurs locaux qui apprécient la proximité, le calme et le paysage des canaux. L'idée selon laquelle les canaux ne présenteraient qu'un intérêt très relatif en terme de qualité piscicole est généralement fautive, puisqu'ils peuvent abriter des espèces très appréciées des pêcheurs telles que le Sandre, la Carpe, le Brochet, la Brème ou encore la Perche.<sup>23</sup> L'attachement des pêcheurs à la vie piscicole des canaux d'irrigation transparaît particulièrement lorsqu'il est question de ne plus alimenter le canal en eau lors de la période de chômage. Les poissons risquant de mourir par manque d'oxygène, les gestionnaires d'ASA reçoivent des demandes chroniques pour que le canal soit mis en eau de façon plus pérenne, ou encore pour que soient menées au préalable des pêches électriques pour transférer les poissons vers des retenues naturelles ou artificielles destinées aux activités de pêche [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000]. Ces demandes peuvent également quelques fois prendre l'aspect de menaces, ou être à l'origine de procès intentés contre l'association. Ce fut le cas du canal de Châteaurenard, poursuivi en justice pour atteinte à la vie piscicole par la société de pêche locale.

Enfin, il arrive que les canaux d'irrigation permettent directement ou indirectement la tenue de concours de pêche. Par exemple, l'ASA de Carpentras se voit régulièrement demander, par les sociétés de pêche locales, des autorisations spécifiques en vue d'organiser des parties de pêche. Ces concours peuvent se faire :

- Sur plan d'eau, qui peut être créé pour l'occasion en fermant les vannes d'un barrage en rivière, et ainsi faire remonter le niveau d'eau en amont (ex : canal de Luc/Ornaison/Boutenac) ;
- Directement dans le canal (avec ou sans lâché de poisson) (ex : canal du Midi) ;
- Ou parfois même sur une rivière que les pêcheurs souhaitent voir réalimentée temporairement, depuis les eaux du canal d'irrigation, spécialement pour la tenue d'un concours de pêche (ex : canal de Carpentras, concours de pêche à la truite avec lâché).

Rappelons qu'en Languedoc-Roussillon par exemple, presque tous les cours d'eau de la région ont, de juin à septembre, des débits inférieurs au dixième du module annuel (référant pour la loi pêche) [*Chambre d'agriculture PACA*, 2000]. Les pêcheurs ont alors un intérêt manifeste à ce que l'eau soit présente dans les canaux ou les rivières, en tant que résultante des restitutions d'eau opérées dans les cours d'eau, ou comme action volontaire du gestionnaire suite à leur demande.

Précisons enfin que pêcher dans les canaux d'irrigation gravitaire nécessite un permis de pêche de deuxième catégorie. Le coût annuel d'un tel permis, pris pour un adulte sur le département du Vaucluse en 2004, est de 30€ pour la carte de pêche, plus une taxe allant de 12€ (catégorie 2 uniquement) à 28€ (catégories 1 et 2), soit un montant total allant de 42€ à 58€/an/pêcheur<sup>24</sup>, ce qui constitue une ressource financière non négligeable, et fait de la pêche une activité économique à part entière. C'est l'une des principales activités de plein air

<sup>23</sup> Cette vie piscicole qui se concentre particulièrement dans les singularités du réseau telles que les bassins de rétention, les siphons, etc.

<sup>24</sup> Source : Fédération de pêche du Vaucluse, <http://www.unpf.fr/84/>, consulté le 27 07 2004.

pratiquée par les français. La pêche est l'objet de dépenses importantes, qu'elles soient directes (permis et matériel de pêche), ou indirectes (hébergement, achats alimentaires et autres produits locaux), contribuant ainsi à l'économie locale des territoires de pêche. Ces dépenses sont à l'origine de flux économiques importants vers ces territoires, et favorisent le tourisme local. Sachant que l'on compte près de 2 millions de pêcheurs officiels, un calcul très grossier avec un prix moyen du permis de 40€ montre que la pêche dégage environ 80 millions d'euros par an par la seule délivrance des permis de pêche.

### **Des usages qui se heurtent à des difficultés techniques et juridiques**

Les canaux souffrent d'une ambivalence forte. D'un côté, ils sont le plus souvent perçus par la population comme des éléments naturels du paysage, auquel ils sont intégrés au même titre que les cours d'eau, ce qui joue en faveur de leur valorisation, qu'elle soit touristique ou récréative. D'un autre côté, ceux directement concernés par les canaux (agriculteurs, gestionnaires, collectivités) considèrent généralement ces derniers comme étant quasi-exclusivement des outils de production agricole. Les canaux restent dès lors peu mis en valeur par les communes ou les ASA, que ce soit à travers des aménagements récréatifs ou des circuits touristiques.

Il faut cependant mesurer ce constat compte tenu de deux problèmes auxquels se heurtent de telles valorisations. Valoriser, pérenniser et étendre ces activités récréatives sur les berges des canaux se heurte au caractère privé des propriétés traversées par les canaux. L'ASA n'est la plupart du temps pas propriétaire des berges. Elle bénéficie uniquement de servitudes de passage pour mener les opérations d'entretien du canal. Pour que ces activités récréatives puissent se dérouler dans les meilleures conditions, l'accès aux berges doit être autorisé par l'ensemble des propriétaires privés des terrains adjacents, ce qui se révèle souvent très compliqué. L'accord du propriétaire peut être implicite (le propriétaire prévoit de fait un passage de sa propriété pour les personnes souhaitant longer le canal) ou formalisé (le propriétaire et l'ASA se mettent d'accord sur les conditions de ce passage, avec éventuellement une close de déresponsabilisation.

Mais il n'est pas rare que l'accès aux berges soit rendu impossible par la présence d'une clôture mise en place par le propriétaire de la parcelle. Cela gêne la tenue des activités récréatives, et perturbe la gestion du canal (les opérations de curage et de faucardage doivent se faire depuis le lit des canaux, ce qui complexifie ces opérations et induit des dépenses d'entretien supplémentaires). Dans la pratique, l'accès aux berges pour les usages récréatifs et touristiques soulève deux problèmes délicats d'ordre juridique : la responsabilité en cas d'accident, et la non pertinence du service au regard de l'objet de l'association. En effet, l'offre d'usages récréatifs ou touristiques ne fait pas partie des objets que peut poursuivre une association (cf. Article 1<sup>er</sup> de la loi du 21 janvier 1865). Il en découle qu'une association syndicale n'est pas légalement autorisée à prélever des taxes pour ce service.

### **Un exemple de valorisation des canaux pour les usages récréatifs**

On peut citer, comme exemple de rétribution de ce service récréatif et touristique, la contractualisation entre l'ASA du Canal de Gap et la ville de Gap, concernant la prise en charge de l'entretien des canaux dans les Balcons du Gapençais. La commune de Gap adopta en 1995 un projet de circuit pédestre, équestre et cyclable autour de la ville de Gap, à vocation récréative (familiale) et touristique. La commune, située en zone de montagne (dénivelés), souhaitait que le tracé parcoure un linéaire important de canaux à ciel ouverts, pour la facilité du parcours que cela induit (les canaux suivent les pentes les plus faibles) et

l'agrément paysager qui est offert. La ville et l'ASA ont passé une convention concernant l'utilisation des berges, qui prévoit entre autre le maintien à ciel ouvert des canaux (pas de passage sous pression comme ce fût le cas sur d'autres linéaires), la préservation des ouvrages de vannage et la prise en charge des coûts d'entretien du canal, de ses berges et de ses ouvrages par la collectivité. La convention signée, le projet adopta comme élément central du parcours un linéaire quasiment plat de près de 12 km de canaux à ciel ouvert le long des berges de la branche principale de Charance. En 2000, 37 km des 47 prévus étaient aménagés, et l'entretien et la valorisation des canaux étaient assurés [*Chambre d'agriculture PACA, 2000*].

En parallèle à ces effets induits que l'on pourrait qualifier de continus dans le temps, d'autres, plus ponctuels, ont un rôle tout aussi important sur le territoire. C'est par exemple le cas de la lutte contre les feux de forêts.

### **3.2 La lutte contre les feux de forêts**

Les canaux et les zones alimentées en eau (cultures et végétation spontanée) jouent un triple rôle dans la lutte contre les feux de forêts. D'abord, les canaux permettent de cloisonner le territoire, et ainsi de constituer des *barrières de propagation contre les feux de forêt*.

Ensuite, les canaux alimentent en eau des zones plus ou moins humides où se développe une *végétation hygrophile et mésohygrophile difficilement combustible, qui s'oppose à la propagation du feu*. Cette maîtrise de la propagation du feu se fait aussi par le biais des productions menées au sein du système canal. La vigne constitue par exemple une barrière naturelle efficace contre sa propagation. L'importance de cet effet induit dépend de facteurs tels que la situation géographique de ces territoires/ zones humides, leur dimension et leur géométrie [*Chambre d'agriculture PACA, 2000*]. De même, lutter contre la déprise agricole permet d'éviter la fermeture des paysages, phénomène propice à la propagation des feux de forêts.

Enfin, les canaux constituent une *source d'eau pour les services de lutte contre le feu*, particulièrement appréciée dans des zones isolées qui nécessitent l'utilisation de canadiers. En attendant l'arrivée de ces avions, les pompiers peuvent mobiliser l'eau des canaux d'irrigation pour endiguer la propagation du feu (ex : incendie de Méailles en 1999).

Parmi les cinq déterminants du risque de feux de forêt<sup>25</sup>, nous avons représenté en gras certains paramètres sur lesquels la présence (point d'eau et barrière de propagation) et le fonctionnement (alimentation en eau du paysage) des canaux d'irrigation influent :

- 1- les paramètres physiques : relief, altimétrie, hydrographie, pédologie, etc.
- 2- les paramètres écologiques de la forêt : essences, **densité**, **recouvrement**, age, hauteur, **teneur en eau**, etc.
- 3- les paramètres climatiques : pluviométrie, **humidité**, **température**, vents, etc.
- 4- les paramètres socio-économiques : population, habitats, **activités**, etc.
- 5- les infrastructures de la forêt : pistes, **sentiers**, **points d'eau**, etc.

---

<sup>25</sup> Source : [http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS13/TS13\\_4\\_belhadjaissa\\_et\\_al\\_ppt.pdf](http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS13/TS13_4_belhadjaissa_et_al_ppt.pdf). Consulté le 29/06/2004.

Un problème délicat concerne le destinataire de la facture d'eau. Les volumes d'eau considérables utilisés sont payés par l'ASA par le biais de la redevance prélèvement à l'Agence de l'Eau. Bien qu'il puisse paraître dérisoire de parler de facture d'eau dans le cas de la lutte contre l'incendie, la situation financière de nombreuses ASA conduit à ce que le problème soit soulevé lorsque la situation se rencontre. Nous laisserons ici la question en suspens.

Un autre problème se pose également, celui de la détérioration des équipements d'irrigation. Pour utiliser l'eau du canal, les pompiers peuvent soit utiliser des pompes immergées, soit brancher leurs tuyaux sur les bornes d'irrigation. Si cette dernière pratique ne pose pas forcément de problèmes de pression, elle peut par contre endommager les bornes du fait de leur incompatibilité de raccordement avec les tuyaux incendies. La question du dédommagement se pose encore.

Après avoir présenté dans le détail les externalités positives et négatives liées au fonctionnement du système canal et à sa présence, nous allons maintenant nous intéresser à celles liées à son entretien.



## **4 LES EXTERNALITES LIEES A L'ENTRETIEN DU SYSTEME CANAL**

Contrairement aux réseaux sous pression, l'entretien des réseaux gravitaires est minime, et ne concerne principalement que les opérations de curage, de faucardage et d'éradication des algues. Néanmoins, ces opérations restreintes sont à l'origine d'effets induits négatifs qu'il convient d'explicitier.

### **4.1 Les résidus de curage et de faucardage sur les berges et dans le lit des canaux**

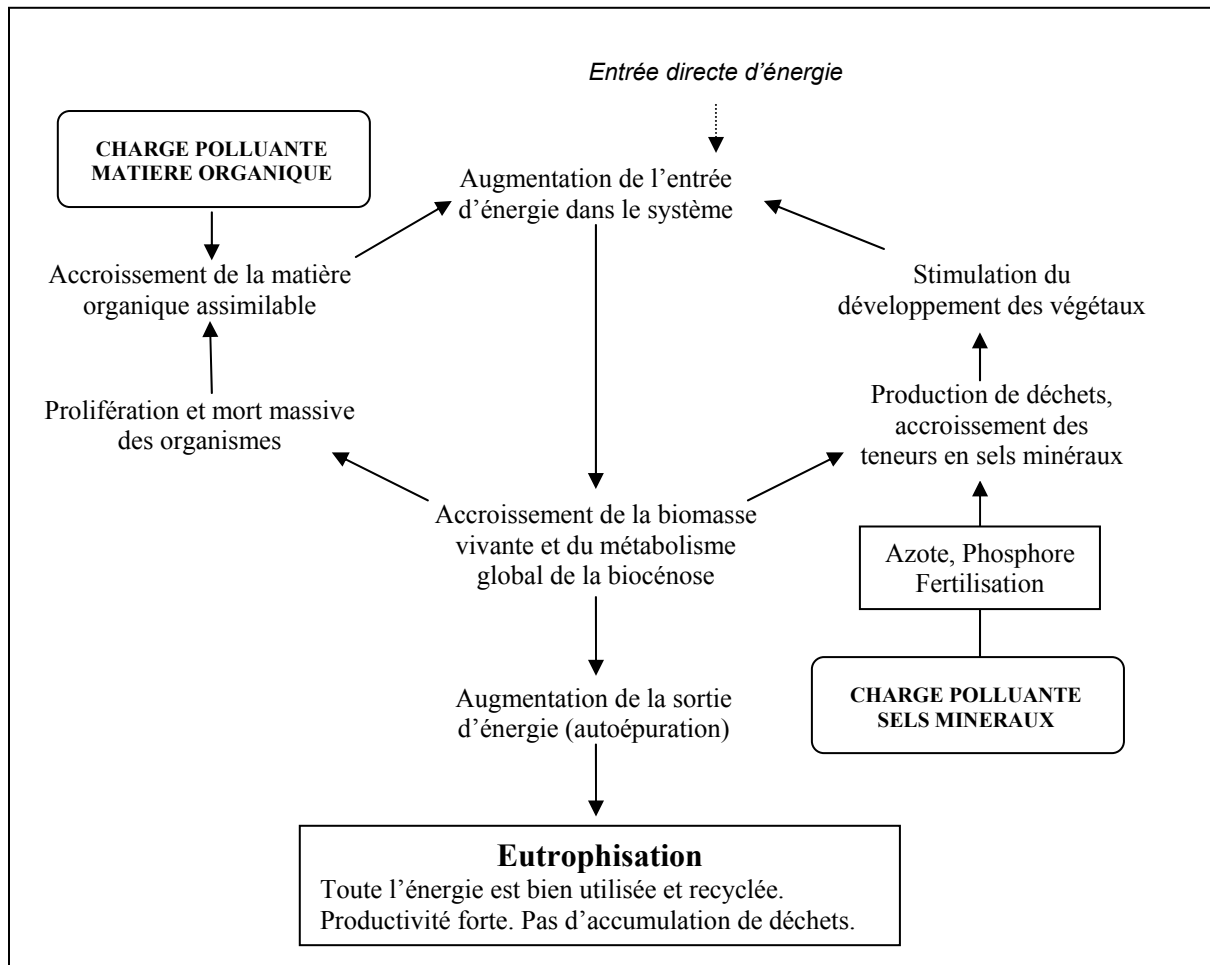
#### **Présentation**

Le curage et le faucardage des canaux sont les principales opérations d'entretien des canaux d'irrigation. Le curage permet d'enlever les sédiments déposés dans le lit du canal, et le faucardage consiste à se débarrasser de la végétation qui se développe sur les berges. Les sédiments et la végétation diminuent la capacité hydraulique des canaux et s'opposent à l'écoulement. L'augmentation de la ligne d'eau peut conduire à des débordements en cas de précipitations importantes.

#### **Gestion des taches d'entretien**

Plusieurs cas peuvent se présenter. Des ASA de taille importante peuvent disposer du matériel nécessaire à la réalisation de ces taches. Pour de plus petites ASA, le matériel peut être collectivisé à plusieurs. Il arrive également qu'une commune décide de prendre en charge ce travail, et mettant à disposition de l'ASA le matériel et parfois même le personnel communal. Cela peut être le cas lorsque l'ASA connaît des difficultés financières, mais aussi lorsqu'une commune estime que l'entretien de l'espace profite à toute la collectivité, et qu'il lui revient de prendre en charge cet entretien, que ce soit de manière financière, matérielle ou humaine, en mettant à disposition de l'association du matériel ou du personnel communal, voire en assurant la gestion complète de l'entretien des canaux.

Lorsqu'une commune met à disposition de l'ASA du matériel communal pour le faucardage, il s'agit le plus souvent d'une épareuse. Cette machine, normalement destinée à l'entretien des fossés communaux, n'est souvent pas adaptée au faucardage des canaux et peut endommager les berges. De plus, l'épareuse ne permet pas de récupérer les résidus de faucardage (herbe et autres végétaux), qui sont alors abandonnés sur les berges et dans les lits des canaux, des fossés d'assainissement et des rivières. Ces dépôts se putréfiant, ils occasionnent une augmentation de la charge nutritive de l'hydrosystème, que l'on assimile alors à une perturbation énergétique du système, et qui est à l'origine d'une eutrophisation des eaux du canal (cf. Figure 11). La pollution correspond ici à un apport d'énergie, sous forme de matière organique, supérieur à la capacité d'assimilation du système (le système est dit « obèse »). La végétation spontanée augmente, gênant d'autant les écoulements. En mourant, elle se putréfie et engendre une nouvelle surcharge nutritive, à l'origine d'un nouveau cycle d'obésité du système, jusqu'à ce que cette surcharge nutritive soit évacuée du système (de manière physique ou biologique). Le faucardage doit alors être plus fréquent et devient aussi plus coûteux. D'autre part, ces résidus de faucardage déposés sur les berges sont une gêne notable pour la tenue d'activités récréatives telles que la pêche ou la promenade ainsi que pour les riverains des canaux. Pour ces raisons, le dépôt des résidus de curage et de faucardage sur les berges et dans le lit des cours d'eau constitue une externalité négative de l'entretien des canaux.



**Figure 11 : Cycle énergétique de la pollution organique**  
 (Source : Hervé Capra, cours d'hydroécologie animale, ENGEES, 2003).

### Quelle solution apporter ?

Une première réponse à ce problème est d'ordre technique. Il s'agit d'utiliser un matériel plus adapté à cette tâche. Depuis l'an 2000 existe un nouvel outil de faucardage : *le panier faucardeur*. Il s'agit d'une extension que l'on positionne sur l'extrémité du bras d'une mini pelle sur chenille, et qui se présente sous la forme d'un panier récupérateur des dépôts. Cette extension permet dans le même temps de faucarder et de récupérer les herbes coupées directement dans le panier placé sous les faux, évitant ainsi les chutes d'herbe fauchée ou d'algues sur les berges ou dans le lit des canaux. Il fut expérimenté par l'ASA des cours d'eau réunis de la Durance.

#### **4.2 Les pollutions consécutives aux pratiques de faucardage et d'éradication des algues**

Certaines pratiques, souvent peu avouées par les gestionnaires d'ASA mais au demeurant bien réelles, posent d'importants problèmes en terme de qualité des eaux. C'est le cas du désherbage chimique, lors duquel des herbicides sont appliqués directement sur les berges des canaux en terre. Si l'efficacité de cette technique n'est pas remise en cause, la pollution accentuée et directe de l'eau qui lui est consécutive pose, elle, de sérieux problèmes de pollution aux hydrosystèmes concernés. Il en va de même pour les pratiques d'éradication des algues, dont le développement consécutif à la pollution des eaux est inquiétant, et pour lesquelles il n'existe aujourd'hui guère d'autres alternatives réelles que l'emploi de produits à base de cuivre, substance mortelle pour la faune piscicole à haute dose.

La littérature ne propose que peu de travaux relatifs à ces questions, et les gestionnaires de canaux restent peu enclins à se prononcer sur ces pratiques et leurs conséquences. Nous ne sommes donc qu'en mesure d'énoncer ces pratiques, sans pour autant pouvoir apporter plus de précision quand à leur généralisation.

Après avoir présenté les externalités liées à la présence, au fonctionnement et à l'entretien des canaux d'irrigation, nous allons nous pencher sur les effets induits associés aux fonctionnalités alternatives des canaux que peut développer une ASA, au premier rang desquelles vient la vente d'eau brute aux usagers non agricoles.



## **5 LES EXTERNALITES LIEES AUX FONCTIONALITES ALTERNATIVES DES RESEAUX D'IRRIGATION**

Divers services alternatifs sont aujourd'hui proposés par les ASA dans le but de diversifier leurs revenus, dont certains présentent des effets induits importants. Parmi ceux-ci, la vente d'eau brute aux rurbains occupe le devant de la scène.

### **5.1 La vente d'eau brute aux rurbains : un intérêt partagé**

#### **Présentation**

Les propriétaires non agricoles de parcelle du périmètre irrigué ont un droit d'accès à l'eau. Les contraintes d'un service d'eau brute par gravité ont conduit certaines ASA à développer un service d'eau brute sous pression pour les *usages domestiques d'agrément*, qui concernent principalement l'irrigation des jardins (pelouses, arbres fruitiers, fleurs, etc.), mais aussi le remplissage des piscines, le lavage des voitures, ... L'eau brute fournie aux usagers domestiques est économiquement plus intéressante que l'eau potable pour ces usages. Cette différence de prix tient essentiellement à deux facteurs : l'eau brute desservie chez les particuliers n'est pas traitée pour sa potabilisation, et les coûts d'adduction sont moins bien moins importants (faibles linéaires d'adduction, mise sous pression tardive, ...). Dans le département du Vaucluse, la demande des particuliers pour l'irrigation de jardins est importante et la majorité des gestionnaires de réseaux sous pression développent ce type d'offre. La SCP a ainsi mené une politique forte de développement des bornes d'agrément, qui s'est traduite par la mise en place de 15 bornes en 1986, à 591 en 1999 [*Fédération des associations syndicales du Vaucluse*, 2000].

#### **L'intérêt des collectivités**

Dans une étude menée sur trois périmètres méditerranéens anciens (associations de Thuir, de Gignac et de Manosque), [*Garin et al.*, 2002b] montrent qu'à la fois les rurbains et les collectivités locales ont un intérêt à ce qu'existe ou soit maintenu un réseau d'eau brute allant dans le sens de leurs attentes spécifiques respectives. L'attente des rurbains est de disposer d'une eau bon marché leur permettant d'arroser leur jardin, dont la fonction principale n'est plus nourricière comme se fut le cas par le passé, mais d'agrément et sociale. Les espèces végétales présentes dans les jardins se diversifient, sous les effets combinés d'une eau brute bon marché, de l'influence des jardineries et d'un apport croissant dans ces territoires de populations exogènes gourmandes en eau. L'eau brute pour le remplissage des piscines reste, quant à elle, une pratique peu sollicitée malgré l'augmentation du nombre de piscines. Pour les auteurs, « L'intérêt financier immédiat dépend du différentiel de prix entre ces eaux [eaux brute et potable]. Il est encore discutable pour de très petites parcelles cadastrales (moins de 500 m<sup>2</sup> sur la commune de Gignac) ou pour une consommation d'eau brute faible (moins de 100 m<sup>3</sup>/an sur Manosque pour 43% des ménages raccordés à un réseau sous pression). » Quoiqu'il en soit, l'étude montre que l'accès à un réseau d'eau brute et la qualité du jardin sont des éléments concourant à l'augmentation du prix des propriétés.

Les *effets indirects* d'un accès au réseau d'eau brute pour les rurbains induisent des bénéfices d'ordres divers pour la collectivité. L'embellissement des jardins de la commune donne à cette dernière une esthétique générale qui renforce son attractivité. L'accès à une eau à faible coût, particulièrement pour une population retraitée attachée au rôle joué par le jardin

(potager ou non) et qui demeure financièrement très sensible au prix de l'eau, permet à la commune de jouir d'une certaine satisfaction de ses habitants, contribuant dans une certaine mesure à la paix sociale, et à la qualité de vie. Enfin, l'embellissement et l'attractivité accrues de la commune par le développement de jardins d'agrément concourent au renchérissement du foncier et à l'augmentation de la taxe d'habitation, ce qui va dans le sens du développement économique de la commune.

Le réseau d'eau brute a aussi des *effets directs* sur la collectivité. Les communes gérant le service d'eau potable en régie estiment que le réseau d'eau brute permet d'écarter les pics de demande estivale en eau potable, et ainsi de réduire les coûts de fonctionnement (volumes potabilisés) et d'investissement (dimensionnement des stations) du service, ainsi que d'éviter aux stations de potabilisation des fonctionnements de pointe qui engendrent des coûts supplémentaires pour l'exploitation et une usure prématurée des infrastructures. Ceci est d'autant plus vérifié en période de pointe des consommations (période estivale), où beaucoup de ménages irriguent leur jardins. De plus, la gestion du service d'eau potable devient plus simple lorsque les pics de demande sont écartés, ce qui permet de s'acquitter d'éventuels problèmes liés à l'insuffisance de la ressource. Les stations de potabilisation et d'épuration fonctionnant de façon très étroite, tout ce qui est valable pour le premier l'est également pour le second. La vente d'eau brute permet donc, d'une manière générale, d'homogénéiser dans le temps le fonctionnement des stations de potabilisation et de traitement des eaux usées.

Enfin, l'accès à un réseau d'eau brute à bas prix permet de prévenir les forages individuels domestiques dans les aquifères peu profonds, ce qui fut observé sur le périmètre de Gignac [Montginoul et al., 2002b]. Ces forages sont généralement consécutifs à un coût de l'eau potable trop important pour les volumes et l'usage souhaités, et un accès à un réseau d'eau brute inadapté, limité ou inexistant. L'accès à un service d'eau brute adapté à la demande (prix de l'eau, capacité du réseau, étendue du réseau) permet d'endiguer le développement des pompes individuelles dans la nappe, et de protéger les captages d'eau potable de la collectivité des pollutions que ces forages peuvent introduire dans les nappes. Il y a donc un intérêt réciproque entre les rurbains et la collectivité de développer un service d'eau brute adapté, mais également entre l'ASA et la collectivité.

### **L'intérêt des ASA et des agriculteurs**

A côté de cet intérêt réciproque des rurbains et des collectivités, les agriculteurs et les gestionnaires d'ASA y trouvent également un intérêt, double, d'ordre économique et politique [Garin et al., 2002b]. Tout d'abord, les recettes générées par la vente d'eau brute aux rurbains sont plus élevées par m<sup>3</sup> prélevé (ou par surface dominée). Sur le périmètre de Manosque par exemple, alors que 78% des volumes prélevés sont distribués aux agriculteurs, contribuant à hauteur de 49% aux recettes de l'association, les autres usages (rurbains individuels et communes) génèrent 38% des recettes avec seulement 21% des volumes distribués ([Feuillette et al., 1997] ; [Garin et al., 1997]). C'est également le cas sur le périmètre irrigué de Gignac où les parcelles rurbaines concernent 21% de la superficie du périmètre syndical, contribuant à hauteur de 38% aux recettes de l'association. La contribution financière des usagers rurbains constitue donc une part importante des recettes des ASA proposant un service d'eau brute.

Ceci s'explique par le fait que les syndicats des ASA, dominés par les agriculteurs, font le choix d'une tarification basée sur le consentement à payer des rurbains plutôt que sur le coût de revient du service, comme c'est le cas pour les usages agricoles (notons que le service

d'eau brute pour les rurbains nécessite des installations particulières de mise sous pression et de distribution de l'eau, ce qui augmente le coût de revient du service et justifie en partie le différentiel de prix observé). Le consentement à payer des usagers rurbains est élevé, puisqu'il est essentiellement fonction du prix de l'eau potable, de loin supérieur à celui de l'eau brute. La base de tarification est généralement la superficie de la parcelle. Pour s'affranchir de coûts de transaction importants qui interviennent pour de petites parcelles ne contribuant que très modestement aux recettes de l'ASA, le syndicat décide fréquemment de poser une superficie minimale de souscription au service, définissant la redevance dont doivent s'acquitter tous les propriétaires de parcelles de superficie inférieure au seuil fixé pour bénéficier du service d'eau brute. Dans les cas étudiés par les auteurs, cette superficie minimale variait entre 300 et 1500m<sup>2</sup>.

A côté de ce bénéfice financier, les agriculteurs et les gestionnaires d'ASA ont un autre avantage à offrir un service d'eau brute, d'ordre politique et social. Les effets induits positifs des réseaux d'eau brute exposés ci-dessus sont également mis en avant par les gestionnaires d'ASA auprès des collectivités desservies, afin d'emporter leur soutien politique pour des demandes de financement de réhabilitation des réseaux. Ce soutien à l'aménagement du territoire devient alors l'argument principal qui permet aux ASA de bénéficier des subventions, cet argument venant dépasser celui du simple soutien aux agriculteurs (ce qui traduit également la volonté de la puissance publique d'avoir une agriculture au service de la société qui soit au centre des politiques d'aménagement du territoire). Les ASA bénéficient enfin de ce soutien politique lorsque les prélèvements par l'irrigation sont pointés du doigt par les usagers aval de la rivière (canoë kayak, hydroélectricité, etc.), particulièrement dans des instances de gestion et de concertation locales (SAGE, Contrat de rivière, etc.). En cela, on constate une synergie d'intérêts entre les rurbains, les collectivités et les ASA allant dans le sens d'un service d'eau brute depuis les canaux d'irrigation. Mais un tel réseau peut également intéresser les usagers non domestiques.

## **5.2 La vente d'eau brute aux usagers non domestiques**

Nous définissons l'usage non domestique de l'eau au sens du décret du 12 septembre 2003<sup>26</sup> : « est assimilé à un usage domestique de l'eau tout prélèvement inférieur ou égal à 1 000 mètres cubes d'eau par an ». Les usagers non domestiques regroupent ainsi aussi bien les collectivités, les industriels, le secteur touristique ou récréatif, le secteur des services, ...

Parmi ceux-ci, les collectivités sont particulièrement demandeuses d'une eau brute moins cher, qui leur permette d'arroser les espaces verts communaux, les terrains de sport, les "équipements verts" (ronds points, ...), ou encore les fontaines municipales. Ces services ont d'ailleurs été développés par des Société d'aménagement régional (SAR) comme la Société du canal de Provence (SCP) (qui a également affirmé une politique d'offre de piquets incendies) [*Fédération des associations syndicales du Vaucluse*, 2000].

D'autres services alternatifs peuvent être délivrés par les ASA aux collectivités, selon les particularités locales, comme par exemple le service d'adduction d'eau brute vers une collectivité pour sa transformation en eau potable. L'adduction d'eau brute concerne particulièrement les petites communes de montagne, qui éprouvent de grandes difficultés

---

<sup>26</sup> Portant modification du décret 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (loi 92-3).

pour mobiliser la ressource et la transporter, tant sur le plan technique (fortes pentes) que financier. Les réseaux d'irrigation sont alors sollicités pour remplir cette fonction, et deviennent la principale source d'eau de ces communes. Les communes n'ont plus qu'à potabiliser l'eau, et, en retour, prennent en charge ces canaux, le plus souvent bénévolement. Il arrive parfois même que ces canaux soient maintenus en l'état « artificiellement » pour remplir cette fonction (lorsque la déprise et l'exode rural ont fait disparaître les agriculteurs). Le canal mixte du sud-Luberon délivre par exemple 1.5 Mm<sup>3</sup> au SIVOM de Pertuis pour ces besoins en eau potable. Une utilisation des eaux du canal de Carpentras pour alimenter le réseau du syndicat Rhône-Ventoux est également à l'étude [*Fédération des associations syndicales du Vaucluse*, 2000].

La vente d'eau brute peut aussi intéresser d'autres types d'usagers, tels que les usagers industriels. Les industries intéressées peuvent aussi bien être des carrières (cas du canal mixte sud-Luberon), une papeterie ou un moulin (cas du canal de Vaucluse), un club de golf (cas du canal de Carpentras), etc. [*Fédération des associations syndicales du Vaucluse*, 2000]. Cela peut enfin être des usagers récréatifs tels que des fédérations de pêche souhaitant voir un cours d'eau réalimenté temporairement depuis le canal d'irrigation pour que se déroule un concours de pêche.

A côté de cette fonctionnalité alternative que représente la vente d'eau brute, une autre, moins développée, est celle qui consiste à opérer des restitutions en rivière au droit d'une sortie de station d'épuration dans l'optique d'y diluer les pollutions.

### **5.3 La dilution des pollutions en sortie de station d'épuration**

Nous avons vu comment les restitutions peuvent être importantes lors des étiages (cf. Tableau 5). La baisse de la capacité autoépuratrice d'une rivière en étiage la rend très sensible aux apports de polluants extérieurs, surtout lorsqu'ils sont concentrés comme les rejets d'eau traitée depuis les stations d'épuration. Il n'est d'ailleurs pas rare que les débits de ces cours d'eau soient majoritairement constitués des débits de sortie de station, ce qui pose de graves problèmes de salubrité des eaux et de viabilité de la faune piscicole. Dans de tels cas, les ASA peuvent être sollicitées par des communes pour dériver une partie de leurs eaux vers ces cours d'eau, en aval des rejets d'eau épurée et selon un débit et une fréquence déterminés, afin de diluer la pollution pour garantir une certaine qualité du milieu aquatique. C'est le cas de la commune de Carpentras avec l'ASA du même nom (les interventions de l'ASA, bien que récurrentes, restent pour le moment bénévoles). Les volumes d'eau véhiculés par les canaux, souvent peu pollués, sont susceptibles par leur importance de diluer certaines pollutions, de telle sorte que les taux de pollution restent en dessous des valeurs critiques. Pour cela, les restitutions doivent s'opérer au plus proche des points de décharge des eaux de station d'épuration (mais les mesures doivent s'effectuer à une distance suffisante de ce point pour que la dilution puisse être faite).

Les Station de traitement des eaux usées (STEU) connaissent des pics de fonctionnement pendant la période estivale (répercussion des pics de consommation d'eau potable). Elles rejettent pendant cette période les eaux traitées dans les cours d'eau, qui eux-mêmes sont souvent dans des états proches des étiages puisque sollicités par les usages annexes qui s'y développent. L'opportunité de cette dilution est donc importante, et peut être évaluée dans le cadre des méthodes d'évaluation monétaire des bénéfices non marchands (cf. Chapitre 8). Remarquons que cette fonctionnalité alternative peut rentrer dans un cadre plus générique de

fonctionnalités, qui est la dilution des pollutions ponctuelles comme les pollutions industrielles par exemple. Si nous n'avons considéré ici que la pollution en sortie de station d'épuration, c'est parce que cela constitue le seul cas de dilution de pollution ponctuelle qui nous ait été donné de voir. Une dilution des pollutions industrielles au droit des rejets reste néanmoins envisageable.

En amont de la dilution des pollutions, une dernière fonctionnalité alternative des canaux d'irrigation peut être observée, celle de l'assainissement urbain.

#### **5.4 L'assainissement urbain**

L'assainissement urbain par les canaux d'irrigation peut être une solution pour certaines petites communes n'ayant pas à proximité de cours d'eau pour évacuer les eaux en sortie de STEU, où ne disposant que de cours d'eau dont la qualité impose des normes de rejets économiquement trop contraignantes. La collectivité peut alors en retour prendre en charge tout ou partie de l'entretien des canaux. C'est par exemple le cas du village des Vignères dans la commune de Cavaillon, qui, ne disposant pas d'une rivière à proximité de sa station d'épuration, a choisi de rejeter ces eaux traitées dans le canal Saint-Julien [ENSAM, 2003]. Cette échange a été formalisé au moyen d'une convention entre le canal Saint-Julien et la mairie de Cavaillon, qui définit les modalités de rejet, détermine des normes de rejets et fixe une compensation financière annuelle pour le service rendu.

Les exemples de services alternatifs donnés tout au long de cette partie ne sont en rien exhaustifs, et il existe encore d'autres services que nous ne pouvons développer ici, comme par exemple le service d'adduction d'eau brute par le biais des canaux dans le cas de villages de montagne qui ne disposent que de peu de ressources, qui plus est difficilement mobilisable, ou encore le service d'adduction d'eau potable aux collectivités (le seul cas que nous avons pu recenser concerne la ville de Martigues, alimentée en eau potable par le biais du canal d'Istres). Quoiqu'il en soit, ces services alternatifs doivent être perçus comme un bon moyen de multiplier les sources de revenu d'une association, même si cette diversification des services reste limitée sur un point, le fait que ces usages alternatifs sont généralement peu consommateurs d'eau. La SCP ne mobilise par exemple que l'équivalent de 15% de ses débits agricoles pour satisfaire les services alternatifs qu'elle propose, alors même qu'elle est la structure ayant le plus développé ces mêmes services [Fédération des associations syndicales du Vaucluse, 2000].

Nous terminons ici la présentation des externalités et des fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation gravitaire, pour entrer dans la partie consacrée à la quantification de ces effets induits, à commencer par ceux liés à des flux d'eau, pour finir par ceux associés à des flux de solutés.



## 6 QUANTIFICATION DES EXTERNALITES DE FLUX D'EAU

Dans le cadre de la présentation des externalités associées au système canal, nous avons classé les externalités suivant qu'elles provenaient de la présence, du fonctionnement ou de l'entretien du système canal. Nous abordons maintenant la partie consacrée à la quantification de ces externalités. La quantification ne concerne que les externalités liées *au fonctionnement du système canal*, et plus précisément relatives au cycle de l'eau, que nous avons rangé en deux catégories : les externalités liées à des flux d'eau, et celles liées à des flux de solutés (cf. Tableau 4). C'est suivant cette typologie que nous décrirons maintenant les moyens aujourd'hui disponibles pour quantifier ces externalités, leurs avantages et leurs limites, dans le but d'isoler les informations qui ne peuvent être quantifiées, celles qui ne peuvent être quantifiées qu'avec une précision ou une fiabilité limitée, et celles qui demeurent parfaitement connues. Ces informations visent à répondre à la question suivante : *Quel degré d'information possède-t-on sur chaque externalité, dans l'hypothèse où l'on placerait ces "services d'externalités" au centre de contrats permettant leur rétribution ?*

### 6.1 La quantification des flux d'eau de surface

Les volumes prélevés en rivière (ou depuis d'autres canaux) par une association d'irrigants peuvent être quantifiés au moyen d'instruments de comptage placés au droit de la prise d'eau. Ces instruments existent le plus souvent dans ces associations puisque, depuis la loi sur l'Eau, elles ont à charge de comptabiliser les volumes qu'elles prélèvent au milieu naturel (et l'Agence de l'Eau (AE) apportait, jusqu'à récemment, son concours financier pour tout achat de matériel qui y était destiné). Ce cadre institutionnel explique par ailleurs en partie que seuls les volumes prélevés fassent l'objet d'une telle politique de comptage systématique, contrairement aux volumes restitués pour lesquels aucune politique de mesure n'a encore vu le jour. Le comptage des volumes prélevés est par conséquent aujourd'hui beaucoup plus développé et fiable que celui des volumes restitués, très aléatoire selon les moyens dont disposent les ASA, et les particularités de ces dernières (topographique, hydraulique, ...).

Nous allons maintenant présenter les méthodes et les appareils de mesure des débits les plus adaptés aux canaux à surface libre, desquels nous comparerons la précision, pour ensuite faire une distinction entre la mesure des prélèvements et celle des restitutions dans la pratique.

#### 6.1.1 *Les méthodes de mesure des débits dans les canaux*

Il existe deux principaux moyens de mesurer les prélèvements/restitutions, et plus généralement les débits, dans des canaux à surface libre : les *mesures de débits par jaugeage*, et celles utilisant des *ouvrages calibrés*. Elles ont comme point commun de déterminer le débit transitant dans le canal à partir de la mesure du niveau d'eau, la relation entre ces deux grandeurs étant donnée par une fonction (ou une courbe) de tarage (encore appelée d'étalonnage). Elles diffèrent dans la façon d'obtenir la courbe de tarage. Dans le cas des ouvrages calibrés, implantés dans le canal concerné par la mesure, la fonction de tarage  $Q = f(h)$  est donnée par le constructeur de l'ouvrage, et demeure spécifique à ce dernier. Dans le cas des mesures de débit par jaugeage, la courbe de tarage est obtenue de manière expérimentale en mesurant les vitesses d'écoulement en différents points d'une section donnée, que l'on intègre ensuite suivant les deux dimensions caractéristiques de la section. Nous détaillerons ces deux méthodes, ainsi que les instruments de mesure de niveau d'eau

utilisés, leur fonctionnement, leur précision, leurs avantages et inconvénients. A côté de ces deux méthodes phares, il existe d'autres méthodes envisageables dans certains cas, telles que la méthode volumétrique ou la dilution chimique.

D'une manière générale, toutes ses méthodes appartiennent à trois catégories de méthodes :

- *Les méthodes globales*, dans lesquelles le débit est mesuré directement (méthode volumétrique, seuils-jaugeurs, dilution chimique) ;
- *Les méthodes complètes*, dans lesquelles les trois composantes – vitesse, profondeur, distance à la berge – sont mesurées séparément (essentiellement la méthode du moulinet hydrométrique) ;
- *Les méthodes incomplètes*, dans lesquelles le champ des vitesses est exploré de façon partielle (ultrasons, bateau mobile, flotteurs), mais qui ne seront pas exposées ici car elles ne conviennent pas aux mesures de débit dans les canaux (mais plutôt dans de grandes rivières où transitent des débits très importants).

#### 6.1.1.1 Les méthodes globales

##### **6.1.1.1.1 *Seuils-jaugeurs et mesures de niveau d'eau***

Les méthodes utilisant des seuils-jaugeurs sont les méthodes les plus couramment utilisées dans les ASA pour déterminer les volumes prélevés, car elles sont les plus adaptées. Elles reposent sur deux composantes : les ouvrages calibrés (donnant une relation entre le niveau d'eau et le débit) et les instruments de mesure de la hauteur d'eau (principalement limnimétriques).

##### **6.1.1.1.1.1 Les ouvrages calibrés (seuils-jaugeurs)**

Pour les ouvrages calibrés, la relation analytique de tarage hauteur d'eau / débit, spécifique à chaque ouvrage (en fonction de sa hauteur, largeur, etc.), est fournie par le constructeur. La fonction de tarage  $Q = f(h)$  est du type  $Q = K C h^n$ , avec  $K$  coefficient de débit lié à la hauteur d'eau  $h$ ,  $C$  et  $n$  paramètres dépendant des caractéristiques du seuil. Il existe deux types d'ouvrages calibrés adaptés à la mesure des débits dans les canaux d'irrigation, le canal Venturi (et assimilés) et les déversoirs.

##### ➤ Le canal Venturi

C'est un canal calibré en tôle placé dans le canal principal. Il possède des contractions latérales et sur le fond qui permettent à l'écoulement de changer de régime, en passant d'un régime fluvial<sup>27</sup> à un régime torrentiel<sup>28</sup>, afin de s'affranchir de l'influence des perturbations d'écoulement aval sur le niveau d'eau amont. Lorsque le canal Venturi fonctionne en régime dénoyé, on accède au débit par la mesure du niveau d'eau à son entrée. Cependant, lorsque le niveau d'eau atteint une hauteur critique dans le canal<sup>29</sup>, le canal Venturi entre en fonctionnement noyé, et la fonction de tarage devient du type  $Q = f(h_{\text{amont}} - h_{\text{aval}})$ . Les imprécisions de mesure sur  $h_{\text{amont}}$  et sur  $h_{\text{aval}}$  s'accumulent, et peuvent conduire à une erreur

<sup>27</sup> Vitesse d'écoulement lente, niveau d'eau élevé, influence de l'aval sur l'amont.

<sup>28</sup> Vitesse d'écoulement rapide, niveau d'eau faible, influence de l'amont sur l'aval.

<sup>29</sup> Du fait de faiblesses d'écoulement dues à une trop faible pente ou à un écoulement trop perturbé en aval (sédiments, végétation, ...), ayant de fait une influence sur l'amont.

de précision finale de l'ordre de 20%, contre 5% en régime dénoyé [ENSAM, 2003]. C'est pourquoi le canal Venturi n'est pas adapté à la détermination des débits en régime noyé. Mais si le régime noyé se trouvait être inévitable, il permet quand même une mesure du débit, contrairement aux déversoirs, qui ne peuvent fonctionner qu'en régime dénoyé. Notons qu'il existe des variantes au canal Venturi (contraction latérale et seuil épais), comme par exemple le canal Parshall (contraction latérale, seuil épais et rupture de pente).

#### ➤ Les déversoirs triangulaire et rectangulaire

A la différence des canaux calibrés (Venturi, Parshall, ...), un déversoir ne constitue pas un ouvrage entier que l'on place dans le canal principal, mais plus un ouvrage placé en travers de l'écoulement et destiné à observer une chute d'eau. En s'opposant à l'écoulement fluvial, il perturbe le niveau d'eau amont, proportionnellement au débit de transit. En mesurant le niveau d'eau amont, on accède alors au débit par le biais de la fonction de tarage.

La relation analytique  $Q = f(h)$  dépend du type de déversoir utilisé, dont les plus courants et les moins chers sont les déversoirs triangulaire (pour des débits de 0.3 l/s à 30 l/s) et rectangulaire (pour des débits supérieurs à 30 l/s). Il existe cependant une grande diversité de déversoirs (trapézoïdal, avec ou sans contraction, ...), de même qu'une vanne pour laquelle la loi de débit a été déterminée peut très bien faire office de déversoir. Les déversoirs sont bien moins chers qu'un canal Venturi, pour une précision équivalente de l'ordre de 5%.

Quelque soit l'ouvrage utilisé, il est nécessaire de vérifier la fonction de tarage fournie par le constructeur. Pour cela il faut effectuer des essais préalables de mesure de couple [débits, hauteurs], par le biais d'un système de mesure de débit mobilisé pour l'occasion (jaugeages au moulinet ou par dilution chimique). Si la relation  $Q = f(h)$  fournie par le constructeur n'est pas satisfaisante, les coefficients de tarage devront être calés sur la base de ces essais (détermination de la courbe de calage réelle et détermination des coefficients de tarage). Cette précaution n'est pas superflue. *Or elle est fréquemment oubliée par les gestionnaires d'ASA, si bien qu'il n'est alors pas possible de savoir la précision réelle des mesures de débits effectuées dans de tels cas.*

Enfin, dans un cas très précis, une mesure du débit est possible sans recourir à la mesure de la hauteur d'eau dans le canal. Il s'agit du cas où une association est équipée d'un Module à masques.

#### ➤ Le Module à masques

Cet ouvrage de régulation est composé d'une succession de masques (ou caissons) que l'on ouvre de façon indépendante, dans le but de ne laisser transiter que le débit souhaité. Chaque masque est d'une taille différente. L'ensemble des combinaisons ouverture / fermeture des différents masques offre une large gamme de débits de transit possibles, ce qui permet la régulation de débit proprement dite. Le module à masques est donc un limiteur de débit, comme n'importe quelle vanne, mais qui a la particularité de pouvoir laisser transiter un débit voulu, sans que l'ouverture de l'ouvrage ne dépende du niveau d'eau amont.

