

Systemes d'irrigation

En cinquante ans, les surfaces irriguées ont plus que triplé pour atteindre plus de deux millions d'hectares. Facteur clé de la maîtrise de la production agricole, l'irrigation a un impact économique et social considérable mais ne doit pas engendrer de conséquences néfastes au plan écologique. Pour répondre à cette exigence, deux points doivent être retenus

- la maîtrise des techniques d'irrigation afin d'augmenter son efficacité ;
- l'optimisation des apports d'eau pour protéger la ressource en eau et éviter la dégradation des sols et les pollutions diffuses.

Dans ce chapitre, le principe des différentes méthodes d'irrigation est présenté dans l'objectif de pointer les spécificités de l'irrigation localisée et les enjeux liés à son fonctionnement.

I.1. Description des différentes Méthodes d'irrigation

I.1.1. Irrigation à la raie

L'irrigation gravitaire (Figure I-1), encore appelée irrigation de surface, est la méthode d'irrigation la plus répandue dans le monde (75% des surfaces). Dans le sud de la France, l'irrigation à la raie reste pratiquée en raison de sa bonne adaptation à certains contextes locaux de basses vallées alluviales (plaine de Crau). Souvent accusée de gaspiller l'eau, l'irrigation gravitaire peut être efficace si elle est bien maîtrisée et modernisée.



Figure I-1 : Un champ irrigué à la raie

I.1.2. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion, en France, s'est développée rapidement après la deuxième guerre mondiale. Ce mode d'irrigation est pratiqué sur environ 90% de la surface irriguée en France, au niveau mondial celle-ci représente un peu moins de 20% des surfaces irriguées. L'évolution technique des systèmes d'irrigation par aspersion a été influencée en permanence par le souci d'économiser de la main d'œuvre et de diminuer la pénibilité du travail. On peut classer les équipements d'irrigation par aspersion en deux types : les couvertures d'asperseurs et les machines à irriguer. Alors que dans le cas d'une installation d'irrigation par couverture d'asperseurs, les appareils goutteurs d'eau sont en position fixe durant leur fonctionnement, les machines à irriguer (enrouleurs, pivots, rampes frontales) ont la faculté de déplacer le ou les goutteurs d'eau durant l'arrosage. L'apparition des machines à irriguer trouve son origine dans le souci de réduire le travail de déplacement manuel des éléments d'arrosage ou de baisser l'investissement par rapport à la couverture intégrale d'asperseurs. L'installation d'une couverture d'asperseurs mobilise un grand nombre d'appareils goutteur d'eau si bien que l'adéquation de l'installation au parcellaire est en général bonne. De même la conduite des arrosages peut être rigoureuse sur la base de données agronomique et technique avérées.

I.1.2.1 Couverture d'asperseur

Les premiers réseaux d'irrigation par aspersion furent équipés d'asperseurs disposés en ligne le long d'une rampe mobile (Figure I-2), qu'on démontait et déplaçait à la main, de poste en poste, pour irriguer l'ensemble de la parcelle. Peu coûteux en investissement, ce

système est exigeant en main d'œuvre. Pour cette raison il a évolué vers la couverture intégrale, qui consiste à disposer sur la parcelle irriguée l'ensemble des asperseurs. Une fois posé, le réseau ainsi conçu reste fixe pendant toute la saison d'irrigation.



Figure I-2 : Irrigation par asperseur



Figure I-3: Photo d'un asperseur

Cette méthode présente l'avantage de réduire le besoin de main-d'œuvre, d'obtenir une répartition homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface irriguée, elle est adaptable à toutes les formes de parcelle (topographie du site), à toutes les natures de sol, et à toutes les cultures.

I.1.2.2 L'enrouleur

L'enrouleur est le matériel d'irrigation par aspersion le plus utilisé en France : 55% des surfaces irriguées sous pression. Ce succès provient de sa grande souplesse d'utilisation, des faibles contraintes de main-d'œuvre et des investissements modérés qu'il nécessite. Bien utilisé, l'enrouleur peut dispenser un arrosage de qualité tout à fait satisfaisant. Toutefois, des enquêtes ont montré que les utilisateurs d'enrouleurs manquaient souvent des informations nécessaires pour bien choisir leur équipement et effectuer les bons réglages pour un arrosage homogène. La généralisation de l'utilisation de régulations électroniques d'enroulement a considérablement amélioré les performances de ces appareils. Il est composé d'un canon d'arrosage monté sur un traîneau ou sur un chariot tracté par le tuyau d'alimentation en eau en polyéthylène, qui s'enroule sur une bobine disposée sur un châssis et entraînée par un moteur hydraulique (Figure I-4).



Figure I-4 : les différents composants de l'enrouleur

L'arrosage se fait par bandes rectangulaires successives dont la largeur dépend de la portée du canon qui équipe l'enrouleur. Le canon est un asperseur à grande portée (25 à 70m). Le canon nécessite une pression entre 5 à 8 bars, soit une pression à l'entrée de l'enrouleur de 7 à 10 bar. La pluviométrie est relativement peu intense en moyenne : 8 à 12mm/h, mais l'apport se faisant sous forme d'un jet dirigé au cours de passage très brefs (quelques secondes par minute), l'énergie cinétique apportée peut être néfaste pour certain type de sols limoneux par exemple à faible structuration. Pour fournir une bonne homogénéité d'arrosage, le canon doit fonctionner dans une plage de pression relativement étroite, avec un écartement entre passage spécifique et un angle de balayage adapté aux deux paramètres précédents.

I.1.2.3 Le pivot (rampe pivotante)

Le pivot également appelé rampe pivotante est un appareil d'irrigation mobile, arrosant en rotation une surface circulaire ou semi-circulaire (Figure I-5). Il est en général à poste fixe, mais il peut être conçu pour être déplacé entre parcelles voisines.



Figure I-5 : irrigation par pivot

L'irrigation par rampe d'arrosage inventée aux USA vers la fin des années 40, a débuté en France au cours des années 60. Convenant bien à l'irrigation des grandes surfaces, le pivot s'est d'abord développé dans des zones plates des Landes, sur des parcelles de grande taille jusqu'à 200 ha. Il se développe de plus en plus dans des zones où son utilisation semblait moins évidente, sur des parcelles plus petites, où il permet l'épandage de fertilisants et de pesticides, et s'adapte à des pentes pouvant atteindre localement 15%. La longueur « idéale » d'un pivot (investissement, charges d'entretien, risque) se situe aux alentours de 400m, soit une parcelle de 50 ha environ. L'intérêt essentiel de ce type de matériel est sa simplicité de mise en œuvre, ses possibilités de fonctionnement automatique et ses performances en terme d'uniformité et d'apport d'eau y compris en conditions ventées.

