

Laboratoire d'Ecologie des Grandes Cultures



Projet BIOMEPUR

Epuration biologique tertiaire d'eaux usées sur filtre végétal de taillis à très courte rotation



Rapport final
Avril 2002



En collaboration avec l'INASEP



Financé par la Région Wallonne - DGRNE

Laboratoire ECOP – Grandes Cultures
Croix du Sud 2 bte 11 B 1348 Louvain-la-Neuve
Tel / fax : 010 47 34 55

Table des matières

Résumé	3
1. Introduction	6
2. Le filtre végétal	7
2.1. Description	7
2.2. Expériences à l'étranger	14
2.3. Aspects micro-économiques	22
3. Expérimentation à Sart-Bernard	26
3.1. Implantation des parcelles d'essais de TtCR et du dispositif expérimental	26
3.2. Système d'irrigation	26
3.3. Paramètres évalués	28
4. Résultats	33
4.1. Eau d'irrigation	33
4.2. Fertilisation	39
4.3. Eau des bougies	41
4.4. Biomasse	51
4.5. Sol	57
5. Bibliographie	66
6. Annexes	
Annexe 1 : Analyses des eaux de la station de Sart-Bernard	
Annexe 2 : Analyses de l'eau de distribution	
Annexe 3 : Analyses de l'eau des bougies	
Annexe 4 : Analyse du bois	
Annexe 5 : Analyses de sol	

Résumé

Le taillis à très courte rotation (TtCR) est une culture de saules, cultivés à très haute densité (plus de 10 000 plantes par hectare), dont on récolte les rejets de souche tous les trois ans. Cette source de biomasse énergétique est appelée à connaître un développement croissant en Wallonie, et ceci dans le cadre des programmes européen et wallon de développement durable par la promotion des énergies renouvelables. Outre le bénéfice pour l'environnement engendré par la réduction des émissions de CO₂, la culture du TtCR fournit une alternative agricole intéressante en Région Wallonne et une source d'énergie non délocalisable qui favorise l'emploi. Citons en exemple le projet TtCR-GAZEL (1995-1999) financé par la Région Wallonne pour démontrer la faisabilité de la cogénération décentralisée, grâce à une installation pilote dans une ferme de Braine l'Alleud. La société Xylowatt SA, une spin-off de l'UCL, commercialise maintenant cette technologie.

Parallèlement, le TtCR fait l'objet de nombreux projets de recherche et développement sur ses capacités de filtre végétal pour le traitement des eaux usées, surtout en Suède, Angleterre, France, Pologne, Etats-Unis et Nouvelle Zélande. Il apparaît en effet séduisant de combiner la production d'énergie renouvelable avec le recyclage d'une ressource considérable en éléments minéraux.

Un système sol – saule possède à priori de bons atouts pour constituer un filtre végétal efficace : une affinité de la plante pour l'eau, une période de croissance longue, une grande évapo-transpiration,... L'irrigation d'eau usée ou dans notre cas la "fertigation" remplace des fertilisants chimiques et augmente la productivité de la culture ; tout bénéfique pour l'environnement (meilleurs bilans énergétique et CO₂). De plus, cette culture non alimentaire évite la contamination de la chaîne alimentaire humaine ou animale.

Mais ce système d'épuration doit tenir compte de facteurs importants tels que les caractéristiques du sol ou du type de système d'irrigation. L'efficacité du filtre dépendra aussi de sa gestion, d'une part au niveau de la composition de l'eau usée et d'autre part au niveau de la manière d'irriguer. L'eau usée ne doit pas contenir trop de matières organiques mais suffisamment pour assurer une dénitrification et elle ne doit pas être trop minéralisée pour limiter le risque de lessivage de nitrates. L'irrigation doit alterner les périodes aérobies – anaérobies (saturation) dans le sol afin de favoriser la nitrification - dénitrification tout en retenant le phosphore et les germes, et en dégradant la matière organique. La gestion de la station d'épuration pour sortir un effluent approprié et du système d'irrigation sont donc des facteurs clés d'une épuration efficace.

Afin de tester le système en Wallonie, une expérimentation fut implantée à Sart-Bernard à côté d'une station à boue activée, en collaboration avec l'INASEP. L'essai comparait un témoin non irrigué, une irrigation à l'eau de distribution et une irrigation avec l'eau sortant du clarificateur (appelée eau secondaire). Deux variétés de saule furent de plus testées (Jorun et Tora), avec trois répétitions de tous ces traitements. L'irrigation était de type goutte à goutte et gérée automatiquement durant deux saisons complètes en 2000 et 2001. Les eaux d'irrigation étaient analysées régulièrement ainsi que l'eau du sol à 60 cm de profondeur, récoltées par des bougies poreuses et des lysimètres pour certaines parcelles (paramètres analysés : N kje, NO₃⁻, NH₄⁺, OrthoP, P tot, K⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, Cl⁻, Mg⁺⁺, SO₄⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻, pH, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, colliformes). Des piézomètres

permettaient également un prélèvement de l'eau de nappe. La productivité des saules fut mesurée chaque année et la composition du bois déterminée à la récolte (% matière sèche, N, P, K, Ca, Na, Al, Fe, Mg, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn). Le sol fut également analysé régulièrement (pH, % humus, N org, N min, P tot, P soluble, K, Mg, Na, Ca, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, Hg).

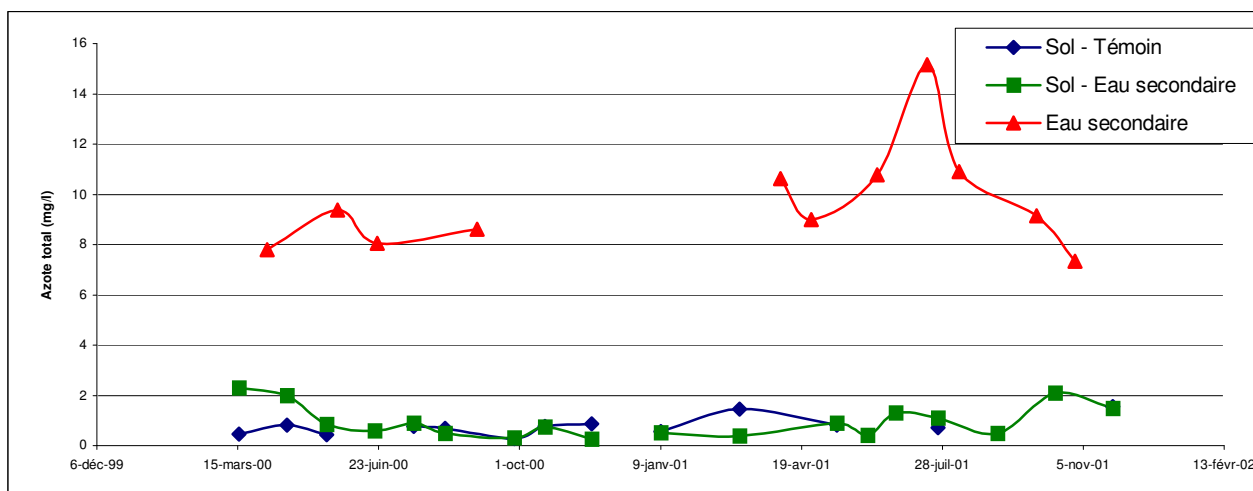
La quantité d'eau et de minéraux N, P et K apportés par irrigation est donnée au tableau ci-dessous.

Fertigation					
Année	Type d'eau	Apport d'eau (mm)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
2000	Eau de distribution	600 - 800	32 - 42	0	10 - 14
2000	Eau secondaire	600 - 800	49 - 66	5 - 8	65 - 93
2001	Eau de distribution	1000	56	16	16
2001	Eau secondaire	1200	125 - 131	12-13	101 - 105

La limite à partir de laquelle on a observé un écoulement important au travers du système a pu être approchée en 2001, avec un max. de 5,5 mm/jour jusque juin et 8 mm/jour en juillet – août.