La précision des débits mesurés dépend, elle, du niveau d'eau amont : plus il est important, plus les mesures seront biaisées du fait des pertes de charges de l'ouvrage. On peut diminuer cette imprécision en abaissant ce niveau amont à l'aide d'une vanne de régulation, ou, à

défaut, d'un seuil de grande longueur de déversement (type bec de canard) à l'amont. En fonction de la gamme de hauteur amont observées, et du type de module à masques, le débit réel est estimé à 5 ou 10% près [ENSAM, 2003].

Après avoir vu les principales méthodes de détermination du débit en fonction de la hauteur d'eau, nous allons maintenant présenter brièvement les instruments de mesure du niveau d'eau adaptés aux canaux d'irrigation.

#### 6.1.1.1.2 Les instruments de mesure de hauteur d'eau

Seuls trois types d'instruments de mesure de la hauteur d'eau sont adaptés aux canaux d'irrigation : i) les instruments basés sur des mesures de pression, ii) sur le contact hydraulique, et enfin iii) sur la réflexion d'ondes sur la phase liquide. Les principaux instruments existants dans ces trois catégories vont être très sommairement décrits, le but n'étant pas de comprendre leur fonctionnement mais de déterminer la pertinence de ces instruments pour des mesures de prélèvements et de restitutions d'eau (précision, coût, applicabilité...).

##### ➤ Les mesures de pression

Il existe deux types d'appareils basés sur des mesures de pression, le *capteur de pression* et le *limnimètre bulle à bulle*.

*Le capteur de pression* est placé au fond du canal et mesure la pression hydrostatique de la colonne d'eau qui le surmonte. L'influence des variations de pression atmosphérique nécessite une mesure de cette pression en parallèle. Un capteur de pression atmosphérique peut être joint au capteur principal, mais il est également possible, et préférable, de se munir de capteurs de pression qui mesurent et intègrent automatiquement cette variation de pression atmosphérique.

*Le limnimètre bulle à bulle*, placé au fond du canal, mesure la pression de l'eau indirectement par la mesure des forces de pression qui s'opposent à la libération de bulles d'air qu'il produit. Il s'agit donc d'un système pneumatique où l'extrémité, immergée, est constituée par une buse laissant échapper bulle par bulle un gaz que fournit un compresseur ou une bouteille de gaz comprimé. Un capteur de pression inclus dans le limnigraphe mesure la contre-pression du gaz qui équilibre la pression hydrostatique (pression nécessaire pour obtenir des bulles). La pression atmosphérique joue également un rôle important (un capteur de pression atmosphérique est systématiquement intégré dans les limnimètres bulle à bulle).

Le principal problème de cet instrument réside dans la consommation d'énergie nécessaire à la production d'air (mais depuis peu des mini-compresseurs à basse consommation électrique existent<sup>30</sup>). Cet instrument, libérant des bulles au fond du canal, est de plus sensible aux obturations dues aux MES et aux sédiments de fond (non négligeables dans les eaux de rivière et dans le lit des canaux d'irrigation), ainsi qu'aux variations de température. Enfin, le limnimètre bulle à bulle ne permet la mesure de hauteur d'eau que lorsqu'elles sont inférieures à 1,5 m environ (valeur qui peut parfois être dépassée dans un canal d'irrigation).

---

<sup>30</sup> Cf. les LPN/8 de *Hydrologic*.

### ➤ Les mesures par contact

Il existe deux types d'appareils basés sur des mesures de niveau d'eau par contact, le *limnimètre à flotteur* et le *limnimètre à règle de contact*.

Le *limnimètre à flotteur* est composé d'un flotteur qui suit les variations du niveau d'eau. La mesure s'apparente alors à la mesure d'un déplacement ou la détection d'une position. L'enregistrement de ces variations peut se faire de plusieurs manières, qui correspondent chacune à un type de limnimètre à flotteur particulier (flotteur à poulie et contrepoids, à axe vertical conducteur, à aimant permanent, ...). Le limnimètre à flotteur relié à un contrepoids fait cependant parti des moins chers et des plus adaptés, avec une précision de l'ordre du millimètre (cf. Tableau 8).

Le *limnimètre à règle de contact* est une règle électrique sensible au contact de l'eau, placée sur la paroi du canal. Chaque centimètre de la règle est marqué par la présence d'un capteur électrique, placé en parallèle à une barre de fer conductrice. La variation du niveau d'eau va créer ou supprimer le contact électrique entre capteurs et barre de fer, permettant ainsi de déterminer le niveau d'eau. La précision atteint 1 mm, par un affinage de la mesure basé sur la mesure complémentaire de la résistance au passage du courant électrique. Il existe également les limnimètres à règle de contact visuelle, mais ils ne permettent pas un suivi automatisé des hauteurs d'eau, ou même suffisamment régulier pour les mesures dont il est question ici. Les limnimètres à règle de contact visuelle (échelles limnimétriques) ne doivent donc être perçus que comme des systèmes d'information alternatifs à moindres coûts, offrant des mesures peu précises et non automatisées, donc espacées dans le temps.

### ➤ Les mesures par réflexion

Le principal instrument de mesure par réflexion utilisé est le *capteur à ultrasons*. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore vers le niveau d'eau à mesurer. Lorsque l'onde rencontre la surface liquide, une partie de l'onde est réfléchi (changement de milieu). Par le biais de la vitesse de propagation, la mesure du temps de propagation entre l'émission et la réception de l'onde renseigne sur la hauteur de la surface de transition. Connaissant la distance séparant le capteur du fond du canal, on en déduit le niveau d'eau. Le capteur à ultrasons doit en général être le plus perpendiculaire possible au plan de la surface à mesurer, ce qui rend sa mise en œuvre difficile. La cellule ultrason nécessite de plus une maintenance régulière (contrainte non négligeable), et le capteur à ultrason est, entre autre, sensible aux variations de température et de pression. La précision, de l'ordre de 1 mm, est cependant très bonne.

A côté des méthodes utilisant des seuils-jaugeurs, il existe également d'autres méthodes, moins employées, mais qui peuvent de révéler utiles dans certains cas, comme la dilution chimique dans le cas de canaux très accidentés.

#### **6.1.1.1.2 La dilution chimique**

Le principe de la méthode par dilution chimique est de mesurer la dilution d'un traceur dans l'eau, à une distance suffisante à l'aval du point d'injection pour que la dispersion du traceur dans tout l'écoulement soit effectuée. Le traceur peut être radioactif, colorimétrique, ou même, beaucoup plus simplement, salin.

Le débit se calcule à l'aide d'une formule du type :

$$Q = K \cdot D$$

Avec :  $K$  = paramètre dépendant de la méthode d'injection (dimension d'un débit)  
 $D$  = facteur de dilution du traceur

Deux méthodes d'injections sont utilisées :

- *La méthode d'injection à débit constant* : le traceur est injecté à un débit  $q$  pendant un temps déterminé  $T_i$  ;  $D$  étant la dilution mesurée pendant le palier de concentration qui apparaît après un temps  $T_p$  :

$$Q = q \cdot D$$

- *La méthode par injection instantanée* : un volume  $V$  d'une solution traceur, de concentration  $C$ , est injecté en bloque dans l'écoulement. Si  $T_p$  est le temps de passage du traceur et  $c$  la concentration moyenne du « nuage salin », le produit  $c \cdot T_p$  est constant et égal au produit  $C \cdot V$ . La formule de débit s'écrit :

$$Q = V \cdot D / T_p$$

$D$  étant la dilution moyenne qui correspond à  $c$ .

Cette méthode est globalement peu coûteuse, mais nécessite qu'il n'existe ni perte, ni arrivée d'eau entre les points d'injection et d'échantillonnage. Cette condition peut ne pas être vérifiée lorsque des canaux en terre (tels que les filioles) ont des taux d'infiltration importants et que la distance séparant les points d'injection et d'échantillonnage est grande. Cette méthode sera donc plutôt adaptée pour des canaux n'ayant qu'un faible taux d'infiltration (canaux dont le revêtement est en terre compactée, ou en béton). L'applicabilité de cette méthode doit être jugée au cas par cas. Elle peut s'avérer très utile pour certaines sections de géométrie irrégulière et/ou encombrée par la végétation, les autres méthodes n'étant généralement pas applicables dans ces situations. La méthode de dilution chimique est très utilisée en France dans les régions de montagne pour les rivières de faible ou de moyen débit.

#### 6.1.1.2 Les méthodes complètes

La seule méthode complète applicable dans le cas des canaux est la méthode de jaugeage par moulinet hydrométrique. Dans cette méthode, chaque composante du débit est calculée de manière indépendante au cours de la même opération sur le terrain :

- *La vitesse moyenne  $U$*  est calculée à partir des vitesses mesurées avec des capteurs, qui sont généralement des moulinets hydrométriques ;
- *La largeur et les distances horizontales* sont mesurées sur un câble tendu transversalement ;
- *Les profondeurs* sont mesurées avec des perches graduées (ou des saumons de lestage dans le cas de canaux profonds).

##### 6.1.1.2.1 *Jaugeage par moulinet hydrométrique*

Dans les méthodes de jaugeage, on établit de manière expérimentale la courbe de tarage pour une section donnée unique, sur laquelle on effectuera ensuite les mesures de niveau d'eau pour déterminer le débit. On mesure à un instant donné le profil de vitesse à différentes profondeurs et à différentes distances de la berge. On utilise pour cela deux types de

moulinets hydrométriques selon l'importance des débits jaugés : le micro-moulinet (ou perche) ou le moulinet saumon. De faibles débits nécessiteront une instrumentation légère et précise (type perche), alors que l'on effectuera un jaugeage au saumon pour des débits plus importants. La vitesse est obtenue par comptage du nombre de tours que fait l'hélice de moulinet en un temps donné (fonction de la loi de l'hélice). Une fois le profil de vitesse de la section considérée établi, on obtient le débit moyen transitant dans la section en intégrant ces vitesses sur les deux dimensions caractéristiques de la section (largeur et profondeur). L'opération est répétée pour différentes hauteurs d'eau observées dans la section, allant au possible du régime des plus basses eaux à celui des plus hautes (pointe des irrigations). Plus les mesures seront effectuées sur des niveaux d'eau variés, meilleure sera la courbe de tarage. La série de mesures  $(Q_i, v_i)_{h=hi}$  permet alors de construire la courbe de tarage  $Q = f(h)$ , puis d'en déduire les coefficients de tarage (a, b) de la fonction de tarage  $f(h) = a \cdot h^b$ . La fonction de tarage permettra ensuite de déterminer les débits transitant dans la section considérée, à chaque fois qu'une mesure de hauteur d'eau y sera effectuée. Ces débits, intégrés dans le temps, donnent alors les volumes prélevés.

Cette méthode a l'avantage d'être simple et relativement peu coûteuse, mais nécessite du temps et du personnel. De plus, elle ne donne pas vraiment de résultats fiables dans le cas de petites sections à faible niveau d'eau, comme les filioles d'assainissement.

Voyons maintenant les méthodes qui peuvent être utilisées dans le cadre des mesures de débits lors des prélèvements puis des restitutions en rivière.

### ***6.1.2 Application au cas des externalités liées à des flux d'eau de surface***

#### **6.1.2.1 Les prélèvements en rivière**

Pour quantifier les prélèvements, on place un système de mesure des débits au droit de la prise d'eau en rivière. On utilisera quasi-systématiquement un ouvrage calibré couplé avec un appareillage de mesure du niveau d'eau. Les autres méthodes ne sont pas adaptées aux mesures de débit permanentes que nécessite la quantification des prélèvements, et ne seront mises en pratique que dans le cadre de campagnes de mesure.

[ENSAM, 2003] propose une analyse comparative de ces différents ouvrages calibrés (Tableau 7) et de l'instrumentation qui les accompagne (Tableau 8), sur la base d'informations provenant de fournisseurs et d'utilisateurs. Les prix indiqués doivent être considérés comme des ordres de grandeur. La notation utilisée est la suivante :

+++ très bon	--- très mauvais
++ bon	-- mauvais
+ assez bon	- passable

<b>Ouvrages calibrés</b>				<b>Ouvrage de régulation du débit</b>
<b>Type d'ouvrage</b>	<b>Canal Venturi</b> (quelques L/s à plus de 500L/s)	<b>Déversoir Triangulaire</b> (0,3 l/s < Q < 30l/s)	<b>Déversoirs Rectangulaire</b> (Q > 30 l/s)	<b>Module à masques</b>
<b>Coût</b>	330 € HT pour un débit de 6 l/s	Prix des travaux de maçonnerie et de la tôle		1 500 € HT pour 100 l/s
<b>Précision</b>	4 à 5% dénoyé 4 à 20 % noyé	2 à 6% (dénoyé)		5 à 10%
<b>Simplicité d'utilisation</b>	+++	++	++	++
<b>Simplicité de mise en place</b>	-	+	+	--

**Tableau 7 : Analyse comparative des ouvrages calibrés de détermination de débit**  
(source : [ENSAM, 2003], p.118).

	<i>Pression</i>		<i>Contact</i>		<i>Réflexion d'onde</i>
	<b>Capteur de pression</b>	<b>Limnimètre bulle à bulle</b>	<b>Limnimètre à flotteur</b>	<b>Limnimètre à règle de contact</b>	<b>Capteur à ultrasons</b>
<b>Coût du capteur seul</b>	800 €			800 € (hauteur de 48 cm)	
<b>Coût avec centrale d'acquisition, câbles, ...</b>	890 €	1100 €	1000 €	3500 €	1600 €
<b>Précision</b>	1 à 2 mm	10 mm	1 mm	1 mm	1 mm
<b>Simplicité de mise en place</b>	++	++	+	+++	+
<b>Avantages</b>			Pas de dérive	Pas de dérive Peu d'entretien Robuste	Pas de contact avec l'eau
<b>Inconvénients</b>	Dérive du capteur (T°, P, âge) Sensible au gel	Dérive du capteur (T°, P) Colmatage Consommation d'énergie	Besoin d'un puit de tranquillisation Blocage mécanique	Prix	Besoin d'une bonne fixation

**Tableau 8 : Analyse comparative des instruments de mesure du niveau d'eau**  
(source : [ENSAM, 2003], p.118).

### **Faisabilité de la quantification**

*Quelque soit l'ouvrage et l'appareillage de mesure adoptés, les précisions sont globalement suffisantes pour quantifier de manière satisfaisante les prélèvements en rivière, à l'origine des externalités négatives décrites plus en amont. Cela tient essentiellement à la morphologie des canaux de prélèvement (canaux de grande section, débit circulant important, berges non végétalisées), bien adaptés aux mesures de débits. La précision et la fiabilité de la*

*quantification permettent d'associer aux prélèvements en rivière une obligation de résultats (prélèvements d'un débit donné pendant un temps défini), et d'assortir une notion de performance à ce résultat. La maîtrise de l'externalités ne pose ici pas de réel problème.*

La plupart de ces équipements sont plus destinés à une télégestion des ouvrages (stockage, télétransmission et traitement des données, commande de vanne) pour contrôler les volumes transitant dans les canaux, et permettre *in fine* une bonne représentation du fonctionnement du canal pour en améliorer la gestion, et éviter les débordements et les gaspillages d'eau. Notons qu'un tel système permet, en plus d'optimiser les prélèvements, de quantifier les volumes de ruissellement urbains qui sont collectés par les canaux (sources d'émission ponctuelles), et d'en faciliter la gestion. Cependant, si les éléments présentés ici permettent d'accéder à un bon niveau d'information sur les prélèvements, beaucoup dépassent les besoins actuels de petites ASA. Ces équipements ont un coût d'investissement relativement élevé, et nécessitent le plus souvent une formation du personnel en électronique et en informatique. L'acquisition automatique des données permet cependant un gain de temps et de personnel considérable, par rapport à une acquisition manuelle.

### **Problèmes et difficultés de quantification**

Le problème posé par la quantification des prélèvements n'est pas tant d'ordre technique, mais plus relatif à l'utilisation des appareils de mesure. Tout d'abord, nous avons par exemple vu comment le contrôle préalable de la fonction de tarage des ouvrages calibrés pouvait être oublié par les gestionnaires d'ASA, si bien qu'il n'est alors plus possible de savoir la précision réelle des mesures de débits effectuées.

Ensuite, les ouvrages calibrés sont souvent positionnés à l'entrée du périmètre. Les volumes mesurés ne représentent alors plus les stricts prélèvements en rivière, du fait des pertes d'eau occasionnées pendant son transport. Ces pertes sont d'autant plus importantes que la distance parcourue jusqu'à l'entrée du périmètre est importante, et que les canaux sont propices aux infiltrations (revêtement et état général du canal). Dans ce cas, estimer ces pertes reste difficile sans effectuer une campagne de mesure des débits entre l'amont et l'aval du canal desservant l'association. On peut aussi se référer à des taux de pertes généralement admis dans la littérature, proposés pour différents revêtements et différents états du canal, et qu'il faut adapter à la longueur de parcours. Les imprécisions sont alors importantes, mais largement moins importantes que si ces pertes n'étaient pas considérées. Par exemple, dans le cadre de l'étude de flux sur le canal de Gignac, les prélèvements ont été estimés, au droit de la prise d'eau, à 41.5 millions de m<sup>3</sup>. Pour estimer les fuites entre le point de prélèvement et l'entrée du périmètre, un ordre de grandeur a été considéré, en fonction de la distance du canal et « d'après les coefficients généralement admis pour un canal de ce type dans un bon état » : 5% des volumes prélevés [BRL, 2002b]. Dans ce cas, les pertes sont estimées à près de 2 Mm<sup>3</sup>, soit 12 jours d'irrigation en moyenne (prélèvements calculés à 2m<sup>3</sup>/s en moyenne et en continu, hors période de chômage). Ne pas prendre en compte ces pertes conduirait à une imprécision notable dans la détermination des volumes entrant sur le périmètre d'une part, et d'autre part dans la détermination des flux d'eau en jeu au sein du périmètre, lorsque cette détermination se fait par déduction des différents termes du bilan hydrique (puisque les prélèvements constituent la grandeur d'entrée principale du bilan. Son imprécision conditionne alors celle des grandeurs ainsi mesurées).

Enfin, un dernier problème se pose lorsqu'il existe plusieurs points de prélèvements, comme c'est souvent le cas. Les ASA essayent au maximum de disposer de systèmes de mesure pour chaque prélèvement. Le Tableau 14 de l'Annexe 3 montre que dans la majorité des études de

flux considérées (18 sur 23), tous les points de prélèvement ont fait l'objet d'une quantification des volumes, les autres études ayant extrapolé des mesures effectuées sur 1 ou plusieurs points de prélèvement. L'imprécision augmente, mais elle n'est que rarement quantifiée dans le cas de ces études de flux. Là encore, cela aura une incidence sur la précision des grandeurs estimées par déduction du bilan hydrique (la recharge de nappe en premier lieu).

Les autres paramètres importants jouant sur la fiabilité des mesures sont la fréquence des mesures, et la durée de la campagne de mesure (cf. Tableau 14 de l'Annexe 3). Les problèmes de fiabilité se posent lorsque les mesures sont effectuées pendant une durée inférieure à la saison d'irrigation (4 cas sur 23), surtout quand la fréquence des mesures est hebdomadaire (5/23). Enfin, un problème méthodologique essentiel réside dans la non prise en compte de la variabilité interannuelle des grandeurs mesurées.

**EN BREF :** Les prélèvements en rivière peuvent être quantifiés de manière précise, et le sont généralement. Des imprécisions importantes dans la quantification des prélèvements peuvent apparaître dans les cas suivants :

- i) les courbes de tarage des ouvrages calibrés n'ont pas fait l'objet d'une vérification expérimentale avant leur mise en pratique ;
- ii) les prélèvements sont mesurés à l'entrée du périmètre irrigué, et non au droit de la prise d'eau ;
- iii) les prélèvements globaux sont extrapolés sur la base d'un nombre non exhaustif de points de prélèvements

#### 6.1.2.2 Les restitutions en rivière

Si les volumes prélevés ne posent généralement pas de problème pour être mesurés, cela en va d'une toute autre manière pour les volumes restitués. Dans certains cas, toutes les restitutions sont collectées au fur et à mesure par un unique canal de collecte, qui se décharge ensuite en rivière. Quantifier les restitutions revient alors simplement à mesurer le débit au droit de la restitution, la mesure des débits étant analogue à celle faite pour les prélèvements (analogie des méthodes, des précisions, ...). Mais dans la majorité des cas, les restitutions au milieu naturel se font par le biais de plusieurs canaux de décharge, ainsi que de tout un réseau de colatures, restituant les eaux en une multitude de points de décharge. Le réseau de colatures du canal de Gignac compte par exemple une centaine de colatures... La pluralité des décharges appelle une multiplication des mesures. Cela entraîne d'une part des coûts importants, difficilement abordables quelque soit la taille de l'ASA. D'autre part, ces mesures sont d'autant plus difficiles et peu fiables qu'elles ne sont pas adaptées aux filioles (sections très petites et irrégulières, débits circulant trop faibles, fortes infiltrations, ...). *C'est pourquoi le flux d'eau restitué au milieu naturel par le réseau de colatures sera considéré d'une manière générale comme peu précis, peu représentatif et peu fiable.*

##### *Peu précis.*

Mesurer le débit dans des canaux de décharge relève des mêmes méthodes et des mêmes précisions que pour la mesure des prélèvements (les canaux de décharge sont similaires aux canaux de desserte). Mais il n'est pas possible de mesurer les débits dans une filiole à l'aide des ouvrages utilisés pour les prélèvements ou les canaux de décharge. Les sections des

filioles sont étroites et irrégulières, largement végétalisées, ce qui empêche de placer des seuils-jaugeurs classiques, et encore moins des ouvrages de régulation. De plus, les débits y circulant sont très faibles, et soumis à de fortes infiltrations. Ceci explique pourquoi aucune des 23 études de flux n'a utilisé cette méthode de quantification (0/23). On aura tendance à utiliser deux types de systèmes (19/23) : des petits seuils jaugeurs portables (ouvrage calibré portable et système mesure du niveau d'eau), placés dans une filiole et faisant obstacle à l'écoulement ; ou un système de jaugeage par moulinet hydrométrique. En hydrologie de surface, la méthode des seuils-jaugeurs portables est très utilisée dans les campagnes d'étiages portant sur des débits inférieurs à 100 l/s, pour lesquels les autres techniques de jaugeages sont difficilement utilisables. Les ouvrages calibrés, une fois installés dans le canal, sont beaucoup plus souples à utiliser que les stations de jaugeages, qui demeurent lourdes à mettre en place et à gérer. Cependant les ouvrages calibrés portables peuvent ne pas pouvoir être mis en place dans la filiole, et ont l'inconvénient de coûter beaucoup plus cher que l'utilisation du moulinet hydrométrique. Ce dernier permet de plus des mesures de débit beaucoup plus précises, mais cette précision peut apparaître superflue pour des filioles dont la géométrie de la section n'est connue qu'avec une précision très hypothétique. Le choix entre ces deux types de méthodes s'appréciera donc au cas par cas, sachant que l'une comme l'autre ne permettront pas des mesures précises des débits restitués en rivière.

*Peu fiable et peu représentatif.*

Si l'on constate que la grande majorité des 23 études utilise des mesures du niveau d'eau pour déterminer les volumes transités, un problème systématique des études de flux réalisées correspond au taux de filioles concernées par ces mesures de débits. Les ASA n'ont pas les moyens de quantifier les débits pour toutes les filioles (19/23), hormis lorsqu'elles sont en nombre très limité, ou qu'elles se déversent toutes dans un unique canal de décharge (4/23). Bien souvent, le taux de filioles concernées par les mesures n'est pas suffisant pour pouvoir ensuite extrapoler les valeurs à tout le réseau de colatures. L'ASF de Gignac possède par exemple plus d'une centaine de colatures, mais n'a effectué des mesures de débit que sur deux filioles, considérées a priori comme représentatives du réseau ...

La fiabilité et la représentativité des mesures des débits constituent le problème majeur de la quantification des restitutions d'eau en rivière. Lorsque l'on analyse les résultats d'une étude de flux donnée, la quantification la plus sujet à controverse est bien souvent le terme de restitution aux eaux de surface.

A cela s'ajoute le problème classique du lieu de mesure des restitutions (en sortie du périmètre ou au droit de la restitution en rivière), avec cette fois-ci une influence des pertes par infiltration beaucoup plus importantes pour les filioles que pour le canal maître. De plus, la littérature ne propose pas de taux d'infiltration dans les filioles car les hydrauliciens ne se sont que rarement intéressés à ce type de canaux. Pour mesurer ces fuites, il faut effectuer des jaugeages ponctuels en amont et en aval des filioles pilotes, pour ensuite extrapoler ces pertes à l'ensemble du réseau de colature.

De nombreux **facteurs humains** peuvent également jouer sur les débits transitant dans les filioles, et restitués en rivière. A défaut de pouvoir les recenser, nous allons présenter brièvement la campagne de mesure sur le Canal de Gignac, qui a le mérite de concentrer une multitude de problèmes liés à la mesure. Nous avons mis en italique les défauts de mesure affectant la *quantification des volumes d'eau restitués*, et en souligné ceux concernant la détermination du taux de fuite. L'italique souligné est utilisé pour signaler les défauts influant sur les deux paramètres.

Des mesures de débit ont été effectuées en amont et en aval de 2 filioles tests, prises comme représentatives de la centaine de filioles existantes. Lors de la campagne sur la première filiole test, on a constaté a posteriori qu'à chaque fois que le débit y transitait dépassait un certain seuil, *la filiole était utilisée par un agriculteur* pour irriguer ses parcelles, ce qui fausse la mesure des fuites de l'amont à l'aval de la filiole. De plus, il s'est avéré que le *garde canal avait modifié ses pratiques habituelles* d'ouverture et de fermeture des vannes desservant les filioles, spécialement pour la campagne de mesures (raisons invoquées : mauvaise communication ou incompréhension sur l'objectif d'observer les pratiques normales). La filiole servait également à *l'arrosage d'un ou de deux jardins*, dont il est difficile de connaître les volumes d'eau prélevés, donc la part que ces volumes d'eau représentent dans les pertes d'eau mesurées le long de la filiole (le but étant de déterminer strictement les fuites de l'eau dans le sol). Concernant la seconde filiole, une *panne sur le boîtier enregistreur* du dispositif de mesure du débit sortant a privé d'un mois et demi de mesures sur 6 mois de campagne, soit le premier quart de la saison d'irrigation (1<sup>er</sup> avril au 14 mai 2001). Lorsque ces mesures furent de nouveau disponibles, on s'est aperçu a posteriori que *le débit entrant avait été dérivé en continu et complètement utilisé une grande partie de la campagne par un irrigant*, pour l'irrigation de l'une des parcelles. Il est alors apparu en fin d'étude que les mesures effectuées sur les deux sites tests étaient insuffisantes pour tirer des conclusions généralisables à tout le périmètre, et qu'il aurait fallu réaliser un plus grand nombre de sites tests. Ces résultats ont néanmoins été généralisés sur tout le périmètre pour être en mesure de fournir une valeur des volumes restitués en surface, ces valeurs étant aujourd'hui présentés au grand public sans précision réelle quand à la fiabilité des mesures. Enfin, la différence minimale entre les débits d'entrée et de sortie a été utilisée pour évaluer les fuites des filioles, estimées à environ 20% du débit nominal (ordre de grandeur).

**EN BREF :** On doit distinguer dans la quantification des restitutions en rivière les restitutions depuis les canaux de décharge – le matériel utilisé et les précisions obtenues sont alors les mêmes que pour les prélèvements en rivière – des restitutions depuis les filioles d'assainissement. Dans ce dernier cas, la quantification peut se faire au choix à l'aide d'ouvrages calibrés portatifs ou de jaugeages au moulinet hydrométrique. La quantification des volumes restitués reste cependant beaucoup plus délicate que celle des prélèvements, et la question de la fiabilité et de la représentativité de ces mesures est centrale. Les principales sources d'erreurs sont i) le taux de filioles tests utilisées et leur représentativité vis-à-vis du réseau de colature en général, ii) les systèmes de mesure de débits utilisés et leur adéquation avec les filioles (précision offerte), et enfin iii) les facteurs humains. Cela affecte à la fois a) la quantification des volumes restitués au milieu naturel, b) et la quantification du taux de fuite dans les filioles.

Les dernières externalités liées à des flux de surface concernent l'assainissement pluvial urbain, et la lutte contre les inondations, que nous allons traiter maintenant.

#### 6.1.2.3 L'assainissement pluvial urbain

Il existe deux types de mesure, selon que les eaux pluviales urbaines rejoignent les canaux de manière ponctuelle (en plusieurs points) ou de manière diffuse. Dans le premier cas, on installera des systèmes de mesure analogues à ceux présentés pour la quantification des prélèvements en rivière. Les volumes rejetés pourront être déterminés avec précision, et être

utilisés pour l'optimisation de la gestion du canal, ainsi que dans le cadre d'un contrat passé avec l'ASA pour assurer l'évacuation de ces eaux (cf. conventions ASA/lotisseurs dans l'Annexe 1). Dans le second cas, pour mesurer la collecte d'eau pluviale suite à une précipitation ou à l'échelle annuelle, il faut mettre en place un système de mesure des débits dans les canaux, en aval immédiat des zones urbanisées. On obtient une estimation des volumes concernés par l'assainissement urbain par la différence entre les débits mesurés à l'amont et à l'aval immédiat de la zone urbanisée. Cela nécessite de mettre en place également une station de mesure en amont de la zone urbanisée, ce qui induit un coût trop important. La solution la plus simple consiste à estimer les volumes d'eau urbaine par la différence entre le débit mesuré à l'aval immédiat de la zone urbanisée et le débit transitant dans les canaux en provenance des prélèvements en rivière (connu car mesuré en amont). Le problème est que sont comptabilisés dans les eaux urbaines les eaux rurales collectées par les canaux en amont de la zone urbaine. Les volumes des eaux pluviales urbaines ne sont donc pas connus avec précision et seul un ordre de grandeur est accessible, à moins que les moyens financiers suffisants soient dégagés pour que soit mise en place une station de mesure en amont immédiat de la zone urbanisée.

Dans le cadre d'un contrat de souscription au service d'assainissement pluvial urbain, qui concernera plutôt une petite commune qu'une grande commune ou qu'un lotissement, l'entente ne portera pas sur les volumes d'eau évacués par les canaux, mais plutôt sur l'assurance que dans le cadre de précipitations courantes, l'eau pluviale urbaine sera effectivement évacuée et que le canal ne débordera pas suite à ce surplus d'eau. *Le contrat portera donc sur une obligation de résultats, et non de moyens.* Notons que de tels contrats contiennent souvent une clause déchargeant la responsabilité de l'ASA vers le contractant en cas de débordements lors de précipitations plus exceptionnelles.

#### 6.1.2.4 La lutte contre les inondations

Le rôle que peuvent jouer les canaux est bien trop variable pour pouvoir quantifier leur influence sur ces dernières. Nous pouvons néanmoins mobiliser des indicateurs de cette influence, tels que i) la capacité hydraulique maximale de transport d'eau dans les canaux, ii) l'espace drainé par les canaux et de l'importance de ce drainage, et iii) de l'effet positif ou négatif qu'auront les canaux sur les crues, principalement vis-à-vis de l'occupation du sol. Ces caractéristiques sont aisément mobilisables. Tous ces points ont été traités (cf. 2.3.2.4).

Après nous être intéressé à la quantification des externalités liées à des flux d'eau superficiels, voyons maintenant celles liées à des flux d'eau souterrains.

## 6.2 La quantification des flux d'eau souterrains

### 6.2.1 *L'alimentation en eau de l'environnement terrestre*

Les infiltrations depuis les canaux d'irrigation alimentent en eau la végétation qui les borde, composée principalement d'arbres et de haies. Pour déterminer l'importance des flux considérés dans cette externalité, la principale méthode consiste à calculer

l'évapotranspiration de cette végétation rivulaire<sup>31</sup>. Cette méthode présente certaines difficultés. Il faut tout d'abord caractériser le couvert végétal considéré (% d'occupation des différentes espèces), ce qui est un travail long et fastidieux, qui nécessite une bonne connaissance en écologie végétale, expertise dont ne bénéficie par forcément les associations d'irrigants. La proximité des canaux induit des infiltrations d'eau constante dont on peut supposer qu'elles maintiennent constamment la réserve hydrique du sol égale à la réserve utile (lorsque les canaux fonctionnent. On considèrera qu'en période de chômage, les précipitations prennent le relais). Enfin, il faut faire la part entre l'alimentation en eau de cette végétation depuis le canal et celle depuis les précipitations, selon la période de l'année considérée. Lorsque qu'elle se fait depuis les précipitations, il faut prendre en considération le phénomène d'interception (cf. Cadre 3), qui est important mais reste très difficile à caractériser et à quantifier, particulièrement dans des zones de végétations hétérogènes.

Toutes ces difficultés amènent à se poser la question de l'utilité de cette quantification vis-à-vis des volumes en jeu dans l'alimentation en eau de la végétation. Pour y répondre, procédons à un calcul sommaire. Considérons un canal bordé de chaque côté par une bande de 5 m de végétation, composée de haies et d'arbres. Leur ETP conjointe peut être grossièrement estimée à 5 mm/j de juin à octobre, 1 mm/j de octobre à avril, et 2.5 mm/j d'avril à juin. On considère que l'ETP est égale à l'ETR ( $K_c=1$ ) du fait de la disponibilité en eau offerte en permanence par les canaux (la végétation n'est jamais en stress hydrique). L'ETR annuelle vaut alors  $(5*4 + 1*6 + 2.5*2)*30 = 930$  mm/an. Sur 1 mètre linéaire de canal, on compte  $2*5 = 10$  m<sup>2</sup> de couvert végétal, d'où une consommation d'eau de 9.3 m<sup>3</sup>/an/mL (pour les besoins du calcul, on considère que les canaux fournissent l'eau à la végétation en continu pendant l'année, ce qui n'induit pas une grande erreur puisque les canaux ne connaissent que 2 mois de chômage pendant lesquels la pluie prend le relais). Si l'on reprend les données du Tableau 13, recueillies par [ENSAM, 2003] sur la base de 23 études de flux, la longueur moyenne de la totalité du réseau de ces associations est de 57 km, et leur prélèvements moyens de 28 Mm<sup>3</sup>. La consommation en eau de la végétation est alors de  $57*10^3*9.3 = 530\ 000$  m<sup>3</sup>/an. La proportion moyenne de consommation d'eau par la végétation par rapport aux volumes prélevés est de  $(530 / 28\ 000)*100 = 1.9$  %.

Les volumes d'eau destinés à l'alimentation en eau de la végétation du paysage constituent *a priori* une part non négligeable des volumes prélevés en rivière, estimé très grossièrement à 2% en moyenne sur 24 associations. A ce titre, ils devraient faire l'objet d'une quantification. Mais cette quantification reste extrêmement difficile de manière directe, du fait de la très forte hétérogénéité des espèces que comprend cette végétation, et des difficultés de mesure de l'évapotranspiration. En effet, il faudrait pouvoir i) déterminer l'ETM de la végétation (sol des berges constamment en eau en période d'activité des canaux), et ii) prendre en compte l'eau mis à disposition de cette végétation depuis les précipitations, pendant la période chômage des canaux. Cette dernière composante nécessite de quantifier a) le phénomène d'interception de la pluie par les feuilles (cf. Cadre 3), et b) le ruissellement de l'eau le long des troncs d'arbres. Mais ces déterminations ne sont techniquement possibles et scientifiquement fiables que dans le cas de zones homogènes et importantes de végétation, comme des forêts. Il est illusoire de vouloir appliquer ces méthodes à la végétation des canaux.

---

<sup>31</sup> Une détermination de ce flux d'eau sortant par déduction du bilan hydrique est possible, mais cette technique sera préférentiellement utilisée pour des flux dont la détermination a plus d'importance, au risque de négliger ce terme du bilan hydrique.

### **L'interception**

Lors d'un événement pluvieux, le feuillage des arbres intercepte une partie de l'eau de pluie. Cette eau interceptée peut soit ruisseler le long des branches et du tronc, soit rester sur le feuillage et être ensuite évaporée. Ce phénomène est appelé Interception. L'interception ne concerne que l'eau interceptée puis évaporée, et non l'eau ruisselant ensuite sur les branches et le tronc. Les eaux interceptées n'entrent ainsi pas dans le cycle d'eau du bassin versant. L'interception peut être estimée en effectuant la différence entre les valeurs de précipitation obtenues à l'air libre et celles obtenues sous couvert<sup>32</sup>, à laquelle on soustrait la part des eaux ruisselées sur le tronc. Ces volumes d'eaux ruisselés sur les troncs peuvent être mesurés à l'aide d'un dispositif composé d'un ensemble de serpentins collecteurs qui enroulent le tronc, et qui récupèrent les volumes ruisselés vers un auget basculeur de comptage des volumes, par le biais d'un petit tuyau de transport. L'interception dépend du type de couvert végétal (indices foliaires, etc.), ainsi que du type de précipitation, les précipitations intermittentes favorisant les interceptions beaucoup plus que celles continues.

#### **Cadre 3 : Le phénomène d'interception**

Mais si l'on ne peut mener de quantification de manière directe, il reste possible, et préférable, de mener une estimation grossière de ce flux évaporatoire sortant du périmètre, de la façon dont nous l'avons fait ci-dessus, mais en plus détaillé et en prenant des valeurs caractéristiques grossières d'interception (N.B. les flux de remontées capillaires d'eau vers cette végétation sont considérés comme nuls puisque la réserve hydrique du sol est toujours à hauteur de sa réserve utile, du fait de la proximité du canal).

**EN BREF :** L'alimentation en eau de l'environnement terrestre est une grandeur non négligeable, dont nous avons très grossièrement estimé les volumes à hauteur de 2% des prélèvements. Il n'est pas concevable de quantifier cette grandeur dans les conditions techniques et économiques actuelles. Seul un ordre de grandeur peut, et doit être pris en compte. Cela permettrait i) d'avoir une base commune de représentation du phénomène et de discussion dans le cadre d'un contrat de rétribution, et ii) de diminuer les erreurs de précision qui seront commises en aval lorsqu'il s'agira de déterminer une grandeur du système par déduction des autres termes du bilan hydrique (ex : la recharge de nappe). Etant donné que l'on ne peut contrôler le résultat d'une volonté d'alimentation en eau d'une végétation ou d'une zone humide (il faudrait pour cela la cultiver à l'instar des cultures), l'obligation du contrat portera de manière préférentielle sur une obligation de moyens (mettre les canaux en eau pendant x mois dans l'année) et non de résultats (souscription à un débit et un temps d'alimentation donnés).

### **6.2.2 Le ressuyage des terres**

Le ressuyage des terres qu'assurent les canaux d'irrigation correspond à la collecte des écoulements hypodermiques du sol (écoulements de sub-surface). La quantification des volumes concernés par le ressuyage des terres peut se faire de manière indirecte par le suivi des débits transitant dans les canaux au cours du temps après une précipitation importante. Une telle précipitation agit en deux temps sur le débit du canal (ou d'une rivière en général).

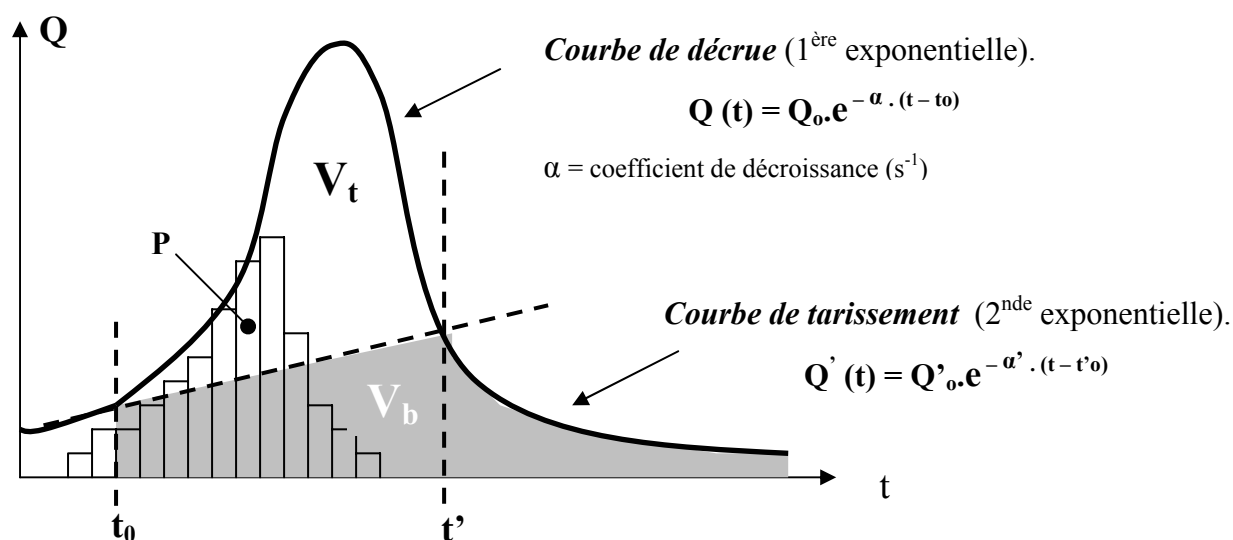
<sup>32</sup> Le pluviomètre doit être placé au plus près du tronc car cette zone correspond à la zone où l'interception est maximale.

De manière directe d'abord, pendant la précipitation. Il s'agit de l'écoulement de crue. De manière indirecte ensuite, à la fin de la précipitation.

Cela concerne donc deux types d'écoulements :

1. *les écoulements hypodermiques*, de sub-surface, qui correspondent à la part des précipitations infiltrées n'ayant pas rejoint la nappe, mais qui rejoint les canaux par écoulement sous la surface du sol ;
2. *les écoulements souterrains entre la nappe et les canaux*, lorsque les précipitations ont fait monter le niveau de la nappe de façon à ce que s'établisse une connexion hydraulique entre la nappe et les canaux.

La contribution indirecte des écoulements hypodermiques et souterrains au débit correspond à ce que l'on appelle l'écoulement de base, dont le volume est noté  $V_b$ , et la somme des écoulements directs et indirects correspond au volume total. En étudiant l'hydrogramme de débit le canal consécutif à l'événement pluvieux considéré, on peut obtenir une estimation du volume de base.



Q = Débit dans le canal    P = Pluie     $V_b$  = Volume de base     $V_t$  = Volume total

**Figure 12 : Hydrogramme général de crue, comprenant les courbes de décrue et de tarissement.**

La mesure des débits lors d'une forte précipitation nous permet de construire cet hydrogramme de crue. La partie descendante de l'hydrogramme peut être modélisée par le biais de deux fonctions exponentielles consécutives : la fonction de décrue et la fonction de tarissement. Ces fonctions s'obtiennent en calant les paramètres de la fonction grâce aux mesures de débits effectuées. Le point de séparation entre ces deux courbes peut être clairement mis en évidence en traçant non plus  $Q = f(t)$  ; mais  $\log(Q) = g(t)$ . Cette courbe correspondra à deux droites, l'une de pente  $\alpha$ , et l'autre de pente  $\alpha'$ , se rejoignant en un point dont l'abscisse correspond au temps ( $t'$ ) à partir duquel l'écoulement existant dans les canaux ne provient plus de l'écoulement superficiel collecté par les canaux, mais de l'écoulement de base (ressuyage + écoulement nappe-rivière). Le volume de base est alors égal à l'aire grisée de l'hydrogramme (cf. Figure 12), délimitée par i) l'axe des abscisses ( $Q = 0$ ), ii) la verticale correspondant au temps ( $t_0$ ) à partir duquel les précipitations ont une influence sur le débit transitant dans le canal, et iii) la verticale correspondant au temps ( $t'$ ) à partir duquel on passe de la courbe de décrue à celle de tarissement.

Ce volume de base déterminé, on pourra apprécier sa contribution à l'écoulement général par le biais de l'*Indice d'écoulement de base*

$$I_B: \quad I_B = \frac{Q_{TOTAL}}{Q_{BASE}}$$

Deux questions se posent maintenant :

- *Comment isoler du volume de base (ressuyage + écoulements nappe-canaux) la contribution de l'écoulement hypodermique (ressuyage) ?*
- *En quel(s) point(s) du réseau établir l'hydrogramme de crue pour déterminer le volume global ressuyé par les canaux d'irrigation ?*

1. *Comment isoler du volume de base la contribution de l'écoulement hypodermique (ressuyage) ?*

Nous évacuerons rapidement le cas où aucune connexion n'existe entre la nappe et les canaux, le volume d'eau ressuyé étant alors égal au volume de base. Dans le cas où existe une telle connexion hydraulique, les méthodes existantes permettant de faire cette distinction (analyse hydrologique, isotopique...) présentent toutes un coût trop élevé pour être envisagées, d'autant que le ressuyage correspond à une aménité, dont les agriculteurs sont les producteurs et les bénéficiaires. Nous ne nous placerons donc que dans le cas d'une absence de connexion entre les canaux et la nappe pour répondre à la question suivante.

2. *En quel(s) point(s) du réseau établir l'hydrogramme de crue pour déterminer le volume global ressuyé par les canaux d'irrigation ?*

La seconde question est de savoir où conduire ces mesures de débits pour quantifier le phénomène de ressuyage. Dans le cas d'un réseau hydrographique naturel, on aurait pris comme point l'exutoire d'un bassin ou d'un sous-bassin versant déterminé, car toutes les eaux y convergent de l'amont vers l'aval. On peut ainsi quantifier l'écoulement de base global, intégrant les contributions de toutes les terres amont. Dans le cas des canaux, la confluence inversée ne nous permet pas cette facilité. Le calcul du volume ressuyé en un point donné ne correspondra qu'au volume d'eau ressuyé d'une zone de terres donnée : la zone dont les écoulements hypodermiques sont collectés directement par le canal considéré pour la mesure, dans sa portion délimitée à l'aval par le point de mesure considéré, et à l'amont, par le point du réseau immédiatement amont où s'opère une partition des eaux. Chaque hydrogramme de crue déterminé donne donc accès au volume ressuyé dans la zone associée au point de mesure. Pour avoir une quantification globale des volumes ressuyés par l'ensemble des canaux du périmètre irrigué, il faut donc multiplier ces points de mesure, de manière à ce que la zone globale couverte par les mesures soit pertinente.

En pratique, le ressuyage des terres n'est pas un phénomène suffisamment important pour que soient mis en place des dispositifs de mesures qui lui soient spécifiquement destinés. On mobilisera alors tous les points de mesure déjà existant sur les canaux primaires, secondaires, tertiaires, ..., et sur les filioles. Seuls les points de mesure effectuant des mesures en continu pourront être conservés, puisqu'ils sont les seuls permettant de construire l'hydrogramme de crue. Le volume des eaux ressuyées sera alors extrapolé à l'ensemble du périmètre, en prenant notamment en compte les types de sols et, dans une moindre mesure, l'occupation du sol. Ceci permettra d'accéder à une précision suffisante des volumes ressuyés, comparativement aux volumes entrant dans le système (prélèvements en rivière).

Nous abordons enfin la quantification d'une des externalités majeures du fonctionnement des canaux d'irrigation, la réalimentation de la nappe phréatique. S'il existe de multiples méthodes permettant la quantification, nous nous pencherons surtout sur la plus répandue de ces méthodes : la déduction du flux de drainage souterrain du bilan hydrique effectué à l'échelle du périmètre irrigué.