I.1.2.4 Diffuseurs et micro-asperseurs

Les micro-asperseurs arrosent de petites surfaces de sol par aspersion, sous forme de tache ; c'est une technique intermédiaire entre le goutte à goutte et l'aspersion. Elle permet de s'affranchir de contraintes liées aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (forte conductivité et faible capillarité) ou à la présence de macropores dues à la fissuration ou à la faune du sol. Lorsque des contraintes de ce type ne permettent pas un fonctionnement acceptable du goutte à goutte ou nécessitent une trop forte densité du goutteur la micro-aspersion fournit une bonne alternative. Elle permet en outre d'avoir un développement racinaire dans un volume de sol plus important.

- **Les mini-diffuseurs**

Les mini-diffuseurs fonctionnent comme de petits asperseurs statiques ne couvrant qu'une partie de la surface du sol au voisinage des cultures. Du point de vue hydraulique, ils sont tous à cheminement court. Ils sont constitués d'une base comportant un orifice calibré au travers duquel l'eau passe sous forme de jet et d'une tête formant un déflecteur sur laquelle le jet vient éclater (Figure I-6).

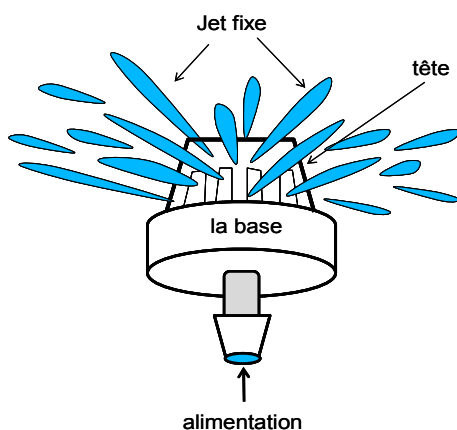


Figure I-6 : Schéma d'un mini-diffuseur

Le débit nominal est compris entre 20 l/h et 150 l/h mais les valeurs les plus couramment utilisées sont 20, 30 et 40 l/h. Pour un même fabricant chaque modèle est généralement repéré par une couleur différente. La portée est limitée à 1 ou 2 mètres et la forme des surfaces arrosées varie selon le type de tête utilisée (plein cercle, demi-cercle, pinceau, etc.). Les mini-diffuseurs sont toujours placés en dérivation. Ils sont fixés directement sur la rampe (rampe suspendue) ou reliés à celle-ci par un tube conducteur. Dans ce cas, ils sont attachés à

un support vertical ou suspendus tête en bas, et stabilisés en position verticale par une masse d'alourdissement (Tiercelin .1998).

- **Les ajutages calibrés**

Les ajutages sont constitués d'orifices calibrés (1,2 à 2,1 mm de diamètre) fixés en dérivation sur la rampe à intervalles réguliers (2,5 à 6,5 m) et recouverts d'un manchon brise-jet. L'eau distribuée par les ajutages ne s'infiltre pas ponctuellement mais s'écoule dans une rigole cloisonnée constituant une série de petits bassins au fond de laquelle est placée la rampe. Selon le diamètre de l'ajutage, le débit varie de 35 à 100 l/h, sous une pression de 1 bar. Ces systèmes ne peuvent pas être assimilés à du goutte à goutte mais restent de l'irrigation localisée, même s'ils fonctionnent avec de forts débits.

I.1.3. Le goutte à goutte ou micro-irrigation

Concernant la France, l'irrigation localisée représente 4 % à 5% des surfaces, soit environ 65 000 ha, mais avec un fort enjeu en terme de revenu, puisqu'elle concerne exclusivement des cultures à haut produit brut. Le goutte-à-goutte se développe surtout sur les cultures maraîchères, l'arboriculture et depuis peu la viticulture.

I.1.3.1 Principe de la micro-irrigation en agronomie

Le goutte à goutte, également appelé micro-irrigation, désigne une technique d'irrigation caractérisée par des apports d'eau faibles, fréquents et localisés au voisinage des cultures (Figure I-7). « Micro-irrigation » est le terme utilisé par la CIID (Commission Internationale pour l'étude des Irrigations et du Drainage, 1976) en raison des faibles débits mis en œuvre au niveau des goutteurs. « Irrigation localisée » est le terme utilisé par la FAO (Food and Agriculture Organisation - 1979).

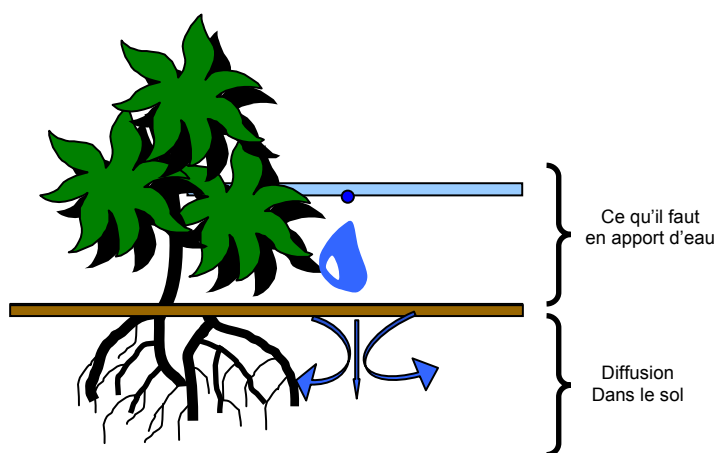


Figure I-7: Schéma de principe du fonctionnement de l'irrigation localisée

Cette méthode d'arrosage fondamentalement différente de celles qui cherchent à couvrir une surface (irrigation gravitaire ou aspersion), consiste à réapprovisionner en eau, périodiquement une partie du réservoir du sol. La réserve d'eau ainsi reconstituée dans le sol, détermine le laps de temps qui sépare deux arrosages successifs. En irrigation localisée, on ne

cherche pas à reconstituer la totalité des réserves en eau du sol. L'eau dont a besoin la plante est apportée en petites quantités, une ou plusieurs fois par jour, de façon ponctuelle. Elle diffuse radialement sous l'effet des forces capillaires et verticalement sous l'effet de la gravité, dans un volume de sol limité au voisinage des racines, dans lequel la plante puisera. Il est indispensable de connaître le besoin hydrique de la plante à chaque apport d'eau, ce qui détermine la fréquence des apports, dont le volume varie au cours de la saison.