L'eau du sol récupérée à 60 cm de profondeur dans les bougies poreuses n'a montré de différence statistiquement significative entre les moyennes des traitements d'irrigation en 2000 et 2001 que pour SO_4^{3-} , Na^+ et Mg^{++} qui sont plus élevés dans les parcelles irriguées avec l'eau secondaire. Pour certaines dates précises, on a constaté un effet statistique de l'irrigation qui a augmenté le N tot (7 février 2000, avant irrigation), NO_3^- (15 mars 2000, toujours avant l'irrigation), SO_4^{3-} (26 novembre 2001) et Mg^{++} (idem). Les deux variétés n'ont montré une différence significative que pour N kje le 26 novembre 2001.

La quantité d'azote total dans l'eau du sol est, à quelques exceptions près, toujours sous la barre des 2 mg/l alors que l'eau secondaire d'irrigation en contient 7 – 15 mg/l (voir graphique ci-dessous). Des concentrations plus élevées dans les lysimètres montrent toutefois que des lessivages ponctuels (non détecté avec les bougies) peuvent avoir lieu.



avec : Sol – témoin : eau du sol à 60 cm de profondeur sous taillis non irrigué
 Sol – eau secondaire : eau du sol à 60 cm de profondeur sous taillis irrigué avec l'eau secondaire
 Eau secondaire : eau d'irrigation sortant du traitement secondaire de la station d'épuration

L'eau du sol contient $\pm 0,1$ mg/l de P tot contre ± 1 mg/l dans d'eau secondaire.

La situation est différente pour le K qui est en concentration plus importante dans l'eau du sol (2 – 8 mg/l) lorsqu'il est irrigué à l'eau secondaire (8 – 12 mg /l). Cet élément n'est en effet pas plus absorbé par le bois en cas de fertigation.

On constate aussi dans le sol des concentrations plus élevées en Cl^- , Na^+ et SO_4^{3-} qui montrent que ces éléments sont entraînés en profondeur par l'irrigation.

Les teneurs en Cd, Cr, Ni, Hg et Zn sont très inférieures aux normes de potabilité respectives mais le Pb est supérieur, ce qui n'est pas du à l'irrigation et reste inexplicable.

La **biomasse** sur pied est passée pendant 4 années de 1 à 5, 20 et 40 tonnes de matière sèche par hectare et par an, avec une différence significative entre les deux clones en faveur de Tora. Les concentrations en éléments dans le bois ont montré une teneur plus élevée de K dans le témoin et de Cr dans le bois irrigué à l'eau de distribution. Les quantités sur 3 ans en kg/ha étaient de 269 – 44 – 80 de N – P – K pour l'irrigation à l'eau secondaire, ayant ainsi exportés la majeure partie de l'azote et du phosphore apportée alors que le K n'est qu'en partie exporté et cela explique son lessivage plus important en cas d'irrigation.

Pour Na et Mg, on remarque également que l'irrigation n'influence pas la concentration dans le bois. Ces éléments percolent donc et cela explique l'effet significatif de l'irrigation dans les bougies.

L'évolution du **sol** montre un pH, un taux d'humus et une teneur en K relativement stables tandis que le P et le Ca diminuent et que le Mg et le Na augmentent. La quantité d'azote minéral du sol sur tout le profil est négligeable, ce qui confirme les faibles teneurs en azote de l'eau du sol et le faible lessivage potentiel. Les teneurs en Cu et le Zn ont tendance à diminuer, le Ni et le Pb sont stables tandis que le Cd et le Cr ont tendance à augmenter, avec des concentrations anormalement élevées pour ce dernier. Toutefois, les quantités en jeu dans l'irrigation et dans le bois sont dérisoires par rapport aux teneurs dans le sol pour tous ces métaux lourds. Au vu des quantités apportées par irrigation et exportées par la culture, on constate une exportation nette pour le Zn, Cr, Ni et Cd. Une évolution à plus long terme du sol serait nécessaire pour mieux cerner son évolution.

Globalement, on peut affirmer que le système sol – taillis à très courte rotation peut être un système efficace de traitement tertiaire des eaux usées s'il est bien dimensionné et géré au niveau de la qualité de l'eau d'irrigation et du système d'irrigation.

On peut certainement trouver des cas d'application concrets en Wallonie pour ce genre de technique notamment lorsque le milieu récepteur de l'effluent pose problème (infiltration polluante dans le sol, eutrophisation intense).

1. Introduction

Le projet BIOMEPUR s'étalait sur une durée de 3 ans (19/03/1999 – 18/03/2002) et avait comme objectif de tester l'épuration biologique tertiaire des eaux usées par irrigation sur filtre végétal de TtCR.

Ce rapport final est constitué d'abord d'un résumé succinct du projet dans son entièreté. Une deuxième partie est consacrée à une étude bibliographique qui aborde les principaux aspects du filtre végétal de saule. La troisième partie décrit l'expérimentation de Sart Bernard et les résultats sont discutés dans le détails. Les annexes présentes l'entièreté des résultats de l'année 2001, les résultats de 1999 à 2000 ayant été intégrés dans les rapports intermédiaires du projet.

2. Le filtre végétal

2.1. Description

2.1.1. Le concept

Un système sol-plante peut être défini comme un réacteur bio-chimi-physique où les principaux processus actifs sont les suivants (Hasselgren, inc.) :

- . *Les particules du sol* filtrent les solides en suspension et fixent les éléments en solution dans l'eau usée par adsorption, échange d'ions ou précipitation.
- . *Les macro- et les micro-organismes* transforment et stabilisent les matières organiques et transforment l'azote.
- . *Le saule*, plante à croissance très rapide et à besoins élevés en eau, utilise ces éléments pour sa croissance, maintient ou augmente la capacité d'infiltration du sol et réduit le volume d'eau usée par évapotranspiration.

Les principaux avantages du saule pour un tel système sont les suivants :

- . L'absorption des éléments nutritifs est efficace.
- . La période de croissance est relativement longue (dès que la température moyenne journalière dépasse 5°C).
- . L'évapotranspiration du saule est plus élevée que l'évapotranspiration potentielle d'un couvert de ray-grass (ETP de référence de Penman). De grands volumes d'eau peuvent ainsi être traités ; jusqu'à 200 m³/ha par jour en plein été, 60 m³/ha par jour en moyenne sur la période de croissance (Hasselgren K., 1998) qui est d'environ 6 mois en Suède, et plus longue en Belgique.
- . Le retour de l'eau vers la nappe phréatique perturbe moins le cycle naturel de l'eau que le traitement traditionnel avec évacuation vers les eaux de surface. Le système participe donc à limiter l'eutrophisation des eaux de surface.
- . Le risque d'accumulation de sels, métaux lourds et autres composés dans le sol est réduit vu que le contenu en ces composés est normalement faible dans les eaux usées. Le saule s'avère d'ailleurs également intéressant car certains clones ont la capacité spécifique d'absorber certains métaux lourds.
- . Les fluctuations de flux et de concentration des polluants peuvent être facilement gérées car le processus de purification naturelle est stable et plutôt insensible aux fluctuations en comparaison des systèmes biologiques traditionnels.
- . L'équipement technique est simple et demande peu de supervision. L'irrigation peut être entièrement automatisée et ne demande qu'une relativement faible consommation énergétique.
- . Les minéraux apportés par l'eau usée remplacent éventuellement des fertilisants chimiques.
- . On combine l'épuration des eaux avec une productivité en biomasse plus élevée grâce à l'irrigation, le saule étant une plante hygrophile. Dans certains cas favorables, on peut obtenir des rendements en biomasse 2 à 3 fois plus élevés dans les parcelles irriguées que dans les parcelles non-irriguées (Perttu et Kowalik, 1997).
- . Grâce au remplacement des fertilisants et une productivité plus élevée, on améliore le bilan énergétique (rapport entre l'énergie renouvelable produite et l'énergie fossile utilisée)

- . Le saule étant une culture non-alimentaire, il n'y a pas de risque de contaminer la chaîne alimentaire humaine ou animale.
- . La biomasse ainsi produite est une source d'énergie renouvelable qui permet de diminuer les émissions de CO₂ dans l'atmosphère d'environ 20 tonnes par hectare et par an.