### **6.2.3 La réalimentation de la nappe phréatique**

La quantification des flux d'eau réalimentant la nappe est la plus délicate. Les eaux qui lui sont restituées proviennent i) des excès d'irrigation sur les parcelles, ii) de la part infiltrée des précipitations, et iii) des infiltrations d'eau dans les canaux (canaux principaux, de décharge et réseau de colature). Les méthodes de quantification se séparent en méthodes directes et indirectes. Dans les méthodes directes, on mesure directement soit la part des eaux infiltrées dans le sol qui sont drainées en profondeur vers la nappe (case lysimétrique, tensiomètres, ...), soit la part des eaux de la nappe provenant de ces infiltrations (analyse isotopique), soit les variations du toit de la nappe (piézomètres). La méthode indirecte consiste à effectuer un bilan hydrique à l'échelle du périmètre irrigué, permettent de déterminer par déduction les restitutions vers la nappe.

#### **6.2.3.1 Les méthodes de détermination directe**

##### **6.2.3.1.1 Par mesure directe du flux d'eau dans le sol**

Il existe plusieurs systèmes de mesure donnant accès de manière directe au flux de drainage profond.

###### **6.2.3.1.1.1 Le lysimètre**

Le lysimètre est un conteneur aux parois étanches et à surface libre, contenant une portion de sol représentative du terrain que l'on souhaite étudier (ou d'un bloc de sol non perturbé), d'une épaisseur variant de 0,5 à 2 mètres. La superficie de la portion de terrain isolée doit être suffisamment grande pour obtenir une bonne précision de la hauteur d'eau évaporée, en théorie à 0,01 mm près. La végétation et les conditions à chaque horizon de sol (la teneur en eau particulièrement) sont maintenues sensiblement identiques à celles du terrain en place. Le lysimètre est pourvu à sa base d'un dispositif recueillant l'eau de drainage, et d'un autre dispositif permettant une pesée du système (détermination des variations de son stock d'eau).

La case lysimétrique permet de mesurer une multitude de données avec précision. Elle permet d'estimer la répartition entre précipitations (resp. irrigation) drainées et ruisselées (avec une mesure des précipitations en parallèle à l'aide d'un pluviomètre placé à proximité). Elle permet également de déterminer les variations du stock d'eau présent dans le sol par le système de pesée en continu du sol. Elle permet enfin de déterminer l'évapotranspiration d'un végétal en croissance, d'une couverture végétative de référence (culture considérée) ou d'évaporation à partir de sol nu, sur la base des informations précédentes et des profils de teneurs en eau du sol, établis à l'aide d'une série de tensiomètres.

La case lysimétrique permet donc de déterminer le flux de drainage profond (sous la zone racinaire) qui va vers la nappe. Cependant la mise en place d'un lysimètre est très contraignante, et son coût ne permet pas de placer suffisamment de lysimètres au sein du périmètre irrigué, de telle sorte que les mesures fournies soient représentatives de l'ensemble du périmètre, bien qu'un lysimètre puisse concerner des surfaces de mesure importantes (jusqu'à 10m<sup>2</sup>), ce qui lui confère une très bonne représentativité comparé aux autres

instruments de mesure (tensiomètres, sondes, ...) qui n'offrent qu'une représentativité très ponctuelle, ce qui nécessite alors de multiplier les points de mesure. La part des apports d'eau infiltrés par rapport aux apports ruisselés est donc déterminée pour un type de sol et un type de culture particuliers. La régionalisation de ce ratio à l'échelle du périmètre est très délicate et souvent peu fiable. Les valeurs déterminées sont le plus souvent extrapolées à tout le périmètre, ce qui ne confère pas de réelle précision à ces mesures, mais seulement un ordre de grandeur. De plus, les cases lysimétriques ne permettent d'accéder au flux de drainage profond qu'à partir des parcelles, et ne peuvent pas mesurer les infiltrations profondes depuis les canaux (et les filioles), que l'on sait jouer un rôle important dans le volume final d'eau qui atteint la nappe depuis le système canal (même s'ils sont moins importants dans le cas des canaux revêtus en béton [infiltrations depuis les fissures], ils restent importants). Cette méthode reste donc largement imprécise, et son application doit être pensée au cas par cas. Dans la pratique, seulement une étude sur six a utilisée cette méthode (4/23).

#### **6.2.3.1.1.2 Le piézomètre**

Le piézomètre permet une mesure directe du niveau de la nappe. Un réseau de piézomètre permet un suivi du niveau de la nappe au cours d'une année d'irrigation. Pour déduire les variations du stock d'eau présent dans la nappe, on estime la superficie au sol de la nappe, et on fait une approximation sur sa géométrie. Il faut que le réseau de piézomètre soit le plus spatialement étendu possible pour être représentatif de la variation spatiale du toit de la nappe. Mais ce n'est souvent économiquement pas concevable, si bien que l'on procède à une régionalisation sur la base des points de mesure disponibles.

Cette variation de stock d'eau dans la nappe ne peut cependant pas être assimilée a priori aux volumes réalimentant la nappe depuis le système canal. Doivent également être pris en compte les flux hydrodynamiques souterrains (ex : échanges d'eau entre nappes) et, plus généralement, les conditions aux limites de l'aquifère, comme par exemple les connexions nappe-rivière qui constituent des sorties d'eau à prendre en compte. Pour cela, une étude hydrogéologique est un préalable nécessaire à l'utilisation d'un réseau de piézomètre pour la détermination des volumes de réalimentation.

Déterminer les flux de réalimentation de nappe d'un périmètre irrigué à partir d'une carte piézométrique est donc une méthode grossière de quantification des volumes en jeu, mais qui peu tout à fait convenir à de petites ASA (réalimentant des nappes qui n'entretiennent que peu de connexions hydrauliques souterraines avec d'autres masses d'eau), pour lesquelles la connaissance fine des volumes en jeu ne se justifie pas compte tenu des objectifs fixés et du prix d'accès à l'information. Dans la pratique, l'application de cette méthode a été observée que dans 2 études sur 23.

#### **6.2.3.1.1.3 Le tensiomètre**

Le tensiomètre est constitué d'une bougie poreuse en céramique placée dans le sol et reliée à un manomètre. A l'équilibre, la différence entre la pression de l'eau dans la bougie et celle de l'eau dans le sol donne accès au potentiel hydrique (ou tension hydrique) du sol à la profondeur considérée (profondeur de résidence de la bougie). Dans le cas d'un sol sec, la différence de charges hydrauliques entre la bougie et le sol crée une dépression qui entraîne l'eau depuis la bougie poreuse vers le sol. Cette dépression est transmise au manomètre, qui mesure ainsi la charge hydraulique (ou potentiel hydrique) de l'eau dans le sol. Dans le cas

inverse d'un sol saturé, l'eau est transmise du sol dans la bougie par surpression, et la pression mesurée permet d'accéder à la charge du sol à saturation.

Placer une série de tensiomètres à différentes profondeurs du sol (en batterie) permet de déterminer le profil de charge  $H = f(Z)$ , donnant le potentiel hydrique en fonction de la profondeur. Le profil de charge permet de connaître la disponibilité en eau dans le sol pour les cultures. Le tensiomètre permet donc d'étudier l'évolution du stock hydrique du sol, dans le but, entre autre, de déterminer avec précision le complément d'eau à apporter par l'irrigation. Le plan de flux nul ( $dH/dZ = 0$ ) correspond à la profondeur délimitant la zone d'extraction racinaire de la zone de drainage profond. Dans la zone racinaire, une partie de l'eau contenue dans les macropores du sol remonte vers la surface sous l'effet de la demande climatique (remontées capillaires).

Dans la zone de drainage, toute l'eau contenue dans les macropores est soumise à l'unique action de la pesanteur, et se retrouve ensuite drainée en profondeur vers la nappe. Il n'est possible d'accéder au flux de drainage profond réalimentant la nappe à l'aide d'une batterie de tensiomètres que si cette dernière est en quasi-continuité hydrique avec la nappe. Le calcul de la hauteur équivalente à la pression permet de détecter la présence d'un horizon saturé (toit de la nappe) par un calcul simple, illustré par l'exemple suivant :

Un tensiomètre dont la bougie est positionnée à 1 m de profondeur et qui fournit une indication de la charge hydraulique égale à  $-80$  cm d'eau traduit le fait qu'au niveau de la bougie, la hauteur équivalente à la pression est positive et égale à  $+20$  cm d'eau, puisqu'en appliquant l'égalité  $H = h + z$ , on écrit :  $-80 = h - 100$ , soit  $h = +20$  cm. Le toit de la nappe est ainsi positionné à  $20$  cm au dessus de la bougie, soit à la profondeur de  $80$  cm. Mais caractériser la variation de toit de la nappe ne donne pas réellement d'indication sur le flux de drainage, car cette variation peut également être due à d'autres apports d'eau, comme les apports souterrains par exemple.

Cette méthode ne reste possible que lorsque le toit de la nappe est peu profond. Elle n'est donc pas réellement adaptée à la mesure du flux de réalimentation, d'autant qu'elle ne permet pas de distinguer les contributions à la recharge de nappe, selon qu'elles proviennent de l'irrigation ou des précipitations, ce qui explique pourquoi aucune étude ne l'a privilégié. Son application reste cependant à étudier au cas par cas.

### 6.2.3.1.2 A partir des mesures de charge hydraulique

Le drainage profond peut être calculé à partir des mesures de la charge hydraulique  $H = f(Z)$ , qui caractérise le flux d'eau dans le sol suivant la loi de Darcy :

$$q = K(\theta) \frac{dH}{dz} = K(\theta) \frac{d(h-z)}{dz}$$

Avec :

$q$	flux d'eau ou vitesse de Darcy	(mm/s)
$K(\theta)$	conductivité hydraulique du sol	(mm/s)
$\theta$	humidité volumique de l'eau dans le sol	(mm <sup>3</sup> d'eau/mm <sup>3</sup> de sol)

Le volume drainé  $D$  est alors obtenu, sur le pas de temps  $\Delta t$  considéré, par la relation :

$$D = q \cdot \Delta t$$

Deux méthodes existent pour quantifier le flux de drainage, la méthode du plan de flux nul et la méthode du drainage interne.

### 6.2.3.1.2.1 La méthode du drainage interne

Dans la méthode du drainage interne, on va chercher à déterminer la relation  $K(\theta)$ , pour ensuite appliquer la loi de Darcy. La méthode du drainage interne est la méthode in situ la plus utilisée [Nemeth, 2001]. On analyse la redistribution de l'eau dans un profil vertical de sol donné, après l'avoir humidifié en apportant de l'eau à sa surface, par le biais d'un infiltromètre (simples ou double-anneaux) ou d'un simulateur de pluie. On mesure alors les variations d'humidité  $\theta = f(Z)$  et de charge hydraulique  $H = f(Z)$  à différentes profondeurs, ce qui permet d'obtenir les caractéristiques hydrodynamiques du sol considéré, c'est-à-dire la relation entre la pression, l'humidité volumique et la conductivité hydraulique ( $K$ ). On détermine alors  $K(\theta)$  par le biais de la même loi de Darcy appliquée entre deux couches de sol de profondeur différentes et dont les caractéristiques sont ici connues. Une fois la relation  $K(\theta)$  déterminée, on revient à une situation d'irrigation courante pour laquelle on mesure  $H = f(Z)$ . Connaissant  $K(\theta)$  et  $dH/dz$ , on en déduit le flux de drainage consécutif à l'irrigation, d'après la loi de Darcy. En opérant cette manipulation pour les périodes d'irrigation considérées comme représentatives, et sur des pas de temps donnés, on obtient le volume drainé vers la nappe D. On en déduit sur l'année d'irrigation les volumes de réalimentation de la nappe.

### 6.2.3.1.2.2 La méthode du Plan de Flux Nul (PFN)

Dans la méthode du PFN, on suit, sous culture ou en sol nu, l'évolution des teneurs en eau et des pressions entre deux épisodes pluvieux relativement éloignés (pour nous, il s'agira de deux irrigations). Après quelques jours de pluie, une partie du sol est soumise à l'évaporation par remontées capillaires, et l'écoulement est ascendant. Une autre partie du sol, en profondeur, est soumise au drainage, et l'écoulement est descendant. Par continuité, ces deux zones sont séparées par un niveau de profondeur ( $Z_0$ ) pour lequel le flux est nul. Il s'agit du plan de flux nul, correspondant, d'après la loi de Darcy à la profondeur  $Z_0$  telle que  $dH/dz = 0$ . Les profils de charge hydraulique obtenus par le biais d'une batterie de tensiomètres permettent de déterminer cette profondeur  $Z_0$ , qui varie dans le temps. La variation du stock d'eau pendant le pas de temps  $\Delta t$ , comprise entre la côte  $Z_0$  du PFN et une côte  $Z$  donnée correspond au flux d'eau  $q$  y circulant. La comparaison des valeurs de charge entre deux tensiomètres installés à des profondeurs différentes permet de déterminer si le flux d'eau dans le sol est ascendant ou descendant.

*Cette méthode permet donc d'estimer de manière simultanée le drainage ET l'évaporation.* En effet, la variation de stock entre la surface du sol ( $Z=0$ ) et le PFN moyen ( $Z_0$ ) pendant le pas de temps  $\Delta t$  représente l'évaporation (cf. Équation 1), alors que la variation de stock entre le PFN moyen ( $Z_0$ ) et le plan de côte  $Z$  ( $Z > Z_0$ ) correspond au flux de drainage qui nous intéresse (cf. Équation 2).

Equation correspondant à l'évaporation de l'eau, dans le cas où les précipitations et le ruissellement sont nuls :

$$\text{Équation 1} \quad \frac{\Delta S_0^{Z_0}}{\Delta t} = -ETR(t)$$

Equation correspondant à la percolation de l'eau :

$$\text{Équation 2} \quad \frac{\Delta S_0^Z}{\Delta t} = -q_z(t)$$

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle n'est applicable que dans le cas où le PFN existe, ce qui n'est pas systématique, et qui doit de plus être positionné au delà de la profondeur maximale d'enracinement si une culture est en place [Nemeth, 2001].

De plus, le PFN étant variable dans le temps, cela nécessite de disposer des tensiomètres qui ne soient pas trop éloignés les uns des autres, afin de pouvoir déterminer au mieux la position du PFN. Par exemple dans les zones à forte colonisation racinaire, l'interprétation est plus délicate dès que la distance entre deux tensiomètres dépasse 10 cm [Tiercelin, 1998]. Enfin, cette méthode est délicate à mettre en œuvre car le PFN est parfois difficile à faire apparaître sur le profil de charge  $H = f(Z)$ . Cependant, cette application est particulièrement bien adaptée au contrôle des flux d'eau à des profondeurs importantes. Mais les caractéristiques hydrodynamiques sont extrêmement variables dans l'espace, ce qui réduit la représentativité des mesures. On estime la précision de ces mesures à 10%.

#### **6.2.3.1.2.3 Conclusion sur les méthodes utilisant les mesures de charge hydraulique**

La critique des méthodes utilisant les mesures de charges hydrauliques fournies par les tensiomètres ou les sondes est sensiblement la même que celle relative à l'utilisation des cases lysimétriques, à savoir que ces méthodes restent très ponctuelles et peu représentatives, et qu'elles se heurtent ensuite au délicat problème de la régionalisation (plus important que dans le cas des cases lysimétriques). Ceci explique pourquoi aucune étude de flux n'a mobilisé ces méthodes dans le cadre de la quantification de la recharge de nappe, préférant utiliser les trois prochaines méthodes que nous allons détailler, à savoir l'analyse isotopique (2/23), l'estimation du drainage profond par déduction du bilan hydrique (12/23), voire l'utilisation de ratio de restitution eau de surface / eau profonde établis dans la littérature (4/23). Néanmoins, le problème méthodologique de la variabilité interannuelle des résultats reste également toujours posé (mesures effectuées pendant une année sèche ou humide), contrairement à la méthode d'analyse isotopique, que nous abordons maintenant.

#### **6.2.3.1.3 Par analyse isotopique**

L'eau contenue dans une nappe phréatique résulte du mélange d'eaux d'origines différentes. On distingue l'eau « ancienne » de l'eau « nouvelle ». L'eau ancienne correspond à l'eau contenue dans les sols (préexistante). L'eau nouvelle est issue de l'infiltration d'eau depuis la surface. Ces infiltrations dans la nappe sont elles-mêmes d'origine différente. Elles peuvent provenir de l'infiltration des précipitations directes (eaux météoriques), on parlera alors de l'eau des précipitations. Mais elle peut également provenir de l'infiltration d'une eau préalablement transportée en rivière (et dans les canaux), mais générée en altitude, à des températures plus faibles, que ce soit par le biais du ruissellement des précipitations, ou de la fonte des glaces. On parlera ici de l'eau des rivières.

Les méthodes de traçage isotopique se basent sur le fait que le rapport isotopique  $\delta^{18}O$  de l'eau contenue dans les sols est différent de celui de l'eau de pluie, qui est lui-même différent de celui de l'eau des rivières. Cette différenciation dans les teneurs isotopiques<sup>33</sup>, illustrée par la Figure 13 s'explique principalement par les processus de changement de phase de l'eau (évaporation, condensation, etc.), et par la température moyenne du sol des zones où interviennent ces changements de phase (thermodépendance du fractionnement isotopique).

---

<sup>33</sup> Mesurée à l'aide d'un spectromètre de masse (*Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS*).

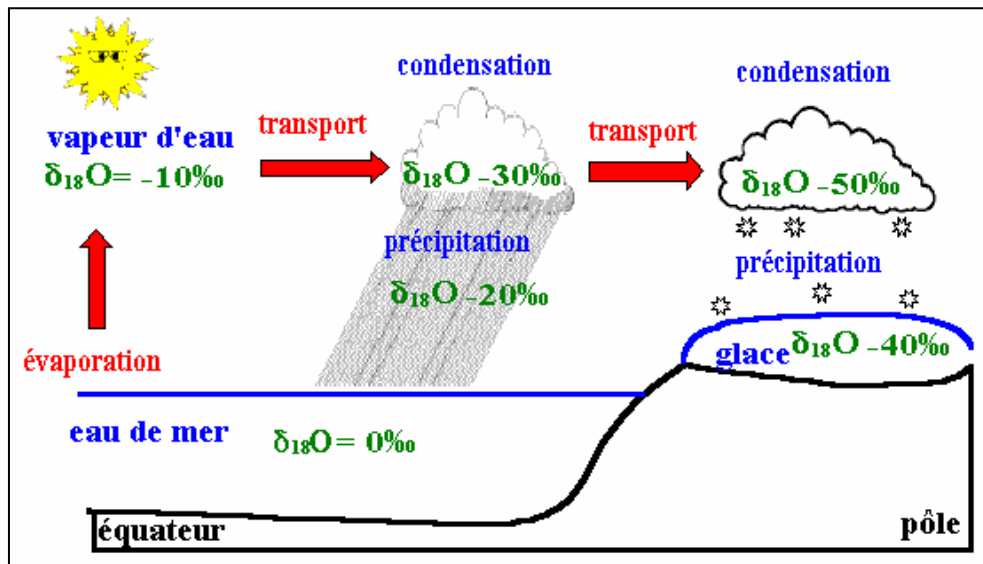


Figure 13 : Evolutions du rapport isotopique de l' $^{18}\text{O}$  contenue dans l'eau au cours des différents changements de phases<sup>34</sup>

L'analyse des isotopes contenus dans l'eau souterraine permet ainsi de distinguer précisément la contribution volumique des précipitations de celle de l'irrigation au sens strict dans le phénomène de réalimentation de la nappe.

Cette méthode présente de nombreux avantages. Elle permet tout d'abord de quantifier le volume de réalimentation ne provenant que des irrigations, et non des précipitations, contrairement à toutes les autres méthodes qui incluent ces deux composantes dans le résultat du flux de drainage. Elle permet de plus d'accéder non pas au volume de réalimentation sur une saison d'irrigation, mais sur une période de temps beaucoup plus longue, d'environ 40ans<sup>35</sup>. Cette méthode s'affranchit ainsi du biais temporel de la variabilité interannuelle des résultats. En outre, elle offre généralement une très bonne précision des volumes quantifiés. Cependant son coût est élevé, ce qui explique que seul deux études aient opté pour cette méthode.

Notons que l'analyse isotopique permet également l'analyse du cheminement de l'eau, ou la mesure des caractéristiques de l'écoulement telles que la vitesse du courant, le temps de parcours, la dilution, etc. Elle permet encore la datation de ces nappes, ainsi que l'estimation de leur contribution au débit des rivières, et enfin leurs interactions avec l'eau provenant d'autres sources. Ce ne sont cependant pas les seules possibilités qu'offre l'analyse isotopique, puisqu'elle permet aussi d'effectuer des études qualitatives de contamination des nappes souterraines ainsi que de leur salinisation.

Voyons maintenant en quoi consistent les méthodes de détermination indirectes du flux de réalimentation.

<sup>34</sup> L'oxygène 18 est apparu en quantité suffisante pour être suivie suite aux essais thermonucléaires dans l'atmosphère de, et d'après, 1963.

<sup>35</sup> L'oxygène 18 est apparu en quantité suffisante pour être suivie suite aux essais thermonucléaires dans l'atmosphère de, et d'après, 1963.

## 6.2.3.2 Les méthodes de détermination indirecte

### 6.2.3.2.1 *Obtenir les restitutions profondes par déduction du Bilan Hydrique*

#### 6.2.3.2.1.1 **Présentation de la méthode**

Dans le cas où aucune mesure ne peut être menée (pour des raisons techniques ou économiques), il est toujours possible d'estimer le flux de drainage sur la base d'une déduction du bilan hydrique, c'est-à-dire par la différence entre les entrées d'eau sur le périmètre irrigué, et toutes les sorties, hormis celle vers la nappe. Cette méthode a l'avantage de donner un ordre de grandeur du flux de drainage souterrain à moindre coût, mais à l'inconvénient de ne plus pouvoir utiliser l'équation entrées = sorties du bilan hydrique comme le moyen de vérifier la validité des mesures ou des estimations faites. Nous avons choisi de placer cette partie sur le bilan hydrique en annexe (cf. Annexe 4) afin d'alléger et de simplifier le corps du rapport, *bien que cela en constitue la partie essentielle*. En effet, le bilan hydrique est la seule méthode employée pour la détermination des flux de drainage à l'échelle du périmètre, dans le cadre des 23 études considérées. On trouvera donc tous les détails de cette méthode dans l'annexe correspondante, et nous ne présenterons ici que les conclusions relatives à l'utilisation de cette méthode (cf. ci-dessous).

#### 6.2.3.2.1.2 **Conclusion sur l'utilisation du bilan hydrique pour déterminer les restitutions en nappe**

La méthode de quantification de la réalimentation de la nappe par déduction du bilan hydrique est loin d'être une méthode offrant une grande précision, principalement du fait que les évaluations des différents termes du bilan hydrique accusent d'imprécisions importantes. Seuls peu de termes peuvent être appréhendés de façon précise sans que cela n'induisse un coût prohibitif. Parmi ces évaluations des termes du bilan hydrique, les évaluations les plus imprécises car les plus délicates à mener, et qui ont une répercussion forte sur l'estimation finale du flux de drainage, concernent surtout l'estimation de l'évapotranspiration des cultures et la mesure des restitutions de surface. Ainsi, si les grandeurs d'entrée du bilan sont relativement bien connues, celles de sortie sont beaucoup plus imprécises. A cela s'ajoute les imprécisions de quantification de nombreux autres termes du bilan (précipitations, remontées capillaires, évapotranspiration de la végétation, ...) qui, si elles n'ont pas de grandes répercussions individuelles sur la précision du résultat final, ont une répercussion globale certaine. De même, une source d'imprécision importante réside dans la non prise en compte de la réserve utile du sol, particulièrement lorsque celle-ci est faible (ex : 20mm en Charente), parce que cela induit une plus grande vulnérabilité au stress hydrique, et donc un plus grand écart potentiel entre ETR et ETM. En outre, notons que le flux de drainage interne ainsi déterminé correspond à une réalimentation de la nappe par les effets conjoints de l'irrigation et des précipitations, la distinction entre ces contributions respectives ne pouvant être apportée que par une analyse isotopique des eaux souterraines. Mais à défaut d'apporter une précision équivalente à celle obtenue par analyse isotopique, l'estimation de la réalimentation de la nappe par déduction du bilan hydrique est d'un coût beaucoup plus acceptable pour la grande majorité des ASA (seules 2 études sur 23 se basent sur une analyse isotopique).

.../

*Suite de l'encadré ...*

Par conséquent, la conclusion que l'on peut tirer de cette analyse du bilan hydrique est que les résultats des études de flux menées à l'heure actuelle doivent être pris avec une grande parcimonie, et ne doivent en aucun cas être considérés comme précis. Cela vaut tant pour la réalimentation de la nappe, que pour les restitutions de surface, ou encore que pour la consommation en eau des cultures, soit, en bref, pour toutes les grandeurs que quantifient les études de flux aujourd'hui existantes. Ces valeurs doivent être considérées plus comme des ordres de grandeur que comme des estimations ou des mesures précises. En résumé, si l'influence des externalités positives de l'irrigation gravitaire sur le milieu naturel est un fait admis, il existe néanmoins aujourd'hui une grande incertitude quant à la quantification de ces effets en terme de flux d'eau.

**Cadre 4 : Conclusion sur l'utilisation du bilan hydrique pour déterminer les restitutions en nappe**

Nous arrivons à la dernière méthode de quantification du flux de drainage. Il s'agit de méthodes caractérisant la répartition des flux d'eau en sortie par le biais de ratios entre restitution d'eau en surface et restitution d'eau en profondeur, établis dans la littérature.

#### ***6.2.3.2 Mobiliser des ratios de restitutions eaux profondes / eaux de surface établis dans la littérature***

Une autre méthode consiste à utiliser des ratios de répartition entre écoulements superficiels et écoulements profonds communément admis. Dans son calcul des redevances – prélèvements – restitutions, l'AE considère qu'en irrigation gravitaire 40% de l'eau est restituée aux réseaux superficiels et 60% à la ressource souterraine<sup>36</sup>. Cette répartition devient 30% en superficiel et de 70% en eaux profondes, d'après une étude réalisée en 1993 par la SCP<sup>37</sup>, et 50% pour chacun d'après l'étude [ENSAM, 2003]<sup>38</sup>. En tout, 4 études de flux sur 23 mobilisent de tels ratios.

Après avoir détailler les méthodes de quantification des flux d'eau, nous allons présenter dans le chapitre suivant celles permettant de quantifier les flux de solutés.

<sup>36</sup> Cependant ces valeurs peuvent être contestables à la vue du peu d'études réalisées sur le sujet lors de la parution du nouveau mode de calcul de la redevance.

<sup>37</sup> Etude (SCP, 1993), généralisant des mesures lysimétriques réalisées sur un ensemble de parcelles du Vaucluse.

<sup>38</sup> Sur la base de 27 études de flux sur des périmètres irrigués de petite, moyenne et grande taille.



## 7 QUANTIFICATION DES EXTERNALITES DE FLUX DE SOLUTE

### 7.1 La quantification et la caractérisation des flux de solutés de surface

La qualité de l'eau se définit par rapport à ces usages : eau potable, irrigation, usage industriels, loisirs, pisciculture, navigation énergie, etc. Comme le montre le Tableau 16 de l'Annexe 5, relatif à l'adéquation entre classes de qualité de l'eau et usages de l'eau. A chaque usage correspond des exigences de qualité biologique, chimique et physique différentes, et les méthodes à appliquer changent en fonction de ces mêmes exigences. On ne retiendra ici que deux types d'usages de l'eau de surface : l'usage pour l'alimentation en eau potable (pris comme grossièrement représentatif des usages consommateurs de la ressource) et l'usage environnemental (usages non consommateurs [environnement et loisirs]). Dans le premier cas, on sera sensible à la nature de la pollution, et à sa caractérisation physico-chimique, principal souci du producteur d'eau potable. Dans le second cas, on sera plus attentif aux conséquences de cette pollution sur l'hydrosystème, caractérisées par des caractéristiques biologiques.

#### 7.1.1 *Caractériser la pollution physico-chimique pour les usages consommateurs de la ressource : l'analyse physico-chimique des eaux*

Rappel : Les flux de substances en sortie de parcelle agricole sont constitués :

- *de substances minérales* : essentiellement sous forme d'ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ )
- *de substances organiques* : il s'agit de matière organique soluble provenant de la décomposition des végétaux, mais également de résidus de pesticides.

Il s'agit ici de pouvoir quantifier ces substances. Cette mesure doit se faire à deux niveaux, d'une part au niveau des émissaires du périmètre irrigué, afin de quantifier les flux polluants arrivant dans le milieu récepteur, et d'autre part dans le milieu récepteur lui-même, afin d'apprécier l'évolution physico-chimique des eaux (dilution). Les mesures pour quantifier les pollutions sont les mêmes dans les deux cas, mais les paramètres à prendre en compte dans le second cas sont beaucoup plus importants. C'est pourquoi nous ne présenterons ici que cette seconde catégorie de mesures.

Avant d'aborder l'étude de la qualité d'une eau superficielle pour évaluer son état de pollution, il est nécessaire de rassembler une somme relativement importante d'informations [Bontoux, 1993].

#### **ETUDES PRELIMINAIRES**

##### *Le régime hydrographique*

Il faut déterminer la vitesse des courants et les variations de débit, particulièrement l'étiage, pour pouvoir apprécier la dilution des rejets de pollutions depuis le périmètre irrigué. Ces données peuvent être obtenues auprès des Services de l'Eau et des Milieux Aquatiques (SEMA) dans les DIREN, responsables de la surveillance de la qualité des cours d'eau, et nécessitent quelque fois d'être complétées par des mesures de terrain. Lors des opérations de prélèvements d'échantillon destinés à l'analyse, il faut effectuer une mesure des débits afin de pouvoir transformer les concentrations que donnent les dosages en flux de polluants transportés.

La situation que l'on cherche à caractériser doit être rapprochée d'une situation antérieure à la pollution pour laquelle on a pu déterminer l'influence des sols dans la composition chimique des eaux (étude hydrogéologique) et les incidences climatiques (le climat joue sur la température des eaux donc sur la solubilité de l'oxygène et l'activité métabolique de la biomasse. Une forte température peut accentuer les effets négatifs de la pollution organique issue des eaux d'irrigation). Ces deux facteurs devront être déterminés s'ils ne l'ont jamais été.

#### *Un inventaire des pollutions*

Une mesure des pollutions en amont des émissaires doit être effectuée, en guise de témoin des pollutions existantes, pour pouvoir mener une étude comparative. De plus, les pollutions agricoles devront être rapprochées de paramètres tels que le tonnage et la nature des engrais utilisés, les habitudes culturelles, l'incidence sur les eaux de ruissellement, etc.

#### *Le choix des points de prélèvements*

Il doit tenir compte de l'hétérogénéité du cours d'eau, et doit être effectué sur des points suffisamment éloignés du point d'émission des pollutions afin que le mélange ait eu le temps de se faire pour ne pas fausser les mesures. C'est particulièrement le cas lorsque l'on souhaite mesurer les effets de la dilution des pollutions par les restitutions d'eau agricole en sortie de station d'épuration. Il faut parfois plusieurs kilomètres pour que le mélange eau usée – eau de restitution – eau du milieu récepteur s'effectue totalement après la sortie de l'émissaire (en sortie d'émissaire, les caractéristiques physico-chimiques peuvent varier énormément en quelques centimètres) [Bontoux, 1993].

#### *Incertitudes liées à l'échantillonnage*

L'écoulement en rivière n'étant généralement pas laminaire, on observe des différences de concentration de pollution entre la surface et le fond, ainsi qu'entre les berges et l'axe. Cette forte hétérogénéité spatiale de la pollution en rivière nécessite de multiplier les prises d'échantillons pour un même prélèvement. Ce n'est cependant pas toujours matériellement faisable, et on optera souvent pour une mesure dans l'axe de la rivière (zone d'écoulement la plus active), à quelques centimètres sous la surface.

Or, dans les études de pollution, la marge d'incertitude qui limite les interprétations provient le plus souvent d'une mauvaise qualité de l'échantillonnage, plus que d'imprécisions analytiques. De plus, malgré toutes les précautions prises, on ne peut éviter les variations temporelles des concentrations, potentiellement brutales lorsque la rivière est le siège de rejets industriels.

### **CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX**

On appréciera ici la pollution compte tenu des caractéristiques physico-chimiques des eaux.

#### *Prélèvement et conservation des échantillons*

Le prélèvement proprement dit ne présente pas de difficulté particulière, contrairement à la conservation. C'est pourquoi il est préférable d'effectuer un maximum de mesures in situ (pH, TAC, O<sub>2</sub> dissous, etc.). La conservation doit se faire dans des conditions standards (20°C et obscurité pour éviter la photosynthèse qui modifie notamment le taux de matière organique). Pour certains éléments, on introduit des réactifs de stabilisation pour leur dosage ultérieur. Il reste que la conservation des échantillons, ainsi que le choix des points de prélèvements, sont des causes d'erreur majeures.

### *Dosage des polluants*

La pollution agricole est principalement constituée d'éléments minéraux, de matière en suspension, et de matières organiques. Le dosage des éléments minéraux se fait par une mesure de conductivité, qui donne une évaluation globale des ions présents dans l'eau, essentiellement minéraux. Le dosage spécifique des éléments minéraux principaux relève de méthodes analytiques classiques et normalisées. Ces dosages concernent une multitude de caractéristiques :  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_{\text{Kjeldhal}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , TA, TAC, ..., et sont réalisés avec précision dans des laboratoires spécialisés. Le phosphore demande lui une attention particulière, notamment pour doser les différents états dans lesquels il est présent dans l'eau.

Le dosage des matières organiques s'effectue en évaluant la Demande Biologique en Oxygène sous 5 jours ( $\text{DBO}_5$ ) et la Demande Chimique en Oxygène (DCO). La mesure directe de la  $\text{DBO}_5$  est l'une des méthodes les plus pertinentes d'appréciation de la matière organique, mais elle n'est pas très précise et on estime les imprécisions de l'ordre de 5 à 10% (par méthode normalisée). Là encore, la conservation des échantillons influe beaucoup sur le résultat final. La mesure de la  $\text{DBO}_5$  reste cependant la seule technique simple d'appréciation de la matière organique. A ce titre, elle sert de base au calcul des taxes imposées aux pollueurs. La DCO n'est pas réellement adaptée pour la mesure de la matière organique des pollutions trop faiblement chargées en matière organique (par opposition à celle des stations d'épuration ou à la pollution industrielle). Enfin, d'autres mesures sont également effectuées dans le cadre de l'étude des eaux brutes, telles que la mesure du carbone organique, des résidus secs volatils ou d'autres analyses spécifiques, mais les pollutions agricoles qui nous concernent n'ont pas réellement d'influence sur ces mesures.

Le lecteur se réfèrera à l'Annexe 5 concernant les normes de qualité de l'eau. Y sont présentées les grilles i) pour estimer la qualité générale de l'eau en fonction des facteurs précédemment vus (cf. Tableau 15 de l'Annexe 5), ii) pour signaler les problèmes d'azote (cf. Tableau 17 de l'Annexe 5), et iii) pour signaler les problèmes de phosphore (cf. Tableau 18 de l'Annexe 5).

#### **7.1.2 Caractériser la conséquence de la pollution pour les usages environnementaux et récréatifs : l'analyse hydrobiologique des eaux**

Les usages environnementaux sont très sensibles à la qualité de la ressource, et, de même, la qualité de la ressource est la considération majeure des usages récréatifs (pêche, canoë kayak, etc.). Ici, on n'évalue pas la pollution des eaux de surface par rapport aux flux de solutés en eux-mêmes, mais par rapport aux conséquences que génère la pollution sur l'hydrosystème, et particulièrement sur la biocénose<sup>39</sup>. En effet, l'analyse physico-chimique de l'eau renseigne sur la nature des polluants et le flux de pollution (si l'on maîtrise les débits), mais elle ne permet que de façon très incomplète l'appréciation de l'état réel de pollution (ou de la qualité) d'un cours d'eau, contrairement à l'analyse hydrobiologique. Pour Vernaux (1982), « La qualité des milieux peut être définie comme étant celle qui permet le développement de peuplements électifs des différents types écologiques quel que soit l'ensemble considéré (lacs, étangs, cours d'eau, vases, support végétaux, ...) » ([Vernaux, 1982] ; cité dans Hervé Capra, *cours d'hydroécologie animale*, ENGEES, 2003).

---

<sup>39</sup> La biocénose est composée des invertébrés, des poissons, des producteurs primaires et de la matière organique.

L'analyse hydrobiologique se compose de trois inventaires : floristique, faunistique et microbiologique. Le dernier inventaire ne nous concerne pas car il vise principalement à rechercher et à déterminer les germes tests de contamination fécale, présents dans les eaux de sortie de station d'épuration. Quel que soit l'inventaire réalisé, la difficulté réside dans sa réalisation et dans l'appréciation de cet inventaire par rapport à un état plus ou moins bien défini de référence : l'écosystème exempt de pollution [Bontoux, 1993]. Un certain nombre de normalisations de méthodes existent pour s'affranchir en partie de ces problèmes. Voyons maintenant le contenu des inventaires floristique et faunistique plus en détail.

### **L'INVENTAIRE FLORISTIQUE**

Il est toujours nécessaire de procéder à une définition au moins sommaire de l'état de la flore dans le cadre d'une expertise de la qualité d'un milieu. Les évaluations sont généralement qualitatives, et rarement quantitatives. On procède pour cela, le plus couramment, à l'examen d'algues brunes microscopiques à squelette de silice : les diatomées. On les prélève en grattant un substrat dur (cailloux, palplanche) ou indirectement grâce à des végétaux tels que les algues filamenteuses. Pour chaque point de prélèvement, on collecte au minimum 400 individus et on calcule un *Indice de polluosensibilité spécifique* (IPS) qui prend en compte l'abondance relative des différentes espèces rencontrées, leur sensibilité à la pollution, et leur intérêt en tant qu'indicateur de qualité [Bontoux, 1993]. Enfin, on effectue un dosage de la chlorophylle présente dans les MES des eaux afin d'apprécier l'importance de la population algale du phytoplancton (joue un rôle important dans la photosynthèse).

Si les diatomées sont utilisées ici dans les cours d'eau, notons qu'elles sont particulièrement adaptées à l'étude des écosystèmes aquatiques des canaux [Bontoux, 1993]. On peut les utiliser si l'on souhaite évaluer la qualité de l'hydrosystème des canaux d'irrigation, par exemple pour se renseigner sur l'opportunité qu'offrent les canaux aux activités de pêche.

### **L'INVENTAIRE FAUNISTIQUE**

Pour évaluer les conséquences que génère un flux polluant sur la faune aquatique, on utilise des indicateurs biologiques (ou bioindicateurs). Il s'agit d'organismes ou de systèmes biologiques utilisés pour apprécier la qualité du milieu aquatique, quel que soit l'usage qui en est fait. Selon le cas, le bioindicateur est une biocénose, un groupe d'espèces qui présentent un comportement analogue, une espèce particulièrement sensible, ou une portion d'organisme (organe, tissu, solution d'extrait enzymatique, etc.) (source : *Hervé Capra, cours hydroécologie animale, ENGEES, 2003, d'après [Iserentant et De Sloover, 1976]*). Il existe trois types de méthodes utilisant les bioindicateurs, mais seuls deux sont adaptés aux pollutions organiques.

Le premier type de méthodes concerne les méthodes relevant de la biochimie, dans lesquelles on évalue l'état trophique du milieu (chaîne alimentaire) à l'aide d'organismes planctoniques. Ces méthodes utilisent des techniques de laboratoire comme le dosage de substances ou la mesure d'activités enzymatiques ou du métabolisme. Les méthodes les plus utilisées sont i) la méthode de l'activité photosynthétique des algues, par dosage de la chlorophylle, ii) la mesure de la biomasse ou de la productivité algale ou planctonique, en enfin iii) la mesure du poids du périphyton (invertébrés producteurs) et le rapport de ce poids à la chlorophylle-a.

Le second type de méthode concerne les méthodes relevant de la biocénologie, dans lesquelles on déduit les caractéristiques des milieux aquatiques de la composition des peuplements qu'ils hébergent (bilan quantitatif des espèces présentes), puisque les altérations du milieu aquatique peuvent provoquer des modifications plus ou moins accentuées sur la

biocénose. Il existe une multitude de méthodes relevant de la biocénotique (analyse par comparaison des biocénoses, indices phytoplancton, indices macroalgues et macrophytes, indices poissons, méthodes non indicielles, ...). La méthode la plus utilisée pour l'évaluation de la qualité des eaux de surface continentales est la méthode basée sur l'étude des macroinvertébrés benthiques (ie. macroinvertébrés présents au niveau du substrat du lit de la rivière). Elle repose entre autre sur des critères liés à la présence ou à l'absence de certains taxons (familles) indicateurs (oligochètes, chironomidae, mollusques, crustacés, etc.), et sur la richesse taxonomique globale. L'indice lié à cette méthode qui est aujourd'hui le plus utilisé est l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN). Il a pour objectifs i) de situer la qualité biologique d'un site, ii) de suivre l'évolution de cette qualité dans l'espace et dans le temps, et iii) de mener une expertise suite à des perturbations organiques (du type rejets de pollutions diffuses), ou des perturbations du substrat du cours d'eau (par une surcharge en matières en suspension). Pour appliquer cette méthode, on effectue les prélèvements à l'aide d'un matériel d'échantillonnage de type « Surber » (filet d'échantillonnage dont l'ouverture de maille est de 500µm), selon un protocole normalisé rigoureux, qui tient notamment compte de la mosaïque possible des habitats des fonds et du milieu aquatique, ainsi que de la vitesse du courant. Il faut faire à peu près 8 prélèvements (en fonction de la vitesse du courant, du substrat et de la végétation), pendant au minimum deux périodes par an. Les prélèvements doivent être appliqués comparativement, c'est-à-dire en amont et en aval des points de restitution de l'eau agricole. On procède ensuite à l'identification des familles (parmi 138 taxons utilisés), et on détermine la nature de la variété taxonomique, à l'aide d'une valeur indicielle, l'IBGN, allant de 0 (milieu très perturbé) à 20 (milieu en très bonne santé). Cet indice dépend de deux principaux paramètres : le nombre total de taxons récoltés, et le groupe d'indicateurs auquel ils correspondent. Cette méthode permet ainsi de d'évaluer, dans les limites de sa sensibilité et de sa fiabilité, l'effet (et non la cause) de la perturbation occasionnée par la pollution agricole sur le milieu récepteur.

Une autre méthode utilisée consiste à évaluer la qualité de l'eau sur la base de l'ichtyofaune (faune piscicole) que l'on y observe par la réalisation de pêches électriques, les poissons étant considérés comme intégrateurs de la qualité globale des milieux aquatiques (car il se positionnent à différents niveaux de la chaîne trophique<sup>40</sup>). On évalue alors le plus souvent la diversité des populations. Cette méthode a l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre. Les macroinvertébrés benthiques ont l'inconvénient d'être difficilement échantillonnables, particulièrement dans les cours d'eau profonds. Pour appliquer l'IBGN, les prélèvements doivent se faire dans des milieux de hauteur relativement faible (<1m), de vitesse pas trop forte, dans des eaux claires. A contrario, une simple pêche électrique permet d'obtenir un bon échantillon de la faune piscicole. Cependant la méthode des poissons présente des contraintes opératoires parfois difficiles à respecter (types d'organismes utilisés [parfois difficilement identifiables], mode de diagnostic [quantitative ou qualitative], moyens matériels et humains nécessaires [liés à la taille et aux caractéristiques du milieu étudié]).

Cependant, l'inventaire faunistique concerne plus la macrofaune invertébrée benthique que l'ichtyofaune. Quoiqu'il en soit, ces méthodes permettent de d'évaluer les effets de la pollution organique diffuse sur l'hydrosystème, qu'elle provienne de la pollution agricole (eaux restituées au cours d'eau et ayant transité au préalable sur les parcelles), de la pollution induite par les résidus de curage et de faucardage dans le lit des canaux, puis des rivières (transfert), ou encore lorsqu'il s'agit d'évaluer les effets d'une dilution par les eaux d'irrigation des pollutions en sortie de station d'épuration.

---

<sup>40</sup> Certains sont détritivores, d'autres planctonivores, d'autres carnivores. Ils sont ainsi représentatifs dans une certaine mesure de la chaîne alimentaire, et leur étude permet d'y déceler d'éventuels dysfonctionnements.

### **7.1.3 Conclusion sur la quantification de la pollution de surface depuis le périmètre irrigué**

La quantification de la pollution de surface pose moins des problèmes vis-à-vis de la précision des méthodes de quantification existantes, que vis-à-vis de la fiabilité des résultats obtenus. La pollution de surface provient d'un grand nombre d'émissaires. De plus,

La restitution de cette pollution se fait de manière spatialement étendue, depuis un grand nombre d'émissaires d'eau polluée, parfois difficilement localisables, si bien qu'il s'avère difficile de mesurer la contribution réelle de la pollution agricole à la pollution globale de la rivière. D'une part, une telle quantification nécessite d'inventorier et de quantifier les autres sources de pollution, ce qui est très difficile de par leur pluralité, leur caractère éventuellement diffus, ou même du fait qu'elles demeurent pour certaines inconnues. D'autre part, la quantification de la pollution de surface nécessite de déterminer au préalable la pollution des flux d'eau polluée avant qu'ils ne se diluent dans la rivière. Enfin, pour mesurer la pollution globale finale de la rivière, les mesures doivent être effectuées à une distance suffisamment grande des points de rejets, de sorte que la dilution des rejets puisse s'opérer (pour accroître la fiabilité des mesures vis-à-vis de l'hétérogénéité spatiale de la pollution dans la rivière). Ceci peut sembler difficilement applicable en pratique, compte tenu du caractère diffus des rejets. Enfin, rappelons que chaque source est à l'origine d'une émission plus ou moins faible de polluants, mais il existe un grand nombre de sources, ce qui engendre des coûts d'observation de la pollution très élevés, voire une observation de cette pollution impossible. C'est ce qui nous fait dire qu'il n'est pas possible de quantifier avec fiabilité la pollution des eaux de surface depuis le système irrigué.

## **7.2 La quantification des flux de solutés de profondeur**

### **7.2.1 *Pollution agricole diffuse et nappe phréatique***

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer le flux de drainage de l'azote dans le sol, rejoignant par la suite la nappe phréatique. Nous allons présenter trois méthodes – l'analyse physico-chimique de l'eau souterraine, le bilan d'azote, et la mesure de l'azote sur le terrain – avant de nous pencher plus précisément sur cette dernière.

#### **7.2.1.1 Caractériser et quantifier la pollution physico-chimique de l'eau souterraine**

Une première possibilité consiste à procéder à une analyse physico-chimique de l'eau souterraine. Cette méthode, très précise, n'est cependant pas fiable du fait que la pollution mesurée est la pollution globale de la nappe, et non celle imputable au périmètre irrigué. Cette méthode doit être considérée comme une méthode alternative à moindre frais permettant d'avoir une idée de l'impact de la pollution agricole sur la qualité de l'eau souterraine, à condition de connaître également les autres sources de pollution de cette dernière...