Il se forme sous le goutteur une zone saturée de faible volume, d'où la majeure partie de l'eau diffuse en écoulement non saturé. Pour un débit et une durée d'arrosage déterminés, la forme et les dimensions du volume de sol humidifié (ou bulbe) dépendent des caractéristiques hydrodynamiques du sol. La Figure I-8 montre deux exemples de forme de bulbes sur un sol de type argileux, avec une diffusion latérale importante du fait de la faible vitesse d'infiltration, et sableux avec une diffusion verticale plus importante.

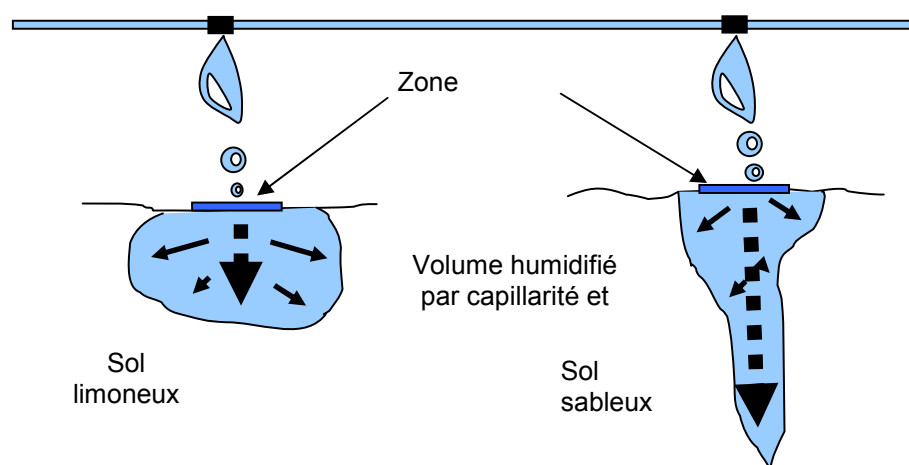


Figure I-8 : Formes du volume de sol humidifié suivant les caractéristiques du sol

La conduite de l'arrosage en goutte à goutte cherchera à maintenir le bulbe humide pour permettre aux plantes un certain confort hydrique pendant toute la saison d'irrigation et pour éviter tous phénomènes de fissurations du sol, en suivant le développement du système racinaire au cours de la croissance

I.1.3.2 Principe de fonctionnement des goutteurs en irrigation localisée

En irrigation localisée, l'eau est transportée le long des rayons de culture par une canalisation principale (ou rampe) le long de laquelle des goutteurs intégrés ou rapportés assurent la distribution en eau au strict voisinage des plantes. Les goutteurs ont un faible débit compris entre 0.5 et 8 l/h sous une pression de 0.5 à 4 bars, suivant que l'on a des goutteurs à compensation de pression ou non. A travers le goutteur, l'eau suit un cheminement complexe et plus ou moins long (0,1 à 1m), qui induit une dissipation de la pression. Il s'en suit que le débit des goutteurs est relativement peu dépendant de la pression auxquels ils sont soumis. Pour déterminer la pression de fonctionnement des réseaux et la longueur maximum des rampes, on cherche en général à rester dans un intervalle de débit de 10% de part et d'autre du débit moyen. Cette caractéristique est essentielle, puisqu'elle détermine la longueur maximale des rampes sur le terrain pour conserver une bonne uniformité de distribution.

Il existe des goutteurs à circuit uniforme comme les capillaires (à l'origine de cette technique Figure I-9) et des goutteurs à circuit non uniforme. Dans les goutteurs à circuit uniforme, la section de passage de l'eau est constante tout le long du cheminement, les pertes de charge

sont engendrées par le frottement de l'eau le long des parois du capillaire, la régulation du débit se fait donc proportionnellement à la longueur du capillaire. Dans les goutteurs à circuit non uniforme, dits à chicanes ou à labyrinthe, des changements brusques de direction du filet liquide provoquent un effet de turbulences qui s'ajoute aux frottements le long des parois pour engendrer une dissipation de la charge. Les sections de passage sont, pour un même débit, plus importantes que celles des goutteurs à circuit uniforme.

Les industriels ont mis au point des goutteurs turbulents à circuit court généralement intégrés, pour diminuer l'encombrement du goutteur et la perte de charge qu'il produit dans la canalisation. La difficulté réside dans la définition d'un circuit court capable d'uniformiser la charge résiduelle en sortie de goutteur, sans créer de zones pièges à particules.

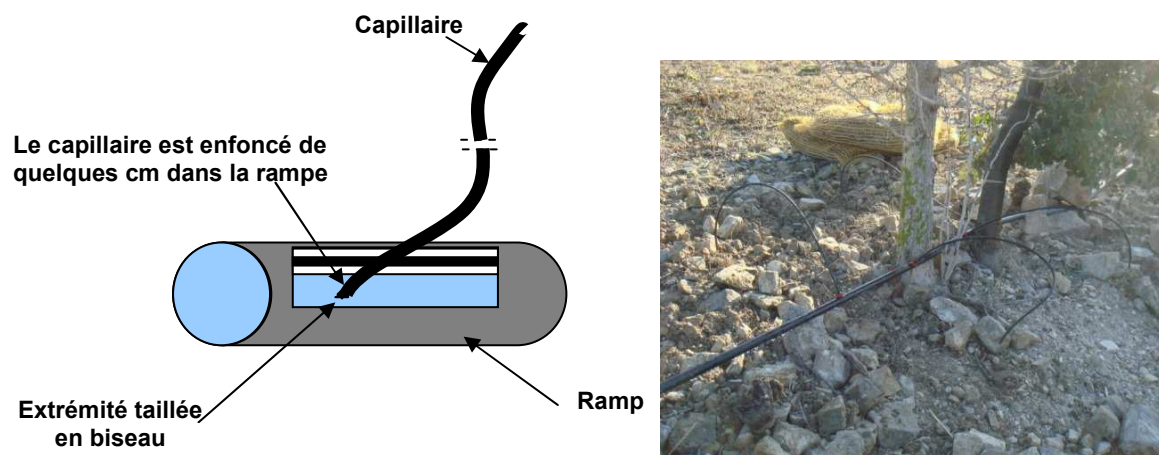


Figure I-9 : Goutteur à circuit uniforme (capillaire)

Il existe trois modes de fixation des goutteurs sur la rampe :

- **Les goutteurs monté en dérivation** ou rapportés ou on-line :

Ils sont fixés sur la rampe par l'intermédiaire d'un embout appelé « tête de vipère » (Figure I-10). Le montage en dérivation des goutteurs sur la rampe s'effectue sur le terrain, il ne convient pas aux dispositifs qui doivent être manipulés (risques d'arrachage).