2.1.2. L'évapotranspiration et réserve du sol

L'énergie solaire est à l'origine d'une demande climatique potentielle en eau ou évapotranspiration potentielle (ETP en mm/jour) ou évapotranspiration de référence (ET0) pour un gazon ras bien alimenté en eau. La formule de Penman au pas de temps décadaire est reconnue comme la mieux adaptée et celle de Penman-Monteith pour un pas de temps journalier. En été, l'ETP moyenne est de l'ordre de 4 mm/jour sur la majeure partie de la France. Au pas de temps journalier, des valeurs extrêmes de 10 mm ont été calculées (sécheresse de 1976) mais on touche la limite du débit des racines (9 mm/jour mesuré) (Tiercelin, 1998).

Pour une culture donnée et dans des conditions climatiques données, en absence de facteurs limitant, on observe une évapotranspiration maximale (ETM).

Pour des périodes données, on a $ETM = K_c \times ETP$ avec K_c = coefficient cultural (car l'échange avec l'atmosphère dépend par exemple de la hauteur du couvert, de la surface foliaire, ...). K_c varie dans la saison, en étant maximum lors du développement foliaire maximum. Il est également possible de décomposer l'effet de la plante (appelé coefficient cultural de base) et du sol. Cette dernière approche est meilleure lorsque l'irrigation doit dépendre du profil d'humidité du sol et de la percolation.

En cas de stress hydrique, l'évapotranspiration réelle est inférieure (ETR). En cas d'irrigation importante, cela ne sera donc pas le cas.

Entre la capacité au champ (CC) qui varie de 10-15% en sols sableux à 25-35% en sol fins et le point de flétrissement (PF) qui varie de 4-5% en sols sableux à 15-20% en sols fins, on a la réserve utile (RU) qui se situe souvent entre 1 et 2 mm/cm de sol.

L'équation générale du bilan hydrique est : $P + I = ET + Dr + Ruis + var. S$

avec P = pluie

I = irrigation

ET = évapotranspiration

Dr = drainage

Ruis = ruissellement

var. S = variation de stock.

Différentes méthodes existent pour définir le moment et la dose d'irrigation à apporter. On peut se baser sur une estimation du bilan hydrique du sol pour calculer l'ETR, tenant en compte la réserve utile du sol. L'irrigation sera $ETM - ETR$. L'ETP peut se calculer à partir des données d'une station météo proche mais il est recommandé de mesurer les précipitations localement pour prendre en compte les averses locales.

La mesure de la teneur en eau du sol (par méthode capacitive, réflectométrie temporelle (TDR) ou neutronique) permet de déterminer les réserves du sol en début de saison. Un

autre type de mesure est celui de l'état énergétique de l'eau, caractérisé par une énergie de position (selon hauteur, 0 à la surface du sol) et une énergie de pression (pression de 0 à la surface d'un réservoir d'eau libre). Cette dernière est négative en milieu non saturé et positive en milieu saturé. C'est pourquoi on a introduit la notion de Succion, terme positif ($Succion = \psi = -h \cdot \rho \cdot g$ avec h = hauteur capillaire, ρ = masse volumique de l'eau, g = accélération de la pesanteur). La charge hydraulique totale est la somme des deux pressions ($Charge\ hydraulique = H = h + z$ avec z = profondeur en cm).

Un tensiomètre peut donc mesurer la succion et son évolution permettra de piloter une irrigation. Exemple: arrosage lorsque la succion est de 80 kPa (ou 8 m de colonne d'eau). Un tensiomètre peut également mesurer la charge hydraulique (en changeant l'étalonnage). Dans ce cas, deux tensiomètres à des profondeurs différentes pourront donner le sens d'écoulement de l'eau qui ira toujours vers une énergie décroissante (par exemple depuis - 2 m d'eau vers - 4 m d'eau). Cela permet donc de déterminer si il y a des pertes par drainage.

Un logiciel a été développé au Canada pour calculer l'ETP (selon radiation, température, humidité relative, vitesse du vent, pluviosité) toutes les 10 minutes. La quantité irriguée dépend de la texture du sol. L'humidité du sol est aussi contrôlée toutes les heures et le flux d'eau au travers de la zone racinaire est calculé. L'irrigation peut ainsi être arrêtée, ou retardée d'un cycle d'irrigation jusqu'à ce que le flux soit de zéro (Papadopol, 2001).

2.1.3. Le sol

Les caractéristiques du sol sont importantes quant à sa capacité d'infiltration. Celle ci dépend de la porosité (% de vide par rapport au volume total de sol), de la perméabilité (dépend de la distribution et de la taille des pores), de la structure (regroupement en agrégats et fentes qui augmentent la perméabilité), de l'état de saturation.

Dans le cas d'eau usée, il faut de plus tenir compte du colmatage du aux matières en suspension, soit par des dépôts de sulfures provenant de la réduction de sulfates par des bactéries anaérobies, soit enfin par des matières gélatineuses, telles des polysaccharides, sécrétés par certains micro-organismes (Debbaut, 1992). On peut par exemple faire une corrélation entre le temps d'infiltration et la DBO5, ce qui implique que le débit doive diminuer et le temps d'irrigation augmenter si la charge augmente (Tiercelin, 1998). Dans le cas d'une recharge de nappe, Rice (1974) arrive à la conclusion que le colmatage peut être évité si les MES restent en dessous de 10 mg/l.

Dans un sol saturé, l'écoulement est décrit par la loi de Darcy, qui utilise le coefficient de perméabilité K (mm/h) et le gradient de la charge hydraulique. En zone non saturée, ce coefficient de perméabilité $K(\psi)$ est remplacé par la conductivité hydraulique qui varie avec la tension (à tension nulle, en sol saturé, $K(\psi) = K$). En pratique, la détermination d'une courbe de relation entre la conductivité et la tension implique des mesures délicates et coûteuses. L'approche est souvent basée sur les caractéristiques de structure, granulométrie et hydromorphie du sol, ainsi que sur un test de perméabilité.

Les sols sablonneux ont une plus grande proportion de grands pores et une conductivité plus grande à saturation. Toutefois, pour une faible teneur en eau, le sol argileux comporte plus de pores pleins qui conduisent l'eau et une conductivité qui peut être plus grande.

En pratique, le colmatage de surface représente une couche à faible conductivité où le milieu est saturé et qui ne laisse passer qu'un débit limité, laissant les terrains sous-jacents non saturés.

2.1.4. Les matières organiques

Les micro-organismes (MO) du sol dégradent la matière organique. En sol non saturé la dégradation est rapide et complète, formant CO_2 et H_2O . S'il reste de la MO et que tout l'oxygène a été utilisé, c'est l'oxydant le plus fort, le nitrate, qui servira d'accepteurs d'électrons, ensuite c'est le MnO_2 qui devient Mn^{++} et le Fe^{3+} qui devient Fe^{++} . Ensuite, on a des fermentations et des réductions de sulfates. S'il reste encore de la MO, il peut y avoir fermentation méthanigère avec dégagement de méthane.

2.1.5. L'azote

L'azote organique peut subir une minéralisation qui produit du NH_4^+ (ammonification). L'azote ammoniacal est fortement retenu sur le complexe d'échange du sol et risque moins d'être lessivé.

En condition aérobie et à un pH élevé (aussi pour neutraliser l'acidité produite), l'ion NH_4^+ subit la nitrification par les bactéries nitrifiantes Nitrosomonas et Nitrobacter.

L'azote nitrique peut être utilisé pour oxyder la matière organique si tout l'oxygène est absent ou déjà consommé, c'est la dénitrification, libérant N_2 et N_2O . La dénitrification est donc favorisée par l'alternance de conditions anaérobies – aérobie, ou autrement dit irrigation – non irrigation.

L'application fractionnée d'azote diminue le risque de lessivage car l'azote résiduel dans le sol est constamment plus faible et peut être puisé par les plantes dans une certaine mesure. Or la fertigation par goutte à goutte est une méthode optimale pour apporter de l'azote de manière étalée.

2.1.6. Le phosphore

Le P des eaux usées est principalement sous forme organique et subit une minéralisation pour se transformer en phosphates.