#### **7.2.1.2 Procéder à un bilan d'azote**

Il est également possible d'estimer le flux d'azote drainé en profondeur par déduction du bilan d'azote. Le bilan d'azote minéral dans un profil de sol est le suivant [Nemeth, 2001] :

$$\Delta S_N = P + I + E + F + MH + MR - A - L - O - D - V$$

Avec :	$\Delta S_N$	variation du stock d'azote dans le sol	(Kg/ha)
	P	quantité d'azote apportée par la pluie	(Kg/ha)
	I	quantité d'azote apportée par l'irrigation	(Kg/ha)
	E	quantité d'engrais apportée	(Kg/ha)
	F	quantité d'azote apportée par fixation	(Kg/ha)
	MH	minéralisation de l'humus	(Kg/ha)
	MR	minéralisation de résidu cultural	(Kg/ha)
	A	quantité d'azote absorbée par la plante	(Kg/ha)
	L	quantité d'azote lessivée	(Kg/ha)
	O	quantité d'azote perdue par organisation (ou immobilisation)	(Kg/ha)
	D	quantité d'azote dénitrifiée	(Kg/ha)
	V	quantité d'azote volatilisée	(Kg/ha)

On peut dès lors obtenir par déduction la quantité d'azote lessivée (L). Cependant, cette méthode est complexe à mettre en œuvre car elle nécessite de connaître tous les autres termes du bilan, qui demeurent difficilement accessibles. Or, la fiabilité du résultat est intimement liée à la fiabilité de l'estimation des différents termes du bilan d'azote et du bilan hydrique (fiabilité de l'estimation du flux de drainage profond). La méthode du bilan d'azote à l'échelle de la parcelle est très peu appliquée, principalement du fait de sa complexité de mise en œuvre, ainsi que des difficultés soulevées par la non homogénéité de l'azote dans la parcelle. Viennent ensuite les problèmes de la régionalisation. On préférera effectuer des mesures directes de la quantité d'azote présente dans le sol, beaucoup plus simple à mener.

### 7.2.1.3 Mesurer la quantité d'azote présente dans le sol

Les méthodes les plus courantes permettant de quantifier la pollution souterraine sont les méthodes de terrain, qui consistent à mesurer les quantités de nitrates présentes dans le sol, ou dans une solution du sol, par le biais d'appareils de mesure (bougies poreuses, cases lysimétriques ou sondage à la tarière). Quelque soit la méthode, il est nécessaire de connaître le flux d'eau de drainage profond (sous la zone racinaire), donc, également, soit de le mesurer (case lysimétrique), soit de l'estimer en conduisant un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle.

#### 7.2.1.3.1 *Les bougies poreuses*

On mesure la concentration en nitrates (C) dans la solution du sol au moyen de bougies poreuses. Connaissant le volume d'eau drainée en profondeur (Dv), on obtient une estimation du flux d'azote nitrique convectif (D<sub>N</sub>) par la relation :

$$Q_N = C.Q_v$$

$Q_N$	quantité d'azote drainée vers la nappe par unité de surface	(Kg / ha)
$Q_v$	volume d'eau drainée en profondeur par unité de surface	(m <sup>3</sup> / ha)
C	concentration en azote	(Kg / m <sup>3</sup> )

La concentration de soluté est une concentration moyenne pour un volume donné. Elle peut être mesurée par le biais de bougies poreuses ou par le biais d'une sonde TDR, par des mesures de résistances électriques. L'analyse de la solution du sol prélevée dans les bougies poreuses permet d'obtenir les profils de concentration en azote nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et amoniacale (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) de la solution du sol. On transforme alors ces valeurs en quantité d'azote par unité de surface par l'équation suivante [Nemeth, 2001] :

$$Q_N = \left( \frac{[NO_3^-]}{4.42 \times 100} + \frac{[NH_4^+]}{1.29 \times 100} \right) \cdot \theta \cdot \Delta Z$$

Avec :	$Q_N$	quantité d'azote par unité de surface	(Kg/ha)
	$[NO_3^-]$	concentration en nitrate dans la solution du sol de la tranche $\Delta Z$	(ppm)
	$[NH_4^+]$	concentration d'ammoniaque dans la solution du sol de la tranche $\Delta Z$	(ppm)
	$\theta$	teneur en eau de la tranche du sol autour de la bougie	( $cm^3/cm^3$ )
	$\Delta Z$	épaisseur de la tranche de sol considérée	(m)
	100	facteur d'échelle permettant d'exprimer $Q_N$ en Kg.N/ha à partir de la concentration en ppm et du stock d'eau en mm	
	1.29	rapport molaire entre $NH_4$ ( $M=18$ ) et $N$ ( $M=14$ )	
	4.42	rapport molaire entre $NO_3$ ( $M=18$ ) et $N$ ( $M=14$ )	

Lorsque l'on utilise des bougies poreuses, il est nécessaire de disposer d'une quantité importante de bougies sur la parcelle pour avoir une bonne idée de la pollution drainée. Les bougies ont l'inconvénient majeur de donner des résultats très locaux, représentatifs du  $cm^2$  occupé par la bougie, ce qui pose d'importants problèmes pour la spatialisation des résultats.

### 7.2.1.3.2 Les cases lysimétriques

Cette méthode permet, à l'instar des bougies poreuses, de déterminer la teneur en azote de la lame d'eau drainée en profondeur de manière précise. Si elle pose également des problèmes de régionalisation, ils demeurent moins importants que dans le cas des bougies poreuses car la surface de mesure concernée par le lysimètre est beaucoup plus importante que dans le cas des bougies (jusqu'à  $10m^2$ ). Quoiqu'il en soit, on préférera à ces deux dernières méthodes, peu représentatives, la méthode basée sur l'analyse des teneurs en azote d'échantillons de sol prélevés à la tarière.

### 7.2.1.3.3 Les sondages à la tarière

#### Présentation

La solution la plus adaptée consiste à effectuer des carottages à la tarière sur une large série de points représentatifs de la parcelle, pour ensuite analyser la quantité d'azote totale  $N_{tot}$  présente dans ces prélèvements. Les échantillons de sol sont prélevés au début et à la fin du cycle d'irrigation, ainsi que pendant la période hivernale, afin d'obtenir une bonne représentativité temporelle des flux d'azote. Sont alors connus :

- les conditions initiales d'azote ;
- les prélèvements d'azote dans la plante ;
- les apports d'azote (azote supplémentaire apporté au champ) ;
- les conditions finales ;
- les pratiques d'irrigation (pilotage + conduite) ;
- l'estimation du taux de minéralisation du sol, sur la base de valeurs moyennes disponibles dans la littérature (autour de  $1 \text{ Kg} / j / \text{ha}$ ).

Toutes ces données nous donnent la quantité d'azote drainée vers la nappe. Il est important de noter que si cette méthode permet d'estimer la quantité d'azote drainée vers la nappe, cette quantité n'est pas forcément celle que l'on retrouvera dans la nappe car des phénomènes physico-chimiques peuvent intervenir et transformer cette pollution. On peut par exemple observer des phénomènes de dénitrification lorsque la nappe est captive, ce qui réduit la charge polluante effectivement présente dans la nappe.

### **Fiabilité de la méthode**

Plusieurs remarques doivent être faites sur cette méthode. Tout d'abord, l'estimation faite ici ne concerne que le flux convectif d'azote (entraînement direct de l'azote nitrique à l'état dissous dans l'eau). On considère donc comme négligeable la dispersion hydrodynamique, composée du flux diffusif (déplacement d'azote du au gradient de concentration en azote nitrique) et de la dispersion mécanique (variations de vitesse et de direction des flux d'eau et d'azote dues à l'effet de la microporosité du sol). Cette remarque est généralisable aux méthodes précédemment décrites, ainsi que les suivantes.

Ensuite et surtout, la régionalisation de ce flux d'azote mesuré à plusieurs reprises de façon ponctuelle soulève le problème de la représentativité de ces mesures, particulièrement au regard de la grande hétérogénéité spatiale et temporelle de l'azote au sein d'une même parcelle.

Une des causes premières de la variabilité spatiale de l'azote dans la parcelle est liée à l'hétérogénéité de l'application des fertilisants sur le champ. Pour la prendre en compte, il faudrait mesurer la quantité de fertilisants appliquée, à l'aide par exemple d'une cuvette de mesure (méthode de l'échantillonnage du sol par auger) [Mailhol *et al.*, 2004], ce qui n'est quasiment jamais effectué. L'application de l'azote est alors considérée à tort comme homogène, ce qui conduit à des erreurs sur le bilan d'azote de l'ordre de 15 à 20%. Ce point a donc son importance. Ensuite, viennent les variations topographiques locales du sol, à l'origine également d'une hétérogénéité dans l'application de l'azote. Enfin, une dernière source de variabilité spatiale de l'azote est liée à l'irrigation, toujours intimement liée à la fertilisation.

En général, l'application de l'azote se fait avant la confection des raies, ce qui induit par la suite une concentration de l'azote sur les billons. Si nous avons vu en quoi une sous-irrigation (volumes d'eau insuffisants et hauteurs d'eau dans les raies trop faibles) conduisait à la formation de reliquats d'azote en fin de campagne, qui sont ensuite lessivés lors des pluies hivernales, il en va de même lorsque l'irrigation est suffisante en terme de volume d'eau, mais que les débits d'application sont mal choisis. Lorsque le débit est constant dans le temps, l'irrigation est généralement plus longue et conséquente en amont de la raie qu'en aval (diminution de la ligne d'eau). Il s'en suit une meilleure valorisation par la plante de l'azote présente sur les billons à l'amont de la raie qu'à l'aval (meilleure « *Nitrogen Use Efficiency* »), qui se répercute sur la formation de reliquats<sup>41</sup>, puis sur leur lessivage. Pour limiter cet effet, il faut appliquer l'eau selon une technique de double débit (débit d'application fort, et ensuite plus faible), afin d'homogénéiser l'application de l'eau le long des raies [Mailhol, 2001].<sup>42</sup> Par conséquent, le pilotage de l'irrigation et sa conduite ont des répercussions importantes sur l'hétérogénéité spatiale de l'azote dans la parcelle.

Cette hétérogénéité pose des problèmes pour la régionalisation des résultats, mais également, plus en amont, pour la détermination du lieu de prélèvements des échantillons. Le carottage doit-il être effectué sur une raie, ou sur un billon ? Bien que des protocoles de mesures existent pour surmonter cette difficulté, cette simple question met en relief la fragilité de la

---

<sup>41</sup> Ces reliquats d'azote se situent en fin de raie dans le cas de raies ouvertes, et en milieu de raie dans le cas de raies fermées.

<sup>42</sup> Cependant, dans la pratique, les agriculteurs n'utilisent que très peu l'irrigation à la raie avec un double débit car elle ne se justifie pas vraiment à la vue de la faible taille des parcelles rencontrées en France (environ de 100 à 400m de long). Cela concerne plus l'irrigation dans des pays comme les Etats-Unis, où les parcelles sont beaucoup plus grandes.

méthode. De plus, ces mesures sont d'autant plus compliquées que cette hétérogénéité à tendance à se gommer au cours de la saison d'irrigation, pour ensuite arriver à une homogénéité apparente en fin de saison (à une profondeur entre 30 et 50cm), particulièrement dans le cas d'une irrigation menée sous fort tirant d'eau (200mm) [Mailhol et al., 2004]. On touche ici à l'une des grandes causes d'erreurs des méthodes de terrain, qui rend nécessaire l'utilisation de modèles numériques pour la détermination de cette pollution azotée vers la nappe, particulièrement dans le cas d'irrigations menées sous faible et moyen tirants d'eau, puisque l'unique autre méthode précise, le bilan d'azote (non adaptée à un contexte autre qu'expérimental), est alors inapplicable [Mailhol et al., 2004].

Pour toutes ces raisons, la méthode des sondages à la tarière doit être considérée comme étant peu fiable [Tiercelin, 1998]. Il faut alors mobiliser les outils modélisation, couplés à des images satellite et des systèmes d'information géographique (ou des enquêtes de terrain) pour déterminer l'occupation du sol nécessaire à la régionalisation<sup>43</sup>, mais cette méthode demeure difficilement applicable dans le cadre d'association d'irrigation standards.

### **7.2.2 Conclusion sur la mesure de la pollution de la nappe depuis le périmètre irrigué**

*Nous pouvons donc conclure qu'hormis l'utilisation de modèles de transfert de pollution, il n'existe pas de méthodes fiables ou précises permettant la quantification de la pollution azotée des eaux souterraines depuis le système irrigué.* Cela n'empêche pas certaines méthodes relatives à l'irrigation ou à la fertilisation de pouvoir conduire à une diminution sensible des lessivages de nitrates sans pour autant réduire le rendement des cultures, comme pratiquer une irrigation à la raie sous grand tirant d'eau [Mailhol et al., 2004], ce qui de plus a un effet bénéfique sur les rendements [Mailhol et al., 2004], ou encore de mener une irrigation/fertilisation par alternance de raies ([Benjamin et al., 1998] ; [Lehrsch et al., 2000]), ce qui peut conduire dans des conditions particulières à une diminution de 30% de la pollution souterraine [Popova et al., 2000b]. Par conséquent, si une obligation de résultats est difficilement envisageable dans le cas de la réduction de la pollution azotée, une obligation de moyens l'est tout à fait.

Nous achevons ici ces deux chapitres consacrés à la quantification des externalités de flux d'eau et de solutés. Cette quantification constitue une des formes de caractérisation des externalités. Une seconde caractérisation réside dans l'évaluation de l'importance que revêt le bénéfice (resp. le dommage) que génère une externalité positive (resp. négative). Les externalités se référant à des biens ou des services non marchands, nous devons nous pencher sur les méthodes d'évaluation qui leur sont spécifiques.

---

<sup>43</sup> 15% d'imprécisions, auxquelles s'ajoutent les imprécisions dues à la non connaissance des pratiques de fertilisations à l'échelle du périmètre irrigué.

## 8 L'ÉVALUATION MONÉTAIRE DES BIENS ET DES SERVICES NON MARCHANDS

*Les externalités que nous considérons dans ce rapport correspondent toutes à des biens ou des services non marchands. Toute cette partie cherche à répondre à la question suivante : Comment attribuer une valeur économique aux biens et aux services non marchands que représentent les externalités ? Répondre à cette question est un préalable nécessaire à la valorisation d'une externalité, qu'elle constitue un bien ou un service. Dans le cas où l'externalité constitue un bien, son évaluation monétaire devra être menée dans le cadre d'une Analyse coûts bénéfiques (ACB), qui aura pour but d'estimer la désirabilité sociale d'un projet de réduction/maintien/développement de cette externalité. Dans le cas où elle correspond à un service, son évaluation monétaire sera un préalable à la mise en place d'une tarification appropriée du service. En cela, l'évaluation monétaire des biens et des services non marchands est un passage quasi-obligatoire pour des projets de valorisation d'externalités. Ce chapitre lui est dès lors consacré.*

### 8.1 Introduction

#### 8.1.1 *L'Analyse Coûts Bénéfices (ACB)*

Pour apprécier les effets d'une politique de valorisation de ces externalités, qu'il s'agisse de réduire des externalités négatives ou de maintenir/développer des externalités positives, il faut être en mesure d'évaluer les bénéfices d'une telle politique, afin de les comparer ensuite à ses coûts, et ce, sur la base d'une évaluation monétaire commune. Il s'agit là d'une Analyse Coûts Bénéfices (ACB) (ou Coûts Avantages) classique.

Le principe de base d'une ACB est de comparer, avant tout projet ou toute opération, les coûts et les avantages qu'il/elle induit. Un projet sera considéré comme bénéfique lorsque ses avantages l'emportent sur ces coûts :

$ANC = (A - C) > 0$  ; avec ANC : Avantages nets pour la collectivité, A : avantages, C : coûts.

Mener une ACB nécessite donc de comparer les coûts et les avantages actualisés sur une unité monétaire commune. Or, toutes les externalités abordées tout au long de ce rapport, positives et négatives, sont relatives à un bien ou à un service environnemental (l'eau, la biodiversité, le paysage, etc.), et tout particulièrement à l'eau, patrimoine commun de la nation, que ce soit en terme de bien (ex : recharge de nappe, biodiversité d'une zone humide alimentée depuis les canaux), ou de service (ex : assainissement pluvial). Les externalités visées constituent en cela des biens et des services non marchands, puisqu'elles reposent sur des actifs naturels qui ne peuvent être échangés dans le cadre d'un marché<sup>44</sup> (ex : valeur de la biodiversité ?).

Pour évaluer la pertinence d'un projet de valorisation – rétribution d'externalités des canaux d'irrigation gravitaire dans le cadre d'une ACB, il reste néanmoins nécessaire de procéder à une évaluation monétaire des bénéfices et des dommages associés à tout changement dans la qualité ou la disponibilité de ces biens/services non marchands. Deux questions se posent alors. Comment peut-on attribuer une valeur économique à ces biens ou ces services non

---

<sup>44</sup> Pour pouvoir être ramené à une unité monétaire (i.e. avoir un prix), un bien ou un service doit pouvoir être échangé dans le cadre d'un marché.

marchands ? Jusqu'à quel point ces valeurs économiques sont-elles crédibles et fiables ? Pour répondre à ces questions, il est nécessaire d'établir une relation entre l'offre d'externalités par les agriculteurs et la demande sociale pour ces externalités.

En effet, la valeur économique d'un bien ou d'un service dépend notamment de la demande qui existe pour ce bien ou ce service. Plus la demande est forte, plus ce bien aura une valeur économique importante. De même, la demande existante pour une évolution dans le niveau d'un bien ou un service donnée (ex : protection d'une zone humide) détermine le **Consentement à payer (CAP)** d'un individu pour en bénéficier. Schématiquement, plus la demande est forte, plus le CAP des individus est élevé. De même, enfin, le CAP d'un individu va déterminer le surplus de bien-être, qualitatif ou quantitatif, que retirera l'individu en bénéficiant du bien ou du service considéré [*Marielle Montginoul, cours d'économie de l'environnement, ENGEES, 2003*].

$$\text{Surplus de bien être d'un individu} = E - C \quad (> 0)$$

Avec :

E = Evaluation subjective par l'individus du bénéfice (resp. dommage) associé à un changement donné dans le niveau d'un bien ou d'un service (qualité ou la disponibilité du bien ou du service considéré).

C = Coûts associés à cette évolution.

Il serait alors possible de donner un prix à ces biens ou ces services sur la base de la demande sociale hypothétique ou révélée, et de connaître ensuite la demande sociale effective résultant de politiques de valorisation de ces externalités. C'est sur cette idée que se basent la plupart des méthodes d'évaluation des dommages et des bénéfices non marchands, que nous allons maintenant décrire, en nous attachant à montrer les possibilités, les limites et les perspectives d'évolutions de ces outils d'évaluation économique, surtout vis-à-vis des externalités qui nous concernent.

### **8.1.2 Les différents types de méthodes d'évaluation monétaire des bénéfices et dommages non marchands**

Il existe deux catégories de méthodes d'évaluation monétaires des biens et des services non marchands [*Rambonilaza, 2002*] :

- ❖ Les méthodes basées sur les *préférences des décideurs politiques, des experts, ou des représentants des parties prenantes de la ressource en jeu* (préférence en terme de production d'aménités).

Y sont présentes la méthode d'évaluation implicite, la méthode DELPHI, la méthode multicritère, ou encore la méthode de monétarisation des dommages physiques, et la méthode des coûts de remplacement. Seules ces deux dernières méthodes seront exposées ici : la **méthode de monétarisation des dommages physiques**, qui ne permet d'évaluer que les dommages, et non les bénéfices ; et la **méthode des coûts de remplacement**, qui n'est utilisée que pour l'évaluation de bénéfices.

- ❖ Les méthodes basées sur les *préférences individuelles*, qui sont les plus répandues. Ces méthodes se divisent également en deux grandes catégories, qui consistent :
  1. Soit à créer un marché artificiel ou « *quasi-marché* », ayant pour objectif de réaliser une évaluation directe des bénéfices/dommages non marchands. La méthode d'évaluation sera dite *méthode d'évaluation directe* des préférences individuelles, car ce marché créé permettra d'évaluer directement le CAP d'un individu pour éviter des dommages ou obtenir des bénéfices sur un bien/service non marchand lors d'un projet donné.
  2. Soit à utiliser un marché connecté à ce bien environnemental, implicite, appelé « *marché de substitution* ». La méthode d'évaluation sera dite *méthode d'évaluation indirecte* des préférences individuelles, car ce marché de substitution permettra alors d'évaluer de façon indirecte le CAP d'un individu pour un changement dans le niveau des biens/services non marchand.

Nous allons maintenant décrire en détail ces méthodes d'évaluation économique, en suivant la typologie qui vient d'être présentée ici.

## **8.2 Evaluations monétaires basées sur les préférences des décideurs et des experts**

### ***8.2.1 La Méthode Indirecte de monétarisation des dommages physiques***

La méthode de monétarisation des dommages physiques est une méthode d'évaluation indirecte qui se base sur les préférences des décideurs politiques, des experts, ou des parties prenantes de la ressource en jeu. Cette méthode ne permet d'évaluer que les dommages, et non les bénéfices, consécutifs à une perte en qualité ou en disponibilité d'un bien/service environnemental (ex : dommages consécutifs à la pollution atmosphérique). Elle consiste à procéder à une évaluation monétaire des conséquences des dommages physiques *a posteriori*. Par exemple dans le cas où l'on cherche à évaluer le coût des dommages causés par la pollution atmosphérique, dont les effets sur l'organisme sont des affectations du système respiratoire et un risque accru de cancer du poumon, on pourra s'intéresser de manière détournée aux coûts d'hospitalisation pour traitement pulmonaire ou de lutte contre le cancer. Ces coûts permettront de donner une évaluation des dommages non marchands occasionnés par la pollution de l'air.

Plus précisément, dans cette méthode, on établit au préalable une mesure physique des dommages causés, comme par exemple les effets sur la santé en termes de taux de morbidité et de mortalité. Il s'agit alors i) de déterminer les relations « dose-effet » entre l'exposition à un niveau donné de pollution et les dommages consécutifs (évaluation micro-épidémiologique), et ii) de mettre en relation les taux d'exposition de populations à certaines pollutions et des taux de morbidité et de mortalité (évaluation macro-épidémiologique et statistique). Puis, c'est sur la base de cette mesure physique que l'on proposera une évaluation monétaire des dommages causés.

Cette méthode présente des biais qui, selon les dommages étudiés, peuvent être plus ou moins importants. Dans l'exemple de la pollution atmosphérique, il peut être délicat de différencier clairement la part des dommages causés spécifiquement par les effets de la pollution sur l'organisme (et en particulier les poumons) des dommages causés par d'autres maux tels que

l'état d'hygiène général d'une population, le tabagisme, l'alcoolisme, etc. De plus, certaines pollutions peuvent entrer en synergie, et rendre un dommage résultant d'un ensemble de pollutions plus grave (ou moins grave selon le cas) que la somme des dommages dus à chacune des pollutions (effet de magnification).

Cette méthode a cependant un avantage sur toutes les autres méthodes que nous verrons par la suite, celui d'une meilleure « objectivité », dans la mesure où cette méthode d'évaluation des dommages ne repose pas sur le ressenti des individus mais sur une évaluation scientifique et statistique de relations dose-effet observées physiquement. Le ressenti des individus ne permet souvent pas d'obtenir des résultats fiables d'évaluation des dommages causés par des pollutions diffuses. Comment un individu peut-il par exemple se douter que sa bronchite peut provenir de la pollution atmosphérique ? Cette méthode permet ainsi une plus grande fiabilité des résultats vis-à-vis du problème d'objectivité dans l'évaluation du CAP.

Ces dommages physiques ne se rapportent pas seulement à la santé des individus. Ils peuvent par exemple être relatifs à la dégradation des récoltes consécutive aux remontées de sel sur les terres agricoles, du fait de pompages dans la nappe trop importants ; ainsi qu'à de multiples autres sujets.

### **8.2.2 La Méthode Indirecte des coûts de remplacement**

La méthode des coûts de remplacement ne permet que l'évaluation monétaire des bénéfices non marchands existants. Elle consiste à supposer le bénéfice disparu, et à évaluer indirectement les dépenses qui doivent être engagées pour remplacer la perte du bénéfice afin de retrouver un service identique en qualité et/ou en disponibilité. La méthode des coûts de remplacement permet donc d'évaluer un bénéfice non marchand par la question : *Combien cela coûterait-il à un bénéficiaire s'il devait substituer l'objet de son bénéfice, toute chose étant égale par ailleurs ?* Prenons l'exemple du bénéfice constitué par la réalimentation de la nappe, vis-à-vis de la collectivité productrice d'AEP, qui a naturellement intégrée dans ses prévisions d'exploitation les volumes réalimentés depuis le système canal. Si ce bénéfice disparaît, les coûts de remplacement correspondent schématiquement à la somme des coûts de mobilisation et d'adduction d'une ressource en eau alternative, et aux coûts induits par le fonctionnement sous optimal d'installations devenus surdimensionnés.

## **8.3 Evaluations monétaires basées sur les préférences individuelles**

### **8.3.1 Les Méthodes Indirectes, utilisant des marchés de substitution (Méthodes des préférences révélées)**

*Dans les méthodes indirectes, on ne base pas l'évaluation directement sur les dires des individus sondés (combien ils se disent prêts à payer pour ...), mais indirectement sur leurs comportements économiques effectifs, que l'on suppose refléter indirectement leur CAP. On procèdera alors à l'observation de marchés de substitution. Par exemple, plus les visiteurs d'un parc naturel viennent de loin et engagent des dépenses de transport importantes pour le visiter, plus on peut dire que leur CAP est important pour éviter la dégradation qualitative ou quantitative du parc. Le marché de substitution observé sera ici le marché du transport.*

### 8.3.1.1 La Méthode des Dépenses de Protection (MDP)

#### **PRESENTATION**

Cette méthode peut être employée lorsque l'on souhaite mener une évaluation monétaire des dommages causés (uniquement) par une évolution des biens/services non marchands, et évaluer le CAP des individus pour éviter ces dommages. Elle repose sur l'idée que les individus expriment leur CAP par les dépenses de protection auxquelles ils consentent pour se protéger d'une nuisance, et donc améliorer leur environnement. On évaluera alors ces dommages par le biais des dépenses qu'ils consentent faire pour se protéger du dommage causé. Si nous prenons l'exemple de la pollution sonore urbaine, on peut évaluer le CAP des individus pour faire diminuer cette nuisance par les dépenses de protection contre le bruit qu'ils consentent faire (ex : double vitrage). Le coût de protection est donc considéré comme l'expression du CAP des individus pour ne pas subir les dommages considérés, ou encore pour que soit mis en place un projet permettant que la situation n'évolue pas dans ce sens.

#### **AVANTAGES ET LIMITES**

Cette méthode ne concerne que les dommages. Elle a l'avantage d'être simple et relativement peu coûteuse. Elle reste relativement peu fiable pour des valeurs plus précises, car cette méthode suppose que la protection matérielle est la seule réaction possible face à des dommages, alors que l'individu peut très bien choisir de déménager. Un certain biais est ainsi introduit. Ensuite, cette méthode n'estime les dommages que sur la base des protections, donc de ce qui peut être protégé. Qu'en est-il des parties extérieures ? Ne pas apprécier l'utilisation de son jardin du fait de nuisances extérieures (ex : bruit) constitue un dommage très important. Enfin, cette méthode ne permet pas d'évaluer tous les dommages environnementaux car certains sont exempts de protections (ex : pollution atmosphérique). Elle ne permet donc d'évaluer monétairement des dommages non marchands autrement que par des ordres de grandeurs.

### 8.3.1.2 La Méthode des Prix Hédonistes (MPH)

#### **PRESENTATION**

Cette méthode repose sur l'idée selon laquelle la valeur d'un bien de consommation (ex : l'immobilier, les produits agroalimentaires, ...), ou d'un bien de production (ex : le travail [salaire], la forêt, les terres agricoles, ...), ne dépend pas uniquement de caractéristiques intrinsèques à ce bien, mais également d'attributs liés à son environnement général (présence de points d'eau (lac, rivière), de forêts, ...). Toutes ces caractéristiques sont appelées des « attributs ». Une maison au bord d'un lac aura par exemple un prix sur le marché de l'immobilier plus important qu'une maison ne bénéficiant pas de la proximité d'un lac, *toutes choses étant égales par ailleurs*. Schématiquement, la différence des prix de vente entre ces deux maisons permet alors d'avoir une évaluation monétaire de l'attribut environnemental « présence d'un lac à proximité ». L'intérêt de la MPH est qu'elle rend théoriquement possible de reconstituer la fonction de demande d'attributs environnementaux à partir de la fonction de prix hédoniste. On en déduit alors le bénéfice/dommage monétarisé d'une amélioration/dégradation de l'environnement. Etant donné l'importance que va revêtir cette méthode dans le cadre des externalités visées par ce travail, nous allons la détailler plus profondément.

Comme marché de substitution, certains utilisent les prix de location des gîtes ruraux, d'autres les prix de vente des résidences secondaires, d'autres encore le prix d'annonce d'appartements et de maisons individuelles, etc. (cf. Tableau 9). Cette méthode a été appliquée essentiellement à la pollution atmosphérique et au bruit, et très peu aux aménités rurales (cf. sur ce dernier point [Michalland et al., 1998] ; [Michalland et al., 1999]).

Marché		Variable dépendante	Hypothèses faites
<b>Location</b>	estivale	loyer à la semaine	taux d'occupation de 100% (haute saison) et ajustement du prix réalisé (existence ancienne de la location)
	à l'année		<i>non rencontré</i>
<b>Vente</b>	de terrain à bâtir		<i>non rencontré</i>
	d'appartements uniquement	prix à la vente	
	de maisons individuelles uniquement	prix à la vente	
	d'appartements et de maisons individuelles	prix à la vente	problème de segmentation possible de marchés entre les deux types d'habitation
		prix d'annonce	Comportement uniforme des vendeurs (surestimation uniforme) et bonne connaissance du prix du marché. Problème de segmentation possible de marchés entre les deux types d'habitation
	dépense mensuelle pour le logement	calcul moyen sur des caractéristiques moyennes	

**Tableau 9 : Variables dépendantes rencontrées dans la MPH et conditions de validité du modèle**  
(source : [Michalland et al., 1998], p.5)

#### La sélection des variables

Les marchés de substitution qui peuvent être utilisés sont divers, et peuvent aussi bien être des marchés relatifs à un bien de consommation qu'à un bien de production. [Michalland et al., 1998] ont mené une étude générale de recensement des cas d'application de la MPH. Le Tableau 10 montre les domaines d'applications de la MPH qui ont été observés par les auteurs dans la littérature.

Marché		Caractéristiques des variables explicatives	
<b>Bien de consommation</b>	Immobilier	Privative	Equipement, taille, arbre de la propriété
		Publique	Environnement social : criminalité, éducation, voisinage (race, classe sociale, ...)
			Equipement : accessibilité, commerce, zone d'emploi
			Environnement physique : - risque naturel (inondation, tremblement de terre) - risque technologique ou pollution - aménité (forêt, points d'eau, qualité de l'eau)
	Voiture	Privative	Equipement, sécurité, esthétique, ...
Produits agro-alimentaires	Privative	Qualitative gustative	
	Publique	Image du terroir	
<b>Bien de production</b>	Travail (salaire)	Publique	Environnement physique : - risque technologique ou pollution - aménité (forêt, points d'eau, qualité de l'eau)
	Forêt	Privative	Potentialités de la forêt
	Terre agricole	Publique	Environnement physique : accès à l'eau

**Tableau 10 : Liste des domaines où fut appliquée la méthode des prix hédonistes**  
(source : [Michalland et al., 1998], p.3)

Dans la MPH, deux types de variables sont utilisées et doivent être sélectionnées avec rigueur. Il y a tout d'abord les *variables dépendantes*, c'est-à-dire le type de marché (ex : immobilier) et le segment de marché (ex : la vente de maisons principales, la vente d'appartements, ...) qui sont choisis pour mener l'analyse. Il y a ensuite les *variables explicatives*, c'est-à-dire les attributs qui entrent en jeu dans le prix du bien choisi pour l'étude. Sont généralement distingués les *attributs intrinsèques* du bien, les *attributs géographiques* (région, quartier, accessibilité) et les *attributs de voisinage*, caractérisant ce dernier. Les attributs de voisinage peuvent être séparés en attributs d'environnement social et les attributs environnementaux au sens strict [Michalland et al., 1998]. Le Tableau 9 représente les variables dépendantes rencontrés, alors que le Tableau 11 montre les variables généralement utilisées pour caractériser les attributs retenus.

<b>Attribut</b>	<b>Exemples de variables utilisées pour caractériser cet attribut</b>
<b>Date d'achat</b>	Année, trimestre
<b><u>Intrinsèque</u> :</b> - dimension - équipement - type d'habitation - constructions attenantes - qualité de la construction - taxe d'habitation	Nombre de pièces, superficie habitable Nombre de salles de bain, cheminée Maison individuelle, maison jumelle, appartement Taille du garage, piscine Age de la construction, indice d'état des lieux Taux d'imposition
<b><u>Localisation</u></b> - région - accessibilité	Sous-région ou quartier Distance à la route principale, au centre ville le plus proche, à l'école primaire-secondaire la plus proche, temps requis pour rejoindre la zone d'emploi
<b><u>Environnement social</u></b> - voisinage - équipement - qualité de l'enseignement - sécurité - emploi	Densité de population, revenu moyen par ménage Salle de sport Ratio élève/professeur, niveau solaire moyen Taux de criminalité Taux de chômage
<b><u>Qualité de l'environnement</u></b> - niveau de pollution - présence d'aménités	Concentration de particules ou d'oxydant Répartition des différents types d'occupation de l'espace, présence de points d'eau

**Tableau 11 : Variables explicatives les plus généralement utilisées dans la MPH**

(source : [Michalland et al., 1998], p.6)

Les attributs environnementaux au sens strict retenus sont très dépendants du type de zone étudiée. Dans le cas de zones urbaines, la pollution atmosphérique, sonore, la présence d'espaces verts, ..., peuvent avoir une influence sur le prix des biens immobiliers, alors que dans les zones périurbaines et rurales, les individus seront plus sensibles à la présence de points d'eau, de forêts ou d'animaux.

*La sélection de la zone géographique d'étude, de son échelle et de son niveau de précision*

Après avoir sélectionné les variables dépendantes et explicatives, on sélectionne [Michalland et al., 1998] :

- ✓ **une zone d'étude**, qui doit être suffisamment large pour refléter les variations d'attributs environnementaux sélectionnés, mais également suffisamment restreinte

pour que le marché immobilier soit unique et puisse être considéré comme homogène ;

- ✓ **des unités géographiques d'estimation des variables** sélectionnées dans le modèle ;
- ✓ **un niveau géographique d'agrégation des données.**

Généralement, une agglomération urbaine de grande taille est utilisée comme zone d'étude dans les applications de la MPH, et les variables dépendantes proviennent des données individuelles de vente de logement, mais rappelons que ces études n'ont que rarement concerné les aménités rurales, et jamais les externalités ici visées. Il faut ensuite chercher les bases de données relatives aux variables dépendantes et explicatives choisies, bases de données dont le lecteur trouvera la présentation dans [Michalland *et al.*, 1998].

#### **INCONVENIENTS ET LIMITES DE LA METHODE**

D'après (Marielle Montginoul, *cours d'économie de l'environnement, ENGEES, 2003*)

#### La MPH repose sur certaines hypothèses non vérifiées dans la réalité

##### 1. Hypothèse de souveraineté du consommateur

La MPH suppose que les individus ont la possibilité effective « d'acheter » plus ou moins d'aménités, de silence, ..., sur le marché immobilier par le biais du déménagement. Or cette mobilité n'est pas une réalité, et le lieu de vie est souvent suscité par diverses contraintes (financières, familiales, culturelles, sociales, ...). La liberté de choix n'est donc pas parfaite.

La MPH suppose de plus que l'individu fonde ses choix en étant parfaitement informé des conséquences qu'aura une évolution de la qualité ou de la disponibilité de biens/services environnementaux, puisque la MPH suppose que l'individu paye, en achetant une maison, un prix implicite marginal pour accéder à un niveau donné de chaque attribut environnemental, comme par exemple le niveau de pollution (cf. Tableau 11). Or, seuls peu d'individus sont conscients des effets concrets de la pollution sur leur personne, qu'elle soit sonore (troubles du sommeil, perturbation des activités et fatigue, ...), atmosphérique (affections du système respiratoire, risque accru de cancer du poumon, ...), etc. Pour que le marché immobilier reflète parfaitement un changement dans le niveau des biens non marchands, il faut aussi que ce changement soit local de telle sorte que les individus aient une réelle capacité de choix entre des sites différenciés (ce qui peut être le cas du bruit [en zone rurale uniquement], mais pas de la pollution atmosphérique). C'est pourquoi l'absence de marché immobilier parfaitement compétitif et informé rend difficile les évaluations monétaires non marchandes sur la base des prix hédonistes.

##### 2. Hypothèse de la similitude des fonctions d'utilité

Par la façon dont elle donne un prix implicite à chaque attribut, la MPH suppose que chaque individu fait la même classification entre les différents attributs environnementaux d'une part (une rivière a un prix implicite plus élevé qu'une forêt, qui vaut plus que...), et qu'une fois cette classification effectuée, chaque individu attache la même subjectivité *et* la même valeur aux désagréments ou aux agréments suscités par chacun des attributs environnementaux. Dans le cas de la pollution sonore par exemple, sa perception subjective en tant que nuisance *et* l'importance des déséconomies qu'elle suscite sont très variables d'une personne à l'autre. C'est ce qui fait dire à Montginoul (ENGEES, 2004), qu' « Au bout du compte, c'est un mélange hétérogène de fonctions d'utilité qui se trouve ainsi évalué, de sorte que l'on ne

pourra connaître avec précision ce que recouvrent les prix hédonistes mesurés ». En effet, pour ([*Rambonilaza*, 2002] : « On ne dispose pas de mesures adéquates des aménités existantes obligeant à utiliser des variables « proxy » pouvant capter de manière conjointe les effets sur les prix de plusieurs aménités. En outre, il n'est pas certain que les variables considérées soient les variables motivant les enchères lors des achats pour les résidences secondaires, et les tarifs des gîtes ruraux sont partiellement réglementés en France. » (p.94)

## La MPH peut accuser de biais importants

La sélection des variables peut être à l'origine de trois types de biais : les omissions de variables, l'existence de colinéarités entre variables et les erreurs de mesure de ces variables.

### 1. L'omission de variables

Plusieurs erreurs sont liées à la mise en pratique de la MPH. La plus aisée à commettre est celle d'oublier certaines variables clefs du modèle. On peut réduire ce risque en effectuant au préalable une enquête rapide auprès d'acheteurs ou d'agents immobiliers, afin d'avoir une bonne connaissance des critères de choix des acheteurs ou des locataires [*Michalland et al.*, 1998].

### 2. Les colinéarités entre variables

Il arrive fréquemment que certaines variables incluses dans le modèles soient interdépendantes (alors que le traitement statistique du modèle suppose le contraire). Par exemple, la présence d'éoliennes peut être tout à la fois synonyme d'une pollution moindre par l'utilisation d'énergies renouvelables, facteur de valorisation, et d'une baisse de la qualité esthétique d'un paysage. De même, le bruit (négatif) peut provenir de facilités de transport à proximité (positif).

Pour éviter l'omission de variables et les colinéarités, on peut cumuler un très grand nombre de variables de manière à s'assurer une certaine exhaustivité, puis effectuer un test de robustesse du modèle pour distinguer les variables clefs, des futiles. Pour cela on simule le modèle en enlevant les variables une à une pour déceler celles qui n'influent que très sensiblement sur les résultats du modèle. On peut également, pour limiter ces deux biais, limiter le nombre de variables de voisinage au strict minimum, ou encore n'utiliser qu'un nombre réduit de variable d'environnement social en construisant de nouvelles variables représentatives grâce à une Analyse en Composante Principale (ACP). On peut enfin utiliser une technique de « *residualization* » qui consiste à introduire les résidus des variables colinéaires dans le modèle, et non les variables elles-mêmes [*Michalland et al.*, 1998].

### 3. Les erreurs de mesure sur les variables

Ce troisième biais peu provenir de phénomènes de congestion, d'écarts entre mesures objectives et subjectives, ou encore de phénomènes de seuil de perception du changement dans le niveau des biens environnementaux [*Michalland et al.*, 1998].

Certains biens/services environnementaux peuvent être soumis à un phénomène de congestion (sans pour autant qu'il n'y ai de rivalité), se traduisant par une perte en qualité ou en disponibilité de l'usage suite à l'augmentation du nombre d'usagers. Par exemple, ni la quantité d'air, ni sa qualité n'est affectée par l'augmentation de la population, alors qu'une fréquentation trop élevée d'un parc (service environnemental) est à l'origine d'une baisse de la qualité de la visite. Les phénomènes de congestion concernent particulièrement les

équipements publics (routes, terrains de sport, lieux de pêche, ...). Lorsqu'un bien est potentiellement soumis au phénomène de congestion (ex : forêt en zone urbaine), l'utilisation d'une variable absolue (ex : nombre d'ha de parc) peut introduire des biais sur la qualité de l'usage. Pour s'en affranchir, on peut ramener cette variable par personne (ex : ha de parc par personne).

Ensuite, la mesure objective des attributs de l'environnement n'est pas toujours la plus pertinente. Concernant l'environnement social, et son attribut criminalité, une zone peut ne pas être l'objet d'une criminalité particulière (sur la base des chiffres de police [qui sont aussi très souvent biaisés]), alors qu'elle paraîtra comme particulièrement à risque pour ses habitants, sur la base du ressenti suscité par les médias par exemple (articles de presse, ...). De même concernant l'environnement au sens strict, une zone peut être particulièrement polluée, mais par une pollution diffuse comme les nitrates ce qui n'aura que très peu d'impact dans les ressentis des individus. Ces ressentis étant la base de leur préférences individuelles, qui elles-mêmes sont l'axiome de base de toutes ces méthodes d'évaluation, il peut être préférable de se baser ici sur des données subjectives affectant réellement le marché de l'immobilier que sur des données objectives qui introduisent de nouveaux biais.

Enfin, certains attributs de l'environnement peuvent n'être perceptibles par les individus qu'au delà d'un certain seuil. La pollution de la nappe n'influe dans le marché de l'immobilier qu'à partir du moment où elle devient visible (eau non potable). De même, la forêt n'influe positivement que lorsqu'elle devient visible au dessus d'un certain seuil (estimé à 20% de la surface totale considérée par [Garrod et al., 1991]), puis influe négativement lorsqu'elle devient trop visible, au dessus d'un second seuil. Ces phénomènes de seuil introduisent des biais lorsque les variables sont considérées de manière continue. Une solution consiste à utiliser, pour ces attributs particuliers, des variables discrètes ou même muettes.

### **CONCLUSION SUR LA MPH**

Les problèmes principaux, particulièrement dans l'espace rural, résident donc dans le choix de données pertinentes disponibles pour caractériser les aménités rurales, le choix d'une taille de zone pertinente et la difficulté de disposer de données de prix de biens immobiliers en milieu rural. Malgré ses difficultés pratiques d'application, ses incertitudes et l'inconvénient de nécessiter des données généralement difficilement disponibles, la MPH est beaucoup utilisée et présente l'avantage d'apporter des évaluations approximatives des dommages/bénéfices des biens/services non marchands.

#### 8.3.1.3 Les Méthodes des Coûts de Déplacements (MCD)

Les MCD furent initialement mises au point pour évaluer spécifiquement la demande économique et sociale existante vis-à-vis du patrimoine naturel pour des activités récréatives et des loisirs de plein air [Rambonilaza, 2002]. L'objectif des MCD est de déterminer la demande d'un actif naturel, ou d'un groupe d'actifs naturels, *à partir de la fréquentation d'un site ou d'un ensemble de site, et sur la base des dépenses de transport que les individus ont consenti à faire pour bénéficier des services (du bien être, de l'utilité) offerts par les actifs naturels spécifiques aux sites en question.* On suppose ainsi que l'individu manifeste une demande pour des actifs naturels présents dans un site par les dépenses de transport qu'il engage pour s'y rendre. Pour établir la fonction de demande des services fournis par l'actif naturel visé, on corrèle le taux de fréquentation du site (= la demande) et les coûts de

transport consentis par chaque visiteur (= indicateur de leur CAP). Il faut donc déterminer le modèle de comportement individuel qui explique le choix d'un site.

Il existe deux types de MCD, qui dépendent de l'orientation méthodologique choisie pour déterminer la fonction de demande d'actifs naturels. La première, appelée *la MCD par unité spatiale*, utilise les données concernant la provenance des individus en les agrégeant au sein d'unités spatiales telles que le département, la région, etc. Les coûts de déplacements des différents individus provenant d'une même unité spatiale sont ainsi pris en compte sous la forme de moyennes dans la détermination de la fonction de demande. La seconde, appelée *la MCD à utilité aléatoire*, conserve les données collectées au niveau de chaque individu pour être utilisées telles qu'elles dans la détermination de la fonction de demande.

### **8.3.2 Les Méthodes Directes, utilisant des marchés hypothétiques (Méthodes des préférences exprimées)**

#### **8.3.2.1 La Méthode d'Évaluation Contingente (MEC)**

##### **PRESENTATION**

Dans la méthode contingente, on élabore des scénarii hypothétiques (ou contingents) d'évolution de biens ou de services environnementaux, en qualité ou en disponibilité, que l'on soumet à un échantillon de la population visée pour demander directement à chaque individu son CAP compte tenu de ses contraintes budgétaires. En proposant d'une manière générale soit la non intervention publique suite à cette évolution, soit une action de préservation ou d'amélioration du bien environnemental qui doit être financé par la personne sondée, que ce soit par le biais de droits d'entrées (pour le cas des parcs), d'impôts locaux, etc., l'individu sondé est amené à estimer son CAP pour le maintien, la réduction ou le développement du bien ou du service environnemental considéré.

L'évaluation contingente est la méthode d'évaluation la plus fréquemment utilisée parmi les méthodes d'évaluation de biens et de services non marchands, car elle permet de considérer un large éventail de biens environnementaux (certains comme la biodiversité ne peuvent être associés à des biens marchands (ex : maison), ce que nécessite par exemple la MPH). *Cette méthode a de plus le mérite de pouvoir estimer les valeurs de non usage* (cf. Cadre 5), *ce que ne permettent pas les méthodes indirectes, ni aucune autre méthode*. En cela, cette méthode vise à évaluer la « désirabilité sociale » d'un changement de qualité ou de disponibilité de biens ou de services environnementaux, ou d'un projet s'y ramenant [Willinger, 1996].

##### **Les demandes de non usage**

La demande relative à la qualité ou à la disponibilité d'attributs environnementaux peut émaner d'agents économiques producteurs ou consommateurs. Dans le premier cas, l'usage associé à cette demande est productif. Dans ce second cas, les usages se divisent en i) usage récréatif (de loisir et touristique), ii) usage non récréatif (ex : bénéficier d'un paysage remarquable), et iii) en non usage. Dans la notion de non usage, un individu peut être motivé à financer la préservation de biens environnementaux « pour conserver la possibilité future de leur usage pour sa propre consommation (valeur d'option), pour la consommation de ses contemporains (valeur de consommation partagée) ou pour la consommation des générations futures (valeur de legs). Par ailleurs, certains individus sont prêts à financer des programmes de conservation par simple altruisme (valeur d'existence). » ([Rambonilaza, 2002], p.93). Notons que pour [Willinger, 1996], seule la valeur d'existence est réellement une valeur de non usage, les autres étant des valeurs d'usages « par procuration ». Par souci de simplification, nous ferons abstraction de cette dernière précision.