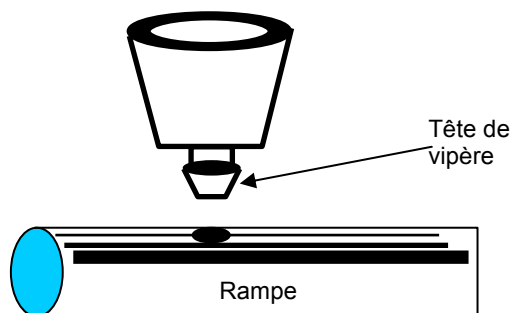


Figure I-10: Schéma du montage en dérivation du goutteur sur la rampe

- **Les goutteurs en ligne**

Il s'agit de goutteurs moulés, munis de deux embouts cannelés que l'on insère dans la rampe. Ce montage est effectué sur le terrain, après tronçonnage du tuyau, à des intervalles réguliers

qui varient selon les cultures auxquelles sont destinées les installations (écartements de 0.3 m à 2.5 m). Ce système n'est plus très répandu.

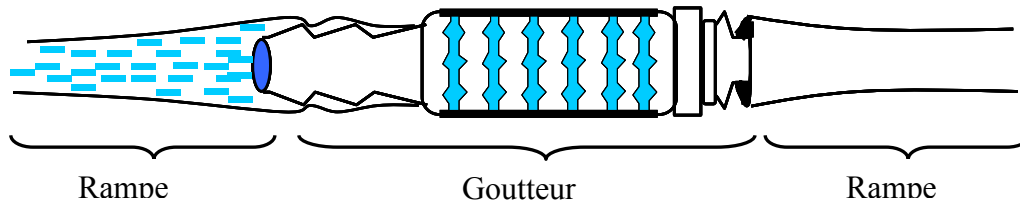


Figure I-11 : Schéma d'un goutteur en ligne et du circuit de l'eau sur la rampe

- **Les goutteurs intégrés ou in-line (par exemple : les goutteurs « GR »)**

L'élément portant le cheminement est mis en place dans le tuyau lors de son extrusion. Le tuyau est donc fabriqué autour du goutteur, les écartements sont imposés.



Figure I-12 : Coupe longitudinale d'un goutteur intégré dans la rampe

I.1.3.3 Courbe de variation du débit en fonction de la pression d'un goutteur

La relation entre le débit d'un goutteur et la pression dans la rampe au niveau de celui-ci est une loi de puissance de la forme :

$$Q = k \times H^x \quad \text{Eq I-1}$$

Avec :

Q = Débit du goutteur [l/h]

H = Pression s'exerçant dans la rampe exprimée en mètre de colonne d'eau [m CE]

X = Exposant dont la valeur dépend du régime d'écoulement hydraulique

K = Coefficient dépendant des unités utilisées.

Le calcul de cette courbe permet de définir la sensibilité de variation du débit aux variations de pression. Cette relation intervient dans le calcul des longueurs maximales de rampe. Selon la valeur du paramètre x, une même variation de pression n'entraînera pas une même variation de débit. Selon la sensibilité de leur débit aux variations de pression, les goutteurs sont répartis en deux classes : autorégulant ou non autorégulant.

- **Goutteurs non auto-régulant ou sans compensation de pression**

Le débit varie en fonction de la pression (Figure I-13). Selon le type d'écoulement à l'intérieur du goutteur, la valeur de x est comprise entre 0.3 et 1 (Jean Robert Tiercelin .1998).

Type de goutteur	Valeur de x
Circuit court à double orifice	X = 0.38
Circuit court à simple orifice	X = 0.48
Circuit long à chicane	X = 0.55
Circuit long uniforme	X = 0.7 à 0.8

Tableau I-1: Valeurs de x pour différents types de goutteur.

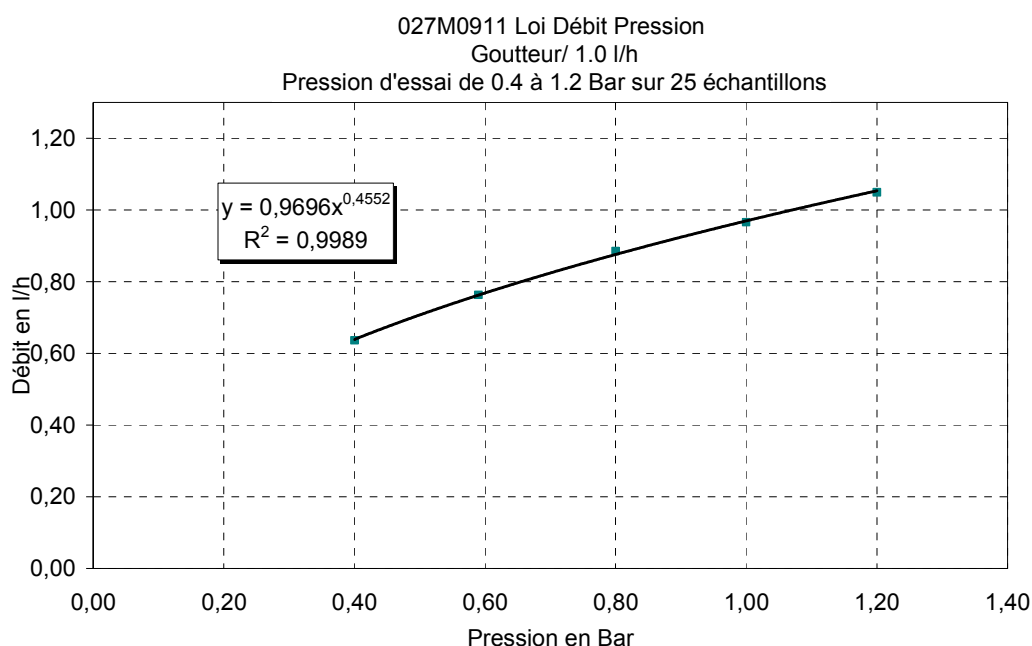


Figure I-13: Exemple de courbe débit pression pour un goutteur non auto-régulant

- **Goutteurs auto-régulant ou à compensation de pression**

Le débit, pour une certaine plage de valeur de pression, est pratiquement indépendant de celle-ci. La valeur de l'exposant x de la loi débit - pression est voisine de 0 (Figure I-14). La régulation du débit est obtenue par une membrane qui, selon la pression, se déforme et obture plus ou moins l'orifice de passage de l'eau (Tiercelin .1998).