Le PO_4^{3-} est très bien retenu dans le sol où il forme des composés peu solubles avec le fer sous forme Fe^{3+} , l'aluminium et le calcium (complexe d'échange avec l'argile). Toutefois, si les conditions sont anaérobies, le fer précipite plutôt avec le soufre et le phosphore reste libre dans le sol. Si le sol est alcalin la fixation du P par le Fe et l'Al est également moins importante.

2.1.7. Les autres éléments

Le Fe^{3+} est un élément particulièrement important pour la stabilité structurale (complexe argilo-humique) et la fixation d'anions tel que le PO_4^{3-} . Le Fe^{++} est par contre soluble et n'a

pas ces propriétés. Il se forme en milieu réducteur par manque d'oxygène (réduction par acceptation d'un électrons).

2.1.8. Les germes

Les germes sont normalement immobilisés dans le sol. Toutefois, cette rétention ne fonctionne pas bien dans les sols saturés avec de l'eau en mouvement ou si le terrain présente des fissures dans lesquelles l'eau s'écoule à vitesse élevée. Dans le cas d'une couche colmatée de quelques cm surplombant une zone non saturée de 1 à 1,5 m, la rétention des germes est à priori efficace.

La survie des germes dans le sol dépend de nombreux facteurs tels que l'humidité, le pH, la teneur en matière organique et la température. Les durées de vie observées vont de 8 – 12 jours à 6 ans (œuf d'*Ascaris*) (Debbaut, 1992).

Dans le cas d'une irrigation par aspersion, les germes peuvent être présents dans les aérosols et survivent plus ou moins longtemps en fonction de l'insolation, la température, l'humidité relative, la stabilité des conditions atmosphériques, la vitesse et la constance du vent (Tiercelin, 1998).

Pour éliminer ces pathogènes, il est possible de prévoir des bassins de stabilisation dans lesquels l'eau reste un certain temps (c'est le cas à Enköping en Suède).

Le TtCR n'est certainement pas une culture "à risque" puisqu'elle a une utilisation essentiellement non alimentaire et ne nécessite que très peu d'opérations manuelles. Lors des entretiens éventuellement manuels des abords, il serait possible de sensibiliser les opérateurs et prendre les précautions élémentaires.

2.1.9. L'irrigation

Le mode d'irrigation a toute son importance car il influencera par exemple le degré de saturation du sol. On pourra être en condition saturante, saturation intermittente, ou non saturante. L'état chimique des éléments dans le sol en dépend, avec une efficacité plus ou moins grande de l'épuration.

Il existe beaucoup de méthodes d'irrigation différentes, que l'on peut subdiviser comme suit (Tiercelin, 1998) :

- en irrigation gravitaire ou irrigation de surface
 - . arrosage à la planche
 - . arrosage par rigole de niveau
 - . arrosage par rigole en pente ou rases
 - . arrosage par plans inclinés
 - . arrosage par ados
- irrigation sous pression
 - . irrigation par aspersion (simple, machines d'irrigation)
 - . irrigation localisée (ou micro-irrigation ou irrigation goutte à goutte).
- irrigation de sub-surface

Chacune de ces méthodes possède des avantages et inconvénients. L'irrigation gravitaire n'est pas régulière dans le temps (on irrigue de grandes quantités avec des délais

importants entre irrigations, ce qui ne convient pas du tout à un filtre végétal – voir ci-dessous) et augmente en plus le risque de surdosage local et donc de lessivage en profondeur. L'irrigation par aspersion présente un risque de dispersion d'aérosols potentiellement nocifs s'il s'agit d'eau usée. La micro-irrigation nécessite une filtration poussée de l'eau afin d'éviter l'obstruction des goutteurs. C'est pourtant cette technique qui est le plus souvent retenue pour l'irrigation d'eau usée en Suède et en France notamment.

Même après filtration, il peut y avoir obstruction des goutteurs par sédimentation et agrégation des particules, précipitation de sels dissous (avec Ca, Fe, Mg, Mn surtout si la pH ou la température augmentent. Des bactéries également provoquent la précipitation de fer ferrique et sulfures) ou par développement de gels bactériens provoquant l'accumulation de particules minérales (surtout si l'eau contient du fer et des sulfures) ou de floculation d'algues. Une classification des eaux a été effectuée en fonction de ce risque d'obstruction (tableau 1.1.). En pratique, on ajoute parfois de l'acide pour diminuer le pH ou du chlore (en continu ou à la fin d'une irrigation).

Tableau 1.1 : Classification des eaux en fonction du risque d'obstruction des goutteurs (en mg/l) (Tiercelin, 1998)

Causes	Risques d'obstruction		
	faible	moyen	fort
<u>Physique</u>			
Matières en suspension	< 50	50 – 100	> 100
<u>Chimique</u>			
pH	< 7	7 – 8	8
Sels totaux dissous	< 500	500 - 2000	2000
Calcium	< 10	10 – 50	> 50
Carbonates	< 100	100 - 200	> 200
Manganèse	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Fer	< 0,1	0,1 – 0,5	0,1 - 1
<u>Biologiques</u>			
Bactéries/ml	< 10 000	10 – 50 000	> 50 000

2.1.10. Gestion du système

L'épuration par le système sol – plante est un processus compliqué. Le succès de l'épuration dépend de la manière dont le système est géré. On peut en effet combiner différentes techniques qui n'auront pas le même résultat (Thienpont, 2002).

On peut d'abord envisager une épuration de différents types d'eaux usées :

- Eau brute : elle contient beaucoup de matières organiques. L'azote se trouve sous forme organique et ammoniacale.

- Eau épurée non nitrifiée (après épuration primaire de décantation et dessablage) : la matière organique est fortement dégradée mais l'azote est toujours organique ou ammoniacal.
- Eau épurée nitrifiée : une oxygénation dégrade la matière organique et transforme l'azote en nitrates.

Ces eaux usées peuvent ensuite être combinées avec des régimes d'irrigation différents :

Eau brute :

- Irrigation saturante : en quantité trop importante, la matière organique bouche les pores du sol. La MO se dégrade lentement par manque d'oxygène et nitrates. L'azote ammoniacal et organique s'accumule dans le milieu. Le fer à l'état II ne peut retenir le phosphore ou complexer les argiles et l'humus. L'écoulement empêche la rétention des germes dont une partie toutefois sera inactivée.
- Irrigation intermittente : une partie de la MO est dégradée. L'azote est en partie nitrifié et dénitrifié ensuite avec la présence de MO. Les variations de flux défavorisent l'adsorption des germes.
- Non saturant : la MO est bien dégradée et il y a nitrification. Les nitrates percolent si ils ne sont pas puisés par les plantes. Les phosphates sont bien fixés par le fer III qui stabilise également la structure du sol. Les germes sont fixés sur le sol par filtration mécanique et adsorption.

Eau épurée non nitrifiée :

- Irrigation saturante : la MO résiduelle reste sous cette forme. La dénitrification est impossible faute de nitrates. Le fer est à l'état II (ci-dessus).
- Irrigation intermittente : la MO restante va être dégradée et l'azote nitrifié. Cependant la dénitrification ne sera pas très importante du fait de la faible quantité de MO et il y a un risque de percolation. Les phosphates sont plus ou moins bien retenus.
- Non saturant : la MO est rapidement dégradée. L'azote est nitrifié et percole.

Eau épurée nitrifiée :

- Irrigation saturante : la dénitrification est réduite à cause de la très faible quantité de matière organique. Les nitrates percolent.
- Irrigation intermittente : la matière organique restante est dégradée et tout l'azote se retrouve en nitrates.
- Non saturant : La MO est dégradée et les nitrates percolent. Les phosphates par contre sont bien retenus par le fer.

On ne voit aucune situation n'est idéale mais l'irrigation intermittente présente le moins de risque car l'azote peut en même temps être nitrifié et dénitrifié (et donc enlevé du système si sa quantité est trop importante et ne peut être puisée entièrement par les plantes). Le phosphore sera également mieux retenu que dans un milieu complètement saturé. Il faut noter que le P n'a que deux solutions pour être éliminé, le lessivage ou l'absorption par les saules et peut donc devenir rapidement un élément limitant du système (et nécessiter un prétraitement éventuel avant irrigation). La MO peut également être dégradée si elle n'est pas en quantité trop importante. Les germes toutefois seront assez peu retenus (importance du régime d'irrigation et du sol).