**Cadre 5 : Les demandes de non usage.**

## DEROULEMENT

Les scenarii hypothétiques d'évolution sont fondés sur trois points essentiels :

1. *La définition précise de l'actif naturel et du changement proposé par le scénario.*
2. *La définition du mode de paiement qui sera retenu* : nouvelle taxe prélevée par la commune, contribution à un fond d'intervention en matière de prévention, impôt local, ..., sur la base d'un montant forfaitaire, proportionnel, ...
3. *Le choix de l'indicateur approprié, le CAP ou le CAR (Consentement à recevoir).* Le CAR est utilisé par exemple lorsqu'il s'agit d'évaluer les indemnités qu'un agriculteur accepterait pour mener une agriculture raisonnée.

Pour obtenir le CAP des personnes sondées, le questionnaire peut :

- ✓ soit être du type « *enchères* », c'est-à-dire demander à l'intéressé s'il accepte de financer un programme donné de préservation par une contribution  $x$ , puis  $x+1$ , ..., jusqu'à ce que l'individu sondé refuse. Le dernier prix accepté est alors retenu comme indicateur de son CAP (méthode de l'expression directe et séquentielle [questions multiples]) ;
- ✓ soit demander le CAP par le biais de *questions ouvertes* (combien êtes-vous prêt à payer pour ...) (méthode de l'expression directe et statique [question unique]).
- ✓ soit demander son CAP à la manière d'un *référendum simple* (accepter-vous de payer tant d'argent ? oui / non). L'évaluation sera alors celle d'une espérance de CAP (méthode de l'expression indirecte et statique).
- ✓ soit enfin demander, par le biais de *questions fermées*, son CAP parmi un ensemble de montants proposés (méthode de l'expression indirecte et séquentielle) ;

L'hypothèse de comportement sous jacente à l'évaluation contingente est celle de la maximisation de l'utilité des consommateurs, sous contrainte budgétaire.

## LIMITES

Les principales faiblesses de cette méthode résident dans les biais associés aux attitudes des enquêtés, qui peuvent résulter :

- Soit d'une connaissance insuffisante, par l'individu enquêté, du bien environnemental visé par le questionnaire. Formaliser la valeur d'un tel bien, qui plus est dans un contexte de contrainte budgétaire, est un exercice difficile, d'autant plus lorsque les connaissances qui lui sont relatives manquent à la personne sondée. Une solution consiste à renseigner les individus sur le bien à évaluer avant de les interroger sur leur CAP, mais les incertitudes restent élevées, particulièrement dans le cas de la biodiversité.
- Soit du fait que la personne sondée pense qu'elle aura à financer effectivement un tel programme de préservation sur la base du prix qu'elle donnera. Elle aura alors tendance à sous-estimer son CAP (comportement du « passager clandestin » [*free rider*]).
- Soit de l'interférence de considérations philosophiques ou éthiques, qui feront du CAP fourni non plus un CAP relatif à l'intérêt que l'individu trouve à la préservation d'un bien environnemental, mais un CAP qui peut correspondre à un don global pour toutes les préoccupations environnementales. L'individu aura alors tendance à surestimer son CAP.

Définir avec précision le changement dans le niveau du bien/service considéré suscité par la politique d'évolution proposée, et transmettre ces informations aux enquêtés, constituent deux difficultés importantes d'application de cette méthode. Les biais ainsi introduits peuvent être réduits si un effort d'investissement accru est fait dans la création du questionnaire, dans les procédures d'enquêtes et dans le traitement statistique des résultats (par le biais d'outils économétriques plus sophistiqués), ainsi que par l'adoption de normes de questionnaire, comme par exemple la norme NOAA (cf. [Portney, 1994]). D'autres biais existent aussi, moins importants que ceux précédemment cités, comme :

- ✓ la technique de questionnement utilisé (les résultats obtenus par la méthode des enchères dépendent du montant initial fixé) ;
- ✓ le CAP peut être invariant avec la « taille » du bien évalué (*scope effect*) (CAP identique pour la préservation de 1 000 ou de 10 000 ha de forêt) ;
- ✓ les CAP accordés à une succession de biens dépendent de l'ordre de succession dans le questionnaire (effet de séquence d'agrégation) ;
- ✓ la valeur attribuée globalement à un groupe d'actifs peut être inférieure à la somme des valeurs révélées pour chacune des composantes de ce groupe d'actifs (effet de sous-additivité).
- ✓ Etc.

#### **8.4 Comment choisir la méthode à mettre en œuvre ?**

Deux critères sont importants pour savoir quelle méthode doit préférentiellement être mise en œuvre : la nature de l'externalité et les types de bénéfiques (inspiré de [Rambonilaza, 2002]).

##### ***8.4.1 La nature de l'externalité***

Il faut tout d'abord caractériser les externalités à évaluer. Or une externalité est étroitement liée au milieu naturel, à travers la ressource environnementale qui la suscite. Les canaux d'irrigation génèrent des externalités du fait de leur interaction avec le milieu environnant. L'existence d'une externalité est alors inaliénable à la préservation de la ressource environnementale (ou actif naturel) qui la génère. La qualité d'activités récréatives comme la pêche, la chasse, la promenade ou le cyclisme, ou d'autres biens non marchands comme par exemple la biodiversité, passe nécessairement par la préservation de l'actif naturel correspondant (la forêt, l'eau, une zone humide), ou, nous concernant, par la préservation de l'actif artificiel que représentent les canaux d'irrigation gravitaire.

C'est pourquoi les études d'évaluation de biens non marchands concernent généralement plus l'actif naturel supportant l'existence des externalités que sur les externalités elles-mêmes [Rambonilaza, 2002] : « Dans le cadre d'une évaluation économique des aménités, la valeur économique de ces dernières se confond ainsi avec le bénéfice de préservation d'une ressource environnementale donnée. » Le bénéfice de conservation des habitats, de la faune et de la flore, suscités par les canaux d'irrigation correspondra donc au bénéfice lié à la conservation des canaux gravitaires. La plupart du temps, on sera donc amené à considérer plus la préservation des actifs naturels et artificiels (canaux + eau) que, directement, la préservation des externalités que ces derniers génèrent.

#### 8.4.2 Les types de bénéfices

C'est la deuxième considération importante. Selon l'externalité, les bénéfices et les bénéficiaires peuvent être variés en genre et en nombre. On peut alors classer les externalités selon les bénéfices qu'elles procurent. Pour les usagers consommateurs, on distingue :

- Les externalités associées à des bénéfices/dommages d'usages récréatifs : les individus concernés sont les résidents du lieu où elles sont générées (cas des usages récréatifs non touristiques) et, dans le cas où ces activités récréatives génèrent du tourisme, les bénéficiaires sont aussi constitués des visiteurs.
- Les externalités associées à des bénéfices/dommages d'usages non récréatifs : (ex : bien être lié au paysage, aux cours d'eau, au patrimoine architectural, ...) les individus concernés ne sont que les résidents du lieu où elles sont générées.
- Les externalités associées à des bénéfices/dommages de non usage : (ex : la biodiversité) les individus concernés peuvent aussi bien être un groupe d'individus, qu'un pays, ou que la planète toute entière.

Pour les usagers producteurs :

- Les externalités associées à des bénéfices/dommages d'usages productifs : les individus concernés sont les producteurs en question.

Lorsque les bénéfices sont associés au non usage (ex : préservation de la biodiversité), les méthodes d'évaluation indirectes dans leur ensemble ne sont pas applicables car elles se basent sur l'étude des comportements révélés des bénéficiaires, or ces comportements ne sont ni observables (les bénéficiaires ne sont pas identifiables), ni révélables (il n'y a pas d'usage concret).

#### 8.5 Les méthodes préconisées dans le cadre des externalités de l'irrigation gravitaire

Nous basons notre analyse sur la typologie de bénéfices et de pertes énoncée ci-dessus, structurée autour des valeurs d'usages productifs / récréatifs / non récréatifs / de non usage et (qui fut également utilisée dans le cadre de l'évaluation des aménités rurales ; cf. [Rambonilaza, 2002]). Une externalité peut affecter plusieurs types d'usages. Le patrimoine architectural par exemple est une externalité liée à la présence des canaux gravitaires. Son existence engendre un surplus d'utilité lors d'une promenade (valeur d'usage récréatif). Mais également lorsque les monuments font partis du paysage offert à la vue des habitants (valeur d'usage non récréatif). C'est aussi un témoignage de l'histoire et de la culture française, qui définit en partie le territoire français et ses habitants, que ceux-ci habitent à proximité des canaux ou dans une région éloignée. Ils demeurent attachés à la préservation de ce patrimoine même s'il n'en ont pas l'usage (valeur de non usage), parce qu'ils lui accordent une valeur d'option, de legs ou d'existence. Le patrimoine architectural induit donc trois secteurs de bénéfices : usage récréatif, usage non récréatif et non usage.

Nous avons effectué ce découpage pour chacune des externalités rencontrées, que nous avons indiqué dans le

Tableau 12 accompagné des méthodes correspondantes d'évaluation des bénéfices/dommages de ces usages ou non usages des biens/services non marchands. Les méthodes d'évaluation ont été données dans deux cas de figure, la théorie et la pratique. Certaines méthodes sont en effet applicables aux externalités considérées de manière générale et théorique. Cependant, certaines particularités du terrain spécifique qui nous concerne (le système canal) peuvent rendre cette mise en application impossible dans la pratique, comme nous allons le voir maintenant en considérant les externalités une à une.

### ➤ La qualité du paysage lié à la présence des canaux en eau

#### *Usage non récréatif*

Les bénéfices ne concernent que les usages non récréatifs<sup>45</sup> (ex : la vue depuis une maison, depuis sa voiture en allant au travail, ...). Deux méthodes sont théoriquement possibles, la MCE et la MPH (la MCD ne peut être appliquée car il n'y a pas d'activité touristique liée au paysage des canaux d'irrigation qui soit aujourd'hui suffisamment développée).

La MPH semble très adaptée ici, mais un biais profond risque d'empêcher son application : le biais de colinéarité des variables. Apprécier la qualité des paysages liés à la présence des canaux nécessite un certain rapprochement des habitations avec ces derniers, ce qui signifie souvent pour ces habitations de faire partie du périmètre syndical de l'association d'irrigation gravitaire, et donc de devoir s'acquitter de la taxe syndicale (attachée à la propriété foncière de manière inaliénable jusqu'à la dissolution de l'association ...). Seules peu d'associations offrent en retour un service d'eau brute réellement adapté aux rurbains, permettant de justifier matériellement cette taxe. La réticence potentielle des individus à rentrer dans un tel système de taxe à vie, donc à habiter au sein d'un périmètre syndical, peut biaiser le marché immobilier en ne lui permettant pas de refléter parfaitement le souhait des individus de bénéficier d'un paysage composé des canaux d'irrigation gravitaire. ***L'existence de la taxe syndicale introduit un biais de colinéarité de variables risquant de rendre impossible l'application de la MPH dans la pratique*** (notons que ce biais viendra à l'encontre de la MPH dans de nombreux cas d'externalités).

Mais il est également probable que dans la pratique les individus ne prennent pas en compte cette taxe syndicale de manière négative au moment d'acheter une maison,

- soit parce qu'avoir accès à de l'eau brute est un argument vendeur pour les agences immobilières, et les individus ne sont pas forcément conscients, au moment de leur choix, de la rigidité du système de taxe syndicale, et de la non adaptation du service d'eau brute aux besoins et aux usages des propriétaires non agricoles ;
- soit, plus simplement, parce que l'association offre un service d'eau brute sous pression performant. A ce moment là, habiter près du canal et devoir payer la taxe syndicale sont deux points considérés comme positifs, puisque le second implique l'accès à un réseau d'eau brute performant. Ce dernier argument est très positif, et est même clairement mis en avant lorsqu'il s'agit de vendre des parcelles de lotissement, que ce soit en France [Montginoul et al., 2002a], ou aux Etats-Unis d'Amérique [Wilkins-Wells et al., 2003].

---

<sup>45</sup> Le surplus de bien être existant lors d'une activité récréative qui se passe d'un paysage de qualité lié aux canaux sera traité ci-dessous, dans la partie « activités récréatives sur les berges des canaux ».

C'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une étude préliminaire sous forme d'enquête auprès des propriétaires non agricoles du périmètre irrigué, pour savoir dans quelle mesure la taxe syndicale était, au moment de leur décision d'achat, un frein ou un moteur de leur décision, et pour savoir également quel était leur degré d'information sur i) le montant exact de la taxe syndicale, ii) la rigidité de cette taxe (et plus généralement du fonctionnement en association syndicale), iii) les conditions générales d'accès au réseau d'eau brute (contraintes d'accès, tour d'eau, à la demande, etc.), et enfin iv) les devoirs dont ils devaient s'acquitter envers l'association (ex : entretenir les fossés d'écoulement passant dans les propriétés). Si cette étude révèle que la taxe syndicale et le service d'eau brute associé sont des éléments perçus positivement au moment de l'achat par les individus, alors la MPH sera applicable, et recommandée, avec la MEC. Dans le cas contraire, elle sera inapplicable du fait des biais de colinéarité de variables introduits. Tout ceci restera valable pour toutes les externalités géographiquement associées au périmètre syndical.

**EN BREF :** Les bénéfices d'un paysage lié à la présence des canaux gravitaire pourront en théorie être évalués par la MEC et la MPH. En pratique, l'application de la MPH, peut-être plus intéressante pour cette externalité-ci, nécessitera au préalable de mener une étude sur la perception de la taxe syndicale par les individus au moment de l'achat d'une propriété sur le périmètre, dans le but d'évaluer le niveau de colinéarité existant entre les variables 'distance aux canaux' et 'adhésion à l'association syndicale'.

#### **Remarque**

*Une méthode alternative beaucoup plus simple et bien moins coûteuse peu être utilisée pour obtenir une évaluation très grossière des bénéfices d'un paysage lié à la présence des canaux. Il s'agit de considérer les canaux comme des rivières naturelles (du point de vue de l'usage non récréatif uniquement) – les canaux étant considérés par la population comme des éléments naturels du paysage – pour ensuite appliquer aux canaux des résultats d'études ayant porté sur l'évaluation monétaire des bénéfices liés à la présence d'une rivière. Garrod et Willis (1991) ont par exemple estimé que la présence d'une rivière était un facteur important, faisant croître la valeur d'une maison de 4.90% (tiré de [Michalland et al., 1998]). Une étude préalable reste nécessaire pour voir dans quelle mesure la population considère les canaux comme des éléments naturels du paysage, proches des rivières.*

#### ➤ **Le patrimoine architectural**

##### *Usage non récréatif*

De même, la jouissance d'un patrimoine architectural dans le cadre du paysage est liée à la proximité d'une habitation au canal, donc de son adhésion au périmètre syndical. Les méthodes possibles en théorie et en pratique sont la MEC et la MPH, à condition que cette dernière soit assortie d'une enquête préalable permettant de juger de l'importance du biais de colinéarité de variables émanant de la taxe syndicale.

##### *Usage récréatif*

La MPH peut être appliquée pour l'évaluation de la valeur d'usage récréatif du patrimoine architectural, mais elle risque de ne pas donner de résultats significatifs car le fait de pouvoir jouir de la présence d'un patrimoine architectural dans le cadre d'activités récréatives n'est pas forcément un argument pertinent dans le choix d'acheter une maison (du moins pour le patrimoine architectural associés aux canaux). De même, les MCD sont applicables en

théorie, mais dans la pratique les canaux et ce qui les entoure ne suscitent pas suffisamment d'activités touristiques pour que cette méthode puisse être appliquée, puisque les bénéficiaires sont principalement les résidents locaux (il n'y a donc pas de réels coûts de déplacement...). Nous préconiserons alors la MEC.

#### *Non usage*

Seule la MEC permet l'évaluation des valeurs de non usage.

### ➤ Les activités récréatives sur les berges des canaux

#### *Usage récréatif*

Pour les raisons que nous venons de voir, la MCD n'est pas applicable, seules la MEC et la MPH le sont, cette dernière devant être assortie d'une enquête préalable pour la même raison.

Les bénéfices d'usages récréatifs sur les berges ou aux alentours des canaux, tels que la pêche, la chasse, la randonnée, etc., constituent une des évaluations monétaires les plus importantes à réaliser. Or les évaluations économiques des bénéfices associés à la chasse et à la pêche par la MEC peuvent être considérés comme les plus fiables [Rambonilaza, 2002]. Qu'ils s'agissent des chasseurs ou des pêcheurs, ils sont d'une part familiarisés avec l'objet de l'évaluation, ainsi qu'avec des scénarii hypothétiques d'action publique qui peuvent être proposés lors de l'évaluation contingente (ex : contrat de rivière). D'autre part, ces individus ont moins de difficultés à exprimer leur CAP du fait que leur activité s'ancre déjà dans un marché monétaire établi, celui des permis de pêche ou de chasse. L'évaluation peut par exemple se baser sur le prix de ce permis, en les questionnant sur la hausse du prix du permis qu'ils sont prêts à supporter pour bénéficier de l'amélioration en qualité ou en disponibilité d'un actif naturel particulier (ex : restitutions en rivière). Les bénéfices estimés peuvent alors être intégrés dans une ACB classique concernant l'opportunité de mettre en place un programme de gestion de la ressource entre eux et les ASA.

### ➤ Le dépôt des résidus de curage et de faucardage ...

... sur les berges des canaux

#### *Usage récréatif*

Les dépôts affectent la qualité des usages récréatifs, qu'ils soient liés à la pêche, à la promenade, etc.

#### *Usage non récréatif*

Les dépôts affectent également la qualité du paysage (berges encombrées), et sont des nuisances pour les riverains.

... dans le lit des canaux

#### *Usage productif*

Les dépôts dans le lit des canaux sont une charge polluante supplémentaire dans l'hydrosystème de la rivière dans laquelle sont déchargées les eaux d'irrigation. Cela affecte les usages productifs qui nécessitent de prélever une eau de bonne qualité (ex : AEP).

### *Usage récréatif*

La pollution engendrée diminue la qualité de la ressource, qui est le principal centre d'intérêt d'activités récréatives telles que la pêche, le canoë kayak, etc. Ce dommage ne peut être évalué que par la MEC (CAP ou CAR).

### *Non usage*

Des dommages de non usage sont également engendrés (le fait de savoir les rivières polluées), desquels seule la MEC permet l'évaluation. Mais cette valeur de non usage risque fort d'apparaître dérisoire ou impossible à quantifier de manière fiable dans le cadre d'un questionnaire. Aucune méthode n'est ici préconisée.

### **Méthode d'évaluation préconisée pour l'usage productif :**

Concernant l'usage productif, une évaluation monétaire des dommages causés peut être menée par la méthode de coûts de protection (ex : coûts de dépollution induits pour l'AEP).

### **Méthode d'évaluation globale préconisée pour tous les autres usages :**

La méthode d'évaluation globale préconisée, pour évaluer l'ensemble des dommages aux usages autres que productifs, liés aux dépôts de résidus de curage et de faucardage sur les berges et dans le lit des canaux, est la MEC, basée sur le CAP des individus pour voir ces gênes disparaître *et* sur le CAR de l'ASA pour que soient ramassés ces résidus. En effet, dans une MEC standard, le CAP des individus sera faussé du fait que les individus manquent d'information sur ces gênes (causes, coûts pour l'association, conséquences en terme de pollution, ...). Il leur sera donc difficile d'exprimer un prix pour les faire disparaître. On préconisera d'utiliser une MEC, où le CAP des individus sera demandé en référence à une valeur seuil égale au CAR de l'ASA pour le ramassage de ces résidus, ou la substitution du désherbage chimique. Le questionnaire sera soit du type « enchères » en partant d'un montant égal au CAR, soit du type *référendum simple* (accepter-vous de payer tant d'argent (égal au CAR de l'association) ? oui / non).

Le CAR de l'association sera également obtenu par une MEC auprès de l'association, et le résultat sera considéré comme fiable puisque cette dernière a une très bonne connaissance des dépenses nécessaires pour récupérer ces dépôts afin qu'ils ne constituent plus une gêne (mis à part si la relation d'agence créée par la MCE est tirée à partie par l'association, auquel cas il faudra prévoir un mécanisme de contrôle [ex : revue de la littérature sur le montant moyen de ces coûts de ramassage]).<sup>46</sup>

#### ➤ La biodiversité (habitats, faune, flore) spécifique aux canaux

La biodiversité est l'une des deux composantes du patrimoine environnemental créé par l'action des canaux. La seconde est la végétation spontanée (de court terme) et la végétation pérenne, générée par une présence d'eau séculaire dans les territoires. Cette seconde composante doit naturellement être regroupée dans la catégorie du paysage lié à la présence des canaux, et nous ne considérerons ici que la biodiversité, qui n'a de valeur que vis-à-vis du non usage.

---

<sup>46</sup> Cette relation d'agence risque d'apparaître dans le cadre des pratiques de désherbage chimique des berges et d'éradication des algues par des produits à base de cuivre, vis-à-vis desquelles les gestionnaires d'ASA restent généralement discrets et pour lesquelles la littérature reste quasi-inexistante.

### *Non usage*

La biodiversité ne suscitant que des bénéfices de non usage, elle sera évaluée par la MEC. Cependant son évaluation va se heurter au manque d'information des individus sondés, qui ne pourront donner une estimation fiable de leur CAP. Si une réponse à ce problème consiste à les renseigner sur le rôle et l'importance de la biodiversité, les incertitudes associées aux résultats demeurent très élevées [Nunes et al., 2001]. ***Les outils aujourd'hui disponibles ne nous permettent donc pas d'évaluer de manière fiable le bénéfice induit par la biodiversité (générée par les canaux d'irrigation ou non)***. Deux alternatives s'offrent alors. On peut associer les bénéfices de la préservation de la biodiversité aux bénéfices de préservation d'un habitat particulier (ici les canaux d'irrigation), d'un écosystème comme les zones humides<sup>47</sup>, ou encore d'une espèce menacée d'extinction (ex : la Cistude dans le cas des canaux d'irrigation de Camargue), ce qui rendra l'étude plus facile à mener lorsqu'on s'adresse au grand public [Rambonilaza, 2002]. On peut également replacer ces bénéfices dans le cadre de mesures agri-environnementales (CTE) ou de la directive habitat (Natura 2000), qui en permettent la rétribution. Si cela paraît possible en théorie, dans la pratique les mesures agri-environnementales, du type CTE, sont des mesures individuelles destinées à chaque agriculteur, et non des mesures qui pourraient être appliquées de manière globale dans le cadre d'un périmètre collectif. De plus, les canaux, éléments artificiels, sont rarement des sites prioritaires vis-à-vis de mesures environnementales.

### ➤ La réalimentation de la nappe phréatique depuis le système canal

#### *Usage productif*

La réalimentation de la nappe est une externalité positive permettant d'accroître la disponibilité de la ressource pour les usages productifs industriels (forages industriels, AEP) et agricoles (forages individuels).<sup>48</sup>

L'importance monétaire du bénéfice peut être évaluée par la méthode des coûts de remplacement. Le bénéfice est moindre pour un agriculteur ayant abandonné les services d'une ASA pour une irrigation individuelle, que pour une collectivité ayant naturellement intégré dans ses prévisions d'exploitation les volumes réalimentés depuis le système canal. Le coût de remplacement pour le premier correspond schématiquement à la somme des taxes syndicale et d'arrosage, à laquelle s'ajoute les pertes provenant d'un amortissement potentiellement inachevé des équipements individuels de pompage. Pour le second, ce même coût correspond schématiquement à la somme des coûts de mobilisation et d'adduction d'une ressource alternative, et de fonctionnement sous optimal d'installations devenus surdimensionnées. Il faut de plus intégrer à ce calcul les coûts d'opportunité, cependant déterminer l'importance du bénéfice nécessite au préalable de connaître les volumes réalimentant la nappe depuis le système canal.

#### *Usage non récréatif*

La réalimentation de la nappe bénéficie également aux forages dont la finalité n'est pas la production, mais la consommation, dans le cadre d'usages non récréatifs. Ces bénéficiaires sont principalement les usagers domestiques possédant un forage individuel. Pour appliquer la MPH sur cette externalité, et pour cet usage, il faudrait effectuer une étude préalable pour

---

<sup>47</sup> Il n'existe aucune évaluation des bénéfices de préservation de la biodiversité liée à l'agriculture [Rambonilaza, 2002]. Il peut être plus facile de ne s'intéresser qu'aux canaux, et non au système canal dans sa totalité pour évaluer ce bénéfice.

<sup>48</sup> Remarque : les usages productifs peuvent aussi manifester une volonté de non usage, dans la valeur d'option que peut avoir une nappe alternative (sécurisation de la ressource, en cas de pollution accidentelle par exemple).

vérifier l'hypothèse selon laquelle la présence d'une nappe sous jacente est un argument qui motive l'achat d'une maison dans le but d'exploiter l'eau brute pour des usages d'agrément. Cette hypothèse est probante.

La nappe s'étendant sur une zone souvent bien plus vaste que le périmètre syndical, de nombreux usagers domestiques de la sorte peuvent bénéficier de cette réalimentation sans être inscrits dans l'association, ce qui limite le problème de colinéarité de variables de la MPH vis-à-vis de la taxe syndicale (l'étude reste cependant nécessaire). Rappelons cependant que la définition de la zone d'étude doit répondre à un critère strict pour la MPH : être suffisamment large pour refléter les variations d'attributs environnementaux sélectionnés, mais également suffisamment restreinte pour que le marché immobilier soit unique et puisse être considéré comme homogène. Or la réalimentation de la nappe se répercute à l'intérieur mais surtout à l'extérieur du périmètre irrigué (pas en terme de hauteur maximale de remontée de nappe, mais de nombres d'usagers de la nappe). La zone d'étude du marché immobilier devra donc considérer des zones hors périmètre syndical, en plus du strict périmètre syndical qui possède des particularités influant spécifiquement dans le choix d'achat d'une maison. Le marché immobilier ne sera donc pas homogène. Les biais introduits limiteront la fiabilité des résultats obtenus par la MPH.

Nous préconisons donc ici la MEC (la plus adaptée), ou la MPH à condition i) qu'une étude soit menée pour affirmer ou infirmer l'hypothèse selon laquelle la présence d'une nappe permettant d'exploiter l'eau brute est un facteur entrant en compte dans l'achat d'une maison ; et ii) que les biais provenant de la non homogénéité du marché immobilier soient pris en compte, et si possible limités.

#### *Non usage*

Des individus peuvent être attachés à savoir la nappe phréatique suffisamment renouvelée, soit parce que cela signifie l'absence de pénurie dans un futur proche, soit parce qu'ils souhaitent l'utiliser dans le futur (valeur d'option). Cela correspond à des aspects quantitatifs et non qualitatifs, pour lesquels les ménages sont plus capables d'en évaluer l'évolution. La MEC semble dès lors bien adaptée.

#### ➤ La pollution agricole diffuse

##### *Usage productif*

On utilisera la méthode des coûts de protection (ex : nécessité de construire une station de nitrification/dénitrification pour potabiliser l'eau prélevée polluée en nitrates par l'agriculture).

##### *Usage non récréatif et non usage*

Les effets sont similaires à ceux de la réalimentation de nappe. Ils concernent les mêmes usagers, mais d'un point de vue qualitatif et négatif, et non quantitatif et positif. Les méthodes d'évaluation des pertes d'usage non récréatif sont la MPH et la MEC. Une nappe polluée empêchera l'utilisation d'un forage individuel, même existant et valorisé par une réalimentation de la nappe, ce qui dépréciera la valeur du bien immobilier concerné (dans l'hypothèse où la présence d'une nappe exploitable pour les usages d'agrément influe sur la décision d'achat). Notons cependant que l'évaluation des effets de la pollution est une évaluation de nature qualitative et non quantitative, ce qui la rend plus difficile pour les ménages. Que ce soit par la MPH ou la MEC, cette appréciation sera soumise au phénomène de seuil : ce n'est qu'à partir d'un certain seuil (ex : eau devenant non potable) que les

individus exprimeront une préférence vis-à-vis de la pollution diffuse. Les méthodes d'évaluation existantes basées sur les préférences individuelles ne sont donc pas réellement en mesure de fournir une évaluation fiable et non biaisée des dommages causés par la pollution agricole diffuse, mais seulement un ordre de grandeur, puisque la variable « pollution diffuse » ne pourra être prise en compte dans les modèles d'une manière continue (ou même discrète), mais seulement d'une manière muette (tout ou rien). Ce constat est le même qu'il s'agisse de l'usage non récréatif ou du non usage, pour lequel seule la MEC est applicable. A l'instar de la biodiversité, il n'est pas dit qu'une information préalable des ménages puisse gommer ce biais. Cette pollution est en effet invisible et diffuse, donc d'autant moins sujet à demeurer dans le ressenti des individus. Une solution pourrait être de guider les individus dans l'expression de leur CAP à l'aide de la valeur du CAR des agriculteurs pour réduire la part d'intrants utilisés (agriculture raisonnée par exemple).

Une évaluation contingente a cependant été menée pour conduire l'évaluation monétaire de la valeur de la préservation de la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère Alsacien [*Stenger et al.*, 1995]. Elle montre que :

- l'exposition passée à une pollution a une influence positive sur le CAP des consommateurs. Ainsi, un individu habitant sur une partie polluée de la nappe exprime un CAP plus important qu'un individu qui bénéficie d'une eau de bonne qualité ;
- le CAP associé aux valeurs d'usage est plus important que le CAP associé aux valeurs de non usage ;
- le CAP a été estimé à 715 FF/an (soit 110 €/an) en 1995.

En bref, l'évaluation monétaire des dommages associés aux usages non récréatifs, occasionnés par la pollution agricole diffuse peut se faire par la MEC, ou encore par la MPH si les mêmes précautions sont prises que pour la réalimentation de la nappe, en prenant de plus garde au biais introduit par le phénomène de seuil lié à la perception de la pollution par les ménages. Pour le non usage, on utilisera une MEC.

### ➤ Les prélèvements et les restitutions en rivière

#### *Usage productif*

Il s'agit des usages prélevant ou détournant la ressource à des fins de production (cf. usage productif des dépôts des résidus de curage et de faucardage dans le lit des canaux). Ce n'est pas un bénéfice/dommage lié à la qualité de la ressource mais à sa disponibilité. On utilisera la méthode des coûts de remplacement.

#### *Usage récréatif*

Les types d'usages récréatifs associés à ces externalités sont plus larges que ceux observés dans les canaux (pêche, promenade, ...), puisque l'on compte des activités spécifiques aux cours d'eau comme le canoë kayak par exemple.

On peut en théorie utiliser la MDC, la MPH et la MEC. En pratique, la MCD n'est pas utilisable car ces usagers sont difficilement localisables. La méthode la plus appropriée sera la MEC. La MPH est elle aussi possible sous conditions. On pourra procéder à cette évaluation dans le cadre de l'évaluation des bénéfices associés aux activités récréatives sur les berges et aux alentours des canaux (pêche, promenade, chasse, etc.), en incluant à l'évaluation les activités récréatives spécifiques aux cours d'eau.

### *Usage non récréatif*

Le soutien d'étiage permet d'éviter d'atteindre ou de se rapprocher d'assecs, ce qui contribue à la qualité du paysage. A la différence des dépôts de résidus qui n'affectent que les canaux, la restitution en rivière concerne des bénéfices sur des zones qui peuvent être extérieures au périmètre syndical, ce qui rend possible l'utilisation de la MPH<sup>49</sup>, en plus de la MEC, mais sous les conditions décrites dans la partie relative à la réalimentation de nappe (enquête + limiter le biais introduit par l'hétérogénéité de la zone d'étude).

### *Non usage*

Similaire au non usage de la réalimentation de nappe. MEC.

## ➤ Assainissement pluvial

### *Usage productif*

Lorsque l'assainissement pluvial se fait sans débordement, il s'agit d'un bénéfice vis-à-vis des communes, pour lesquelles l'assainissement pluvial constitue un acte de production (assainir la commune). Lorsque cela engendre des débordements sur des zones habitées, ces dernières sont amenées à prendre des dispositions individuelles de protection. On utilisera alors la méthode des coûts de protection.

## ➤ Lutte contre les inondations

### *Usage productif*

La lutte contre les inondations constitue également un acte de production pour les communes. Il s'agit tantôt d'un bénéfice, tantôt d'un dommage, selon la réaction du système canal face à une crue donnée. Lorsqu'il s'agit d'un bénéfice, c'est-à-dire que le système canal permet effectivement une protection, on utilisera la méthode des coûts de remplacement, les coûts de remplacement se calculant sur la base de la période de retour maximale pour laquelle le système canal assure cette protection. Lorsqu'il s'agit d'un dommage, c'est-à-dire que les canaux aggravent la situation, les habitations ne peuvent généralement pas prendre de disposition individuelle pour éviter l'inondation. On utilisera alors la méthode de monétarisation des dommages physiques.

## ➤ Lutte contre les feux de forêt

### *Usage productif*

La lutte contre les feux de forêt est également un acte de production pour les communes (sécuriser la commune), et pour la collectivité toute entière d'une manière générale (ce qui justifie la centralisation des financements au niveau de l'Etat). Le problème posé ici est qu'il n'est pas possible de substituer cette protection, que ce soit à l'échelle globale de la collectivité, ou à l'échelle individuelle des ménages. On ne peut donc utiliser les méthodes des coûts de remplacement et des coûts de protection. On cherchera à utiliser une méthode alternative évaluant les coûts évités grâce au rôle protecteur du système canal.

---

<sup>49</sup> Contrairement à la réalimentation de la nappe, le phénomène de restitution (ou de prélèvements) est observé de manière privilégiée en dehors du périmètre syndical.

➤ Lutte contre la salinisation

*Usage productif*

La lutte contre la remontée du biseau salé est un bénéfice pour des agriculteurs, leur permettant de maintenir leur production, mais aussi pour les communes, attachées à la santé économique de leur secteur agricole. Pour évaluer les dommages causés par les remontées de sel sur les terres agricoles, que ce soit suite à des pompages individuels trop importants, ou à un arrêt des irrigations qui permettraient d'ordinaire d'équilibrer le niveau de la nappe, on peut utiliser deux méthodes.

Une première méthode possible est la méthode de monétarisation des dommages physiques. Elle est ici facile à appliquer puisque les effets de la pollution saline sur les parcelles agricoles sont bien identifiés (on est en mesure de connaître la relation liant le taux de salinité du sol au rendement des cultures), et qu'on peut mesurer les dommages physiques à travers la dégradation des récoltes et les pertes de revenu consécutives.

Une seconde méthode possible est la méthode des coûts de remplacement. Il est en effet envisageable de remplacer la réalimentation de la nappe depuis le système canal par une recharge artificielle de la nappe phréatique (type puits d'infiltration EDF) afin de prévenir l'intrusion de l'eau de mer. Cette idée fût notamment développée sur le littoral libanais, où sont concentrées les productions d'agrumes (cf. [Imad, 2003]).

➤ Lutte contre les affaissements de terrain (fortes pentes + tassement)

La lutte contre les affaissements de terrain, provenant de conditions de fortes pentes, ou de tassements de terrain sur une nappe surexploitée, constitue un acte de production pour les communes et la collectivité (sécuriser les biens et les personnes). Nous nous situons dans un cas similaire à la lutte contre les feux de forêt, où il n'existe pas de moyen de substituer le service rendu par les canaux. On cherchera donc à évaluer les coûts évités. On peut également utiliser la MPH, les risques d'affaissement de terrain pouvant jouer sur le prix des maisons.

➤ Externalités liées à l'accès à un service d'eau brute pour les rurbains

Les effets induits associés à un accès à un service d'eau brut adapté pour les rurbains concernent principalement les communes (ex : écrêtement des pics de consommation en eau potable grâce au réseau d'eau brute). Tous les services non marchands rendus par l'accès à un réseau d'eau brute peuvent être évalués par la méthode des coûts de remplacement (ex : coûts d'une installation de remplacement, permettant d'écrêter de la même manière les pics de consommation d'eau potable).

➤ Le prélèvement individuel agricole en nappe

*Usage productif*

Le prélèvement individuel agricole en nappe n'est pas une externalité. Nous avons cependant choisi de le présenter ici car il doit être pris en compte lors d'une ACB globale associée au projet de prise en compte des externalités, puisque par exemple une contribution des communes pour les externalités produites ferait baisser la taxe syndicale et d'arrosage, ce qui inciterait certains agriculteurs individuels à rejoindre le périmètre collectif qu'ils ont quitté. On utilisera ici la méthode des coûts de remplacement, en se basant sur le CAR des

agriculteurs irriguant en individuel pour rejoindre de nouveau le réseau collectif. Le CAR sera composé d'une part d'un coût objectif (la différence entre le coût de l'irrigation individuelle et collective [taxes syndicale et d'arrosage]), et d'autre part d'un coût subjectif, censé dédommager l'agriculteur pour les contraintes de l'irrigation collective qu'il subira de nouveau. Cette part subjective reste néanmoins malsaine, surtout vis-à-vis des agriculteurs ayant choisi de ne pas abandonner l'outil de production collectif, et ainsi de se plier aux règles collectives, nécessaires à la gestion de ressources limitées en accès libre.

#### *Non usage*

Situation symétrique au non usage de la réalimentation de nappe (aspect quantitatif) combiné avec la pollution diffuse de la nappe (aspect qualitatif). MCE.

### **8.5.1 Conclusion**

Le Tableau 12 offre un récapitulatif des méthodes préconisées pour chaque externalité.

Externalité non marchande		Type de bénéfiques / pertes	Méthode d'évaluation des bénéfiques / dommage, possible en théorie	Méthode d'évaluation des bénéfiques / dommage, préconisée en pratique
<b>Paysage lié à la présence des canaux en eau</b>		Usage non récréatif	MPH, MEC	MEC, MPH (si enquête préalable)
<b>Patrimoine architectural</b>		Usage non récréatif	MPH, MEC	MEC, MPH (si enquête préalable)
		Usage récréatif	MPH, MEC, MCD	MEC
		Non usage	MEC	MEC
<b>Canaux support d'activités récréatives</b>		Usage récréatif	MPH, MEC, MCD	MEC (le plus adapté), MPH (si enquête préalable)
<b>Dépôts de résidus de curage et de faucardage ...</b>	<b>... dans le lit des canaux</b>	Usage productif	Méthode des coûts de protection	Méthode des coûts de protection
		Usage récréatif	MPH, MEC	MEC (questionnant le CAP des individus sur la base du CAR de l'association, par technique d'enchères ou par référendum simple)
		Usage non récréatif	MPH, MEC	
	<b>... sur les berges des canaux</b>	Usage récréatif	MCD, MEC	Aucune
		Non usage	MEC	
<b>Biodiversité: habitats, faune, flore</b>		Non usage	MEC, mesures agri-environnementales	MEC
<b>Réalimentation de la nappe</b>		Usage productif (forages industriels et individuels agricoles)	Méthode des coûts de remplacement	Méthode des coûts de remplacement
		Usage non récréatif (forage individuel pour habitants)	MPH, MEC	MEC (surtout), MPH (si enquête préalable)
		Non usage	MEC	MEC

<b>Pollution agricole diffuse de la nappe</b>	Usage productif (forages industriels et individuels agricoles)	Méthode des coûts de protection	Méthode des coûts de protection
	Usage non récréatif (forage individuel pour habitants)	MPH, MEC	MEC (surtout), MPH (si enquête préalable)
	Non usage	MEC	MEC
<b>Prélèvements et Restitution en rivière</b>	Usage productif	Méthode des coûts de remplacement	Méthode des coûts de remplacement
	Usage récréatif	MCD, MPH, MEC	MEC (le plus adapté), MPH (si enquête préalable)
	Usage non récréatif	MPH, MEC	MEC (surtout), MPH (si enquête préalable)
	Non usage	MEC	MEC
<b>Assainissement pluvial</b>	Usage productif (commune)	Méthode des coûts de remplacement lorsque l'assainissement pluvial se fait sans débordements Méthode des coûts de protection dans le cas contraire	Méthode des coûts de remplacement lorsque l'assainissement pluvial se fait sans débordements Méthode des coûts de protection dans le cas contraire
<b>Lutte contre les inondations</b>	Usage productif (commune)	Méthode des coûts de remplacement lorsque les canaux offrent une protection contre les crues Méthode de monétarisation des dommages physiques dans le cas contraire	Méthode des coûts de remplacement lorsque les canaux offrent une protection contre les crues Méthode de monétarisation des dommages physiques dans le cas contraire
<b>Lutte contre les feux de forêt</b>	Usage productif (commune)	Méthode des coûts évités	Méthode des coûts évités
<b>Lutte contre la salinisation des sols</b>	Usage productif (agriculteur + commune)	Méthode de monétarisation des dommages physiques, Méthode des coûts de remplacement	Méthode de monétarisation des dommages physiques, Méthode des coûts de remplacement
<b>Lutte contre les affaissements de terrain</b> (fortes pentes + tassement)	Usage productif (agriculteur + commune)	MPH, Méthode des coûts évités	MPH, Méthode des coûts évités
<b>Externalités liées à l'accès à un service d'eau brute</b>	Usage productif (commune)	Méthode des coûts de remplacement	Méthode des coûts de remplacement
<b>Prélèvement individuel agricole en nappe</b> (considéré pour l'ACB finale)	Usage productif	Méthode des coûts de remplacement, utilisant le CAR des agriculteurs pour revenir au réseau collectif	Méthode des coûts de remplacement, utilisant le CAR des agriculteurs pour réutiliser le réseau collectif
	Non usage	MEC	MEC

**Tableau 12 : Tableau de synthèse des méthodes préconisées pour l'évaluation monétaire des externalités de l'irrigation gravitaire**

Il ressort du Tableau 12 qu'un nombre assez important d'externalités et d'usages associés peuvent être évalués par une MEC, et que parmi ceux-ci, beaucoup peuvent être également évalués par la MPH. Si la MEC semble la plus adaptée pour la grande majorité des externalités, c'est à titre individuel, c'est-à-dire pour chacune des externalités. Mais il n'est pas possible de mener une évaluation contingente unique pour l'ensemble des externalités susceptibles d'être évaluées de cette manière.

En effet, du fait du nombre important d'externalités pour lesquelles les individus seront amenés à exprimer leur CAP, on serait confronté à un biais important de cette méthode : l'effet de sous additivité (dont ne souffre pas la MPH, qui se base sur les préférences révélées). Lors d'une telle évaluation contingente, la valeur attribuée globalement à un groupe d'actifs peut être inférieure à la somme des valeurs révélées pour chacune des composantes de ce groupe d'actifs. Schématiquement, un individu sondé n'est pas en mesure de prévoir au début du questionnaire la façon dont il va gérer son « porte-monnaie de CAP » pour la grande quantité d'attributs pour lesquels il aura à exprimer son CAP. A cela s'ajoute d'autres problèmes qui biaiseront également l'évaluation : manque d'information sur l'attribut à évaluer, manque d'objectivité, ...

*L'utilisation de la méthode contingente, si elle reste indispensable pour évaluer les valeurs de non usage, devra donc être utilisée avec le plus de parcimonie possible, et les externalités devront au possible être évaluées par la MPH. Il faudra donc décider au cas par cas des méthodes à employer pour estimer les externalités rencontrées, et il sera toujours possible qu'une externalité soit évaluée à la fois par la MEC et la MPH, afin de rendre l'évaluation plus fiable. Rappelons que la MPH devra au préalable être assortie des études décrites plus haut, nécessaires à la fiabilité des résultats trouvés. A ces études, suivra l'élaboration d'un questionnaire et d'une analyse économétrique précis, permettant de limiter au maximum les biais rencontrés.*

Une méthode d'évaluation encore jeune et à l'essai, mais qui pourrait être particulièrement adaptée aux externalités et au type de zones d'études rencontré ici, est l'évaluation contingente par la méthode des programmes (*choice experiment*). Dans la méthode des programmes, on propose aux individus de choisir un programme d'action parmi plusieurs possibles. Chaque programme sera une combinaison unique d'externalités positives/négatives, classées par ordre de priorité, avec des niveaux de bénéfices/dommages définis pour chaque externalité, et spécifiques à chacun des programmes. On informe ensuite l'individu sur les coûts de chaque programme et le niveau de bénéfices/dommages correspondant à chaque externalité. L'individu classe enfin les programmes entre eux selon ses préférences. On limitera le panel de choix possibles à 3 ou 4 programmes, qui devront être élaborés avec le plus grand soin, et être validés par les acteurs en question (associations d'irrigants et communes souhaitant contractualiser) (cf. Cadre 6). Cette méthode permet de révéler les préférences individuelles par le choix des attributs, et non par des variables socio-économiques [revenus, age, sexe, ...] comme c'est le cas pour les autres méthodes d'évaluation indirecte.

### **La mise en place d'une enquête par la méthode des programmes**

[Rambonilaza, 2002], p.101.

« Pour mettre en place une enquête par la méthode des programmes, un travail minutieux est nécessaire pour déterminer les attributs importants, ainsi que les niveaux de qualité à atteindre pour chaque attribut. L'économiste doit travailler avec d'autres experts (écologue, architecte, forestier) pour définir ces attributs. Des enquêtes préliminaires réunissant différents représentants des parties prenantes (*stakeholders*) de la ressource en jeu (*focus group*) est une étape préalable et nécessaire pour affiner le questionnaire lors d'une enquête contingente. Elle permet d'une part de cerner la population ou plus précisément la catégorie de population qui est concernée par la ressource en jeu. Elle permet également de vérifier si les individus ont la même perception de cette ressource telle qu'ils prononcent une valeur sur un même bien. Enfin, elle permet de déterminer parmi les attributs scientifiques d'une ressource ceux que perçoivent les « gens ordinaires » sujets de l'enquête. »

#### **Cadre 6 : La mise en place d'une enquête par la méthode des programmes**

La méthode des programmes est cependant très coûteuse, ce qui peut justifier le recours à une autre méthode, alternative : celle du « transfert de bénéfices ». Il s'agit de définir le bénéfice apporté par une politique concernant ces externalités, à partir des résultats obtenus lors d'évaluations similaires dans d'autres régions (même externalité, et même changement dans le bénéfice/dommage attaché à cette externalité). On peut par exemple imaginer que les résultats d'une étude de valorisation des externalités effectuée pour le compte d'une grande ASA, qui a les moyens financiers nécessaires à l'élaboration d'une étude poussée et fiable, soient transférés au cas d'une association plus petite, sans les moyens financiers suffisants, mais qui souhaite arriver au même résultat. Cette méthode de transfert des bénéfices est cependant encore peu utilisée.

Maintenant que nous avons vu dans quelle mesure il était possible de quantifier le bien/service (cf. quantification des externalités) et d'évaluer monétairement ce bien/service, nous allons essayer de révéler dans quel cadre – économique, juridique et gestionnaire – peut être menée une gestion des externalités qui soient orientée dans une optique de service, principalement compte tenu des difficultés posées par la rétribution de ces externalités.



## 9 RETRIBUER LES « SERVICES D'EXTERNALITES »

La valorisation économique des externalités ne peut se faire que dans un cadre juridique et économique définit autour de ces biens et de ces services environnementaux. La rétribution par la collectivité des externalités produites nécessite que ces dernières relèvent de l'intérêt général, qui est indissociable des notions de biens et de services publics. C'est dans ce cadre, à la fois juridique, économique et gestionnaire, qu'il faut analyser la possibilité d'une telle rétribution.