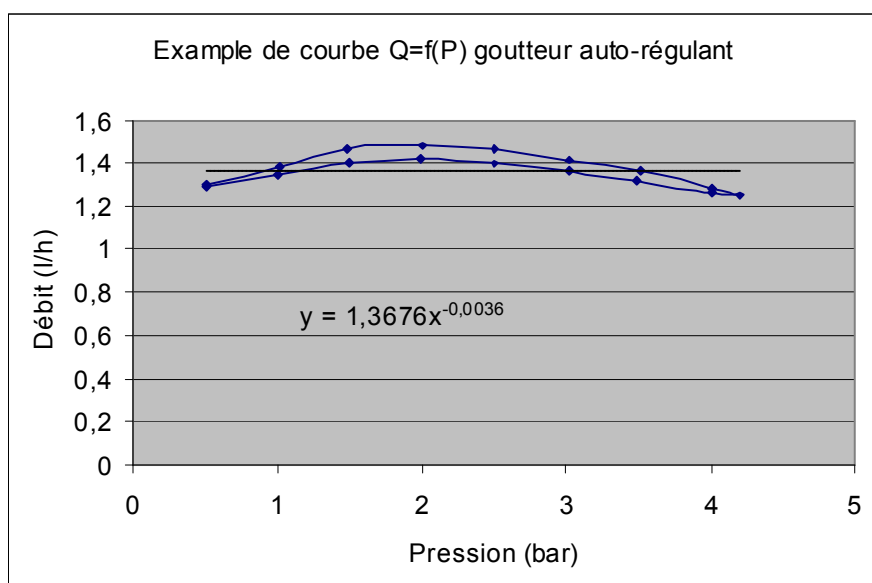


Figure I-14 : Exemple de courbe débit pression pour un goutteur autorégulant

I.1.4. Détermination du coefficient de variation technologique (CV)

Elle permet de quantifier la variabilité des débits d'un lot de goutteurs à une pression donnée et caractérise la qualité de fabrication. C'est un élément important à connaître car avec un dimensionnement correct de l'installation (choix des diamètres), il conditionne l'homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle. Le protocole utilisé est défini dans les normes ISO 9261 «Agricultural irrigation équipement – Emitters and Emitting-pipe systems - Specifications and tests methods ». Il est différent pour les goutteurs non autorégulant et autorégulant pour lesquels une phase de conditionnement des goutteurs est nécessaire.

Le coefficient de variation technologique CV est donné par la formule :

$$CV = \frac{\sigma}{Q_m} \quad \text{Eq I-2}$$

Avec : σ = écart type du débit de l'échantillon.

Q_m = débit moyen de 25 exemplaires du goutteur

L'homogénéité de fabrication est appréciée à partir de la valeur du coefficient de Variation CV selon quatre classes définies par le CEMAGREF (Tableau I-2).

Valeurs du CV	0	5	10	15
Appréciation par classe	Très bonne	Bonne	Médiocre	Mauvaise

Tableau I-2 : Classes d'appréciation de l'homogénéité des goutteurs en fonction du CV

I.2. Les différentes formes de colmatage

Le colmatage des goutteurs en irrigation localisée, est la cause majeure de baisse des performances à l'échelle de la parcelle (Pitts et al, 1990) et détermine donc la durée de vie du système de distribution. Le colmatage peut être d'ordre physique, biologique ou chimique et il est souvent causé par une association de différents facteurs parmi lesquels la qualité physico-chimique de l'eau d'irrigation, dans les interactions qu'elle crée, joue un rôle prépondérant.

I.2.1. Le colmatage physique

Le colmatage physique (ou minéral) est provoqué par des particules minérales en suspension dans l'eau. Ces particules entrent dans la constitution du sol d'où elles ont été arrachées lors de l'écoulement de l'eau avant sa captation pour les besoins d'irrigation. Elles sont souvent grossièrement classées par minéralogie en fonction de leur taille :

- sables grossiers : particules supérieures à $200\mu\text{m}$;
- sables fins : particules comprises entre $200\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$;
- limons grossiers : particules comprises entre $50\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$;
- limons fins : particules comprises entre $20\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$;
- argiles : particules de taille inférieure à $2\mu\text{m}$.



Figure I-15 : Colmatage physique dans le labyrinthe et au niveau de la grille d'entrée située à l'intérieur du tube

Elles peuvent agir sur l'obstruction des goutteurs de deux manières différentes :

- colmatage par obstruction : quand une des dimensions des particules est supérieure à la section de passage de l'eau à travers le goutteur (cas des particules de sables) ;
- colmatage lent ou limonage : quand les particules les plus fines se déposent progressivement aux endroits où la vitesse de circulation de l'eau est faible. Ce point d'accroche sert de support pour les prochaines particules et perturbe l'écoulement au sein du goutteur. Les dépôts sont localisés soit dans le labyrinthe, soit au niveau de la grille d'entrée censée empêcher les grosses particules de pénétrer dans le labyrinthe (Figure I-15).

Les argiles et les particules de la taille des limons, sont normalement trop petites pour colmater les goutteurs. Cependant, sous certaines conditions physicochimiques, les argiles peuvent s'agréger en aval du système de filtration et former des agrégats provoquant le colmatage (Pitts et al, 1990) soit directement, soit indirectement en retenant d'autres particules comme les limons. Ce phénomène de colmatage dû à l'agrégation est un des mécanismes qui seront particulièrement étudié dans ce travail. En effet, on considère qu'il constitue un préalable au développement d'autres phénomènes de colmatage, en particulier biologiques. De plus, il est probable que les engrais apportés lors d'opérations de fertigation aient un effet aggravant sur ce mécanisme.