La qualité de l'eau est également primordiale. Elle ne doit pas contenir trop de MO qui colmaterait le sol mais être quand même présente pour assurer une dénitrification. Le type

et le fonctionnement de la station d'épuration doivent donc tenir compte de l'épuration subséquente par les saules. On peut aussi imaginer de mélanger des eaux nitrifiées et brutes.

Il faut noter que la législation impose des concentrations maximales en matière organique (DBO max. et MES max.), ce qui revient à exiger la minéralisation de cette matière organique. Or pour un procédé d'épuration par le système taillis - sol, ce sont justement les minéraux qui présentent une nuisance potentielle avec le risque de lessivage.

2.2. Expériences à l'étranger

Les principales expériences à l'étranger dans le domaine de l'épuration des eaux par le TtCR sont menées en Suède, en Pologne, au Royaume-Uni, en France, au Danemark, aux Etats-Unis et en Nouvelle-Zélande.

2.2.1. Suède

En suède, environ 15000 ha de taillis de saules ont été plantés dans un but de production d'énergie renouvelable, dont une partie pour l'épuration de 5 villes et 30 décharges (épuration des lyxiviats) (communication orale Stig Larsson, Svalöf Weibull). Quelques projets d'épuration font références :

a. Kageröd

Les caractéristiques du projet sont les suivantes (Hasselgren, 1998) :

- . Date de la plantation : 1995
- . Surface : 15 ha, irrigation avec des eaux usées sur 13 ha
- . Eaux provenant d'une station de 1500 EH et d'une usine de lait en poudre de 6 à 7000 EH (environ 150 000 m³).
- . Plantation de trois clones Rapp, Orm et Ulv, à une densité de 17 000 plants/ha.
- . Les eaux résiduelles de la station sont appliquées à des doses de 2, 4, 6, 8, 10, 12 mm par jour avec des jets sprinkler, et ceci à partir de la deuxième année après plantation (en 1992). La charge en N-P-K est de 14-1,6-12 mg/l
- . Période d'irrigation : mai à octobre.
- . Des analyses chimiques de l'eau usée, de l'eau du sol, du sol et de la plante sont effectuées pour les éléments N, P et K, DBO et certains métaux lourds (Cu, Zn, Cd, et Pb).

D'après leurs résultats, la "ration" N-P-K apportée par les effluents secondaires est en moyenne de 100-12-87, ce qui correspond relativement bien aux besoins du saule dont le rapport N-P-K dans le bois est de 100-13-65. L'optimum de croissance du saule a été atteint avec une dose d'irrigation de 6 mm/j, produisant 8 à 13 tonnes de matière sèche par hectare et par an, ce qui correspond à environ 3 fois la productivité d'une parcelle non irriguée dans cette région. Sous ces conditions, il s'avère qu'après passage dans la couche racinaire, la concentration en azote dans les eaux est plus basse que celle que l'on retrouve après un traitement tertiaire conventionnel. Il en serait de même pour le phosphore. Actuellement, une surface de TtCR de 52 ha suffirait pour épurer l'eau de toute la station (1500 EH) durant un an. Ces calculs se basent sur une dose d'irrigation de 1,7mm/jour.ha.

Mais selon Hasselgren (1998), on peut épandre sur le saule une quantité d'eau deux fois supérieure à celle évapotranspirée par ce dernier, à savoir un débit de 6mm/j.ha ce qui diviserait la surface irriguée par un peu plus de 4.

L'inconvénient d'un tel système est qu'il faudrait pouvoir stocker les effluents secondaires en hiver et les épandre au printemps en période de croissance.

D'après Börjesson (1999), 75 à 95 % de l'azote et du phosphore des eaux usées peuvent être exportés par les cultures énergétiques, quand l'irrigation d'eaux usées est de 500 à 1000 mm/an/ha. Une augmentation de la dose d'irrigation jusqu'à 2000 à 5000 mm/an/ha diminuera l'efficacité du traitement de 10 à 55 %. Il a estimé qu'une charge d'eaux usées de 600 mm/an/ha, contenant 125 kg d'azote, ne causera pas de problème à long terme (comme le lessivage des nitrates par exemple) sur l'environnement. Cette quantité d'eaux usées non seulement fournira l'azote et autres macro nutriments nécessaires, mais aussi satisfera la demande en eau, qui est souvent le facteur limitant de la croissance. L'élimination de l'azote dans un filtre végétal est également due, dans une certaine mesure, à la dénitrification.

Le contenu en éléments nutritifs des eaux usées correspond en général relativement bien à la demande en nutriments d'une culture énergétique. L'irrigation avec des eaux usées peut augmenter le rendement en biomasse significativement par rapport à une plantation sans apport de fertilisants. En comparaison avec une culture et des pratiques de fertilisation conventionnelles, le rendement en biomasse est augmenté, en moyenne, de 50 %.

La combinaison du traitement des eaux usées dans un filtre végétal en été avec un traitement conventionnel du phosphore en hiver, présente la plus grande efficacité au niveau du coût étant donné qu'on évite l'investissement en bassin de stockage pour l'hiver. Le traitement de l'azote sera alors réalisé uniquement en été, mais c'est pendant cette saison que l'écosystème aquatique récepteur est le plus vulnérable à l'eutrophisation. En Suède, avec cette combinaison de traitements, les eaux usées de 60 habitants peuvent être traitées sur un hectare de cultures énergétiques (Börjesson, 1999).

b. Bogesund

Pour sa propriété de filtre végétal, le saule peut non seulement servir à traiter les eaux usées, mais également à valoriser les boues d'épuration et les sols contaminés (Perttu et Kowalik, 1997).

- Irrigation avec des effluents secondaires.

Caractéristiques de l'essai :

- . Durée de l'irrigation : 1992-1994.
- . Planté en 1982, aucun traitement jusqu'en 1992.
- . Recépage des saules en 1992.
- . 4 parcelles de 20x15 m²;
- . 2 parcelles irriguées avec des effluents secondaires;
- . Irrigation : 3 fois par an, par irrigation gravitaire.
- . Quantités de N-P-K-Ca-Mg apportées: 250 - 25 - 90 - 35 - 5 kg/ha.an.

Dans cet essai, durant la période sèche et de forte croissance, les saules irrigués ont montré une évapotranspiration 2 à 3 fois supérieure aux précipitations. Selon les auteurs, l'application de l'eau ajoutée à l'effet fertilisant des éléments nutritifs contenus dans les eaux a presque doublé la production.

Les besoins du saule en N-P-K-Mg-Ca-S sont en valeur relative de 100-14-72-8,5-7-9 et le ratio N-P-K dans les effluents secondaires domestiques est de 100-18-64.

Un risque peut apparaître lorsque les eaux domestiques sont mélangées avec des eaux industrielles qui contiennent souvent des métaux lourds.

- Epanchage de boues d'épuration

Dans les boues la concentration en azote est beaucoup moins élevée et le ratio N-P-K est de 100-73-9, ce qui n'est pas adéquat pour la nutrition du saule.

Un saule requiert entre 80 et 100 kg d'azote par hectare. Selon les auteurs, bien que les boues d'épuration ne soient pas en équilibre avec les besoins du saule, elles peuvent être épandues sur le champ mais la productivité sera moindre. Il faudrait raccourcir la rotation à 2 ans et deux épandages pourraient être réalisés : durant le premier printemps juste après la coupe et au début du second printemps. Il serait alors possible d'épandre 2,5 à 3 tonnes (matière sèche) par hectare et par an.

- Plantation sur sols contaminés

Certains clones de saule ont la capacité d'absorber préférentiellement certains métaux lourds, comme le zinc et le cadmium, qui se retrouvent alors dans le bois. Lors de sa combustion, la plupart du Cd se retrouve dans les cendres volantes, qui peuvent être traitées séparément. 20 g de Cd peuvent être enlevés par 10 à 12 tonnes de matières sèches/ha.an.

c. Enköping

Enköping est une ville de 20 000 habitants qui possède une station d'épuration des eaux usées qui utilise le TtCR en traitement tertiaire. 200 000 m³ d'eau sont ainsi irrigués sur 80 ha de TtCR plantés en 2000. Cette épuration supplémentaire permet de réduire de 50 % la pollution du lac Mälaren et de la mer baltique.