### 9.1 Quelles informations retire-t-on d'une considération économique du problème ?

#### 9.1.1 *Les externalités confrontées aux notions de biens et de services publics*

La notion de service public, que nous confrontons aux services qui seraient potentiellement rendus par les ASA, est indissociable de la notion de monopôle : « *En matière économique, le service public se nourrit d'une double tradition : celle de monopole d'un côté, celle des biens publics de l'autre. De plus, la notion de service public est liée aux effets très forts des activités concernées sur la croissance économique, l'environnement ou la cohésion sociale* » ([Halaunbrenner, 1996], cité par [Garin et al., 2001], p.17). Quand à la notion de bien public, elle est caractérisée à travers deux critères :

- ❖ *L'absence de rivalité* sur le bien : la consommation du bien par un individu n'entre pas en rivalité avec celle d'un autre individu ;
- ❖ *L'absence d'exclusion* : aucun individu n'est exclu de la consommation de ce bien, parce que son exclusion implique un coût soit nul, soit prohibitif.

Mais la plupart des externalités ne sont pas des *biens publics purs*, même si les critères de non-rivalité et de non-exclusion sont vérifiés, du fait qu'elles sont soumises au phénomène de congestion. C'est par exemple le cas des restitutions d'eau en rivière, de la réalimentation de la nappe, de l'assainissement pluvial, de la lutte contre les inondations, ... Bien qu'un nombre croissant de bénéficiaires de ces externalités ne crée ni exclusion, ni rivalité (ex : la lutte contre les inondations ou la recharge de nappe sont des bénéfices accessibles pour tous dans les mêmes conditions), la congestion des consommateurs altèrera qualitativement l'externalité en question. Par exemple, l'augmentation des bénéficiaires d'un ouvrage de lutte contre les inondations s'accompagne d'une augmentation des surfaces imperméabilisées, ce qui va générer une augmentation des inondations, et une plus grande vulnérabilité face aux inondations. De même pour la réalimentation de la nappe, l'augmentation des bénéficiaires sera à l'origine d'une surexploitation de cette ressource en accès libre, ce qui altèrera la qualité de son usage, sans pour autant créer de rivalité et sans que l'exclusion ne soit possible. En cela, un nombre important d'externalités dont il est ici question ne porte pas sur des *biens publics purs*. Lorsque ce phénomène de congestion se réalise, cela rend alors impossible l'application de la règle de gestion des biens publics : la règle du bénéficiaire-payeur [Rambonilaza, 2002]. Cependant, toutes les externalités ne sont pas soumises au phénomène de congestion :

- *soit parce que la congestion est impossible*. Prenons par exemple l'aménité « lutte contre la salinisation des sols par la maîtrise de la remontée du biseau salé », consécutive au transfert d'eau de la surface en profondeur par le biais de l'irrigation gravitaire. Les consommateurs de cette aménité sont les bénéficiaires directs des

activités de production agricole sur ces terres (les agriculteurs). La congestion de ces consommateurs ne peut altérer le bien être qui ressort de cette externalité, puisque plus il y a d'agriculteurs irrigants, plus l'infiltration d'eau douce sera importante, et plus le contrôle de la remontée du biseau salé sera effectif ;

- *soit parce que la congestion ne peut atteindre un niveau tel que l'usage de l'externalité soit significativement altéré. C'est par exemple le cas des externalités liées au paysage agricole au sein d'un périmètre d'irrigation gravitaire, pratiquant par exemple une agriculture diversifiée et extensive.*

Ce problème de congestion empêche dès lors que les externalités soient soumises aux règles de gestion des biens publics. Cependant, *l'intervention de la puissance publique demeure indispensable car elle est la seule garante d'une offre d'externalités qui puisse être optimale [Rambonilaza, 2002].* En effet, la considération des externalités constitue une défaillance du marché, qui ne peut par la simple demande sociale conduire l'offre d'externalités correspondante. Dans le cas où le marché serait le seul régulateur de la production de ces biens et de ces services non marchands, l'offre serait sous-optimale. Il en va de même si ce sont les agriculteurs qui assurent cette offre. Les externalités étant consommées gratuitement par leurs bénéficiaires (ou subies « en silence » par les perdants lorsqu'ils s'agit d'externalités négatives), ces derniers ne sont pas incités ou ne sont pas en mesure de tenir compte de cette demande sociale de biens et de services non marchands dans leur processus de décision.

Si l'intervention publique est nécessaire à l'ajustement de l'offre d'externalités à la demande sociale, la question est alors posée du mode et de l'échelle d'intervention publique.

### ***9.1.2 Limites des outils existants et perspective dans le « contrat de canal »***

Les principaux outils mobilisables dans le cadre des externalités de l'irrigation gravitaire sont ceux créés vis-à-vis de ce que l'on appelle les « aménités rurales », plus en référence au caractère amène du monde rural que vis-à-vis de la définition stricte d'une aménité (cf. 1.1). Il s'agit d'outils qui visent :

- soit à créer des zones de protection et/ou de valorisation de la faune et de la flore sauvage et remarquable, et plus généralement de la biodiversité. C'est par exemple le cas des arrêtés de protection de biotope. Cependant, l'intégration des canaux dans ces zones de protection n'est généralement pas éligible du fait qu'ils constituent des éléments artificiels du milieu. C'est pourquoi les canaux d'irrigation de Camargue ne furent pas intégrés à la ZSC de la Camargue pour la protection de la Cistude d'Europe, alors que les canaux d'irrigation en constituent l'habitat privilégié.
- soit à compenser la production d'aménités par l'agriculteur, par le biais d'une subvention directe qui ne soit plus basée sur les prix du marché de la production agricole de l'exploitant comme ce fût le cas. Ces outils sont les mesures agri-environnementales, traduites au niveau des agriculteurs par le Contrat Territorial d'Exploitation (CTE).

Ces derniers outils ont cependant des limites qu'il convient d'apprécier. Il existe une certaine inadéquation des démarches contractuelles aujourd'hui existantes que sont les CTE et les mesures agri-environnementales, principalement du fait que ces outils, fondés sur la liberté contractuelle, supposent une contractualisation à titre individuel et non collectif des agriculteurs, ce qui ne permet pas d'arriver à une solution d'ensemble. De plus, les mesures à

caractère environnemental, qui seules avaient à l'origine vocation à figurer dans les CTE, semblent manquer de consistance et tendraient plus à s'inscrire dans une « logique de guichet » que dans une logique de projet, à l'inverse de l'objectif initialement affiché [*Délégation à l'aménagement et au développement durable du territoire*, 2001]. Ensuite, les résultats des CTE ont été relativement modestes, puisque l'on comptabilisait 7 700 contrats signés au 8 juin 2001, quand le gouvernement affichait un objectif de 50 000 contrats signés dès l'année 2000, et plus de 200 000 pour l'horizon 2006. La montée en puissance des CTE serait en outre freinée par la lenteur de l'administration à instruire les projets, mais aussi par la réticence des agriculteurs, qui doivent entreprendre des démarches complexes et s'exposent à des contrôles très stricts (s'agissant des mesures environnementales, financées en partie par l'Union européenne, au titre de la politique de développement rural). Enfin, leur durée d'application limitée à cinq ans pose la question de la continuité des actions entreprises dans le cadre des CTE.

Une perspective adaptée à la considération des externalités de l'irrigation gravitaire est aujourd'hui en cours d'élaboration à l'Agence de l'Eau. Il s'agit du « Contrat de Canal », l'équivalent du contrat de rivière ou de baie. Il entre dans le cadre du protocole de gestion de l'eau intégrant l'ensemble des usagers de la ressource, que l'AE souhaite voir signé par les ASA avant tout accord de subvention. Par le biais du contrat de canal, l'AE souhaite réaffirmer une part de ses objectifs environnementaux, en considérant dorénavant les canaux d'irrigation comme pouvant constituer des milieux aquatiques à part entière. Dans ce cadre, les canaux doivent être étudiés et appréhendés d'une manière plus globale et concertée, sur la base de ce que l'on observe aujourd'hui avec les contrats de rivière. Le contrat permet en effet de formaliser une demande, émanant le plus souvent de la collectivité, tout en laissant le libre choix à la collectivité d'agriculteurs d'y adhérer ou non, ce qui permet ensuite de clairement s'entendre sur des coûts et des objectifs.

En clair, si les démarches contractuelles aujourd'hui existantes apparaissent comme inadéquates vis-à-vis d'un projet de valorisation des externalités de l'irrigation gravitaire, la perspective du contrat de canal, en cours d'élaboration à l'AE, semblerait être le lieu d'expression privilégiée d'une rétribution de ces externalités. L'optique d'un tel contrat serait alors de conférer aux ASA un rôle de maître d'œuvre de l'organisation du territoire, et d'intégrer à leur gestion les autres usagers de la ressource.

Après avoir mis à profit cette considération économique du problème de la rétribution des externalités, nous allons maintenant nous intéresser à sa considération juridique.

## **9.2 Quelles informations retire-t-on d'une considération JURIDIQUE du problème ?**

Dans le cas où la valorisation économique d'une ou de plusieurs externalités se ferait dans le cadre des activités d'une ASA, c'est-à-dire que l'ASA serait le fournisseur du bien ou du service correspondant, il est nécessaire de s'intéresser au statut juridique qui prévaut aujourd'hui pour ces associations, et à la nature de la mission qu'elles remplissent, afin d'être en mesure de savoir dans quelle mesure ces associations peuvent être rétribuées pour la production d'externalités. S'agit-il d'une mission de service public, d'une mission de gestion/exploitation de biens communs, ou d'une mission de gestion/exploitation de biens privés ?

### 9.2.1 La nature juridique du fournisseur de bien ou de service

D'après [Garin et al., 2001].

L'arrêt Tatin du 12 juillet 1995 donne une définition juridique des associations syndicales autorisées (ASA) : **les ASA sont des établissements publics à caractère administratif (EPCA), non locaux**. D'une part, ce ne sont pas des établissements publics locaux puisqu'elles ne sont pas rattachées au droit des collectivités locales. D'autre part, les ASA ne peuvent être assimilées à des services publics, puisqu'elles ne respectent pas entièrement les principes fondamentaux du service public, qui sont la **continuité** du service, l'**égalité** des usagers devant le service, et enfin l'**adaptation** du service aux besoins.

1. **la continuité du service** : quand le service répond à un intérêt général qui ne peut être satisfait de manière intermittente, le service doit alors être délivré en continu<sup>50</sup> (ex : AEP). Ce principe est d'emblée contraire au fonctionnement d'une ASA, où les membres qualifiés décident à la majorité les modalités de desserte en eau agricole (tours d'eau, période de chômage des canaux, etc.).
2. **l'égalité des usagers devant le service** : « *Le service public doit traiter les usagers sur un pied d'égalité, sans discrimination, dans toute la mesure où ces usagers se trouvent dans des situations comparables au regard du service* » ([Halaunbrenner, 1996], cité par [Garin et al., 2001], p.16). Cette condition est réalisée à la constitution de l'association, où chaque usager du réseau bénéficie de la même manière i) du service rendu par le réseau d'irrigation, ii) des aides publiques, et que iii) chacun est taxé en raison de l'intérêt qu'il possède à la réalisation des travaux (généralement de façon proportionnelle aux surfaces équipées ou aux débits souscrits). Mais ce principe d'égalité n'est aujourd'hui souvent plus respecté du fait de l'évolution de l'usage des terres. C'est par exemple le cas lorsqu'un adhérent de l'association se retrouve exclu du service parce que, suite au morcellement des parcelles agricoles induit par la périurbanisation, l'adduction d'eau jusqu'à son terrain est devenue techniquement impossible. Dans une telle situation, le propriétaire reste redevable envers l'association de la taxe syndicale correspondant à ce service, puisque celle-ci est attachée de manière inaliénable à la propriété foncière, jusqu'à la dissolution de l'association. En cela, le service délivré par les ASA ne respecte plus le principe d'égalité des usagers devant le service. Il en va de même du troisième principe fondamental du service public, l'adaptation du service, rendu caduc par l'évolution des usages non plus des terres, mais de l'eau sur les périmètres :
3. **l'adaptation du service aux besoins** se résume ainsi : « *Le régime des services publics doit pouvoir être adapté chaque fois qu'il le faut, à l'évolution des besoins collectifs et aux exigences de l'intérêt général. Il impose qu'il n'y ai pas d'obstacles juridiques aux mutations à réaliser* ». Cependant, aucun texte juridique ne peut contraindre un propriétaire agricole à devoir s'adapter à un service différent de celui pour lequel sa parcelle a été engagée, même dans le cas où des demandes d'usagers non agricoles pour une modernisation du service d'eau seraient justifiées.

Si, comme nous l'avons vu, l'offre d'externalités ne peut s'ajuster à la demande sociale sans intervention de la puissance publique, cette intervention ne peut a priori pas être menée dans le cadre d'associations syndicales autorisées puisqu'elles ne remplissent pas une mission de service public. Ce constat, établi ici principalement compte tenu de l'évolution de l'usage des

---

<sup>50</sup> Sauf en cas de force majeure ou par décision de l'autorité compétente.

terres et de l'eau consécutive à l'émergence d'usagers non agricoles au sein de ces périmètres, nous conduit maintenant à revenir sur l'intégration de ces usagers dans la gestion des ASA. Cette considération nous permettra ensuite de mieux appréhender l'adéquation d'une structure de gestion donnée vis-à-vis de l'importance que revêt l'intégration de ces usagers non agricoles, dans le cadre d'une valorisation de ces externalités.

### **9.2.2 La nécessité d'intégrer les usagers non agricoles dans la gestion de l'association**

Les usagers non agricoles se répartissent en deux groupes : les usagers rurbains, que l'on pourrait aussi appeler usagers domestiques (au sens de la définition donnée précédemment), et les usagers non domestiques, parmi lesquels seules les collectivités seront considérées.

#### **9.2.2.1 L'intégration des rurbains**

Nous avons vu comment l'accès à un réseau d'eau brute profitait, à divers degrés, directement ou non, aux rurbains, aux collectivités, aux agriculteurs et aux gestionnaires d'ASA (cf. 5.1 et 5.2). La durabilité de leurs intérêts respectifs ne pourra cependant être assurée qu'à trois conditions :

- i) que le service d'eau brute soit modernisé, tant sur ses aspects techniques que tarifaires.*

Les rurbains ont des exigences concernant le service d'eau brute (débit, fréquence, durée) qui ne peuvent être satisfaites lorsque existe un tour d'eau classique, par exemple d'une fréquence hebdomadaire (qui peut de plus conduire à devoir irriguer la nuit) et d'une main d'eau dont le débit trop important (généralement de 25 l/s) et le mode d'arrosage correspondant (irrigation de surface uniquement) sont inadaptés. Si nous prenons par exemple le cas de l'ASA de Thuir, sur des secteurs où le service d'eau brute n'a pas été modernisé, les propriétaires ne payent plus leur redevance lorsqu'ils n'utilisent plus le réseau. Les associations n'ont souvent que peu de recours face aux refus de ces propriétaires non agricoles de payer les rôles qui leur sont adressés par le percepteur de l'association. Le faible montant individuel de ces dus, associé au morcellement important des parcelles loties, rend souvent dérisoire toute poursuite. Cependant, la somme de ces contributions à l'échelle de l'association représente une part importante des ses recettes de fonctionnement, ce qui affecte directement et non négligemment la gestion de l'association. Dans l'exemple, les mairies se sont substituées à ce manque à gagner, sous la forme d'un dédommagement équivalent aux redevances perdues, en payant pour le rôle d'assainissement pluvial joué par le réseau de colatures de l'ASA.

Ensuite, la politique tarifaire des ASA est rarement réévaluée, bien que les nouveaux usagers non agricoles manifestent des attentes de qualité de service et de tarification différentes de celles qui prévalaient du temps où les ASA n'étaient constituées que de propriétaires agricoles. Cette réévaluation tarifaire est souvent très difficile car aucun élément n'est disponible pour pouvoir juger de la pertinence socio-économique de la structure tarifaire appliquée. Les charges d'irrigation, les marges par cultures, les évolutions d'assolement, de pratiques d'irrigation et de valorisation de l'eau, etc., restent des paramètres pour lesquels aucun système d'information n'est mobilisé. Cependant, la diversification des activités des ASA devra passer par la définition de politiques tarifaires adaptées à chaque type d'usages.

- ii) *que ces nouveaux usagers rurbains soient intégrés aux instances de décision de l'association, ce qui passe par un partage du pouvoir des agriculteurs et des gestionnaires d'ASA [Garin et al., 2002b].*

Les usagers rurbains sont très peu présents dans les assemblées générales, et quasiment jamais dans les syndicats. Deux raisons expliquent cela. Tout d'abord, bien que ces nouveaux usagers rurbains puissent représenter une part importante des membres de l'association, les statuts de l'association ne leur laissent généralement pas la possibilité d'être représentés à leur juste poids car ils peuvent inclure un mode d'éligibilité leur interdisant jusqu'au droit de vote. Cela tient à ce que les statuts, au moment de leur élaboration, ne pouvaient naturellement concevoir d'autres usages que l'usage agricole. Les conditions de représentation et de vote en assemblée générale requièrent généralement un minimum de superficie inscrite au sein du périmètre cadastral qui, par le morcellement des terres agricoles consécutif à la vente des terrains aux rurbains, ne permet pas à ces mêmes rurbains d'accuser de ce minimum de superficie, et donc de faire valoir leur droit. En cela, ce système leur est très défavorable. Sur le périmètre de Manosque par exemple, la surface minimale souscrite pour bénéficier d'une voix en assemblée est d'un hectare, et il est interdit de constituer un groupe de plus de 7 propriétaires pour avoir une voix. Ce système exclut d'office la très grande majorité des rurbains puisqu'en 1995, 92% des propriétaires possédaient 24% de la superficie équipée et n'avaient aucun droit de vote [Garin et al., 2002b].

Une telle situation conduit souvent ces usagers rurbains à ne plus vouloir souscrire pour un service qui ne leur convient pas, quand dans le même temps certains agriculteurs craignent, à tort ou à raison, que l'intégration des rurbains conduise à un glissement des missions fondamentales de l'association. Quoi qu'il en soit, nombre des dysfonctionnements de ces associations sont symptomatiques d'une nécessaire évolution du système gravitaire vers la diversification des services et l'intégration de ces nouveaux usagers non agricoles. Leur intégration est une des conditions de durabilité des institutions d'irrigation définies par Ostrom : « Les règlements doivent être collectivement choisis et le plus grand nombre d'individus affectés par les règles opérationnelles doivent pouvoir participer à leur modification » ([Ostrom, 1992], citée par [Garin et al., 2002b]).

- iii) *que les rurbains s'engagent de façon réciproque dans la gestion de l'association.*

Les rurbains n'ont pas toujours conscience du rôle de co-décideur qu'ils peuvent jouer dans l'association, par manque d'information, mais également d'intérêt. Le service d'eau brute leur est souvent en tout point similaire au service d'eau potable, et ils se positionnent dans leurs relations avec l'association dans une relation « client-entreprise » [Garin et al., 2002b]. Ceci explique aussi pourquoi un système de représentation du type « 1 homme – 1 voix » pose des problèmes : pour posséder un pouvoir décisionnel dans une association, il est important de comprendre le fondement et la philosophie profonde d'une association syndicale : la gestion commune d'un patrimoine collectif. Or, les gestionnaires d'ASA se plaignent souvent du fait que les propriétaires riverains ne se comportent pas en acteurs associés à la gestion collective de l'ouvrage, selon les devoirs qui leur incombent. Les réseaux qui traversent ces propriétés ne sont pas entretenus comme ils devraient l'être, et il peut même arriver que les canaux ou les filioles soient utilisés comme collecteurs de détrit. De plus, certains propriétaires privés ne prennent pas la peine d'aménager sur leur propriété l'espace minimal nécessaire au passage des engins d'entretien des canaux, ce qui complexifie alors la gestion de cette tâche, même si les ASA bénéficient d'après la loi de servitudes de passage. Enfin, un dernier problème important qui empoisonne les relations entre gestionnaires d'ASA et rurbains concerne les vols d'eau par le biais de raccordements clandestins, qui de plus endommagent

les infrastructures de l'association (les vols d'eau ne sont cependant pas spécifiques aux rurbains, et concernent également les agriculteurs).

En parallèle au phénomène rurbain et à son souhait d'une plus grande considération dans les prises de décisions de l'association, on observe également un engagement prononcé de collectivités souhaitant dans le même temps apporter leur soutien à ces associations durement touchées par la crise du monde agricole, et faire perdurer les effets induits qu'elles produisent sur les territoires qu'elles irriguent. Ce mouvement d'intégration des collectivités à la gestion des ASA est l'objet de la partie suivante.

#### 9.2.2.2 L'intégration des collectivités

A défaut d'être intégrées aux instances de décision des ASA, les collectivités sont parfois intégrées comme instance consultative concernant le service d'eau brute sous pression proposé par certaines ASA. C'est par exemple le cas de l'ASA de Gignac qui, en plus d'avoir intégré dans son sein un représentant des rurbains, travaille en étroite collaboration avec les services d'eau potable de la collectivité de Gignac pour une planification conjointe des raccordements d'eau potable et d'eau brute pour les nouveaux lotissements [*Montginoul et al.*, 2002a].

De plus, il n'est pas rare que des collectivités apportent d'ores et déjà leur concours financier à la survie des associations syndicales d'irrigation, qui n'arrivent à équilibrer leurs comptes que par la non prise en compte des amortissements. Cela fragilise ces structures, qui, face à une défaillance importante de leur réseau, n'ont d'autre alternative que de faire passer ce qui devrait être de l'entretien en investissement, et de demander des aides publiques. [*Garin et al.*, 2001] notent que les collectivités territoriales (conseils régionaux et départementaux, communes, etc.) interviennent de plus en plus dans les projets d'investissement des ASA, qu'ils soient de création, de modernisation, d'extension ou de réhabilitation de réseaux, « palliant d'une certaine manière le désengagement de l'Etat, sous l'argument que les réseaux collectifs d'irrigation font partie de l'aménagement du territoire ou qu'ils remplissent d'autres fonctions collectives (fournisseur d'eau brute, contribution à l'assainissement des eaux pluviales, entretien du paysage) qu'il faudrait financer par ailleurs s'ils n'existaient pas. » Notons que ces aides concernent également des associations syndicales d'assainissement et de drainage, mais sous une autre forme que financière. Pour ces associations, l'implication des communes est réelle et diversifiée, mais très peu formalisée. Certains élus de communes sont syndics en tant que propriétaires et apportent ainsi leur soutien politique à l'association, d'autres communes préfèrent entretenir à leurs frais une partie du réseau (ex : filioles d'assainissement), d'autres encore optent pour le prêt de matériel ... [*Fédération des associations syndicales du Vaucluse*, 2000]. Quoi qu'il en soit, aucune commune n'apporte son concours financier direct à une association, sous la forme de don par exemple. Cela tient essentiellement à ce que les ASA ne sont juridiquement pas autorisées à percevoir de revenus pour des objets autres que ceux initialement poursuivis dans les statuts. Cela limite ainsi l'implication des collectivités dans la santé financière de ces associations. Enfin, une autre limite importante de l'implication des collectivités dans les ASA est que ces associations ne peuvent reposer que sur des propriétaires fonciers. Si dans certains cas les collectivités sont propriétaires de terres au sein du périmètre, ce n'est pas toujours vérifié.

Ces difficultés que possèdent les collectivités à participer à la gestion des ASA peuvent être perçues comme regrettables compte tenu des implications majeures qu'ont ces associations

sur le fonctionnement des collectivités, et de l'environnement au sens large. C'est d'autant plus dommageable que l'intégration des collectivités est également synonyme, dans une certaine mesure, de l'intégration des usagers rurbains, administrés de ces premières. Les collectivités sont de plus susceptibles de se substituer aux rurbains en tant qu'acteurs compréhensifs du fonctionnement et de la philosophie des associations syndicales. Tous ces points convergent dans l'idée que les collectivités locales et territoriales, ont une place croissante à jouer dans la gestion et le financement de ces associations. Ce rôle des collectivités en direction d'une évolution socioprofessionnelle des structures de gestion de l'irrigation est d'autant plus important qu'il conditionne la survie, le développement et la professionnalisation de bon nombre d'associations d'irrigation gravitaire.

Si ces points peuvent conforter l'idée d'une interaction nécessaire entre les associations d'irrigation et les collectivités, dans laquelle la rétribution des externalités trouve sa place, il n'est pas évident que les associations syndicales constituent une structure gestionnaire réellement adaptée à la mise en place de telles rétributions, pour des raisons d'ordre à la fois juridique et gestionnaire. C'est ce que nous allons aborder maintenant, en soulevant la question de la structure de gestion à privilégier.

### ***9.2.3 Quelle structure gestionnaire privilégier ?***

Les associations syndicales sont de nature juridique à opérer des transactions marchandes avec des parties prenantes quelle qu'elles soient. En effet, l'article 3 de la loi du 21 Juin 1865 confère aux associations syndicales la capacité civile en ces termes : « Elles peuvent ester [agir] en justice, par leurs syndics, acquérir, vendre, échanger, transiger, emprunter et hypothéquer. » Cependant, plusieurs obstacles s'opposent à ce que soient rétribuées les externalités qu'elles génèrent autour de la notion de service. Tout d'abord, la plupart des services d'externalités que peuvent proposer les ASA ne correspondent pas aux objets qu'elles sont autorisées à poursuivre<sup>51</sup>, et donc vis-à-vis desquels elles sont autorisées à percevoir une rétribution. Cependant, certains services d'externalité sont autorisés, au titre des améliorations agricoles d'intérêt collectif, comme par exemple la réalimentation de la nappe, ou la lutte contre les inondations. Mais le cas où une association syndicale ayant pour objet l'irrigation souhaiterait percevoir des contributions directes au titre de la réalimentation de la nappe, un second problème s'interpose, celui qu'une association ne peut modifier son ou ses objets qu'à la condition que soient redéfinis les statuts de l'association, ce qui est une tâche à la fois longue et administrativement lourde (soumission du projet au préfet, enquête d'utilité publique, ...). Néanmoins, ces barrières devraient disparaître suite au projet d'ordonnance sur les associations syndicales actuellement en cours.

Mais un autre problème juridique important vient rompre les chances des associations syndicales d'être une structure de gestion adaptée à la valorisation de ces externalités. Nous avons eu l'occasion de voir tout au long de ce rapport en quoi la rétribution de ces externalités s'avérait être une manne substantielle d'argent, potentiellement susceptible de permettre aux ASA de conduire des politiques de maintenance pensées sur le long terme, permettant d'assurer la pérennité de leurs réseaux. Or, d'après les textes relatifs au droit des associations syndicales, les ASA sont sujets aux mêmes règles d'équilibre financier que les communes de moins de 3000 habitants, à savoir qu'elles ont la possibilité, mais non l'obligation, de pratiquer l'amortissement de leurs équipements, mais l'interdiction formelle de faire fructifier

---

<sup>51</sup> cf. Article 1<sup>er</sup> de la loi du 21 juin 1865.

la réserve d'argent qui y serait destinée. Cette contrainte juridique rend toute provision pour la prise en charge des coûts de renouvellement impossible, du fait de l'érosion monétaire très importante que subirait la réserve d'argent économisée (ces économies doivent être menées sur de longues périodes). Il demeure alors illusoire de voir les ASA prendre en charge les coûts de renouvellement des réseaux de leur propre chef. C'est une des principales raisons qui appelle à ce qu'une structure de gestion différente prenne en gestion le service d'externalité.

A côté de ces problèmes de nature juridique au sens strict, d'autres, plutôt liés à la structure gestionnaire qu'est l'association syndicale, interviennent également. Revenons pour cela à la structuration en ASA, pour en analyser brièvement les avantages et les inconvénients en tant que structure de gestion.

L'avantage d'une ASA réside dans le fait que les propriétaires sont directement impliqués dans la gestion de leur outil de production. Cependant, ces propriétaires sont également les usagers-consommateurs, et peuvent être amenés à prendre des décisions en contradiction avec les intérêts de l'association, comme par exemple la non révision de la politique tarifaire (stagnation des tarifs). Ensuite, l'existence et le fonctionnement en assemblée générale font des ASA un système à démocratie directe, qui reste néanmoins difficile à entretenir. Le fonctionnement en assemblée générale/syndicat entraîne d'une part des coûts de transaction importants dans le fonctionnement décisionnel de l'association, et d'autre part des coûts d'organisation et de fonctionnement également importants lorsqu'il s'agit de convoquer une assemblée générale, particulièrement dans les moyennes et grandes ASA (>1000ha) pour lesquelles il est très compliqué et onéreux de convoquer personnellement l'ensemble des propriétaires par l'assemblée générale. De ce point de vue là, le fonctionnement en ASF est plus performant, puisqu'une ASF ne possède pas d'assemblée générale, et que les syndics sont nommés par le préfet. Ce système est moins démocratique mais beaucoup plus souple<sup>52</sup>. De plus, le recouvrement des redevances dues à l'ASA effectué par le Trésor public permet de n'avoir que peu d'impayés. Néanmoins, l'association est déresponsabilisée de sa trésorerie et de ses impayés, ce qui peut, entre autre, nuire au dynamisme qu'elle met en œuvre pour recouvrir ses deniers. Enfin, le fonctionnement et la performance des ASA sont liés à un certain effet de taille.

Dans de petites associations (moins de 10 adhérents) on constate souvent un très fort degré de responsabilisation de chaque membre de l'association, ainsi qu'une synergie collégiale entre tous les membres. Ces petites associations d'irrigation ne possèdent généralement pas de personnel salarié, et assurent souvent mal l'entretien de leur réseau. Concernant les grandes associations, elles sont généralement toutes aussi responsables, et fonctionnent également de manière efficace, mais elles se révèlent plus professionnelles du fait des importants moyens engagés. Ainsi, ces grandes associations s'appuient sur du personnel qualifié, et entretiennent correctement leur réseau. Enfin, les associations de taille intermédiaire ont plus de difficultés pour conjuguer à la fois collégialité et professionnalisme [AFEID, 2001]. Les ASA étant le plus souvent de petite taille (une ASA gravitaire moyenne possède 95 propriétaires, pour 194ha de surface équipée et 93ha irrigués [Garin *et al.*, 2001]), on peut dire que la forte implication de bénévoles dans les ASA permet de réduire ses coûts de fonctionnement d'une part, mais s'accompagne d'un manque de professionnalisme d'autre part.

---

<sup>52</sup> Allant dans ce sens, le statut des ASL est de loin le plus souple, puisqu'il permet une constitution rapide et simple des statuts de la structure, et que l'adhésion y est volontaire.

Ces considérations nous incitent donc à réfléchir aux types de structures susceptibles de supporter un tel service, et de percevoir une rémunération en retour. S'agit-il de communes, de communautés de communes, de syndicats intercommunaux, de syndicats mixtes, du département, de la région, de l'Etat, de l'Europe, ... ? A défaut de pouvoir répondre à cette question, nous exposerons les avantages et les inconvénients d'une structure qui nous semble être en mesure de marier harmonieusement ASA et collectivités : le Syndicat Mixte (SM).

Une structuration en Syndicat Mixte possède certains avantages qu'il convient d'apprécier. Tout d'abord, le SM peut poursuivre des objets très variés, et est donc en mesure de proposer l'ensemble des services d'externalités associées aux canaux d'irrigation gravitaire. Ensuite, le SM possède une indépendance dans la gestion de l'irrigation vis-à-vis des usagers – consommateurs, principalement constitués par les agriculteurs, mais aussi par des usagers non agricoles comme les usagers domestiques périurbains. Ce mode de gestion permet en outre une forte implication des collectivités dans la gestion de l'eau et des infrastructures d'irrigation. Enfin, une structuration en SM permet une gestion plus intégrée de la ressource par une ouverture accrue de l'association vers les autres usagers de l'eau, tels que les collectivités, les coopératives, les kayakistes, etc. Cependant, une constitution en SM conduit les propriétaires agricoles du périmètre à ne plus être impliqués directement dans la gestion de leur outil de production, ainsi que dans la gestion de la structure, vis-à-vis de laquelle ils deviennent de simples usagers – consommateurs et dans laquelle ils ne contrôlent plus les coûts. Des agriculteurs peuvent néanmoins être intégrés dans les instances de décision, avec le pouvoir de voter les propositions du syndicat.

Ainsi, et sans pour autant retenir le fonctionnement en Syndicat mixte de manière unique, il apparaît qu'il existe des structures plus adéquates à la valorisation des externalités que les associations syndicales. Le Syndicat Mixte en est un exemple, mais il n'est certainement pas le seul. Un fonctionnement en SM ne présente pas les mêmes contraintes que le fonctionnement d'une ASA en assemblée générale / syndicat, tout en restant aussi démocratique (à une échelle autre). En étant étroitement lié aux communes, le SM est un lieu privilégié de synergie de politiques publiques, telles que les politiques d'urbanisme, d'environnement, sociale, etc. Le SM est dès lors une structure privilégiée pour, par exemple, travailler sur la maîtrise de l'accroissement périurbain vis-à-vis des périmètres irrigués. Nous avons ainsi vu comment une périurbanisation qui soit à la fois contrôlée au niveau des plans d'urbanismes, et bien intégrée au niveau des instances de décision de l'association, pouvait bénéficier à tous, et en premier lieu aux associations d'irrigation par la diversification et l'accroissement des revenus consécutifs à la vente d'eau brute aux rurbains, et par l'accroissement de la crédibilité politique vis-à-vis de l'intérêt général.

Le syndicat mixte est également une structure adaptée à la gestion de la maintenance et du renouvellement des ouvrages. D'une part, il n'est pas biaisé dans cette tâche en étant à la fois décideur et usager du réseau. D'autre part, il est en mesure de mobiliser les compétences techniques et le matériel communal nécessaires aux opérations d'entretien et de maintenance des canaux. Enfin, il est en mesure de faire fructifier son fond de roulement pour le renouvellement du réseau.

On comprend maintenant qu'une question fondamentale de la rétribution des externalités repose sur la structure gestionnaire du service. Un dernier point tout aussi essentiel tient dans la manière dont il est possible de proposer une gestion des externalités qui soit orientée dans une optique de service fourni, au sens que lui a donné le monde de l'entreprise, et que lui donne aujourd'hui le service public : la maîtrise et la performance du service.

### **9.3 Quelles informations retire-t-on d'une considération gestionnaire du problème ? La gestion des externalités dans une optique de service fourni**

D'après [Renault et al., 2003].

Dans l'approche classique de la gestion d'un service fourni, on va chercher à i) identifier l'aire concernée par le service (= l'aire du service), ii) identifier chacune des utilisations de l'eau possibles dans l'aire desservie, iii) spécifier pour chaque utilisation les services qui lui correspondent, et enfin iv) se mettre d'accord sur une tarification appropriée. Dans le cas, par exemple, de la fourniture du service d'eau agricole aux irrigants, l'aire desservie par le service est le périmètre irrigable, dans lequel l'usage de l'eau est celui de l'alimentation en eau des cultures. L'échelle du service proprement dit correspond à l'agriculteur, l'aire correspondante étant sa superficie souscrite. La spécification du service correspond aux caractéristiques de la distribution de l'eau d'irrigation (débit, volume, adéquation, disponibilité, fiabilité, charge en agents chimiques ou en sédiment, ...). Le niveau du service est fonction du type de culture, selon qu'elle soit vulnérable et requiert un service très performant (adéquat et fiable), ou quelle soit moins sensible ou à moins forte valeur ajoutée et peut se contenter de performances moindres. Enfin, concernant la tarification en secteur gravitaire, elle est proportionnelle à la surface ou au débit souscrit, très rarement au volume apporté, et respecte ainsi dans une certaine mesure le principe d'utilisateur – payeur.

L'étude de l'applicabilité de cette approche classique de la gestion d'un service fourni au cas des externalités de l'irrigation gravitaire nous amène en fait à revenir aux trois conditions, énoncées en Introduction, nécessaires à la mise en place d'une gestion orientée service à travers un principe d'usager – payeur, à savoir i) la condition de coûts de transaction appropriés pour mesurer le service fourni, ii) une certaine flexibilité dans le choix des paramètres du service par l'usager, et iii) la possibilité pour le fournisseur du service de contrôler l'offre [Renault et al., 2003]. En effet, plusieurs éléments collectés tout au long de ce travail nous permettent de penser que lorsqu'il s'agit d'un service lié à une ou plusieurs externalités, la gestion de ce service diffère très sensiblement d'une telle approche classique, et ce, dans chacune des trois conditions.

#### ***1. La condition de coûts de transaction appropriés pour mesurer le service fourni ;***

Pour appliquer dans la pratique une gestion classique d'un service, il faut qu'il existe un lien fort entre le prix payé et le service reçu par l'usager, en qualité ou en disponibilité. Ce lien est généralement un lien de proportionnalité, ce qui constitue par ailleurs un des principes de gestion durable des biens définis par Ostrom [Ostrom, 1992]. Lorsque l'on souhaite appliquer en pratique ce concept d'utilisateur – payeur, il est nécessaire de minimiser les coûts de transaction nécessaires à la mise en place de cette relation de proportionnalité, c'est-à-dire les coûts nécessaires à la quantification fiable et précise du service fourni. Ces coûts de transaction relatifs à la mesure du service doivent notamment rester relativement faibles par rapport aux coûts associés à la délivrance du service (*Fonction de mesure* de la Figure 1).

Or, cette condition peut est difficilement vérifiée dans le cas de nombreuses externalités de l'irrigation gravitaire. Nous avons en effet eu l'occasion de voir comment la quantification d'un grand nombre d'externalités pouvait se révéler difficile et par dessus tout imprécise, comme c'est par exemple le cas pour les restitutions au milieu naturel (qu'elles soient en rivière ou dans la nappe), la pollution des eaux souterraines, l'alimentation en eau d'un paysage arboré et biologiquement diversifié, etc. Dans une telle situation, il n'est pas possible de caractériser le service fourni par des critères analogues à ceux de la fourniture d'eau

classique (eau potable, brute, d'irrigation sous pression), comme la disponibilité, la fiabilité, etc. Dans le cas d'externalités positives comme l'alimentation du paysage ou la réalimentation de la nappe, le service d'externalité s'apparentera alors plus à l'assurance d'une alimentation en eau superficielle et souterraine quasi-permanente de ces usages, sur toute la zone du service concernée. *Par conséquent, le service d'externalité sera caractérisé par une obligation de moyens (présence d'eau en continu pendant x mois de l'année), et non par une obligation de résultats, contrairement à l'approche classique des services d'eau modernes (ex : souscription pour un débit et un temps d'alimentation donnés, variables en fonction de la demande de l'utilisateur).*

## **2. Une certaine flexibilité dans le choix des paramètres du service par l'usager.**

Dans le cadre d'un service classique, l'usager doit être en mesure de modifier les paramètres ou le niveau du service selon sa demande (*Fonction d'ajustement de la demande* de la Figure 1). En effet, on considère généralement que l'efficacité d'un système repose sur sa flexibilité, ce qui suppose que l'utilisateur puisse sélectionner et changer son niveau de service.

Cette condition est plus ou moins vérifiée selon le type d'externalité considéré. Pour certaines externalités, changer le niveau du service fourni se révèle irréalisable du fait que leur contrôle (indépendamment de leur mesure) est impossible, ou très difficilement envisageable. C'est par exemple le cas pour la lutte contre les inondations, ou pour le patrimoine architectural associé aux canaux d'irrigation, bénéfiques vis-à-vis desquels aucun ajustement notable, variable et réversible ne peut être mené.

Pour d'autres externalités, seuls des changements de niveau « tout ou rien » sont possibles, comme par exemple pour l'alimentation en eau du paysage. Seules deux alternatives existent pour modifier le niveau du service : maintenir un canal en terre pour que continue d'être alimentée la végétation rivulaire, ou mettre un revêtement en béton pour stopper ces infiltrations (dans le cas où les économies d'eau seraient estimées être plus précieuse que la végétation et la biodiversité observée le long des canaux). C'est également le cas de la remontée du biseau salé en zone côtière, puisque la salinisation de la nappe d'eau douce est un phénomène irréversible. C'est enfin le cas de la lutte contre les feux de forêt. Soit les canaux sont maintenus en fonctionnement, auquel cas ces derniers jouent un rôle réel, soit ils sont abandonnés, auquel cas ils se végétalisent complètement et n'agissent plus contre le feu.

Cependant, pour d'autres externalités, changer le niveau du service fourni est envisageable, comme par exemple dans le cas de la réalimentation de la nappe, ou des restitutions en rivière. Suite à la demande d'une collectivité de voir plus ou moins d'eau présente dans la nappe à un moment donné de l'année, l'association d'irrigation peut décider de rallonger ou de raccourcir la durée de mise en eau de ces canaux. Ainsi, certaines associations, ayant contractualisé pour ce service avec des collectivités, réduisent la durée de chômage des canaux pour accroître celle pendant laquelle la nappe est réalimentée. On peut également citer la salinisation primaire des terres agricoles (ou secondaire dans le cas d'une eau d'irrigation salée), puisque l'irrigation permet sous certaines conditions d'abaisser le niveau de sel présent dans le sol, et que ce phénomène est, lui, réversible.

Néanmoins, même dans ce cas le fournisseur du service d'externalité (l'association d'irrigation) reste limité dans cette variation du niveau du service. Cette limite peut provenir de raisons techniques. Dans l'exemple de la réalimentation de la nappe, les canaux et les parcelles ne peuvent générer d'infiltrations supplémentaires au delà d'un certain seuil,

puisque les dimensions du système canal sont fixes. Cette limite peut également provenir de raisons institutionnelles, puisque les associations d'irrigation, ayant des droits d'eau fixes, ne peuvent accroître à volonté les restitutions, qu'elles soient de surface ou de profondeur.

*En cela, d'une manière générale la flexibilité dans le choix des paramètres des services d'externalités reste largement limitée.*

### **3. La possibilité pour le fournisseur du service de contrôler l'offre et, si nécessaire, de couper le service en cas de non paiement ;**

Enfin, une dernière condition de base nécessaire à l'application du principe usager – payeur est que le gestionnaire du service doit être en mesure de contrôler l'offre, à commencer par la délivrance ou non de l'eau, particulièrement en cas de non paiement.

#### **A/ COUPER LE SERVICE D'EAU**

Le gestionnaire du service doit être en mesure de contrôler l'offre, et, à l'extrême, de couper le service en cas de non paiement (fonction de contrôle sur la Figure 1), ce qui constitue une condition essentielle à l'application du principe utilisateur – payeur [Anukularmphai, 1996]. Or, ceci n'est pas possible dans le cas des associations d'irrigation. D'une part parce leur principe de fonctionnement est singulièrement de taxer les propriétaires fonciers, indépendamment du service d'eau fourni, et, d'autre part, parce que la loi leur impose de satisfaire le service d'eau dont elles font l'objet.

L'eau d'irrigation étant un préalable indispensable à l'existence de nombreuses externalités dont le contrôle individuel reste très limité voire impossible, il n'est pas possible de couper le service d'externalité sans couper le service d'eau d'irrigation. L'unique possibilité consiste à couper le service d'externalité par un passage sous pression, permettant que soit maintenu le service d'eau d'irrigation, mais cette transformation est irréversible. Par conséquent, ***il n'est pas possible de couper le service d'externalité de façon réversible***. Dans un fonctionnement gravitaire, il y a donc une obligation technique de continuité conjointe du service d'eau d'irrigation et du service d'externalité. La menace de la coupure existe cependant en réalité, mais à une échelle temporelle différente de celle que nous considérons jusqu'à présent. La menace de coupure du service pour les usagers non payeurs émane du fait que la non pérennité de l'association syndicale conduirait à l'abandon des réseaux, donc à la perte des externalités, et à la coupure du service d'externalité (avec le service d'irrigation toujours).

Cependant, le contrôle de l'offre ne se limite pas à la seule possibilité de couper le service en cas de non paiement. D'une manière générale, le contrôle de l'offre est indissociable i) de l'évaluation monétaire du service, ii) de la tarification du service, ainsi que iii) de l'échelle à laquelle le service est fourni (individuelle, collective).

#### **B/ LA TARIFICATION DU SERVICE**

Nous avons déjà vu comment la tarification du service pouvait être définie à l'aide de l'évaluation monétaire des services non marchands, c'est-à-dire de l'évaluation monétaire du bénéfice (effectif ou non) induit par l'externalité (ex : bénéfice social d'un paysage arboré et composé de canaux d'irrigation) (cf. Chapitre 8). Le point qui nous intéresse maintenant concerne l'échelle de la fourniture du service, dans laquelle la tarification sera appliquée.

## C/ L'ECHELLE DE FOURNITURE DU SERVICE

L'échelle de fourniture du service dépend du type de service fourni. Le service de fourniture d'eau agricole se fait à l'échelle de l'agriculteur, ce qui identifie clairement l'aire du service (parcelles souscrites). En revanche, les nombreuses et importantes externalités induites par l'irrigation gravitaire multiplient le nombre d'utilisateurs et complexifient la gestion du service. ***Dans le cas des externalités, le niveau d'individualisation du service*** peut être un individu (ex : lotisseur pour l'assainissement pluvial), ***mais correspond quasi-systématiquement à une échelle collective*** qui va du système canal (ex : biodiversité), à l'ensemble des collectivités connectées à ce système par le biais de l'externalité visée par le service (ex : dans le cas de la réalimentation de la nappe, l'échelle du service dépasse le strict périmètre irrigué, pour englober les collectivités et plus généralement les usagers non agricoles prélevant l'eau de la nappe). Or, il serait injuste de porter à la charge des seuls agriculteurs l'ensemble des coûts associés à la production des externalités, alors que seule une partie minoritaire de l'eau mise à disposition leur sert au final (25% de consommation en eau des plantes). Si la gestion de l'eau doit être intégrée, la tarification aussi, dans le sens du principe bénéficiaire – payeur.

Néanmoins, ce transfert de coûts entre les utilisateurs se révèle très difficile à définir, et à mettre en place, principalement du fait que le niveau d'individualisation du service se situe à une l'échelle collective. En effet, ***cela rend difficile, voire impossible, d'appliquer le principe d'utilisateur – payeur au niveau individuel, hormis si l'externalité relève de l'intérêt général.*** Dans le cas contraire, cela conduit inéluctablement à la diminution de l'impact qu'une tarification de l'eau, fonction de la consommation, peut avoir, puisque si l'on connaît l'échelle globale de délivrance du service, on ne connaît pas ses composants consommateurs individuels.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La pression sur les ressources en eau conduit à recommander une rationalisation des prélèvements en les adaptant aux besoins des cultures, ainsi qu'à une économie d'eau par la minimisation des pertes en ligne lors de son transport, ce qui peut justifier l'abandon des infrastructures anciennes au profit de nouveaux investissements dans des réseaux sous pression. Mais réduire les volumes transités et irrigués risque à terme d'avoir un impact négatif sur l'environnement connecté au périmètre irrigué, pouvant conduire à la perte d'externalités pourtant essentielles, tant au niveau des écosystèmes en question qu'au niveau des activités qui en tirent parti. Dès lors que l'on élargit le concept d'utilisation efficiente de l'eau aux externalités, rationaliser les prélèvements ne devient plus forcément synonyme d'optimisation du rapport volume prélevé/volume effectivement utilisé par les plantes. Il est par conséquent essentiel aujourd'hui de mieux définir les termes d'« utilisation efficiente » de l'eau et les objectifs qu'ils sous tendent, ceci en travaillant à une échelle qui dépasse le périmètre irrigué pour englober les territoires affectés par la circulation des eaux de surface et souterraines liés au réseau de canaux – comme la Directive Cadre sur l'Eau de 2000 le préconise dans ses concepts de groupes de masses d'eau<sup>53</sup> – afin d'être en mesure de réaliser des économies d'eau cohérentes et efficaces.