I.2.2. Le colmatage organique ou biologique

Le colmatage organique (ou biologique) est provoqué par de la matière organique inerte présente dans les eaux de surface, ou plus souvent par le développement de matière organique vivante comme des algues, des bactéries (Figure I-16), voire certains champignons ou même des coquillages microscopiques. L'expansion des algues nécessite de la lumière, ce qui veut dire qu'elle a essentiellement lieu à la sortie des orifices (Figure I-17).



Figure I-16 : Colmatage biologique du filtre en amont de la rampe d'irrigation



Figure I-17 : Obstruction par des algues de l'orifice de sortie d'un goutteur

La prolifération de certaines bactéries sous forme de biofilm, peut engendrer l'accrochage ou le piégeage de certains solutés comme les carbonates de calcium ou des particules qui se trouvent en suspension dans l'eau d'irrigation (Gilbert et al, 1981). C'est en particulier le cas dans les eaux ferrugineuses, où ces biofilms peuvent même proliférer dans des canalisations en PVC, malgré des vitesses d'eau qui dans le cas de la Figure I-18 sont supérieure à 3m/s à la conception. Aussi, la pratique de la fertigation, c'est-à-dire l'apport d'élément fertilisant via le réseau d'irrigation localisée peut contribuer au colmatage des

réseaux en favorisant le développement de certains micro-organismes grâce à un apport supplémentaire en nutriment.



Figure I-18 : Colmatage ferrique des tubes par un biofilm développé par des bactéries sidérophores

I.2.3. Le colmatage chimique

Les eaux d'irrigation, qu'elles soient de forage ou de surface, contiennent différents éléments chimiques dissouts. Ces éléments sont en équilibre dans leur milieu d'origine. Lors du pompage, cet équilibre peut être rompu par la mise à l'air ou l'ajout des intrants¹ et des précipités peuvent alors apparaître. Les plus rencontrés sont les carbonates de calcium et les précipités de fer sous forme ferrique (Figure I-18), plus rarement des précipités de sulfate (Burt et al., 1995 ; Burt et Styles, 1994 ; Hills et al., 1989 ; Nakayama et Bucks, 1986).

La mise à l'air libre des eaux riches en gaz carbonique et en calcium provoque, au niveau des sorties des goutteurs, le dégazage du CO₂ et le dépôt localisé du CaCO₃ (Figure I-19). Ces dépôts sont déclenchés par l'oxygénation de l'eau mais d'autres facteurs interviennent tels que la température et le pH du milieu (Owen et al., 1998). L'apport d'éléments fertilisants tels que les composés contenant du phosphore, l'ammoniaque liquide, certain oligo-éléments (zinc, cuivre, manganèse) favorisent la précipitation des solutés (Pitts et al. 1990) et accélèrent le processus du dépôt, traduit par un colmatage.

¹ En agriculture, on appelle « intrants » les différents produits apportés aux terres et aux cultures, ce terme comprend : les engrais, les amendements (éléments améliorants les propriétés physiques et chimiques du sol, tels que le sable, la tourbe, la chaux...), les produits phytosanitaires et les activateurs ou retardateurs de croissance.



Figure I-19 : Exemple de colmatage par précipitation de CaCO_3 , et son amorce sur une gaine

I.2.4. Le colmatage mécanique

Le colmatage peut également être provoqué par des projections de particules de sol sur le goutteur, lors d'une pluie par exemple, ou par un contact direct de l'orifice du goutteur sur le sol. Il n'est pas rare que ces deux effets soient réunis (Chossat, 1995). De plus, sur les goutteurs qui sont situés en partie haute des parcelles, lors des phases d'arrêt d'irrigation, l'eau peut circuler en sens inverse de celui prévu et aspirer par les goutteurs quelques particules susceptibles de perturber l'écoulement ensuite. De manière générale, ce type de colmatage correspond donc à une obstruction par des éléments externes.

Par ailleurs, il arrive que les racinelles de certains végétaux pénètrent par l'ouverture des goutteurs lorsqu'ils sont posés sur le sol ou enterrés, et les obstruent (Figure I-18). Les constructeurs proposent des goutteurs dont le plastique est traité avec un désherbant (trifluralin par exemple) qui joue le rôle de répulsif pour les racines et évite leur intrusion. D'autres proposent des goutteurs équipés d'une valve qui se ferme lorsque le système est sans pression, ce qui fait que la racine "ne trouve" pas la source d'eau. Les orifices peuvent également être colonisés par des insectes, qui nichent ou pondent pendant l'arrêt des réseaux et provoquent ainsi leur colmatage.



a



b



c

Figure I-20 : Schéma d'un goutteur capable d'accepter l'intrusion racinaire (a), exemple de bouchage par un insecte (b) et d'intrusion sur une gaine vue en coupe (c)

I.2.5. Synthèse

Pour conclure cette partie sur les origines du colmatage, il est utile de préciser que les causes sont rarement isolées mais très souvent combinées. En effet, comme nous venons de le voir, certaines bactéries peuvent contribuer au colmatage chimique en transformant le fer ferreux en fer ferrique, ou encore, la matière organique. Les mucus qu'elles produisent forment un biofilm, qui peut servir de fixateur aux particules minérales qui flocculent et forment ainsi des agrégats de taille plus importante. C'est pourquoi, il est très difficile de traiter chaque phénomène séparément, au contraire mieux vaut aller vers une approche plus globale (ou intégrée) du problème. Quels que soient le ou les facteurs qui sont à l'origine du colmatage, le cœur du problème réside dans la qualité de l'eau d'irrigation utilisée et son conditionnement par filtration.

I.3. La qualité et l'origine de l'eau d'irrigation

On a vu que le colmatage des goutteurs est directement lié à la qualité de l'eau d'irrigation. Celle-ci peut être caractérisée par sa charge en particules en suspension, sa composition chimique et le type d'organismes qui y prolifèrent. Les eaux de surface contiennent une grande variété de phytoplancton et zooplancton, qui peuvent rester à l'état dormant ou se développer durant le stockage. Les particules minérales en suspension peuvent s'agréger soit entre elles, soit avec d'autres matières d'origine organique comme des fibres végétales, les substances exopolymériques d'origine bactérienne. Ces derniers phénomènes sont abondants plus particulièrement dans les eaux des lacs collinaires (Adin, 1987 ; Ravina et al., 1992) ou les rivières. Les organismes aquatiques (certains coquillages par exemple) peuvent aussi proliférer dans tout le réseau d'irrigation (Nakayama et Bucks, 1991 ; Ravina et al., 1992). De tels problèmes peuvent être intensifiés par des réseaux très longs et une faible vitesse d'écoulement (Ravina et al., 1993).