La centrale de cogénération de Enköping qui est équipée d'un réseau de chaleur urbain et qui fonctionnait auparavant au charbon s'est convertie maintenant entièrement au bois. Le saule est intégré dans le mélange de combustibles (3000 m³ par jour en hiver). Les cendres de la centrale sont mélangées aux boues de la station d'épuration pour mieux équilibrer les minéraux et sont épandues sur les taillis afin de recycler ces minéraux (en Suède l'épandage de boues en agriculture est très peu apprécié mais le taillis est une culture non alimentaire et pose donc moins de problèmes éthiques).

L'agriculteur qui gère les 80 ha de saule (soit 50 % de ses terres) est très satisfait de la rentabilité du projet. Il bénéficie de contrats, d'une part avec la commune qui a financé le système d'irrigation, et d'autre part avec la centrale de cogénération pour la fourniture du bois.

L'opération est également très rentable pour la commune qui a fait une économie de plus d'un million d'EUR sur son investissement dans l'épuration.

d. Projet européen BWCW

Un projet européen dans le programme FAIR est en cours (1998 – 2002), avec 6 partenaires (France (Leroux), Suède (2), Irlande, Danemark et Grèce) et dont la coordination est assurée par Swalof Weibull en Suède (Larsson, 2000). Des essais ont été implantés dans chaque pays pour tester l'épuration d'eau usée urbaine sur des taillis.

La variété Jorr fut plantée dans tous les essais pour sa résistance aux conditions humides.

Le rapport final n'est pas encore disponible.

2.2.2. Pologne

En Pologne, des recherches sur l'utilisation du saule comme filtre biologique ont été entreprises depuis les années soixante.

a. Worclaw

Caractéristiques (Perttu and Kowalik, 1997) :

- . Plantation en 1960.
- . Essais de coupe tous les 1 ou 2 ans.
- . Surface : 0,32 ha
- . Sol : limoneux sur 70 cm
- . Récolte des percolats : système de drainage à une profondeur de 1 m 20 et espacés de 14 m. L'eau drainée est récoltée et analysée.
- . Irrigation gravitaire par canaux espacés de 1 m 80.
- . Plantation des saules en simples rangs tous les 60 cm et espacés sur la ligne de 20 cm (80 000 plants/ha).
- . Traitements :
 - a) 100 mm 2 fois par semaine ce qui correspond à 4000 mm par an et donc 2100 kg N/ha.an et 430 kg de P₂O₅/ha.an.
 - b) 100 mm par semaine ce qui donne 2000mm/an et 1050 kg N/ha.an et 215 kg P₂O₅/ha.an.
- . Rendement : 2,5 à 7,2 tms/ha.an.
- . Récolte des percolats 2 fois par mois de mai à septembre.
- . Concentration des effluents: 32 mg/l d'N, 6 mg/l de P.

Les besoins du saule sont de 75 à 100 kg d'N/ha/an, 10 à 15 kg de P/ha/an et 55 à 80 kg de K/ha/an. Ils suggèrent donc de diviser par deux la quantité d'eau irriguée (50 mm/semaine).

Ce filtre végétal a permis de diminuer la DBO de 88% et de réduire les nutriments N, P et K de respectivement 41,3%, 42,9% et 2,3%. En conclusion, il s'est avéré que l'effet épurateur était principalement dû à l'activité du biofilm développé sur la surface des particules solides.

2.2.3. Angleterre

Des essais ont été effectués sur des jeunes plants de saule en culture hydroponique.

a. Avec des lixiviats de décharge

Les lixiviats ont été utilisés purs et à différentes dilutions : 50%, 25 % et 12,5% (Alker, Riddell-Black *et al*, 1998). Les dilutions supérieures à 25 % se sont révélées phytotoxiques en culture hydroponique alors que dans les cultures en lysimètre avec sol, les lixiviats purs ne l'étaient pas.

La concentration en N dans les lixiviats dilués a diminué de 32% en 7 jours.

14 à 24% de l'azote minéral des lixiviats dilués ont été exportés par l'absorption de la plante et une autre part a été volatilisée, mais la quantification est difficile vu la présence d'azote organique dans les lixiviats.

b. avec une solution nutritive.

Des mesures de croissance et d'absorption d'azote ainsi que la comparaison entre différentes variétés a été réalisée. La solution nutritive était apportée une fois toutes les deux semaines (Alker, Riddell-Black and Smith, 1997) : concentrations en azote de 113 mg/l sous forme de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et en phosphore de 41 mg/l sous forme de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

La fertilisation azotée et phosphorée a augmenté le rendement des saules, l'augmentation étant fonction de l'espèce. Les meilleurs rendements ont été obtenus par les *Salix viminalis* et *Salix viminalis x triandra*. La quantité d'azote dans les tiges était significativement supérieure à celle de tiges non traitées.

2.2.4. France

L'utilisation du taillis en tant que filtre végétal était développé par l'Association pour le Développement des Cultures Energétiques (ADCE). Cette association a ensuite donné naissance à une société privée, BIONIS Environnement, qui commercialise essentiellement des systèmes de ce type en agriculture et dans les industries agro-alimentaires.

a. Orchies

La société Leroux située à Orchies (Nord Pas de Calais) traite ses effluents par épandage sur des saules. Un système d'irrigation goutte à goutte a été installé sur 10 ha de TtCR afin de traiter 30 à 50 000 m³/ha.an d'effluents, soit une quantité de 500 mm d'eau par an. L'investissement total (achat du terrain compris) s'élève à 5 millions FF, ce qui est comparable à l'investissement qu'ils auraient du réaliser pour s'équiper d'une petite station, mais le coût de fonctionnement dans le cas du traitement avec les saules est moindre. La biomasse produite est offerte à une association d'accueil de handicapés pour alimenter une chaufferie à bois.

b. Villeneuve d'Ascq

Un essai a été mené par l'ADCE dans le cadre d'un projet européen LIFE (LIFE 97ENV/F/182) près de la station d'épuration de Villeneuve d'Ascq (170 000 EH) de la Communauté urbaine de Lille.

Caractéristiques de l'essai :

- . 3 parcelles de 8800 m², 8100 m² et 7200 m² ainsi que 6 parcelles de 200 m².
- . 3 variétés : Bjorn, Loden et Jorr.
- . 3 systèmes d'irrigation : par sprinkler et en goutte à goutte à deux espacements différents.
- . Date de plantation : mars 1997.
- . Début de l'irrigation en 1998.

Les résultats se sont avérés très concluants pour l'azote, le phosphore et la productivité des saules. Le rapport final date du 31 mars 2001 (ADCE, 2001)

c. Killem

A Killem près de Dunkerque, JB Ronckier, un producteur et transformateur laitier devait se mettre aux normes européennes en matière de pollution d'origine animale et a investi dans un système d'irrigation sur taillis. Les jus de lisier et de ruissellement des étables (65 vaches) ainsi que les eaux de laiterie et de process représentent environ 10 m³/jour et auraient pu être stockées dans une fosse de 1 200 m³ représentant 6 mois de stockage pour être épandues sur les champs, mais avec un risque de pollution bactériologique de la chaîne alimentaire. La solution du taillis fut plutôt choisie.

2,3 ha de taillis furent plantés avec une irrigation souterraine pour un investissement total de 61 000 EUR (Gabant, 2001). Un herbicide (Treflan) est injecté pour éviter le bouchage des goutteurs. Le système doit traiter 3600 m³/an.

BIONIS Environnement vante des systèmes 3 fois moins cher que des stations d'épuration et quasiment sans frais d'entretien.

d. Bretagne

J Savel est un agriculteur breton qui a planté 1 ha de saule en 2001 pour l'épuration des eaux blanches, en collaboration avec l'agence AILE.

2.2.5. Danemark

Au Danemark (Nielsen, 1994), dans le Jutland, 6000 m³ d'effluents secondaires sont épandus chaque année sur 1,5 ha de saules en sol sableux, soient 400 mm/ha.an.

