

Université Catholique
de Louvain



Faculté des Sciences
Agronomiques

Laboratoire d'Ecologie des Grandes Cultures - ECOP

Projet BIOMEPUR

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



Rapport intermédiaire du 15 décembre 1999

N° Visa : 99/52.033.



En collaboration avec l'INASEP



Financé par la Région Wallonne

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 3 |
| 2. Phase 1 : études préliminaires | 5 |
| 2.1. Le saule : filtre végétal pour les eaux usées | 5 |
| 2.1.1. Principe | 5 |
| 2.1.2. Expériences à l'étranger | 6 |
| 2.2. Procédés conventionnels d'épuration | 11 |
| 3. Phase 2 : Expérimentation | 12 |
| 3.1. Implantation des parcelles d'essais de TtCR et du dispositif expérimental | 12 |
| 3.1.1. Description des parcelles | 12 |
| 3.1.2. Système d'irrigation | 15 |
| 3.1.3. Paramètres évalués | 16 |
| 3.2. Premiers résultats | 20 |
| 3.2.1. Eaux d'irrigation | 20 |
| 3.2.2. Analyses de la solution du sol | 23 |
| 3.2.3. Analyses du sol | 24 |
| 3.2.4. Analyses du matériel végétal | 25 |
| 4. Bibliographie | 26 |
| 5. Annexes | 28 |

1. Introduction

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 qui vise la production d'électricité de pointe à la ferme.

Parallèlement, le TtCR fait l'objet de nombreux projets de recherche et développement en Europe sur ses capacités de filtre végétal pour le traitement des eaux usées. Sa grande capacité d'évapotranspiration et son potentiel de croissance favorise le prélèvement des nitrates et des phosphates, ainsi que de certains métaux lourds, contenus dans ces effluents. Une épuration est réalisée tout en recyclant une ressource considérable en éléments minéraux dans une filière d'énergie renouvelable.

L'épuration des eaux est un véritable défi en Région Wallonne. La Communauté européenne a adopté le 21 mars 1991 une directive (91/271/CEE) relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. Elle fut traduite en droit régional par le Gouvernement Wallon le 8 décembre 1994. Ainsi doivent être épurés (DGRNE) :

- fin 1998, les effluents des agglomérations de plus de 10 000 équivalents habitants (EH) lorsque le cours d'eau récepteur est classé en "zone sensible" ;
- fin 2000, les effluents d'agglomérations de plus de 15 000 EH ;
- fin 2005, les effluents d'agglomérations ayant un nombre d'EH entre 2 000 et 15 000 ;
- fin 2005, les effluents d'agglomérations de moins de 2 000 EH devront subir un "traitement approprié" afin de respecter les objectifs de qualité des eaux réceptrices.

Le projet BIOMEPUR étudie ce concept épuratoire séduisant qui consiste à réaliser une épuration tertiaire grâce à une culture de TtCR. D'ores et déjà les expériences étrangères laissent espérer une bonne efficacité du filtre et un coût de traitement moindre par rapport aux traitements conventionnels, augurant d'un développement potentiel pour l'épuration tertiaire des petites stations d'épuration.

Les **objectifs** du projet sont multiples :

1. Tester l'épuration biologique tertiaire des eaux usées par irrigation sur filtre végétal de TtCR.
 - Dans quelles mesures ce filtre biologique est-il efficace au cours du temps ?
 - Comment gérer l'irrigation pour optimiser le système ?
 - Quel est l'impact sur la croissance et la productivité des saules ?
 - Les deux variétés de saule testées donnent-elles une réponse différente ?
2. Réaliser une analyse micro-économique de cette technique d'épuration dans le cadre de la production de bioénergie.
 - Quelle est la rentabilité économique de ce traitement pour l'épurateur et pour le cultivateur du TtCR ?

A cette fin, le projet est divisé en quatre phases :

Phase 1 : **Etude préliminaire** du potentiel du TtCR comme filtre végétal pour l'épuration biologique des eaux usées secondaires.