La filtration, le traitement chimique de l'eau et le nettoyage à forte pression sont les moyens généralement utilisés pour prévenir ou lutter contre le colmatage du système d'irrigation (Nakayama et Bucks, 1991). Mais la filtration, obligatoire dans les systèmes de micro-irrigation, peut s'avérer compliquée. Le colmatage des filtres utilisés peut intervenir en quelques jours ou quelques dizaines de minutes suivant la situation. L'utilisation d'eaux de mauvaise qualité, éventuellement usées renforce ce besoin. Aussi, une bonne connaissance de la composition de l'eau aide à définir une méthode de prévention par un conditionnement adapté (Bucks et al. 1979; Nakayama, 1986 ; Nakayama et Bucks, 1991).

I.3.1. Origine de l'eau

Les eaux utilisées en irrigation localisée peuvent avoir diverses origines, qui leur confèrent des caractéristiques différentes et induisent un conditionnement spécifique :

- Eaux souterraines provenant de forages : plutôt riches en minéraux en solution, elles peuvent donner lieu à des précipitations, donc à un colmatage chimique ; ce type de colmatage se produit le plus souvent à la sortie du goutteur ; il peut être combiné avec des développements bactériens ;
- Eaux superficielles, provenant de rivières, de canaux, de lacs naturels ou artificiels, de retenues collinaires ou encore de bâches de rétention ; du fait du ruissellement dans des sols fragiles, elles sont souvent chargées en particules minérales, et sont responsables du colmatage physique ; par ailleurs, du fait du stockage prolongé, elles

peuvent avoir des taux élevés en algues et en bactéries et peuvent entraîner des colmatages organiques ;

- Eaux usées ou recyclées dont l'utilisation tend à se développer en micro-irrigation pour supprimer les risques de contacts : ce sont des eaux riches en matières en suspensions et solutés, issues en général du traitement de station d'épuration ou de recyclage d'eaux de lavage ou de drainage, qui peuvent être utilisées seules ou en association avec des eaux d'autre origine. Ce type d'eau peut provoquer les trois types de colmatage.

L'origine de l'eau implique donc un conditionnement particulier de sorte à limiter les facteurs favorisant le colmatage. Il n'existe aucune méthode quantitative reconnue pouvant permettre d'évaluer le potentiel de colmatage d'une eau donnée. Seule une méthode indirecte a été mise au point par des Israéliens et améliorée par un laboratoire Sud-Africain. Il s'agit de caractériser le pouvoir colmatant d'une eau, au moyen d'un filtre à tamis, par rapport à une taille de filtration donnée, correspondant aux mailles couramment utilisées en agriculture. On mesure le temps et le volume requis pour colmater partiellement l'élément de filtre dont la surface est fixée, mesuré par l'évolution de la perte de charge d'un écoulement le traversant. Ce travail est fait d'une part en amont, d'autre part en aval du filtre, on en déduit un index ou un pouvoir colmatant de l'eau servant à définir la filtration requise.

Une analyse de l'eau avant la mise en œuvre de l'installation peut être utile, en complément du recours à l'expérience des utilisateurs locaux. L'injection de fertilisant peut accentuer le risque de colmatage, en fonction de sa solubilité qui dépend de la nature de l'eau d'irrigation (Ford, 1977) et de son effet sur la charge de surface des particules (floculation ou dispersion).

I.3.2. Température et pH

Le colmatage est souvent aggravé par les variations de température car la solubilité de certains éléments en dépend. Le calcium, le magnésium, les carbonates lorsque le pH est supérieur à 7,2 avec une température élevée, vont précipiter dans les tubes et dans les goutteurs. La solubilité du CaCO_3 est inversement proportionnelle à la température (Hill et al., 1989). Mais si l'augmentation de la température favorise la précipitation, une fois le précipité formé, la diminution de la température ne dissout pas la couche de CaCO_3 . Ces précipités dus au carbonate de calcium, s'accumulent dans le cheminement étroit des goutteurs en accélérant le colmatage. Il faut savoir que les systèmes de surface, dont les tubes sont noirs, peuvent voir leur température dépasser 80°C aux heures les plus ensoleillées de la journée.

La formation de phosphat sous forme de précipité dépend de plusieurs facteurs (Boman, 1990) tels que le pH, la température, la concentration. Les ions Ca^{2+} et PO_4^{3-} forment plusieurs combinaisons ; trois d'entre elles sont insolubles dans l'eau (hypo-, méta-, et pyro-phosphate). Des composants qui apparaissent naturellement comme la blushite ($\text{CaPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la whitlochite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) voient leur solubilité diminuer avec l'augmentation du pH. Par ailleurs, tous ces paramètres peuvent influencer sur la croissance des bactéries, ce qui tend à augmenter le risque de colmatage.

I.3.3. Concentration en sel

La salinité de l'eau est un critère très important pour la caractérisation de la qualité des eaux d'irrigation. Les sels présents dans l'eau sont potentiellement colmatants s'ils rentrent en contact avec d'autres ions (fertilisants par exemple), ou des particules en formant un précipité.

C'est particulièrement le cas des sels contenant des cations divalents qui peuvent lier des particules minérales provenant des sols comme les argiles.

I.3.4. Concentration en colloïde

La coagulation à l'intérieur des réseaux d'irrigation est un phénomène possible, car les colloïdes sont omniprésents dans les eaux naturelles. On les trouve aussi bien dans les eaux de ruissellement que dans les eaux souterraines ou marines. Leur abondance et leur petite taille leur confèrent une très grande surface spécifique, et donc un rôle majeur dans tous les phénomènes d'interaction aux interfaces qui se produisent dans l'environnement aquatique.