Selon Nielsen, il serait possible d'exporter au maximum 80 kg d'azote par ha et par an. Mais il faut toutefois faire très attention aux autres facteurs tels que le contenu du sol en azote au départ, les dépôts atmosphériques et la dénitrification. Le plus gros problème mis à part les métaux lourds et les produits carbonés toxiques est la percolation de l'azote sous forme de nitrates. Le saule aurait une capacité particulière à absorber le cadmium et le zinc.

L'auteur attire l'attention sur le cycle global de l'azote. Durant la combustion, la majeure partie de l'azote est convertie en diazote (N₂) et une petite partie de l'azote (4 à 20%) est transformée en oxyde d'azote (N_xO_x) qui retournera tôt ou tard sur les régions avoisinantes sous forme d'acide nitrique (HNO₃). La plupart des autres nutriments se retrouvent dans les cendres. Les métaux lourds se retrouvent également dans les cendres

excepté le mercure qui est toujours perdu sous forme gazeuse. Certaines précautions doivent être prises pour le cadmium, mais s'il est bien traité, il précipitera dans les cendres volantes.

2.2.6. Nouvelle Zélande

Des essais sont réalisés en plein champ et en lysimètres (Riddel-Black, Sims *et al*, 1994).

- Irrigation avec des effluents d'industrie agro-alimentaire

Etablissement d'une plantation de 100 ha d'eucalyptus pour épurer les effluents provenant d'un abattoir (4000 m³ d'effluents par jour). Le système d'irrigation est un système gravitaire, à la raie. La densité est de 4000 plantes par hectare et la récolte se fait tous les trois ans. Espèces : *Eucalyptus botryoïdes*, *E. ovata*, *E. camaldulensis*, *Acacia dealbata* et *A. melanoxylon*.

Après 4 années d'essais, sur une parcelle de 6 ha, il a été montré que l'eau pouvait y être traitée avec succès.

En 1992, un plan d'irrigation et de plantation de 90 ha supplémentaires a été établi avec une première plantation de 30 ha d'Eucalyptus. La rotation y sera de 3 ans avec une densité de 4000 pl/ha et une irrigation à la raie modifiée.

Les objectifs de la plantation étaient d'abord de créer un système d'épuration efficace et durable, ensuite, de maximiser le potentiel énergétique de la combustion de la biomasse produite afin d'annuler le coût du traitement de l'effluent.

- Essai en lysimètres

Epanchage d'effluents de laiterie sur *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus saligna* et *Salix hinuyanagi* plantés dans des lysimètres d'un mètre de haut et 1,78 m de diamètre.

Les objectifs de l'expérience sont :

- . Mesurer et calculer l'équilibre des nutriments et l'équilibre hydrique des trois espèces énergétiques analysées.
- . Evaluer le taux de transpiration de ces espèces sous irrigation.
- . Surveiller le développement racinaire sous irrigation et les changements dans les prélèvements des minéraux suite à ce développement racinaire.
- . Evaluer les différences entre ces trois espèces quant à leur capacité d'épurer l'effluent.

La densité de plantation est de 5000 pieds/ha. L'effluent a subi préalablement un pré-traitement aérobie et anaérobie limité. L'irrigation est effectuée à raison de 15 mm une fois par semaine par des mini sprinklers.

Des mesures de pertes par transpiration sont effectuées en complément de la mesure du poids des lysimètres. Des bougies en céramique à 10, 20, 30 et 50 cm de profondeur permettent d'analyser la solution du sol.

2.2.7. Etats-Unis

Des essais furent implantés à Tully, état de New-York, pour comparer deux fertilisations (336 – 112 – 224 de N – P – K et non fertilisé) (Hector, 2001). La densité était de 107600 plantes/ha et l'irrigation de 2 – 6 cm par semaine. Dans une deuxième expérience, on compare 2 clones et 3 densités (107600, 36900 et 15000 plantes/ha). La fertilisation fut de 224 – 112 – 224 et l'irrigation maintenue proche de la capacité au champ. Enfin dans une troisième expérience, on compare l'irrigation goutte à goutte à la non irrigation et deux clones.

La productivité dépend du clone, de la fertilisation et de l'irrigation (sauf pour un clone). La densité n'influence pas le rendement.

L'exportation des éléments donnait un ordre constant avec N (18 – 103 kg/ha) > (17-103) Ca > (7 – 44) K > P (1,7 – 12,6) > (1,8 – 6,2) Mg. Il y a un effet du clone et de la fertilisation sur l'exportation de N, P et K mais pas Ca et Mg (car le Ca n'était pas un des fertilisants et était déjà abondant dans le sol). Avec la fertilisation, la concentration augmente, ce qui montre une consommation de luxe pour N et K. Dans les parcelles irriguées, une consommation de luxe de P et K fut également observée. Pour *Salix dasyclados* et pour un rendement de 15 – 22 t/ha, l'exportation était de 75-86 kg/ha N, 10 – 11 kg/ha P, 27 – 32 kg/ha K, 52 – 79 kg/ha Ca et 4 – 5 kg Mg.

L'exportation d'éléments minéraux dépend plus du rendement que de la concentration dans la plante. La densité n'a pas non plus d'effet sur l'exportation, puisqu'elle n'a pas d'effet sur la productivité.

Pour certains clones, les exportations augmentent avec des cycles de récolte plus courts, car le rapport bois/écorce change. Pour les cycles plus longs, on observe une diminution des concentrations en N, P et Mg qui contrecarre l'effet rendement (les exportations sont quasi stables, même si le rendement augmente). Cela n'est pas vrai pour K et Ca dont les concentrations sont plus stables.

2.3. Aspects micro-économiques

2.3.1. Selon les projets FAIR et LIFE (voir ci-dessus)

Une étude économique a été réalisée par l'Université Suédoise des Sciences Agronomiques (Larsson, 2000) ainsi que par l'ADCE (ADCE, 2001).

Deux options peuvent être comparées (Larsson, 2000). 1. "option été" : les eaux sont pompées dans un bassin tampon et directement irriguées sur les taillis pendant les 6 mois de croissance. L'eau usée est traitée conventionnellement pendant l'hiver. 2. "option année" : l'eau est stockée dans des bassins pendant les 6 mois d'hiver.

Le calcul est réalisé sur 10 ha à 1 km de la station sur lesquels on apporte 430 mm d'eau à 35 mg N/l, soit 150 kg N/ha.

Les coûts représentent l'équivalent de 303 BEF/kg d'N ou 41 027 BEF/ha.

Selon Rosenqvist (Larsson, 2000), le traitement tertiaire conventionnel (nitrification/dénitrification forcée) en Suède est de 117 – 384 BEF/kg N, pour tendre vers 8 –12 mg/l après traitement. La plus haute valeur correspond aux investissements et maintenance. Si par contre le traitement secondaire est une boue activée, alors des bassins existants peuvent être partiellement utilisés pour le traitement tertiaire et le coût est alors de 117 – 194 BEF/kg N.

Le coût du traitement du P (produits, énergie, travail, traitement des boues) est de 77 BEF/kg N (coût du P par quantité d'N traitée). La construction d'une étape de précipitation du P résulte en un coût de 77 à 230 BEF/kg N selon les conditions (utilisation de bassins existants ou pas).

Avec ces coûts, Rosenqvist conclut que l'intérêt économique du traitement sur taillis varie de – 512 BEF à + 56 649 BEF/ha et par an.

Pour le cultivateur, le remplacement de la fertilisation par l'irrigation d'eau usée représente un avantage de 4 137 BEF/ha, tenant compte d'un accroissement de productivité de 1,5 t MS/ha.

L'eau provenant du pressage des boues peut également être traitée et éventuellement stockée en hiver dans le bassin tampon, qui aura donc une utilisation optimale tout au long de l'année.

Selon l'ADCE, un système d'irrigation goutte à goutte sur 10 ha comprenant tuyau d'amenée enterré, pompe, filtres, régulation et automatisme revient à 3,5 millions de BEF. Le taillis permettrait une réduction d'investissement dans le traitement tertiaire de 20%. Cette option est la plus intéressante pour les petites stations. D'autre part le coût d'entretien serait plus faible que celui d'une station car les coûts de culture et récolte sont normalement couverts par la valorisation du bois en chaufferies (ADCE, 2001).