Dans l'idée de la prise en compte des externalités, on pense les valeurs positives consécutives à certaines pratiques agricoles en terme de service, service que rend l'agriculteur à la collectivité, qu'il soit environnemental (biodiversité), social (agrément paysager) ou encore économique (recharge de nappe pour l'AEP). La rémunération de ces externalités, directe (ex : par les communes bénéficiaires) ou indirecte (ex : par des incitations financières de l'Etat), permettrait de mettre en application les principes de bénéficiaire-payeur (les bénéficiaires sont alors soit considérés comme les bénéficiaires locaux de ces externalités, soit comme la collectivité toute entière dans le cas d'une rétribution par la puissance publique et les collectivités territoriales). Elle permettrait de plus de conférer aux ASA une pérennité certaine en leur faisant payer le « coût durable » de l'eau tel que défini par [Tardieu, 2000] (coût complet<sup>54</sup>, moins coût du premier investissement), ce qui demeure impensable aujourd'hui, d'une part parce que les textes juridiques qui s'appliquent aux ASA leur interdisent de faire fructifier leur provisions pour pratiquer l'amortissement des équipements, et d'autre part parce que cela entraînerait une augmentation du coût de l'eau d'irrigation pouvant justifier aux yeux des irrigants l'abandon de l'irrigation collective au profit d'une irrigation individuelle, moins contraignante et moins onéreuse.

---

<sup>53</sup> DCE 2000/60/CE du 23/10/2000.

<sup>54</sup> Le coût complet de l'eau dans le cas d'un réseau d'irrigation intègre les coût de fonctionnement, de maintenance (préventive et corrective) et de renouvellement du réseau, auxquels s'ajoutent les coûts financiers du premier investissement (partie non subventionnée de l'investissement initial total).

L'accroissement de la pression de l'irrigation individuelle sur les ressources souterraines est déjà un phénomène préoccupant, faisant de son organisation et de sa maîtrise un enjeu essentiel dans la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau. Rétribuer les externalités produites permettrait que soient partagées les charges de l'association, et par conséquent, que soit diminué le montant de la taxe syndicale demandée aux propriétaires agricoles et non agricoles, et ainsi d'offrir des prestations à moindre coût. Cette baisse du coût du service d'eau d'irrigation gravitaire, associée à des campagnes d'incitation à l'utilisation de l'irrigation collective, permettrait de redynamiser ces structures par la réintégration des agriculteurs ayant abandonnés les services de l'association par le passé pour l'irrigation individuelle, comme se fût déjà observé sur diverses ASA (du fait de la prise en charge de l'entretien du canal par les collectivités, l'ASA de Luc-Ornaison-Boutenac a pu baisser sa taxe syndicale de 46 à 8 €/ha pour les adhérents, qui participent dorénavant pour 17% au budget de fonctionnement de l'association contre 100% auparavant. Suite à une campagne de mobilisation, le nombre d'adhérents a augmenté, ce qui s'est traduit par une augmentation de la superficie souscrite de 650ha à 950ha, contribuant d'autant aux recettes de fonctionnement de l'ASA). Il s'agit donc de permettre aux ASA d'irrigation gravitaire de devenir des structures compétitives de distribution d'eau agricole, particulièrement vis-à-vis de l'irrigation individuelle.

La rétribution d'actions de réduction, de maintien ou de développement d'externalités (positives ou négatives) produites par l'irrigation gravitaire pose cependant quelques problèmes, principalement relatifs à la quantification de ces externalités. Cette quantification se révèle dans la très grande majorité des cas largement imprécise, science et technique ne permettant de caractériser ces phénomènes à des coûts abordables que par des ordres de grandeur. Le contrôle de l'offre, qu'il concerne la mesure du service, sa flexibilité ou sa zone de tarification, apparaît être la cause majeure ne permettant pas que soient rétribuées ces externalités dans le cadre d'une gestion de ces dernières qui soit orientée dans une optique classique de service.

Ainsi, en présence d'externalités, l'identification de l'utilisateur n'est pas aisée, tout comme le sont la définition et l'identification du service, du fait de l'échelle collective à laquelle se situe le niveau d'individualisation de la plupart des services d'externalités. C'est pourquoi en présence d'importantes externalités, l'approche classique de gestion orientée service n'est plus valable [Renault et al., 2003], la difficulté majeure de son application résidant dans le contrôle de l'offre relatif au service d'externalité proposé. La base du service d'externalité est donc celle d'une gestion non classique, ce qui rend nécessaire de définir une nouvelle forme de gestion des services d'externalités, et plus généralement une nouvelle forme de gouvernance du système, parce qu'étant donné que le niveau d'individualisation du service correspond à une échelle collective, conduisant à une multiplication du nombre d'utilisateurs et du nombre d'utilisations, on pourra privilégier des structures du type Syndicat mixte ou Syndicat intercommunal, qui intègrent cette pluralité d'utilisations, d'utilisateurs et de territoires.

Cette situation amène un nécessaire choix entre trois formes d'organisations du territoire différentes [Renault et al., 2003], véritables challenges à la fois pratiques et théoriques, que nous pouvons formuler par ces trois questions :

- ***Doit-on procéder à une internalisation économique des externalités ?*** C'est-à-dire est-ce que l'on doit internaliser les externalités et redéfinir entièrement la mission de l'association d'irrigation dans le but de fournir un service d'eau intégrant l'ensemble des usages ?
- ***Faut-il une internalisation institutionnelle des externalités ?*** C'est-à-dire est-ce que les irrigants doivent rester les principaux usagers, et les autres usages, considérés comme des externalités positives, conduire à un transfert de coûts ?
- ***Doit-on effectuer une internalisation territoriale de ces externalités ?*** C'est-à-dire est-ce que les habitants de toute la communauté vivant dans la zone connectée<sup>55</sup> au système canal doivent être considérés comme des utilisateurs/ bénéficiaires du service d'eau d'irrigation, considéré alors comme un service d'eau brute ?

***Ou bien va-t-on avoir un mélange intime d'internalisations, considérant les externalités au cas par cas, principalement à la vue du caractère général, collectif ou individuel de l'intérêt qu'elles suscitent ?***

Si les auteurs optent pour une internalisation territoriale, dans le contexte très particulier des périmètres rizicoles des tropiques humides du Sri Lanka, nous préférons repousser la réponse à ces questions dans le contexte méditerranéen dans le cadre d'un futur travail de thèse sur la question.

Si d'autres structures de gestion semblent plus adéquates que l'association syndicale pour proposer ces services d'externalités, à commencer par le syndicat mixte, la question reste posée quant à l'évolution que doivent suivre l'utilisation de ces réseaux et la mission de ces associations d'irrigation gravitaire. Quoi qu'il en soit, la mise en place de cette nouvelle forme prometteuse de gestion de l'eau et des territoires ne peut attendre l'avènement de systèmes d'informations perfectionnés offrant une information plus précise sur ces externalités, qui nous permettraient de rentrer dans les canons d'une gestion plus classique de ces services d'externalités.

---

<sup>55</sup> Par le biais de la topographie, de la nappe phréatique, de l'usage de la terre ou de l'eau, etc.



## BIBLIOGRAPHIE

AFEID, Ed. (2001). *L'eau pour la production alimentaire et le développement rural. Vision des acteurs français de l'eau*. Montpellier. 46p.

ANUKULARMPHAI, A. (1996). *Comment and discussion on the country institutional context*. Proceedings of the Regional Consultation Workshop on Towards Effective Water Policy in the Asian and Pacific Regions. W.L. Arriens, Bird, J., Berkoff, J., Mosley, P. (Eds). Manila, Philippines, Asian Development Bank.

BENJAMIN, J.G., PORTER, L.K., DUKE, H.R., AHUJA, L.R., et BUTTERS, G. (1998). *Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement*. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: pp.1103-1108.

BONTOUX, J. (1993). *Introduction à l'étude des eaux douces - eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson*, Cebédoc-Lavoisier Editeurs, Liège-Paris.170p.

BRL (2002a). *Etude du mouvement des eaux du canal de Gignac*. Plaquette de présentation. 4p.

BRL (2002b). *Etude du mouvement des eaux du canal de Gignac. Phase III : Interprétation des mesures et Analyse des flux hydrauliques sur le périmètre irrigué*.

CHAMBRE D'AGRICULTURE PACA (2000). *L'irrigation Gravitaire, un héritage collectif pour les besoins d'aujourd'hui*, MAPAAR Région PACA, DIREN, Agence de l'Eau RMC. Journées Techniques Agriculture Environnement, Avignon. 14 et 15 septembre 2000. 237p + annexes.

DATAR (2002). *Le Schéma de Services Collectifs des Espaces Naturels et Ruraux*. 123p.

DÉLÉGATION À L'AMÉNAGEMENT ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE DU TERRITOIRE (2001). *Rapport portant avis sur le projet de décret approuvant les schémas de services collectifs*. Sénat, session ordinaire 2000-2001, n°395. 431p + annexes.

ENSAM (2003). *Fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation gravitaire*. Séminaire de la formation " Gestion de l'eau, des effluents et des déchets ". ENSA Montpellier, Chambre d'Agriculture de Languedoc Roussillon, VERSeau. 144p.

FÉDÉRATION DES ASSOCIATIONS SYNDICALES DU VAUCLUSE (2000). *Schéma directeur d'hydraulique agricole du Vaucluse*.

FEUILLETTE, S., GASSELIN, P., RUF, T., et GARIN, P. (1997). *Situation de l'irrigation urbaine et péri-urbaine du canal de Manosque*. In: *Travaux d'étude pour le Schéma d'orientation pour le canal de Manosque*. Cemagref-Ardepi-Orstom. Montpellier. 23 pages + annexes.

GARIN, P., et LOUBIER, S. (2002a). *Durabilité et fragilité des Associations Syndicales Autorisées (ASA) d'irrigation en France*. Compte rendu pour l'Académie de l'Agriculture Fr n°88(3): p.61-71.

GARIN, P., LOUBIER, S., GLEYSSES, G., PLATON, J.-P., et LUNET DE LAJONQUIERE, Y. (2001). *Les associations syndicales autorisées : Bilan d'étude sur leur fonctionnement et leurs stratégies de maintenance*. Cemagref, Série Irrigation "Rapports" 2001-01. Montpellier. 57p.

GARIN, P., MONTGINOUL, M., et RUF, T. (2002b). *Intégration du multi-usage de l'eau dans les périmètres irrigués méditerranéens*. Irrigation water policies: micro and macro considerations, Agadir (Maroc). 15-17 juin 2002. 13p.

GARIN, P., PLATON, J.P., et PITON, N. (1997). *Situation de l'agriculture irriguée et évaluation des impacts agricoles d'un projet de réseaux sous pression pour le périmètre de Manosque*. In: *Travaux d'étude pour le Schéma d'orientation pour le canal de Manosque*. Cemagref-Ardepi-Orstom. Montpellier. 28p. + Annexes.

GARROD, et WILLIS (1991). *The hedonic price method and the valuation of countryside characteristics*. ESRC 14.

HYDROSOL INGÉNIERIE (2000). *Etude du mouvement général des eaux des canaux de la plaine Cavaillonnaise - Canal Saint-Julien, Canal du Plan Oriental, Canal du Cabedan Neuf, Canal des Balaruts*. Rapport final.

HYDROSOL INGÉNIERIE (2001). *Etude du mouvement général des eaux des canaux de la plaine cavaillonnaise*.

IMAD, E. (2003). *Prévention de l'intrusion de l'eau de mer par la recharge artificielle de la nappe phréatique sur la côte libanaise*. Liban.

LEHRSCHE, G.A., SOJKA, R.E., et WESTERMANN, D.T. (2000). *Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yields*. pp.1266-1275.

LUC, J., et VANDERSMITH, M. (1990). *Rôle de la nappe dans l'alimentation hydrique des cultures en Costières*. Rapport final ASF.

MAILHOL, J.-C. (2001). *Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison*. Thèse de l'Université Montpellier II, formation doctorale Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental. 312p.

MAILHOL, J.-C., CREVOISIER, D., et TRIKI, K. (2004). *Impact of water application conditions on nitrogen leaching under furrow irrigation: Experimental and modelling approaches*, (à paraître).

MICHALLAND, B., et VOLLET, D. (1998). *Application de la méthode des prix hédonistes au cas des aménités produites par les activités agricoles et forestières*, Cemagref Clermont-Ferrand, 75p.

MICHALLAND, B., et VOLLET, D. (1999). *Utilisation de la méthode des prix hédonistes pour l'évaluation des aménités agricoles et forestières*. Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales 51: pp.42-64.

MONTGINOUL, M., LUNET DE LAJONQUIÈRE, Y., et GARIN, P. (2002a). *Impact de la présence d'un réseau de distribution d'eau brute sur la consommation en eau potable. Le cas de la commune de Gignac (34)*. UMR GSP Cemagref-ENGEES, Strasbourg, 27 p.

MONTGINOUL, M., et RENAULT, D. (2003). *Economic instruments for water management in the presence of positive externalities: the case of riced-based irrigation in Sri Lanka*. The Economics of water management in developing countries. Problems, principles and policies. In Phoebe Koundouri, Panos Pashardes, Timothy M. Swanwon, and Anastasios Xepapadeas Eds. United Kingdom, Edward Elgar: pp.116-133.

MONTGINOUL, M., et RINAUDO, J.D. (2002b). *Impact de la tarification sur les stratégies de consommation et d'approvisionnement en eau des ménages*. SHF "Economie de l'eau", Paris. 24-26sept. 8p.

NEMETH, I. (2001). *Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique*. Ecole Doctorale Science de la terre et de l'eau. Montpellier, Université Montpellier II. 260p.

NUNES, P.-A.-L.-D., et VAN DER BERGH, J.-C.-J.-M. (2001). *Economic valuation of biodiversity: sens or nonsens?* Ecological Economics 3: pp.203-222.

OSTROM, E. (1990). *Governing the Commons: the evolution of Institutions for Collective actions*. Cambridge University Press.

OSTROM, E. (1992). *Crafting institutions for self-governing irrigation systems*. San Francisco: Institute for Contemporary Studies Press, 111p.

POIZAT, G., CHAUVELON, P., ROSECCHI, E., et CRIVELLI, A.J. (1998). *Passage de poissons du Rhône par les pompes d'irrigation de Camargue: premiers résultats*. Station biologique de la Tour du Valat, Le Sambuc.

POPOVA, Z., VARLEV, I., KUTEV, V., et SHOPOVA, D. (2000a). *Lysimeter study on ground water degradation due to different fertilisation and irrigation management*. Soil science agrochemistry and ecology 35(4): pp.19-22.

POPOVA, Z., VARLEV, I., KUTEV, V., et SHOPOVA, D. (2000b). *Lysimeter study on ground water degradation due to different fertilisation and irrigation management*. ICID-CIID, Water resources management in the 21st century, Budapest, HUNGARY. 1-3 June 2000. pp.177-180.

PORTNEY, P. (1994). *The contingent valuation debate : why economists should care*. Journal of Economic Perspectives 8: pp. 3-17.

RAMBONILAZA, M. (2002). *Mise en oeuvre de l'évaluation économique des aménités rurales en Europe : le cas des aménités environnementales*. Ingénieries n° spécial 2002 : " Aménités rurales, une nouvelle lecture des enjeux territoriaux ", pp.91-104.

RENAULT, D., et MONTGINOUL, M. (2003). *Positive externalities and water service management in rice-based irrigation systems of the humid tropics*. Agricultural Water Management 59: pp.171-189.

STENGER, A., et WILLINGER, M. (1995). *Preservation value for groundwater quality in a large aquifer: a contingent valuation study of the Alsatian aquifer*. Sixth annual meeting of the European Association of Environmental Resource Economists (EAERE), Umea University, Umea, Suède. June 17-20 1995.

TARDIEU, H. (2000). *La valeur de l'eau en agriculture irriguée : une information économique nécessaire pour mieux réguler la gestion de l'eau et des productions agricoles dans un marché ouvert*. Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, Tarbes (France), 14p.

TIERCELIN, J.-R. (1998). *Traité d'irrigation*. Paris. 233p.

WILKINS-WELLS, J., et PODMORE, T.H. (2003). *The benefits and costs of pressurized dual water systems in Colorado and the potential role of canal companies and irrigation districts in providing the pressurized irrigation water supply portion of dual systems*. Sociology Water Lab, Colorado Institute for Irrigation Management, Colorado State University. Colorado, USA. 175 pages.

WILLINGER, M. (1996). *La méthode d'évaluation contingente : de l'observation à la construction des valeurs de préservation*. Natures, Sciences et Sociétés 4(1): pp.6-22.

# **A N N E X E S**



## **Annexe 1**

**SOLUTIONS POUVANT ETRE APORTEES AUX EXTERNALITES  
NEGATIVES ASSOCIEES A L'ASSAINISSEMENT PLUVIAL ET A LA  
LUTTE CONTRE LES INONDATIONS**

## **QUELLE SOLUTION APPORTER AUX EXTERNALITES NEGATIVES DE L'ASSAINISSEMENT PLUVIAL ET DE LA LUTTE CONTRE LES INONDATIONS ?**

### **Dans la lutte contre les inondations**

Il existe deux solutions permettant de s'affranchir ou de limiter le risque d'inondation à l'aval. Une ASA ou une commune peut par exemple contractualiser avec un agriculteur propriétaire pour utiliser des parcelles agricoles comme zone d'expansion de crue. L'agriculteur sera indemnisé pour les dégâts occasionnés aux cultures, par exemple sur la base d'un barème établi par la chambre d'agriculture (ex : ASA du bassin versant du Vistre) [ENSAM, 2003]. Une commune peut également décider de construire un bassin de rétention destiné à recueillir les eaux du canal lors des crues. Cette solution permet de protéger les zones vulnérables contre cet aléas, en collectant et stockant d'importants volumes d'eau (de l'ordre du million de m<sup>3</sup>), et en permettant l'écêtement des pics de crues. Elle permet de plus de choisir la période de retour des crues contre laquelle on souhaite protéger ces zones, ce qui constitue une protection plus importante et parfois mieux appropriée aux objectifs de protection que se fixe une commune. Cette solution se heurte cependant à d'importants problèmes. Tout d'abord un bassin de rétention coûte très cher. C'est une solution qui reste difficilement envisageable pour de petites communes dont l'intérêt qu'elle retire d'un tel ouvrage ne se justifie pas compte tenu des dépenses à engager. L'intérêt général d'un tel ouvrage peut néanmoins mener à la création d'une structure intercommunale pour que soit construit l'ouvrage. Ensuite la mise en place de telles infrastructures nécessite de disposer d'un espace suffisant, et que cet espace ne soit pas soumis à de trop importantes pressions foncières. Enfin ces ouvrages ne sont sollicités que de manière très ponctuelle, et paraissent inutiles aux yeux d'une partie de la population le reste du temps. Il est important de valoriser ces ouvrages dans le temps, en leur conférant des utilités alternatives (terrains de sports de plein air), ou en les intégrant à des zones préétablies. Cette valorisation a cependant un coût, qui peut certes apparaître rentable par rapport au surplus de bien-être dégagé pour la population (ex : terrain de football), mais peut rester inabordable pour certaines communes.

### **Solutions existantes contre le risque de débordement suite à l'assainissement pluvial**

#### La régulation

Une première solution contre le risque de débordement réside dans une régulation des débits dans les canaux adaptée et efficace. Il est possible de s'affranchir des risques de débordements :

- *en multipliant les points de délestage et en s'assurant de la régularité de leur espacement* ; Par exemple, dans le cas de canaux assurant l'évacuation des eaux pluviales de communes successives, des zones de décharge peuvent être prévues à la sortie de chaque commune, ce qui permet une gestion plus efficace des volumes transités en ne cumulant pas les débits et les hauteurs d'eau de l'amont vers l'aval. Cela permet également d'opérer une dilution des pollutions introduites par les eaux urbaines.
- *et en opérant les vannes de délestage de manière appropriée*. Les vannes de délestage peuvent être actionnées manuellement par le garde canal, ou être automatisées. L'automatisation des vannes a l'avantage de permettre un contrôle optimisé des débits

dans le canal, diminuant les risques de débordements. La surveillance des vannes peut être visuelle, assurée par un système d'information situé à proximité de la vanne, ou encore par télésurveillance. Dans le cas général, l'ouverture automatique des vannes dépend de paramètres mesurés, connus ou estimés tels que le niveau d'eau amont, la pluviométrie, la demande en eau prévisionnelle des irrigants, ou encore leur consommation effective (dans le cas d'une irrigation à la demande). Concernant l'assainissement pluvial, le principal problème qui se pose est que le gestionnaire ne peut quasiment jamais prévoir dans sa gestion les débits concernés par l'assainissement pluvial, ce qui rend nécessaire la création d'un système d'information à cet effet.

### La construction de bassins de rétention

Une autre solution, à l'instar de la lutte contre les inondations, réside dans la construction de petits bassins de rétention, destinés à récupérer les eaux pluviales et de ressuyage. Si le ou les bassins de rétentions sont correctement situés dans le linéaire du canal, leur capacité permet d'avoir une marge de sécurité dans les volumes d'eau pluviale récoltés, principalement par rapport à l'augmentation des zones périurbaines.

### Des conventions ASA / lotisseur

En nous inspirant du rapport [ENSAM, 2003], nous allons présenter trois exemples concernant l'évacuation des eaux pluviales et la création de bassins de rétention, représentatifs de trois cas de schéma d'entente possibles. Un premier schéma est celui adopté par l'ASA de Vernet-Pia, qui impose à tout promoteur immobilier dont l'intervention s'inscrit dans le périmètre syndical de l'ASA de créer un bassin de rétention pour chaque nouvelle construction. Un deuxième schéma relatif à la mise en place de bassins de rétention est celui proposé par le canal de Carpentras. Une convention bipartite est signée entre l'association et la commune, selon laquelle la commune a à charge de créer les bassins de retentions nécessaires et doit participer financièrement aux installations nécessaires pour évacuer les eaux pluviales vers le canal. Pour les auteurs, cette convention ne permet cependant pas d'effacer les incertitudes concernant les responsabilités en cas de poursuites judiciaires par exemple suite à des inondations. Enfin un troisième schéma de fonctionnement est celui adopté par l'ASA de Thuir. Il consiste à signer une convention tripartite entre l'ASA, la commune et le(s) lotisseur(s), qui :

- i) impose au lotisseur de construire un bassin de rétention pour chaque nouvelle construction. L'ASA donne son accord au déversement des eaux de ruissellement dans le canal à la condition que les dimensions du bassin soient satisfaisantes, et qu'il existe un dispositif permettant de contrôler les débits transférés au canal selon la volonté de l'ASA. Cela lui permet de maîtriser ces nouveaux débits entrants, et d'améliorer sa gestion de l'eau dans le canal ;
- ii) fixe un débit maximum admissible ;
- iii) et dégage la responsabilité de l'ASA dans le cas où ce débit maximum serait dépassé. La responsabilité d'éventuels dégâts occasionnés par des débordements revient alors au lotisseur, pendant les travaux, puis ensuite à la commune.

Les auteurs précisent cependant que cette convention reste provisoire dans le cas de l'ASA de Thuir, et ne sera valable que tant que la commune n'aura pas élaboré son schéma d'assainissement pluvial. Quoiqu'il en soit, ces exemples nous montrent comment la prise en compte des écoulements urbains dans la gestion du canal nécessite un système d'information sur ces nouveaux apports d'eau.

### Un choix de gestion

Deux types de gestion peuvent être menés : une gestion des débits *a priori*, ou *a posteriori*.

La gestion *a priori* correspond à l'idée où l'on maîtrise les débits apportés par les différentes sources d'eau (apport d'eau depuis l'amont du périmètre, apport d'eaux pluviales rurales et urbaines, apports par ressuyage, ...), dans le but de les accepter ou de les refuser à l'entrée du canal principal pour maîtriser les volumes qu'il transite. L'apport d'eau prioritaire est celui provenant de l'entrée du périmètre (qu'il faut essayer de ne pas faire trop varier car cette variation ne se fera sentir à l'aval que longtemps après). La connaissance et la maîtrise des autres apports d'eau permettent de choisir les moments les plus propices à leur insertion dans le canal. Cela permet par exemple de pouvoir ne pas accepter des volumes d'eaux pluviales urbaines lorsque le réseau est déjà beaucoup sollicité par ailleurs, comme le fait l'ASA de Thuir en imposant aux lotissements des bassins de rétention et des mesures de débits rejetés dans les canaux.

Dans la gestion *a posteriori*, tous les apports d'eau sont acceptés dans le canal et la gestion des volumes se fait ensuite par le biais de la régulation. Dans cette situation il n'est pas nécessaire de connaître les débits d'entrée des différents apports. Il faut par contre être en mesure de connaître le niveau d'eau et le débit en de nombreux points du canal, afin de gérer au mieux leur régulation. Le canal de Carpentras dispose par exemple de capteurs de niveau disposés le long du canal, ainsi que de pluviomètres, le tout consultable à distance par minitel, et même, en cas de problème majeur, par téléphone portable. Dans la pratique, la gestion des apports est toujours un mélange des gestions *a priori* et *a posteriori*, où l'on cherche à la fois à connaître et à maîtriser les volumes transités dans les canaux, et à pouvoir contrôler les entrées potentielles d'eau dans le canal.

### Un système d'information sur les précipitations

La gestion des débits est cependant plus délicate lors d'une forte pluie. Les temps de réponse importants de la régulation de l'eau dans le canal ne permettent pas une gestion du canal suffisamment réactive lorsqu'un événement pluvieux important intervient. Par conséquent, il est nécessaire de disposer d'une information sur les précipitations à venir. Dans le cas de petites ASA, dont le faible linéaire de réseau permet d'avoir des temps de réaction sur les canaux corrects, les bulletins d'alerte émis par météo France peuvent constituer un système d'information peu coûteux qui soit suffisant pour permettre de vider le canal à temps en cas de forte précipitation. Dans le cas de grandes ASA, le linéaire de canal est souvent trop important pour observer des temps de réaction suffisamment rapides [ENSAM, 2003]. Sur l'ASF de Carpentras, dont le canal s'étend sur 85km, les temps de retard sont de l'ordre de la journée, ce qui empêche de vider le canal dans les temps suite à une alerte de Météo France. C'est pourquoi pour ce genre d'association il peut être préférable de mettre en place des pluviomètres. Ces derniers peuvent être consultables à distance grâce à la télétransmission.

En apparence, il pourrait être envisageable d'asservir la régulation automatique des vannes de délestage aux mesures faites par les pluviomètres, mais ces derniers posent des difficultés qui ne permettent pas d'atteindre une fiabilité suffisante dans ces mesures pour qu'elles puissent être prises en compte de manière brute dans une automatisation. Dans le cas où une ASA n'a pas les capacités techniques ou financières pour adopter un système de surveillance à distance, des astreintes doivent être mises en place, afin qu'en cas de forte précipitation une intervention puisse être menée rapidement sur les ouvrages de régulation, qui ne peut cependant se faire sans un système d'information fiable et rapide d'annonce de crues. C'est ce qui fut défaut au canal Saint-Julien lors des crues du Coulon de 1994. La mauvaise communication ne permit pas aux services techniques d'opérer sur le canal, ce qui eu pour conséquence de générer une inondation sur un quartier normalement protégé [ENSAM, 2003].

#### Un système d'information sur ces nouveaux apports d'eau

Pour une bonne gestion de l'eau dans le canal, le gestionnaire doit être en mesure de connaître et de maîtriser les débits entrant et sortant des canaux, pour satisfaire au mieux les demandes en eau prévisionnelles des irrigants. Les écoulements supplémentaires provenant de l'assainissement pluvial constituent des apports en entrée qu'il faut pouvoir intégrer à la gestion quantitative de l'eau dans les canaux, au risque de créer des débordements localisés. En effet, en zone méditerranéenne la période estivale est marquée par de violentes précipitations apportant de grandes quantités d'eau dans les canaux en peu de temps. Les temps de réaction doivent être très court et les eaux de ruissellement urbain sont susceptibles de provoquer le débordement du canal si l'on ne les a pas prévues. Ceci montre l'importance d'un système d'information rapide, précis et fiable, permettant de gérer au mieux les quantités d'eau présentes dans les canaux par les opérations de régulation et de délestage.



## **Annexe 2**

### **TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENTES ETUDES DE FLUX ANALYSEES**

[*ENSAM*, 2003].

## CODE DE LECTURE DU TABLEAU CI-DESSOUS

### **A/ Milieu physique de l'étude**

- **Climat / pluviométrie :** 1. Climat méditerranéen
- **Type(s) de végétation cultivée sur la zone d'étude :**
  1. Maraîchage
  2. Fruitiers
  3. Oliviers
  4. Vignes
  5. Prairies
  6. Céréales
  7. Maïs
  8. Oléagineux
  9. Friches
- **Type(s) de sol(s) selon les types les plus couramment cités :**
  - Col. Coluvions
  - All. Alluvions
- **Topographie :**
  1. Pente forte
  2. Pente moyenne
  3. Pente faible
  4. Pente nulle
- **Ressources en eau naturelle (Nombre) :**
  - Cours d'eau
  - Nappe
  - Canaux

### **B/ Caractéristiques du(es) canal(aux) étudié(s)**

- **Irrigation :**
  - surfaces irriguées en hectares
  - réseau de canaux en km de longueur du réseau et du canal maître
  - débits moyens et de pointe en m<sup>3</sup>/s
  - volumes prélevés en Millions de m<sup>3</sup>/an
- **Mode d'irrigation :**
  - Sr : par submersion à la raie
  - St : par submersion totale
  - As : par aspersion
  - Lo : localisée (goutte à goutte)
- **Mode de desserte :**
  - D = à la Demande
  - T = au Tour d'eau
- **Caractéristiques des canaux :**
  - T = canaux en terre
  - B = canaux bétonnés
- **Origine des eaux :**
  - Riv = rivière
  - Can = canaux primaires
  - Aut = autres

Lieu de l'étude	Milieu Physique						Caractéristiques des canaux										Résultats de l'étude						
	Végétation			Sols	Ressources en eau			Irrigation						Mode de desserte	Caractéristiques des canaux	Origine des eaux	Pourcentage de répartition des eaux prélevées (%)						
	Principale	Secondaire	Tertiaire		Nappe	Cours d'eau	Canaux	Surfaces irriguées (ha)	Réseaux de canaux (km)		Débit prélevé (m <sup>3</sup> /s)		Volumes prélevés (Mm <sup>3</sup> )				Mode d'irrigation		Type	Tour d'eau (j)	Milieux naturels	Nappe	eaux de surface
				Totalité du réseau					Canal maître	Débit moyen	Débit de pointe	Principale		Secondaire									
Canal de Braux	5	10					32		10		0,25				D		T	B(2)		90,5	34,5	56	8,5
Grand canal de la Bâtie	5	8		Col			100		5			2	St		T	10	T			84	56	28	16
Canal du Bourg	5	6	1				135		10		0,326						T		Riv	83,3	22,7	60,6	16,2
Canal de la Plaine de l'Escale	2	7	1			1	163		40		1	11	Sr				T	B(0,1)	Riv	92,6	52,6	40	7,2
Canal des Herbeys	5	6	7	Col		1	200		12		1,05	4	Sr	St	T	40	T	B()	Riv	90	70	20	10
Fare des Oliviers	4	9	1				279	38	8			3	Sr	St	T	6			Riv	74	47	27	26
Mérindol	2	1	5	All	1	1	2	325	30	0	0,42	0,73	13	Sr	St	D			Can	85	32	53	14
Brillane	2	6	10			1	400				4	55	Sr	St	D				Riv	97	70	27	3
Noves	2	1	9				503					6	Sr	St	D				Can	54			46
Charleval, Bonneval, des Royères	2	1	6				514		5,1			9	Sr	St	T	14			Riv+Can	77	29	48	23
Béal du Moulin	2	1	9	All			588	44	9,5			17	Sr	St	D				Can	78	60	18	22
Canal du Moulin et de Craponne	6	1	9				600	35	9			16	Sr	St	D				Autres	68	20	48	32
Cabannes	2	9					1000	75	17			12	Sr	St	T	14			Can	53	22	31	47
Manosque	2	6				1	1000				1	45	Sr	St	T				Riv	89	34	55	10
Grans	5						1040					23	Sr	St	T	10			Can	58	22	36	42
Congrès et Canalet	5						1166					30	Sr	St	T				Can	64	55	9	36
Peyrolles	6	9	7				1800	204	24			39	Sr	St	D				Autres	73	27	46	26
Log4c	2	1	9				1990					23	Sr	St					Can	52	52	0	48
Sud Lubéron	2	1	5				2071		53			18							Riv	44	31,5	12,5	56,5
Châteaurenard	2	1	10				2450	150				45	Sr	St	D				Riv+Can	74	42	32	26
Vallée des Baux	1	9		Col	1	1	2750	233	53	2,4	3,86	44	Sr	St	D	9,5			Riv	81	47	34	19
Gignac	4	9		All		1	2800		40	2,1	5	48	Sr	Lo	T		B		Riv	93	44	49	7
Gignac	4	9		All		1	2800		40	2,1	5	48	Sr	Lo	T		B		Riv	95	31	64	5
Saint Chamas	5	10	1					7	3,5				Sr	St	T				Can	67	63	4	33
Saint-Julien	2	9	1	All	1	2	3800		38		7,23	124	Sr	St	D		T	B()	Riv	84	29	55	16

Tableau 13 : Les résultats des différentes études de flux analysées par [ENSAM, 2003]

(source : [ENSAM, 2003], p.102)



## **Annexe 3**

### **SYNTHESE DES METHODES EMPLOYEES DANS LES 23 ETUDES DE FLUX ANALYSEES**

Termes à mesurer		Méthode de mesure		Nombre d'études	
Entrées d'eau sur le périmètre d'irrigation	Pluies	Pluviométrie	valeurs considérées	moyenne sur x années	0
				réelle	23
			lieu de mesure	départementale	0
				locale	23
	Prélèvements	Méthodes de mesure		niveau d'eau	17
				ouvrages de régulation	1
				autres ou non précisés	6
		Nombre de sites choisis		1	1
				plus de 1	4
				tous	18
		Fréquence de mesure		manuelles (hebdomadaire)	5
				manuelles (aléatoire)	0
				continue	17
				non renseignée	1
		Durée		moins d'une saison	4
				saison	13
				année	5
	plus d'une année		1		
Ecoulements de surface	Méthodes de mesure		niveau d'eau	19	
			ouvrages de régulation	0	
			autres ou non précisés	3	
	Nombre de sites choisis		1	4	
			plus de 1	15	
			tous	4	
	Détermination directe	Fréquence de mesure		manuelles (hebdomadaire)	5
				manuelles (aléatoire)	3
				continue	15
				non renseignée	1
	Durée		moins d'une saison d'irrigation	5	
			saison d'irrigation	13	
			année	5	
		plus d'une année	1		
Détermination indirecte		non mesurée	1		
		négligée	0		
Restitutions profondes	Détermination directe	Méthodes de mesure	case lysimétrique	5	
				mesure de la hauteur de la nappe	2
				analyse isotopique	2
	Détermination indirecte	Méthodes d'estimation	par bilan au niveau de la parcelle	12	
		estimation en considérant étude SCP (1)	4		
Consommation des plantes	Evapo-transpiration potentielle	valeurs considérées		moyenne sur x années	7
				réelle	17
		Mode		calcul selon ETP Penman	4
				calcul selon ETP Bowen	11
				non précisé	8
	Lieu		départementale	5	
			locale	18	
	Coefficients culturaux	valeurs considérées		moyenne	0
				évolutive selon la croissance	23
		Occupation du sol		enquête ou données de terrain	4
				images satellitaires	11
			non précisé	8	
	Base de calcul			$Be = ETP * Kc - Pe$	15
			en se basant sur la réserve utile	8	

**Tableau 14 : Synthèse des méthodes employées dans les 23 études de flux analysées par [ENSAM, 2003]**  
(source : [ENSAM, 2003], p.64)

## **Annexe 4**

### **METHODE DE DETERMINATION DE LA REALIMENTATION DE LA NAPPE PAR DEDUCTION DU BILAN HYDRIQUE**

La notion de bilan hydrique diffère selon le domaine d'application. Un bilan hydrique agronomique sera plus attentif à l'évolution de la réserve d'eau dans le sol, dans le but de prévoir les besoins en eau des cultures et de conduire les irrigations adéquates. Il sera par conséquent mené à l'échelle de la parcelle. Un bilan hydrique hydrologique sera lui plus attentif à la notion de flux en jeu, dans le but de les quantifier pour, par exemple, établir l'alimentation d'une nappe phréatique. Son échelle privilégiée sera celle d'un bassin versant (ou équivalent). On se rapprochera ici de ce dernier type de bilan hydrique.

#### **A/ LE SYSTEME CONSIDERE POUR ETABLIR LE BILAN HYDRIQUE**

Le système considéré pour établir un bilan hydrique sur les types de flux qui nous concernent est d'une manière générale le périmètre irrigué. Définir un système d'étude nécessite néanmoins de délimiter de manière stricte la zone d'étude, ce qui pose déjà un premier problème. Prend-on en compte uniquement les parcelles agricoles ? Certes non, puisque les canaux jouent un rôle majeur dans les flux d'eau observés. Les canaux, dans leur totalité, doivent donc être intégrés dans le système que l'on considère (canal principal, secondaire, tertiaire, ..., ainsi que les canaux de décharge et les filioles d'assainissement). De même, les canaux en terre alimentent en eau les sols qui les entourent. Généralement ces sols correspondent aux parcelles agricoles du périmètre. Cependant ce n'est pas toujours le cas. Les canaux peuvent transporter l'eau depuis le point de prélèvement pendant de longues distances avant d'atteindre le périmètre irrigué proprement dit. De même, le rôle des canaux de décharge et des filioles est de faire sortir les eaux excédentaires du périmètre. Ils peuvent passer au sein de terres non agricoles, dont ils alimentent par les infiltrations la végétation. L'évapotranspiration de cette végétation est une sortie d'eau non négligeable du périmètre irrigué (notre calcul grossier l'estimait à environ 2% des prélèvements en rivière), et cette végétation rivulaire doit donc être intégrée au système sur le lequel on conduit le bilan hydrique. *Nous considérerons donc comme système pour mener le bilan hydrique le volume de sol constitué, en surface, des parcelles agricoles, de l'ensemble du linéaire de canaux et de sa végétation rivulaire (soit le système canal), et, en profondeur, la profondeur de la zone d'influence racinaire moyenne.*

#### **B/ LES ENTREES-SORTIES D'EAU DU PERIMETRE IRRIGUE**

Toutes les entrées – sorties du périmètre doivent être listées pour le bilan hydrique. Nous essayerons d'être le plus exhaustif possible dans les flux d'eau en jeu, quitte à ensuite en négliger certains.

#### **Entrées d'eau sur le périmètre irrigué :**

##### 1. Précipitations

##### a. Les précipitations directes sur le périmètre irrigué (**P**)

- i. Part des précipitations infiltrée dans le sol
- ii. Part des précipitations ruisselée dans les canaux
  - ruissellement sur les surfaces naturelles
  - ruissellement sur les surfaces imperméabilisées

- b. Les précipitations indirectes, tombant en dehors du périmètre irrigué, mais dont la part ruisselée rejoint le système canal ( $R^+$ )<sup>56</sup>
- 2. Prélèvements en rivière (ou en canaux) à l'amont du périmètre (**PR**)
- 3. Les remontées capillaires depuis la nappe (**RC**)

### **Sorties d'eau sur le périmètre irrigué :**

- 1. Evapotranspiration du couvert végétal
  - a. Consommation en eau des cultures (**ETRc**)
  - b. Consommation en eau de la végétation associée aux canaux (**ETRv**)
- 2. Restitutions d'eau au milieu naturel
  - a. par écoulements de surface vers les exutoires naturels (cours d'eau) (**Rs**)
    - i. par les canaux de décharge
    - ii. par les filioles récupérant les eaux excédentaires à l'aval des parcelles
  - b. **par drainage profond vers la nappe (D)**
    - i. depuis la parcelle irriguée
    - ii. depuis les canaux et les filioles
  - c. par écoulements de subsurface (Hypodermiques) (**REH**)
- 3. Evaporation de surface dans les canaux (**EVs**)
- 4. Prélèvements urbains d'eau brute (usagers non agricoles appartenant au périmètre, commune de montagne prélevant de l'eau dans les canaux, ..., que la desserte soit à surface libre ou sous pression) (**PU**)

Le bilan hydrique, dérivant de l'équation de conservation de la masse, et permettant la détermination du flux de drainage profond sur tout le système considéré devient ici :

#### **Équation 3**

$$D = P + PR + RC + R^+ - ETRc - ETRv - R_s - R_{EH} - EV_s - PU \pm \Delta S$$

$D$	<i>Drainage en profondeur</i>
$P$	<i>Pluie</i>
$PR$	<i>Prélèvements en rivière</i>
$RC$	<i>Remontées capillaires</i>
$R^+$	<i>Ruissellement exogène au système, qui entre dans le système</i>
$ETRc$	<i>Evapotranspiration des cultures</i>
$ETRv$	<i>Evapotranspiration de la végétation rivulaire (arbres, haies, ...)</i>
$R_s$	<i>Restitutions de surface aux cours d'eau</i>
$R_{EH}$	<i>Restitutions par écoulements hypodermiques aux eaux de surface</i>
$EV_s$	<i>Evaporation de surface dans les canaux</i>
$PU$	<i>Prélèvements urbains</i>
$\Delta S$	<i>Variation du stock d'eau présent dans la réserve utile du sol</i>

<sup>56</sup> Signe + pour signifier que ce ruissellement est une entrée du système.

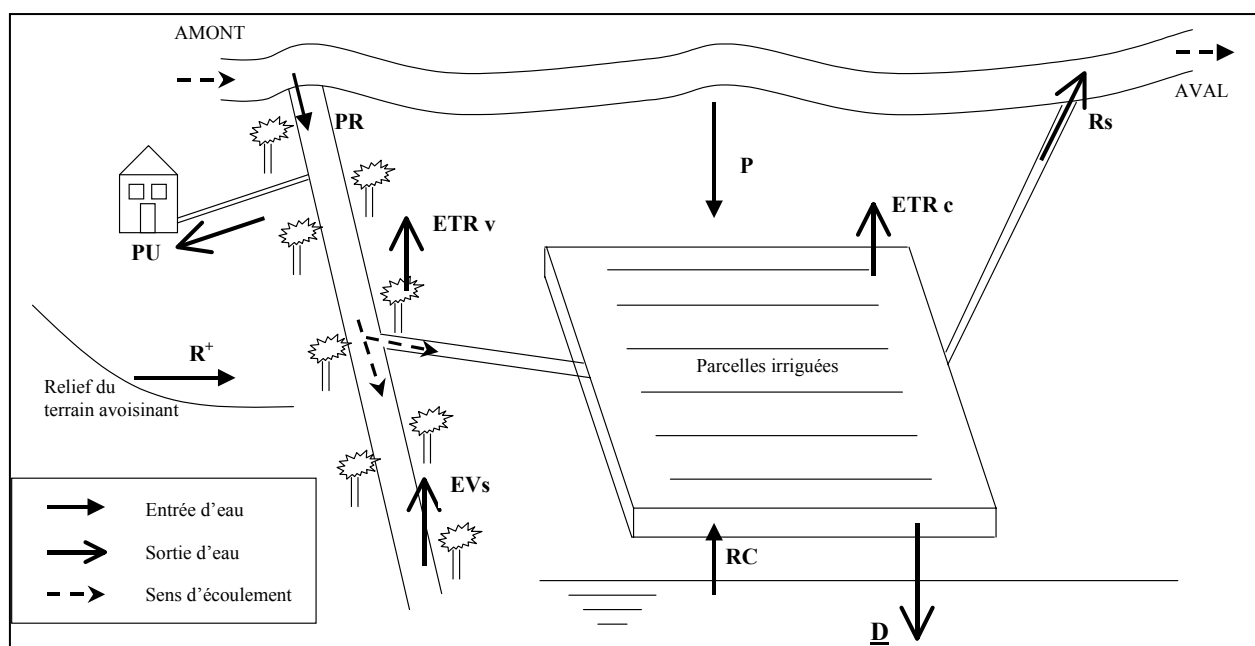


Figure 14 : Schématisation des entrées et sorties d'eau prises en compte dans le bilan hydrique

Chaque terme du bilan hydrique peut être soit estimé, soit mesuré. Les termes mesurés peuvent l'être à l'échelle du périmètre irrigué, ou à l'échelle de la parcelle puis spatialisées. Que les termes du bilan hydrique soient mesurés ou estimés, plusieurs méthodes peuvent être employées. Le choix des méthodes est lié à leur facilité de mise en œuvre, à leur adéquation avec les conditions particulières du périmètre irrigué visé, au degré de précision souhaité, et enfin à leur coût. Nous allons exposer ces méthodes de quantification, en partant des termes de l'Équation 3, de la gauche vers la droite.

## C/ L'ÉVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

### ENTREES D'EAU

#### 1. LES PRÉCIPITATIONS (P)

##### **Cas particulier d'un périmètre irrigué**

Ce terme du bilan hydrique doit être apprécié à la vue du contexte dans lequel on cherche à l'estimer. Lorsqu'il s'agit d'effectuer un bilan hydrique sur un bassin versant naturel, les entrées d'eau du système sont composées des précipitations et des écoulements souterrains. La comparaison de ces deux grandeurs conduit généralement à positionner les précipitations comme la principale grandeur d'entrée du système. Dans ce contexte, il est nécessaire de pouvoir estimer ou mesurer cette grandeur avec une bonne précision, sans quoi les erreurs d'appréciation sur cette entrée du système conduiront à un bilan hydrique largement biaisé.

La spécificité d'un bilan hydrique mené sur un périmètre irrigué (ou une parcelle irriguée) tient à ce que les apports d'eau artificiels par l'irrigation (inclus dans le terme PR) représentent de loin la plus importante part des entrées d'eau sur le système. Les précipitations tiennent alors une place moins importante, et leur mesure / estimation ne

requiert pas forcément le même niveau de précision que dans le cas précédent. Les précipitations sont donc ici un terme important mais pas prépondérant du bilan hydrique.

### **Estimation de la valeur des précipitations**

Il est tout d'abord possible d'obtenir une estimation des précipitations grâce aux mesures effectuées par Météo France. L'avantage d'une telle estimation réside principalement dans son coût, et dans la période de mesures sur laquelle elle se base. Les données de Météo France peuvent être utilisées comme mesures d'un événement pluvieux donné, ou encore comme des mesures synthétisant plusieurs dizaines d'années d'observation (par exemple dans le cas d'un calcul d'ETP particulier). De plus, les mesures de Météo France peuvent être considérées comme fiables compte tenu des difficultés de mesure généralement associées à la mesure des précipitations. La précision de la pluviométrie donnée par Météo France est de l'ordre de 5%.

Le problème principal d'une estimation de la pluviométrie à l'échelle d'un périmètre irrigué sur la base des mesures de Météo France réside dans l'échelle spatiale de pertinence des mesures fournies. Les données de Météo France sont issues de mesures mises en œuvre à une échelle spatiale beaucoup plus importante que celle d'un périmètre irrigué. Choisir ces valeurs comme valeurs des précipitations moyennes du périmètre dans la région concernée conduit donc à une erreur liée à l'hétérogénéité spatiale des précipitations. Cette erreur sera d'autant plus importante que les périmètres d'irrigation gravitaire sont majoritairement situés dans la région méditerranéenne, dont on a eu l'occasion de décrire les particularités climatiques (intensité, caractère ponctuel et très forte hétérogénéité des précipitations). C'est ce qui explique pourquoi seule la pluviométrie locale et réelle (par opposition à une valeur de pluviométrie moyennée sur x années) est systématiquement utilisée lors des études de flux présentées dans le Tableau 14 de l'Annexe 3 (23/23).