Plus particulièrement, les colloïdes minéraux sont le siège principal des processus d'adsorption et de transport de matière organique dans l'eau. Ces réactions aux interfaces solide/liquide, varient avec les conditions du milieu et déterminent la stabilité des colloïdes en suspension. Ainsi, les phénomènes d'agrégation et de sédimentation d'agrégats organo-minéraux dans les milieux aquatiques naturels peuvent être à l'origine du transfert des matériaux de surface vers les eaux profondes (Fowler et Knauer, 1986). Ce qui est vrai dans le milieu naturel l'est aussi dans les systèmes d'irrigation. Leur rôle biogéochimique est donc d'un grand intérêt scientifique, dans la mesure où ils concentrent les différents micro-organismes et polluants de l'environnement aquatique (Grossart et Simon, 1993 ; Smith et al., 1992 ; Ploug et al., 1999 ; Schramm et al., 1998), et contribuent à leur flux vers les fonds marins (Grossart et Simon, 1998).

Les colloïdes minéraux proviennent essentiellement de l'érosion mécanique du sol, car ce substrat meuble est très sujet à l'érosion par les eaux de ruissellement. Pour assurer son rôle de réserve hydrique, de support pour la végétation et résister à l'érosion, le sol doit être structuré, poreux et les agrégats qui le forment de forte cohésion. La matière organique naturelle contribue à cette cohésion. Les exsudats racinaires riches en glucose permettent le développement dans la rhizosphère de colonies bactériennes, qui ont pour effet de réguler la stabilité hydrique et minérale du milieu. Les minéraux du sol résultant de l'altération de la roche originelle par pédogenèse (l'ensemble des processus physique, chimique et biologique) qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la différenciation des sols sont très variés : argiles, oxydes de fer, oxyde de manganèse, carbonates et minéraux primaires résiduels sont les plus abondants.

I.3.5. Cas des eaux marginales

Avec la diminution des ressources en eau de bonne qualité, l'irrigation à partir d'eau marginale tend à se développer (Broughton, 1995 ; Von Hoyningen Huene, 1994). Dans ces conditions, il y a un fort potentiel pour la croissance d'agents d'encrassement biologique (BCA: Biological Clogging Agent), comme les algues, les bactéries et les protozoaires dans les réservoirs alimentés par des eaux usées provenant des zones rurales (élevage intensif), et des zones urbaines (Adin et Sacks, 1991 ; Ravina et al., 1992 ; Sagi et al., 1995 ; Bucks et al., 1979 ; Ford, 1978). Quand une telle eau est utilisée dans des systèmes de micro-irrigation, un risque existe de voir les goutteurs se boucher rapidement (Adin et al., 1989 ; Adin et Alon, 1986 ; Bucks et Nakayama, 1984 ; Gilbert et al., 1979). L'impact des BCA se traduit par la réduction du débit d'émission et de l'uniformité de distribution sur le champ. D'autres chercheurs (Adin et Sacks, 1991 ; Hills et Tajrishy, 1995) ont montré que les BCA se lient chimiquement à l'eau. La sévérité de l'encrassement dépend aussi des qualités industrielles du goutteur, c'est-à-dire son type, ses dimensions, la section de passage de l'eau, la longueur du

cheminement, la présence ou l'absence de système de compensation de pression dans les goutteurs.

I.3.6. Tableau de Synthèse du lien qualité d'eau et risques de colmatage

Nakayama et Bucks ont établi en 1980 une grille permettant d'estimer les risques de colmatage :

Paramètres	Symbole	Unité	Degré de risque		
			Faible	Moyen	Elevé
Particules en suspension		ppm	< 50	50 – 100	> 100
pH	pH	1 à 14	< 7,0	7,0 - 8,0	> 8,0
Conductivité électrique	EC _w	dS/m	< 0,75	0,75 - 3,0	> 3,0
Matières totales dissoutes	TDS	mg/l	< 500	500 - 2000	> 2000
Sodium Adsorption Ratio	SAR	mg/l	< 3	3 – 9	> 9
Carbonate de Sodium Résiduel	RSC	mg/l	< 1,24	1,25 - 2,5	> 2,5
Alcalinité ou dureté		mg/l	< 120	120 – 200	> 200
Population bactérienne		ppm	< 10 000	10 000-50 000	> 50 000
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	mg/l	< 90	90 – 520	> 520
Chlore	Cl ⁻	mg/l	< 142	142 – 355	> 355
Bore	B	mg/l	< 0,5	0,5 - 2,0	> 2,0
Nitrate-Nitrogen	NO ₃ -N	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
Fer	Fe	mg/l	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	mg/l	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Manganèse	Mn ²⁺	mg/l	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5

Tableau I-3 : Les différents paramètres et leurs risques de colmater les goutteurs.

(Compilation de données issues des auteurs suivants : Ayers et Westcot, 1985 ; Couture, 2004 ; Hassan Farouk, 1999 ; Nakayama and Bucks, 1980 ; Pitts et *al.* 1990 ; Thomas, 2004)

Plusieurs recherches ont eu pour objectif de déterminer les causes du colmatage et de mettre en place des moyens de prévention (Oron et al, 1979 ; Adin, 1987 ; Adin et Sacks, 1991 ; Ravina et al., 1992 ; Tajirishy et al.,1994 ; Taylor et al., 1997). Les recommandations suivantes en sont tirées :

- la filtration de l'effluent et le lavage des filtres : il est préférable de réaliser une filtration en cascade (ou à plusieurs étages) du plus grossier au plus fin, en commençant par un filtre à sable ;
- la chloration peut éliminer les bactéries et certaines algues, or dans bien des cas, le colmatage est justement accru par la formation de biofilm lié à l'activité bactérienne. Il est à noter que le stockage dans des réservoirs tampons accroît ces phénomènes et la nécessité de recourir à la chloration ;

- le maintien d'un régime turbulent dans les réseaux pour éviter la formation de biofilms: leur développement est très lié aux propriétés de cisaillement de l'écoulement. Un cisaillement élevé, éventuellement obtenu au cours de cycles brefs peut contribuer à décoller le biofilm ;
- le lavage des lignes à grande vitesse ($>1\text{m/s}$) pour évacuer les accumulations de particules qui se créent pendant les périodes d'arrêt, et les biofilms éventuels ; il est préconisé de rincer les lignes en ouvrant leur extrémité ;
- l'optimisation de la géométrie ou l'architecture du labyrinthe de cheminement de l'eau dans les goutteurs qui détermine les zones et la cinétique du colmatage.

Plus tôt le colmatage est détecté, plus le traitement est facile. Un suivi de l'évolution de la pression et du débit (dans les filtres et les lignes de goutteurs) est tout à fait suffisant pour identifier un tel phénomène.