2.3.2. Selon l'expérience en Belgique

Il est difficile d'extrapoler les résultats de l'étude exposée ci-dessus car les conditions sont différentes d'un pays à l'autre notamment au niveau de la qualité de l'eau (qui influence de dimensionnement de l'installation).

Il faut effectivement discuter le dimensionnement du système d'épuration tertiaire pour mieux déterminer son coût. Les hypothèses de calcul ont ici un impact considérable car l'état des connaissances en la matière reste incomplet. Jusqu'où peut on aller dans l'intensité de l'épuration tout en gardant un risque acceptable, notamment en ce qui concerne le lessivage ? Aucune réponse précise n'est valable, tout est dans la nuance.

Ainsi, le système peut être limité par :

- La quantité de matière organique et matières en suspension qui risquent de provoquer un mal fonctionnement du système d'irrigation ou de colmater le sol. Le tableau 1.1. donne des chiffres sur le risque d'obturation d'un système goutte à goutte (une filtration est de toute façon nécessaire).
- L'azote : ici également la quantité maximale est impossible à déterminer avec précision puisqu'une partie non négligeable de l'azote est épuré par dénitrification qui dépend elle-même des conditions pédologiques et chimiques (voir plus haut). Dans cet essai, nous avons apporté 125 – 130 kg N total et l'exportation dans le bois était de 90 kg N/ha et par an. L'azote présent dans l'eau du sol était très limité ainsi que l'azote minéral du sol, signe que l'on peut monter plus haut dans la dose. En Irlande, des doses de plus de 300 kg N/ha ont été apportées sans que l'eau du sol de monte trop en concentration (communication orale de M. Dawson).
- Le phosphore : c'est un élément important car il n'est éliminé que par exportation et par lessivage. Or, l'exportation n'a été que d'une quinzaine de kg par ha et par an dans cet essai. Le sol, qui contient quelques centaines de kg de P, et la matière organique (feuille, racine) peuvent également jouer un rôle tampon durant quelques années
- Les autres éléments, y compris les métaux lourds : aucun problème ne se pose pour autant que ces éléments n'influencent par la croissance (toxicité), la structure du sol (capacité d'infiltration,...), l'accumulation dans le sol au dessus des normes (métaux lourds,...), la concentration dans l'eau de percolation (aucune norme n'existe mais il ne faudrait pas contaminer une nappe aquifère,...).

Pour exporter plus d'éléments par hectare, il est possible de récolter pendant la saison de croissance, avec les feuilles. Cela permet d'enlever des quantités supplémentaires de 35 – 125 kg d'N, 4 – 20 kg de P et 25 – 65 kg de K (Jossart, 199, calcul personnel).

Il faut également déterminer la période d'irrigation qui peut être toute l'année (mais alors on augmente le risque de lessivage en hiver) ou uniquement une partie de celle-ci.

En faisant un calcul sur un équivalent habitant (EH) moyen (180 l/jour, 9,9 g N/jour, 2,2 g P/jour), le dimensionnement aboutit à des valeurs de 60 EH/ha (P), 105 EH/ha (N) et 375 EH/ha (eau) pour une irrigation pendant 240 jours par an. Mais ces chiffres peuvent être augmentés car ils sont basés sur une sorte de "maîtrise totale" de ces facteurs par le taillis. Mais on peut admettre que de l'eau puisse passer à travers le système avec une charge acceptable en minéraux dissous.

En pratique, un calcul de dimensionnement doit être réalisé pour chaque STEP car chacune d'elles est différente au niveau de la charge réelle et de la concentration de l'effluent.

En ce qui concerne les coûts d'investissements, une étude a été demandée à la société Barvaux Water Technics à Buzet pour un système d'irrigation sur 12,15 ha. Un autre devis provient la société française Ruckebusch SA spécialisée dans ce domaine (ADCE, 2001). Ces devis sont repris au tableau 1.2.

Tableau 1.2. : Pré-devis pour un système d'irrigation goutte à goutte sur 12,15 ha (Barvaux) et 10 ha (Ruckebusch)

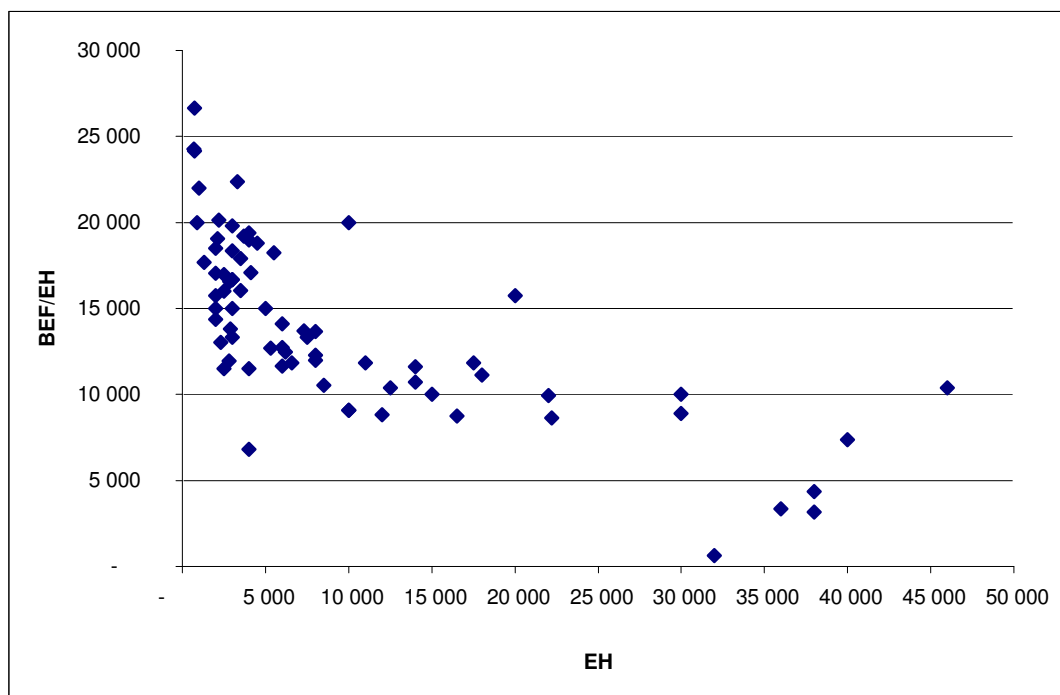
	Barvaux BEF HTVA	Ruckebusch BEF HTVA
Goutte à goutte	1 201 500	662 171
Conduites de base	911 820	279 210
Raccords	703 720	229 388
Filtration	206 945	642 715
Pompage et automate	1 230 000	830 521
Crépine	260 000	-
cablage	250 450	57 687
Montage	compris	814 260
Total	4 764 435	3 515 951

Le coût de la société française est légèrement inférieur ramené par surface unitaire. Si l'on considère qu'un ha peut traiter l'eau de 100 à 200 EH (voir discussion à ce sujet plus haut), on arrive à un prix de 1700 à 4000 BEF/EH. Ce prix peut être comparé avec le coût d'une station d'épuration qui varie grossièrement de 12 à 25 000 BEF/EH pour une station de moins de 10 000 EH (Figure 1.1.). Dans le programme d'investissement de la SPGE, trois traitements tertiaires sont prévus avec des budgets de 2 222 BEF/EH (18 000 EH), 2 358 BEF/EH (pour 212 000 EH), et 3 333 BEF/EH (18 000 EH).

On peut donc estimer que le traitement tertiaire d'une petite station augmente le coût d'investissement dans une proportion raisonnable. Toutefois la variation peut être importante d'un cas à l'autre.

Si la surface était plus grande, on aboutirait probablement à un prix unitaire par ha plus faible. On ne tient ici pas compte du coût du taillis en lui-même (plantation et récolte essentiellement) car il fait partie d'un calcul de rentabilité séparé lié à la filière bioénergie.

Figure 1.1. : Coûts des stations d'épuration dans le programme d'investissements de la SPGE



source : SPGE, 2001