Les apports d'eau par les précipitations sont doubles. Il y a les apports d'eau provenant des précipitations directes sur le périmètre irrigué d'une part, qui sont intégralement prises en compte en entrée du bilan hydrique. Il y a, d'autre part, l'entrée d'eau provenant du ruissellement des précipitations extérieures au périmètre, qui doit également être prise en compte dans le bilan hydrique. Cette contribution aux entrées d'eau est exposée plus bas.

## **2. LES PRELEVEMENTS EN RIVIERE (PR)**

Les prélèvements en rivière constituent la grandeur d'entrée principale du système. Les systèmes de mesure et les biais existant dans la quantification de ces volumes ont été exposés dans la partie principale du rapport. Il en ressort que les prélèvements en rivière sont généralement quantifiés avec une précision suffisante, mais que la quantification de cette grandeur d'entrée du bilan hydrique peut ne pas être fiable dans les deux cas suivants :

- i) les prélèvements sont mesurés à l'entrée du périmètre irrigué, et non au droit de la prise d'eau ;
- ii) les prélèvements globaux sont extrapolés sur la base d'un nombre non exhaustif ou non représentatif de points de prélèvements.

Sur les 23 études considérées, une étude ne considère qu'un seul point de prélèvement, 4 en considèrent plus de 1, et 18 les considèrent en intégralité.

### **3. LES REMONTEES CAPILLAIRES (RC)**

Les remontées capillaires constituent un apport d'eau pour le système, lorsqu'elles proviennent de la nappe. Cette composante du bilan hydrique ne doit donc être considérée que dans le cas où existe une nappe peu profonde. Dans ce cas, les RC peuvent être estimées à l'aide d'une batterie de tensiomètres distribuée dans le sol de manière à ce qu'elle assure une continuité entre le sol et la nappe (ou pourra par exemple utiliser la méthode du Plan de flux nul pour déterminer le flux des remontées capillaires, que l'on régionalise ensuite à l'échelle du périmètre irrigué, avec les problèmes que posent la régionalisation).

Ces remontées capillaires peuvent être non négligeables par exemple dans le cas d'une culture de vigne (très peu d'irrigation pour maintenir son stress hydrique). En effet, dans le cas d'une présence de disponibilité en eau à la pression atmosphérique (nappe) à faible profondeur, associée à des prélèvements de surface par les plantes, des flux ascendants en milieu non saturés sont générés, et, dans certains cas, peuvent alimenter seuls les plantes relativement peu exigeantes en eau [Luc *et al.*, 1990], telle que la vigne. Dans de telles situations, cette composante du bilan hydrique doit être déterminée. Cependant, aucune des 23 études ne prend en compte les apports d'eau par remontées capillaires (mais rien ne nous permet de dire si cette considération avait lieu d'être dans ces études).

### **4. LE RUISSELLEMENT EXOGENE AU SYSTEME, QUI ENTRE DANS LE SYSTEME (R<sup>+</sup>)**

Cette entrée d'eau dans le périmètre est difficile à déterminer avec précision. Néanmoins, nous avons vu comment la particularité de notre système était d'avoir comme entrée d'eau principale les prélèvements en rivière, nettement supérieurs en volume que l'entrée d'eau par précipitations directes, elles mêmes nettement plus importantes que le ruissellement exogène au système (précipitations extérieures au système, et le rejoignant par ruissellement). Cette entrée d'eau dans le système ne requiert donc pas une grande précision, et un simple ordre de grandeur suffit. Sa non prise en compte constitue une source d'imprécision supplémentaire, hormis en situation topographique de très faible pente, où ce terme est négligeable. Estimer cette grandeur revient à effectuer une transformation pluie-débit sur le bassin versant associé au réseau de canaux d'irrigation, sur la base de la pluviométrie mesurée ou estimée. Une autre solution est de considérer des valeurs de ruissellement communément admises sur la région méditerranéenne : 80% des volumes précipités sont ruisselés (une étude menée par la DDAF en 1991 ramenait ce chiffre à 50%) [ENSAM, 2003]. En appliquant ces valeurs sur la superficie du bassin versant drainée par le périmètre irrigué, on obtient une ordre de grandeur de cette entrée d'eau suffisant.

## SORTIES D'EAU

### 1. L'ÉVAPOTRANSPIRATION DES CULTURES (ETRC)

#### a. Définitions des évapotranspirations potentielle (ETP), maximale (ETM) et réelle (ETR)

Les besoins des cultures sont fixés par la demande évaporative de l'atmosphère : l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'**ETP** est définie comme « la quantité d'eau transpirée par unité de temps par un gazon bien alimenté en eau, recouvrant complètement le sol et de hauteur uniforme » ([Penman, 1948], cité par [Nemeth, 2001], p.14). L'ETP ne dépend que de la demande climatique en eau, fonction de facteurs climatiques (lumière, chaleur et humidité atmosphériques). L'ETP correspond donc à la limite supérieure du phénomène d'évaporation. Elle peut être appelée « évaporation climatique » car seuls les phénomènes physiques entrent en jeu (atmosphère), et non les phénomènes biologiques (plante). Les capacités d'évaporation de la plante sont toujours plus faibles que la demande climatique en évaporation. Cette évaporation restreinte du fait des particularités biologiques est appelée évapotranspiration maximale ETM.

L'**ETM** peut être définie comme la consommation en eau maximale d'un couvert végétal bien alimenté en eau. Elle est maximale dans le sens où elle ne prend pas en compte l'eau dont dispose réellement la plante dans le sol pour évapotranspirer. L'eau est ici considérée comme étant en quantité idéale (réserve hydrique = réserve facilement utilisable). Dès lors que l'eau n'est pas présente dans le sol dans des conditions telles qu'elles ne génèrent ni stress hydrique ni asphyxie, l'évapotranspiration de la culture sera inférieure à son évapotranspiration maximale. On parlera alors d'évapotranspiration réelle ETR.

L'**ETR** est la consommation en eau réelle de la culture. Elle dépend des conditions climatiques, du type de culture, du stade phénologique de la plante et des conditions d'humidité du sol. Si le sol peut fournir toute l'eau demandée par la plante, l'ETR sera égale à l'ETM (ex : cas de la végétation rivulaire, alimentée en continu par les canaux). Dans le cas d'une eau manquante ou en excès, l'ETR sera inférieure à l'ETM.<sup>57</sup>

#### b. La détermination de l'évapotranspiration des cultures

La détermination de l'évapotranspiration au niveau du système prendra toujours comme point de départ sa mesure ou son estimation à l'échelle de la parcelle pour une culture donnée, que l'on régionalisera ensuite au système. L'ETM peut être soit mesurée directement, soit calculée à partir de l'ETP par la relation  $ETM = kc \times ETP$ , avec kc coefficient cultural.

##### ***i) Mesure directe de l'évapotranspiration au niveau de la parcelle et régionalisation***

La mesure directe de l'ETR se fait par le biais de tensiomètres en utilisant la méthode du Plan de flux nul, ou encore à l'aide d'un lysimètre. On recrée à la surface du lysimètre la culture considérée, et on alimente la réserve hydrique du sol à l'identique de la réserve hydrique de la culture pendant la période d'irrigation. Ensuite, on détermine l'ETR par bilan hydrique dans la case lysimétrique, tous les termes étant par ailleurs connus avec précision. Cette méthode pose néanmoins un problème de représentativité important, puisque la quantité d'eau présente dans le sol suite à l'irrigation dépend des pratiques d'irrigation de chaque agriculteur, qu'aucun système d'information ne nous permet de connaître. Plus généralement, ces mesures sont beaucoup plus représentatives du contexte très particulier de la mesure (pratique

---

<sup>57</sup> Remarque : L'ETM et l'ETR prennent en compte à la fois l'eau transpirée par les cultures et l'eau évaporée par le sol.

d'irrigation, type de sol, topographie, etc.), que d'un contexte général, ce qui pose des problèmes de régionalisation des mesures.

Si ces mesures directes sont effectivement très précises, le résultat de leur régionalisation à l'échelle du périmètre est rarement fiable, car elle se heurte à l'hétérogénéité des conditions agro-pédo-climatiques. De plus, ces méthodes de mesure directes sont difficiles à mettre en place et sont relativement coûteuses. C'est pourquoi dans les études de flux considérées, la consommation en eau des plantes se base systématiquement sur l'évapotranspiration potentielle, les coefficients culturaux (23/23). Il s'agit donc de méthodes indirectes, qui consistent à i) déterminer l'ETP dans les conditions climatiques de la culture étudiée, ii) déterminer le coefficient cultural  $k_c$ , iii) en déduire l'ETM, puis supposer que l'ETR égale l'ETM en supposant que les besoins nets en irrigation sont satisfaits à chaque instant (pas de stress hydrique). C'est ce que nous allons exposer maintenant, afin d'apprécier la fiabilité et la précision de cette méthode dans le cadre des études de flux considérées.

### *ii) Estimation de l'évapotranspiration au niveau de la parcelle et régionalisation*

#### **Détermination de l'ETP**

L'ETP se calcule toujours sur des périodes mensuelles ou décennales (en mm/10j), la période décennale étant la plus adaptée aux variations observées. Deux méthodes existent. La première est expérimentale. L'ETP de référence est celle du gazon cultivé dans des conditions climatiques similaires à celles de la culture en place. Le travail expérimental consiste alors à recréer les conditions climatiques de la culture en place, mais non pas pour cette culture mais pour du gazon, puis, à l'aide d'un lysimètre, effectuer un bilan hydrique permettant d'isoler le terme d'évapotranspiration (ETP). La deuxième est analytique. Elle consiste à utiliser une formule d'évapotranspiration basée sur un bilan radiatif du couvert végétal, représentant les conditions climatiques déterminant l'ETP. Les formules utilisées sont généralement la formule de Penman et la formule de Bowen (15/23). Une station météorologique doit alors être mise en place sur le périmètre, ce qui représente un coût important. En pratique, on préférera se baser sur les mesures de l'ETP issues des stations de Météo France, donnant l'ETP décennale pour la zone considérée. La valeur de l'ETP considérée peut alors être soit une moyenne de l'ETP sur  $x$  années (7/23), soit la valeur réelle de l'ETP au moment de l'étude (17/23)<sup>58</sup>. Ce choix tient essentiellement aux conditions dans lesquelles l'étude a été effectuée. Si ces conditions étaient considérées comme des conditions normales pour la zone considérée, l'ETP réelle est utilisée, pour une plus grande précision. Dans le cas contraire, les études se ramènent à l'ETP moyennée sur  $x$  années, ce qui réduit la précision des résultats obtenus pour le flux de drainage.

Une fois l'ETP déterminée, on calcule l'ETM sur la base du coefficient cultural choisi.

#### **Le choix du coefficient cultural $k_c$ pour le calcul de l'ETM**

L'ETM est calculée à partir de l'ETP, par la relation  $ETM = k_c \cdot ETP$ . Le choix de  $k_c$  est particulièrement important car il sera le principal déterminant de la fiabilité de l'estimation de l'évapotranspiration.  $k_c$  dépend du type de culture et du stade phénologique de la plante. L'adaptation du  $k_c$  correspondante peut se faire de plusieurs façons : en fonction du stade phénologique observé de la plante, à la vue du nombre de jours après semis, ou encore à la somme de degrés-jours depuis le semis [Nemeth, 2001]. C'est généralement la première

---

<sup>58</sup> Certaines études de flux considèrent plusieurs méthodes pour la détermination des valeurs considérées, ce qui explique que le nombre total de fois où les différentes méthodes sont employées puisse dépasser le nombre total d'études considérées dans ce rapport (23).

forme d'adaptation du  $k_c$  qui est utilisée. L'évolution de  $k_c$  au cours du cycle phénologique est pratiquement la même pour toutes les cultures : au début du cycle (formation et développement des feuilles),  $k_c$  croît rapidement. Un palier est ensuite atteint (sénescence des feuilles à la mi-saison), puis  $k_c$  diminue pendant l'arrière-saison (cf. Figure 15).

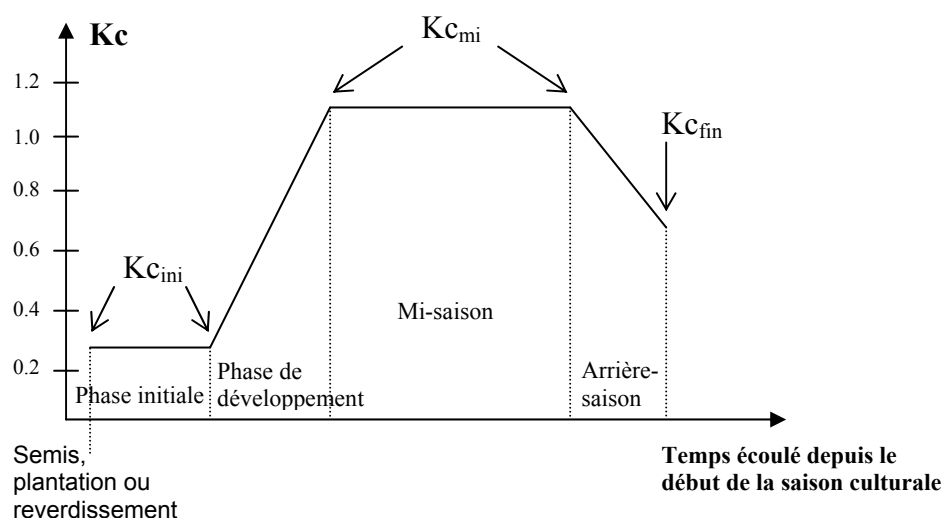


Figure 15 : Evolution temporelle du coefficient cultural (d'après [Tiercelin, 1998], p.214)

On doit donc adapter la valeur de  $k_c$  au cours du temps, ce qui fut considéré dans toutes les études analysées (23/23). Pour cela, des recueils donnent les valeurs de  $K_{c.ini}$ ,  $K_{c.mi}$  et  $K_{c.fin}$  pour chaque type de culture<sup>59</sup>.

### Détermination de l'ETR pour la culture donnée

La relation empirique entre l'ETM et l'ETR est synthétisée dans la figure ci-dessous.

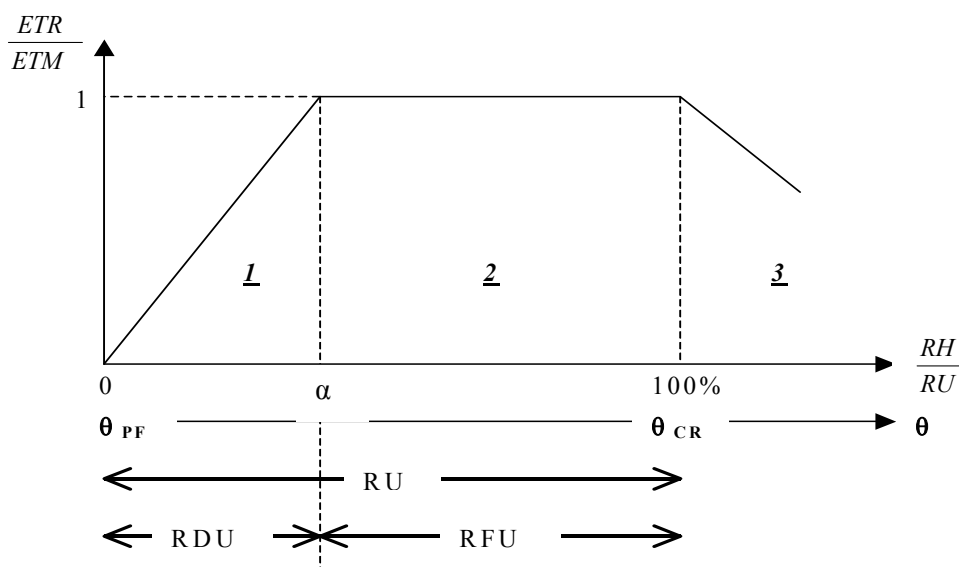


Figure 16 : Relation empirique entre l'ETR et l'ETM, considérant le rapport entre les réserves hydrique et utile

<sup>59</sup> On préférera cette solution à celle consistant à déterminer expérimentalement la valeur du  $k_c$ , par comparaison de l'ETP retenue et de l'ETM mesurée au champ, toujours pour des raisons de fiabilité liée aux conditions agro-climatiques particulières de la mesure.

La zone 1 est celle de la réserve difficilement utilisable (RDU) par la plante. L'eau n'est pas présente en quantité suffisante pour que la plante la puise sans effort, contrairement à la zone 2 où la plante est en situation de confort hydrique (réserve facilement utilisable, RFU). La RDU et la RFU constituent la réserve utilisable (RU). Généralement, la RFU représente  $\frac{1}{2}$  à  $\frac{2}{3}$  de la RU. Dans la zone 3, l'eau est présente en trop grande quantité dans le sol et la plante souffre d'asphyxie. Par réaction, elle se protège en diminuant ses prélèvements d'eau, ce qui explique la descente de la courbe dans cette zone.

La réserve utile est une donnée du problème, connue grâce à l'utilisation conjointe de tensiomètres et d'une sonde à neutron (ou d'une sonde TDR ; cf. Cadre 7). La réserve utile du sol vaut :

$$RU = (\theta_{CR} - \theta_{PF}) \cdot \Delta Z$$

Avec :	<i>RU</i>	<i>Réserve utile du sol considéré</i>	<i>(mm d'eau)</i>
	$\theta_{CR}$	<i>Humidité à la capacité de rétention (ou humidité au champs)</i>	<i>(mm d'eau/mm de sol)</i>
	$\theta_{PF}$	<i>Humidité au point de flétrissement</i>	<i>(mm d'eau/mm de sol)</i>
	$\Delta Z$	<i>épaisseur de la zone d'extraction racinaire du sol considéré</i>	<i>(mm de sol)</i>

L'humidité à la capacité de rétention ( $\theta_{cr}$ ) correspond à la capacité du sol à stocker l'eau, et l'humidité au point de flétrissement ( $\theta_{pf}$ ) correspond à la capacité du sol à céder l'eau à la plante, sous la force de succion de la plante. Lorsque la réserve utile du sol est atteinte, la plante est dite en situation de confort hydrique, ce qui lui permet d'avoir une croissance optimale. En situation courante, la quantité d'eau dans le sol correspond à la réserve hydrique du sol, définit pour une humidité  $\theta$  par :

$$RH = (\theta - \theta_{PF}) \cdot \Delta Z$$

La différence entre les réserves hydrique et utile du sol permet de déterminer la quantité d'eau qui doit être apportée à la plante pour qu'elle soit en situation de confort hydrique. Cela permet ainsi de pouvoir piloter les irrigations sur la base des besoins nets en irrigation, et ainsi de faire des économies d'eau et d'accroître l'efficacité de son utilisation.

A tout instant, l'état hydrique d'un milieu poreux non saturé peut être défini par ses deux variables d'état, la teneur en eau volumique ( $\theta$ ), définie comme le volume d'eau présent dans un volume unitaire de sol, et la pression effective de l'eau ( $h$ ), définie comme la différence de pression de l'eau dans le sol et la pression atmosphérique. Sont présentés ici brièvement les instruments de mesure de ces variables d'état (autres que le tensiomètre que nous avons déjà exposé), conduisant par la suite à la détermination de la réserve utile du sol.

### **La sonde à neutrons**

C'est une méthode in situ permettant de déterminer l'humidité volumique<sup>60</sup>  $\theta$  du sol en place, en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides à être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau. Ce ralentissement est d'autant plus important que les atomes d'hydrogènes sont nombreux, et donc que l'humidité du sol est importante. Cet instrument n'est pas adapté à des mesures profondes allant au-delà de la couche de surface (<20 cm de profondeur).

<sup>60</sup> Humidité volumique = volume d'eau / volume de sol sec.

Suite de l'encadré ...

En cela, cet instrument est incompatible à la détection de discontinuités dans la teneur en eau telle que le toit d'une nappe. C'est la méthode actuellement la plus utilisée lorsqu'il s'agit de déterminer l'humidité volumique d'un sol. Elle nécessite néanmoins un étalonnage long et délicat, et que le contact entre la terre et le tube soit bon, ce qui conditionnera principalement la précision de la mesure.

#### **La sonde TDR**

La sonde TDR fonctionne en réflectométrie dans le domaine temporel (Time domain reflectometry, TDR). Elle permet, à l'instar des sondes à neutrons, de mesurer l'humidité volumique  $\theta$  du sol en place, mais ici sur la base de la relation existant entre la constante diélectrique relative du sol et la teneur en eau volumique. La sonde TDR est relativement simple d'emploi, et permet une mesure de l'humidité volumique avec une incertitude inférieure à 2%, avec une très bonne résolution spatiale et temporelle.

L'utilisation conjointe de tensiomètres ( $H = f(Z)$ ) et de sondes à neutron ou de sondes TDR ( $\theta = f(Z)$ ) permet d'obtenir la courbe de rétention  $H = f(\theta)$ , d'où l'on extrait l'humidité à la capacité de rétention ( $\theta_{cr}$ ), et l'humidité au point de flétrissement ( $\theta_{pf}$ ).

#### **Cadre 7 : Fonctionnement de la sonde à neutron et de la sonde TDR**

L'autre grandeur à déterminer pour pouvoir estimer l'ETR est le rapport  $\alpha$ , caractérisant la réserve hydrique du sol minimale pour laquelle l'eau est mise facilement à disposition de la plante. Pour déterminer  $\alpha$ , des mesures à l'échelle de la parcelle doivent être menées i) en condition de confort hydrique, pour déterminer l'ETM, et ii) en condition de réserve hydrique croissante entre chaque mesure, pour déterminer la réserve hydrique à partir de laquelle la plante est en confort hydrique (l'ETR mesurée sera égale à l'ETM). Ces mesures sont longues et coûteuses, et se heurtent toujours au problème de leur spatialisation, face aux variations des conditions agro-pédo-climatiques. Et même si  $\alpha$  était déterminé, son utilisation dans le cadre du graphique ci-dessus nécessite que la réserve hydrique du sol soit connue. L'utilisation de cases lysimétriques étant onéreuse et peu fiable, une méthode alternative consisterait à se baser sur les pratiques d'irrigations des agriculteurs.

Or les pratiques d'irrigation restent inconnues sur le périmètre irrigué, surtout pour l'irrigation à la raie (aucun système d'information ne nous donne accès à cette information). Nous ne sommes même pas en mesure de savoir si le tour d'eau d'un irrigant a effectivement été utilisé ou non. Il n'existe dès lors pas de moyens permettant de déterminer l'ETR sur la base de l'ETM et de la réserve hydrique réelle du sol. C'est pourquoi **toutes les études considérées (23/23) se basent en réalité sur l'hypothèse suivante : l'irrigation des cultures se fait en fonction des besoins théoriques en eau des plantes, de sorte que les cultures soient toujours en situation de croissance optimale. Les apports d'eau par irrigation sont ainsi considérés comme supérieurs ou égaux aux besoins théoriques des plantes. La réserve hydrique est donc toujours égale à la réserve utile et l'évapotranspiration réelle est donc toujours considérée comme étant maximale (ETM=ETR, kc=1).**

Cette hypothèse simplificatrice est le principal biais de la quantification des volumes d'eau consommés par les cultures, et par conséquent un des biais importants de la quantification de la réalimentation de la nappe par déduction du bilan hydrique (avec la quantification des restitutions en rivière). Ce biais est d'autant plus accentué que sur beaucoup de périmètres

irrigués, est pratiquée la culture de la vigne. Or la vigne se cultive en état de stress hydrique et non de confort hydrique. Ce "**biais cultural**" induit des imprécisions considérables dans l'estimation de l'évapotranspiration réelle de la vigne sur la base de son évapotranspiration maximale. Cette considération est parfois prise en compte dans les études de flux, de différente manière. Le coefficient cultural considéré peut ne pas être  $k_c$ , correspondant à la consommation en eau maximale, mais  $k_c(\text{opt})$ , consommation optimale. La valeur de  $k_c(\text{opt})$  doit alors être obtenue depuis les valeurs proposées par la littérature. Le problème que pose cette méthode est que les valeurs de  $k_c(\text{opt})$  sont très difficiles à extrapoler ou à généraliser car elles restent largement dépendantes des conditions de culture et du type de vigne (sol, surface foliaire exposée, etc.), plus encore que celle de  $k_c$ . Des études de flux préfèrent utiliser le  $k_c$ , puis procéder à des abattements. Par exemple pour l'étude des flux du canal de Gignac, le coefficient cultural  $k_c$  a été considéré en situation de non stress hydrique pour les mois d'avril à juillet (quand l'irrigation est pratiquée), puis un abattement de 50% du coefficient cultural a été effectué pour les mois d'août et septembre, afin de tenir compte du stress hydrique lié à l'arrêt des irrigations. Ils n'ont pour cela pas pris en compte les limitations d'irrigation liées aux objectifs de qualité de la vigne, afin d'appréhender les quantités d'eau réellement consommées par la vigne, dans une situation de faible stress hydrique. Dans ce cas, les imprécisions ne proviennent pas seulement de l'abattement effectué de manière plus ou moins arbitraire (l'abattement du  $k_c$  reste généralement comparé aux valeurs de  $k_c(\text{opt})$  données dans la littérature), mais à l'estimation du  $k_c$ , avant même que l'on ne procède à son abattement. En effet, dans la littérature seuls peu de travaux ont porté sur la détermination de  $k_c$ , et beaucoup plus sur la détermination du coefficient cultural optimal  $k_c(\text{opt})$  puisque cela correspond aux conditions réelles d'irrigation de la vigne.

**EN BREF :** Quelque soit la valeur du coefficient cultural retenue, utiliser une méthode d'estimation de l'évapotranspiration sur la base des coefficients culturaux induit des imprécisions importantes, particulièrement dans le cas de la vigne, largement développée dans les périmètres irrigués méditerranéens. Mais cette méthode (qui a le mérite d'utiliser des  $k_c$  moyens représentatifs des cultures) reste cependant préférable aux mesures d'ETR à la parcelle pour chaque type de culture, qui sont ensuite extrapolées à l'ensemble du périmètre, du fait que le caractère ponctuel et le manque de représentativité des mesures (conditions agro-pédo-climatiques particulières) affectent beaucoup plus la fiabilité des résultats obtenus, pour un même procédé de spatialisation.

### **Spatialiser l'évapotranspiration au niveau du périmètre irrigué**

La valeur de l'évapotranspiration des cultures à l'échelle du périmètre irrigué est calculée en effectuant la somme pondérée de l'évapotranspiration de chaque type de culture par la surface occupée par chaque culture. Il est alors nécessaire de connaître la composition culturale du périmètre (occupation du sol). Une première méthode consiste à enquêter chaque parcelle, ou à utiliser des données de terrain (4/23). Cette méthode peut convenir pour de petites à moyennes ASA, mais reste difficilement applicable pour de grandes ASA de plusieurs milliers d'hectares. De telles ASA peuvent alors faire appel à l'imagerie satellitale (11/23), moins contraignante, mais plus coûteuse et moins précise. L'image satellite ne permet pas de différencier les cultures avec précision, et les cultures particulières de faible surface au sol sont généralement gommées au profit des grandes cultures avoisinantes. Ce "**biais territorial**" fait que seules les cultures importantes sont donc concernées par l'estimation de l'évapotranspiration sur le périmètre. On estime les incertitudes liées à l'utilisation d'images satellitales pour la cartographie des types de cultures à 15% [ENSAM, 2003].

Mais la régionalisation pose d'autres problèmes que celle de la prise en compte de l'occupation du sol. Tous les calculs d'évapotranspiration effectués sont considérés pour des surfaces de sol planes, permettant l'irrigation optimale. Ce n'est pas le cas dans la réalité car les surfaces sont rarement aplanies comme elles le devraient théoriquement, ce qui conduit certaines zones à accumuler l'eau et d'autres à en manquer. L'eau n'est donc pas répartie de façon homogène sur les parcelles, ce qui induit des erreurs dans l'estimation de l'évapotranspiration, considérée comme étant maximale partout.

Il faut enfin ajouter une incertitude provenant d'un "*biais temporel*", consécutif au fait que les assolements de culture effectués tout au cours de la campagne ne sont pas pris en compte (les images satellites ou les enquêtes effectuées sont ponctuelles dans le temps), entre autre parce qu'il n'existe aucun système d'information sur les assolements annuels et interannuels.

### **Estimation de l'incertitude finale liée à l'estimation de l'évapotranspiration des cultures**

Si nous comptons une incertitude de 5% relative aux données de Météo France, une incertitude de 15% provenant de la régionalisation (par image satellitale ou par enquêtes), ainsi que les incertitudes dues au choix du coefficient cultural (particulièrement pour la vigne, largement développée dans les régions PACA et Languedoc-Roussillon), l'incertitude liée à l'utilisation de l'ETM et non de l'ETR, celles liées à la représentativité de la fréquence des mesures vis-à-vis d'une campagne complète d'irrigation, et les incertitudes diverses détaillées ci-dessus, nous arrivons à une erreur sur les volumes consommés par les plantes variant du simple au double vis-à-vis de la valeur estimée. Par exemple, les deux études qui ont été menées en parallèle sur le canal de Gignac, estimant la consommation des plantes à 7% des entrées d'eau pour l'une, et à 5% pour l'autre (pour un même volume d'eau en entrée).

## **2. L'EVAPOTRANSPIRATION DE LA VEGETATION (*ETRV*)**

Ce point a été traité dans la partie 6.2.1 relative à la quantification de l'alimentation en eau de l'environnement terrestre. Il en ressort que l'évapotranspiration de la végétation est une grandeur non négligeable, dont nous avons très grossièrement estimé les volumes à hauteur de 2% des prélèvements. Il n'est pas concevable de mesurer cette grandeur dans les conditions techniques et économiques actuelles. De plus, la précision du bilan et les faibles volumes d'eau concernés rendent inutile une détermination fine de ce terme du bilan hydrique. Un ordre de grandeur doit cependant être pris en compte afin de diminuer l'imprécision du bilan, ce qui n'est pas toujours le cas dans les études de flux.

## **3. LES PRELEVEMENTS URBAINS (*PU*)**

Les prélèvements urbains sont composés des prélèvements domestiques et non domestiques. Les prélèvements non domestiques sont toujours connus avec précision car ils émanent de conventions passées entre un usager non domestique (commune, industrie, ...) et une ASA, pour un volume de prélèvement donné. L'importance des volumes en jeu requiert naturellement un système de mesure, généralement financé par la vente de l'eau. Ce qui nous intéresse ici, ce sont les prélèvements domestiques, principalement utilisés pour l'arrosage des pelouses et jardins (les autres usages, comme le lavage de la voiture ou le remplissage de la piscine, peuvent être considérés comme négligeables).

Dans le pire des cas, ces volumes ne sont pas considérés dans le bilan hydrique, ce qui augmente sensiblement les imprécisions. Dans le moins pire des cas, ces volumes sont considérés comme des sorties d'eau spécifiques du système, et sont quantifiés à l'aide de compteurs d'eau dans le cas d'une desserte sous pression. Mais cette eau servant à l'arrosage des jardins est elle aussi i) consommée par les plantes, et ii) drainée en profondeur (on considère que l'arrosage ne génère pas de ruissellement), et l'importance du phénomène urbain sur la plupart des périmètres ne permet pas de négliger ces termes. On doit alors estimer le terme d'évapotranspiration (le terme de drainage depuis les jardins est considéré comme rejoignant la nappe, et est donc inclus dans l'estimation, par déduction du bilan hydrique, du flux de drainage total réalimentant la nappe).

Pour estimer l'évapotranspiration des jardins, la méthode est la même que pour celle des cultures (basée sur l'ETM et le  $k_c$ ). Les modalités d'application de la méthode sont cependant spécifiques. On devra le plus souvent considérer tous les jardins cultivés de la même manière, et on appliquera un  $k_c$  global et estimé pour l'ensemble du jardin. Cette méthode introduit des imprécisions, mais a le mérite de donner un ordre de grandeur cette évapotranspiration particulière. Il faudra être attentif à la valeur de  $k_c$  retenue pour les jardins, qui doit être élevée car l'arrosage des jardins concerne principalement la pelouse, le potager ou les plantes ornementales, tous grands consommateurs d'eau et généralement abondamment arrosés par les ménages. La seconde source d'imprécision importante concerne la régionalisation de l'évapotranspiration d'un jardin moyen. Le problème ne vient pas tant de l'hétérogénéité des types de jardins, mais plus de la part des habitations périurbaines qui possèdent effectivement un jardin. Cette information peut soit provenir des enquêtes sur l'occupation du sol effectuées dans le cadre de la régionalisation de l'évapotranspiration des cultures, et on pourra alors également relever la superficie approchée de chaque jardin, soit d'une estimation du taux de surface périurbaine occupée par les jardins (toutes les habitations n'ont pas de jardins), dans le cas où l'occupation du sol a été obtenue par image satellitale (mais l'image satellitale n'a généralement pas la précision suffisante pour distinguer les jardins individuels), ou encore dans le cas où l'on s'est basé sur le registre cadastrale de l'association (il n'est cependant pas rare que le registre cadastrale ne soit pas actualisé, même si des campagnes de recensement des changements cadastraux sont menées chaque année auprès des propriétaires).

**EN BREF :** La détermination de l'évapotranspiration des jardins à l'échelle du périmètre est très imprécise, mais un simple ordre de grandeur suffit. Ce terme est souvent négligé, voire oublié, à tort dans les études de flux.

#### 4. LES RESTITUTIONS DE SURFACE AUX COURS D'EAU ( $R_s$ )

Les méthodes de mesure de ces écoulements de surface, leur fiabilité et leur précision sont exposées dans la partie qui lui est consacrée (cf. 6.1). Il en ressort que la quantification des volumes restitués est beaucoup plus délicate que celle des prélèvements, et que la question de la fiabilité et de la représentativité de ces mesures est centrale, les principales sources d'erreurs étant i) le taux de filiales tests utilisées et leur représentativité vis-à-vis du réseau de colature en général, ii) les systèmes de mesure de débits utilisés et leur adéquation avec les filiales (précision et fiabilité correspondantes), et enfin iii) le comportement des acteurs du périmètre. Les restitutions en rivière doivent par conséquent être considérées comme des grandeurs particulièrement mal connues, qui auront un impact certain sur la précision de la quantification du flux de drainage profond par déduction du bilan hydrique.

## 5. LES RESTITUTIONS PAR ECOULEMENTS HYPODERMIQUES AUX EAUX DE SURFACE ( $R_{EH}$ )

Ce sont des écoulements obliques de sub-surface, différés dans le temps, qui contribuent à l'alimentation des réseaux hydrographiques et dont l'importance est directement fonction du type de sol (porosité et texture) et de sa pente. La part de ces écoulements peut être importante et représenter de 10 à 30% des débits de crue. Le drainage oblique est donc une composante importante du bilan hydrique, qu'il soit mené à l'échelle de la parcelle, du périmètre irrigué ou du bassin versant. Nous avons eu l'occasion de nous pencher sur la quantification de ce terme dans le cadre de la fonction de ressuyage des terres agricoles assurée par les canaux d'irrigation. Il en ressort que la quantification de ce terme est délicate et imprécise, mais qu'il reste possible d'obtenir un simple ordre de grandeur, suffisant dans notre problème.

## 6. L'EVAPORATION DE SURFACE DANS LES CANAUX ( $EV_s$ )

L'évaporation de surface est canaux est une grandeur relativement aisée à mesurer. Il suffit pour cela de placer quelques bacs d'évaporation dans des lieux représentatifs des conditions climatiques locales (bacs contenant un volume connu d'eau, gradué afin de déterminer la lame d'eau perdue en un temps donné par évaporation). Les variations du niveau d'eau du bac, mesurées à des intervalles fixes, sont le reflet de l'intensité de l'évaporation.

Sur l'ensemble des études de flux considérées, seule une mentionne ce terme dans le bilan hydrique qu'elle effectue, pour ensuite le négliger compte tenu des faibles volumes en jeu. Il s'agit de l'étude effectuée sur le canal de Gignac. Elle considère une superficie au miroir du réseau primaire de 150 000 m<sup>2</sup>, avec une évaporation de l'ordre de 1m d'avril à octobre. Le volume évaporé est de 150 000 m<sup>3</sup>, soit, sur 7 mois, un débit fictif continu moyen évaporé de 8 L/s, soit moins de 0,5% du débit entrant moyen. D'une manière générale, l'évaporation de surface dans les canaux est un terme qui peut être négligé dans le bilan hydrique sans que cela ne conduise à des imprécisions notables.

## 7. LA VARIATION DU STOCK HYDRIQUE $\Delta S$

Un dernier terme du bilan hydrique doit être pris en compte, il s'agit de la variation d'eau présente dans la réserve utile du sol :

$$\Delta S = S_F - S_I$$

$S_F$  correspond à la réserve hydrique RH à la fin de la campagne d'irrigation, et  $S_I$  à la réserve hydrique au début de la campagne (généralement considérée comme étant égale à la réserve utile RU, compte tenu de la fin des précipitations hivernales). La variation de stock hydrique est un terme important du bilan hydrique. Sa détermination nécessite de connaître la réserve utile du sol, ce qui nécessite une étude pédologique préalable. Or, toutes les études de flux ne se basent pas sur une telle étude, d'une part. D'autre part, ces études ne sont pas exemptes d'imprécisions et de fortes variabilités des résultats. En effet, les résultats de ces études révèlent généralement une grande variabilité pédologique, sur la base de laquelle il faut isoler des zones à peu près homogènes de sol et leur attribuer une valeur de réserve utile moyenne. Tous ces points se retrouvent ensuite amplifiés dans la spatialisation de l'estimation de la réserve utile à l'échelle du périmètre irrigué.

## D/ LA DEDUCTION DU FLUX DE REALIMENTATION DE LA NAPPE

Les propos qui vont être tenus ici réclament une attention particulière. Il existe deux méthodes utilisant un bilan hydrique permettant d'accéder à la réalimentation de la nappe :

1. La Quantification Statique (QS), qui consiste à ne considérer que les instants initial et final de la saison d'irrigation pour mener le bilan hydrique. Le pas de temps est donc égal à l'année d'irrigation.
2. La Quantification Dynamique (QD), qui consiste à discrétiser l'année d'irrigation sur la base d'un pas de temps donné (généralement la décade, 10 jours). Le flux de réalimentation est alors calculé à la fin de chaque pas de temps, jusqu'à ce que la saison d'irrigation soit terminée. Son calcul se base alors sur la considération des *besoins nets en irrigation* et la *réserve utile*.

Nous commencerons par nous pencher sur la QD, le but final étant de mieux comprendre en quoi la QS est largement imprécise.

### 1. La Quantification dynamique (QD)

Comme nous l'avons dit, la QD (quantification "dynamique" en référence à la succession des pas de temps) se base sur la considération des *besoins nets en irrigation* et la *réserve utile*. Les besoins nets en irrigation sont calculés sur un pas de temps donné, que nous prendrons ici égal à la décade. Pour la décade  $n$ , les besoins nets en irrigation s'écrivent :

Équation 4

$$B_n = K_c(i).ETP - P_e - RH$$

Avec :	$B_n$	Besoins nets en irrigation pour la décade ( $n$ )	(mm)
	$P_e$	Précipitations efficaces sur la décade ( $n$ )	(mm)
	$K_c$	Coefficient cultural considéré pour le stade phénologique ( $i$ ) donné	
	$ETP$	Evapotranspiration potentielle sur la décade ( $n$ )	(mm)
	$RH$	Réserve hydrique du sol à la fin de la décade ( $n-1$ )	(mm)

Chaque terme étant connu, les besoins nets en irrigation ( $B_n$ ) sont également considérés comme connus. Dès lors, la différence entre l'eau apportée aux cultures pendant la décade  $n$  et les besoins nets en irrigation nous renseigne alors sur le drainage souterrain. Deux cas de figure se posent.

Le premier cas de figure correspond au cas où les apports d'eau par l'irrigation sont inférieurs à  $B_n$ . Dans ce cas, les cultures risquent d'être en état de stress hydrique. Cela dépend avant tout de la réserve utile du sol, c'est-à-dire de sa capacité à stocker d'importants volumes d'eau. Si la RU est grande (ex : 200mm), alors il y a de fortes chances que l'eau qui s'y trouve soit en quantité suffisante pour que le déficit dans les apports d'eau par irrigation soit comblé par la réserve hydrique du sol (RH). Dans ce cas, les cultures ne seront pas exposées au stress hydrique, et par conséquent la relation  $ETR = ETM$  est vérifiée sur la décade considérée. Le drainage est nul, et l'évapotranspiration réelle est bien estimée. Cependant, dans le cas où RU est petit (ex : 20mm en Charente), alors le stock ne sera pas suffisant pour jouer son rôle tampon vis-à-vis des déficits d'apports d'eau aux cultures. Dès lors, les cultures étant en situation de stress, l'ETR sera notablement inférieure à l'ETM sur la décade. Or,

comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à l'estimation de l'évapotranspiration, l'ETM reste la meilleure estimation possible de l'ETR. Dans une telle situation, nous savons que l'imprécision liée à la non vérification de l'égalité entre l'ETR et l'ETM sera d'autant plus importante que le déficit d'irrigation est important, sans réellement pouvoir rien faire pour limiter cette imprécision. Ceci nous permet de cerner l'importance que peut avoir la considération de la réserve utile du sol.

Le deuxième cas de figure correspond au cas où les apports d'eau par l'irrigation sont supérieurs à Bn. Un bilan hydrique alternatif nous permet alors de déterminer le flux de réalimentation de la nappe, avec les apports d'irrigation et les précipitations efficaces comme grandeurs d'entrée, l'ETR=ETM comme grandeur de sortie, et la variation de RH comme entrée ou sortie selon son signe.

Ainsi, décade par décade, on peut déterminer le flux de réalimentation de la nappe, et arriver en fin de saison d'irrigation à obtenir un flux qui prend en compte les moments de stress hydrique qu'ont connu les cultures. Or, nous avons vu comment ce stress hydrique était d'autant plus apte à se passer que la RU était petite. Par conséquent, il semblerait que cette méthode de QD soit particulièrement bien adaptée à la détermination du flux de réalimentation lorsque l'on est en présence d'un sol à faible RU.

Cependant, la QD ne peut en aucun cas être menée à l'échelle d'un périmètre irrigué, mais uniquement à l'échelle d'une parcelle irriguée. En effet, cette méthode repose intimement sur la connaissance de l'apport d'eau d'irrigation aux cultures. Or cette grandeur n'est jamais connue, car aucun système d'information existant n'offre cette information pour toutes les parcelles d'un périmètre irrigué. Si l'on pense que le calendrier des irrigations, rempli au niveau de chaque agriculteur pour toute la période d'irrigation, est susceptible de constituer un tel système d'information, c'est oublier que ce calendrier est prévisionnel et non réel, et que les pratiques réelles, effectives, des irrigants concernant le pilotage de l'irrigation (le choix d'irriguer) sont absolument inconnues. C'est pourquoi toutes les études de flux se basent sur la méthode de Quantification Statique.

## 2. La Quantification statique (QS)

La QS a pour unique pas de temps l'année d'irrigation. *Le niveau de détail que prend en compte la QD correspond au niveau d'imprécision que possède la QS.* La QS consiste tout simplement à calculer le flux de drainage par déduction de l'Équation 3. Les études de flux prennent généralement en compte les besoins nets en irrigation (15/23) ainsi que la RU (8/23) dans le problème. Cependant, cette prise en compte est effectuée moins pour prendre en compte les effets d'un état de stress hydrique des cultures sur le flux de drainage, que pour que soit affirmée ou infirmée grossièrement l'assertion selon laquelle les cultures sont toujours en état de confort hydrique, à la base de la QS. Le flux global annuel de réalimentation de la nappe est ainsi déterminé par déduction du bilan hydrique.

Nous ferons deux remarques pour clore cette partie. La première concerne un facteur renseignant sur l'incertitude associée à l'utilisation de la QS : la RU. On peut dire d'une manière générale que plus la RU est faible, plus les incertitudes liées à l'utilisation de la QS sont fortes, puisque plus RU est faible, plus les risques de stress hydrique sont importants, stress qui n'est de toute façon pas pris en compte dans la QS.

La deuxième remarque est la suivante. Dans le cas de l'application de la QD, le drainage étant calculé par rapport au déficit d'irrigation, le flux de réalimentation de la nappe ainsi calculé correspond à la réalimentation de la nappe qui revient aux seules eaux d'irrigation, c'est-à-dire prélevées en rivière, contrairement au cas de la QS où le flux de drainage correspond à l'eau d'irrigation ainsi qu'aux précipitations.

## CONCLUSION

*La conclusion de la méthode de quantification de la réalimentation de la nappe par déduction du bilan hydrique est située dans le corps du rapport (cf. 6.2.3.2.1.2, p.- 114 -).*

## **Annexe 5**

**GRILLES D'ANALYSE DE LA QUALITE DE L'EAU, DES USAGES DE  
L'EAU, ET DES PROBLEMES DE POLLUTION EN NITRATE ET EN  
PHOSPHORE**

		1A	1B	2	3	HC
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	≤ 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25	> 25
DCO	mg O <sub>2</sub> /L	≤ 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	> 80
Oxyd. (froid 4h)	mg O <sub>2</sub> /L	≤ 3	3 à 5	5 à 8	> 8	
Oxygène dissous	mg/L	≥ 7	5 à 7	3 à 5	< 3	
Taux de saturation en oxygène dissous		≥ 90%	70 à 90%	50 à 70%	< 50%	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	≤ 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	> 8
IBG (Indice Biologique Global)		≥ 17	16 à 13	12 à 9	8 à 5	≤ 4

Tableau 15 : Grille pour estimer la qualité générale de l'eau

(source : [Bontoux, 1993], p.77)

Classe \ Usage					
	Vie piscicole	Eau potable	Baignade	Abreuvement	Irrigation
1A Excellente	++++	++++	++++	++++	++++
1B Bonne	+++	+++	++	+++	+++
2 Moyenne	++	++	+	++	+++
3 Médiocre	++	+	+	+	+++
HC Hors classe	+	+	+	+	+

++++ Aisé      +++ Possible      ++ Aléatoire      + Impossible

Tableau 16 : Adéquation entre classes de qualité de l'eau et usages de l'eau

(source : [cours de potabilisation des eaux, ENGEES, 2003])

Formes de l'azote	NO Situation normale	N1 Pollution modérée	N2 Pollution nette	N3 Pollution importante	N4 Pollution excessive
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	≤ 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	> 8
NO <sub>2</sub> (mg/l)	≤ 0,1	0,1 à 0,3	0,3 à 1	1 à 2	> 2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	≤ 5	5 à 25	25 à 50	50 à 80	> 80
N <sub>kjeldhal</sub> (mg/l)	≤ 1	1 à 2	2 à 3	3 à 10	> 10

Tableau 17 : Grille pour signaler les problèmes d'azote

(source : [Bontoux, 1993], p.77)

Formes du phosphore	PO Situation normale	P1 Pollution modérée	P2 Pollution nette	P3 Pollution importante	P4 Pollution excessive
PO <sub>4</sub> (mg PO <sub>4</sub> /l)	≤ 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	> 2
P total (mg P /l)	≤ 0,1	0,1 à 0,3	0,3 à 0,6	0,6 à 1	> 1

Tableau 18 : Grille pour signaler les problèmes de phosphore

(source : [Bontoux, 1993], p.77)