Phase 2 : **Expérimentation sur site** par irrigation d'eaux secondaires sur un hectare de TtCR situé à côté de la station d'épuration de Sart-Bernard. Ceci comprend la mise en place d'un système d'irrigation et le suivi régulier de l'impact du système sur la qualité chimique et sanitaire du sol et de la solution du sol.

Phase 3 : **Analyse micro-économique** du système.

Phase 4 : **Rapports.**

2. Phase 1 : études préliminaires

2.1. Le saule : filtre végétal pour les eaux usées

2.1.1. Principe

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

1. *Les particules du sol* filtrent les solides en suspension et fixent les éléments en solution dans l'eau usée par adsorption, échange d'ion ou précipitation.
2. *Les macro- et les micro-organismes* transforment et stabilisent les matières organiques et transforment l'azote.
3. *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 même plus longue en Belgique.
- 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.
- 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).
- 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.

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 problèmes 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).

2.1.2. 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, en Nouvelle-Zélande.

En suède, environ 18000 ha de TtCR ont été plantés dans un but de production d'énergie renouvelable. Deux essais d'épuration font références :

1) Kageröd (Hasselgren, 1998).

Les caractéristiques du projet sont les suivantes :

- 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.

2) Bogesund (Perttu et Kowalik, 1997)

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.

a) 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.

b) Epandage 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 champs 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.

c) 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.

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

Essai à Worclaw (Perttu and Kowalik, 1997)

Caractéristiques :

- Plantation en 1960.
- Essais de coupe tout 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 :

- 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.
- 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.

Au Royaume-Uni de grandes zones de TtCR ont déjà été plantées.

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

1°) avec des lixiviats de décharge (Alker, Riddell-Black *et al*, 1998).

Les lixiviats ont été utilisés purs et à différentes dilutions : 50%, 25 % et 12,5%. 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.

2°) avec une solution nutritive (Alker, Riddel-Black and Smith, 1997).

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.

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.

En France, deux expériences de taille sont en cours.

1) Orchies (Nord Pas de Calais)

La société Leroux 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. De plus, la biomasse produite est offerte à une association d'accueil de handicapés pour alimenter une chaufferie à bois, la récolte étant réalisée à leurs propres frais.

2) Villeneuve d'Ascq

L'association pour le développement des cultures énergétiques (ADCE) mène un essai de traitement tertiaire avec une partie des eaux usées sortant de la station d'épuration de Villeneuve d'Ascq (170 000 EH).

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.
- L'efficacité du traitement sera évaluée à partir de l'an 2000.

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, soit 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 (N_2) 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.

En Nouvelle Zélande (Riddel-Black, Sims *et al*, 1994)

Des essais sont réalisés en plein champ et en lysimètres.

1) 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.

2) 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. Procédés conventionnels d'épuration

Les procédés de traitement des eaux usées sont conventionnellement classés en traitements primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire.

Le traitement **primaire** enlève les matériaux organiques et inorganiques grossiers, les graisses et les huiles par des procédés de dégrillage, sédimentation et flottation. 50 à 70 % des solides en suspension présents dans l'eau brute sont éliminés par le traitement primaire ainsi que 40 à 50 % des métaux lourds (Feigin et al, 1991).

Le traitement **secondaire** implique des processus aérobies et anaérobies durant lesquels la matière organique présente dans les eaux usées est décomposée ou oxydée par des micro-organismes. Les traitements secondaires conventionnels sont les boues activées (cas de Sart-Bernard), les lits bactériens, les bio disques, le lagunage aéré, le fossé d'oxydation. Les effluents secondaires ont peu d'odeur, sont clairs et quasi incolores. D'après Feigin (1991) 99,9 % des micro-organismes pathogènes présents dans l'eau brute sont éliminés après le traitement secondaire, mais la concentration restante en coliformes est encore fort élevée et peut atteindre $10^5/100$ ml. La concentration en métaux lourds peut être abaissée de 70 à 90 % par le traitement secondaire, ils se retrouvent donc concentrés dans les boues.

Remarque : dans ce rapport, nous appellerons "*effluent secondaire*" ou "*eaux secondaires*", les eaux sortant du traitement secondaire.

Le traitement **tertiaire** consiste en un abattement supplémentaire de la charge organique (DBO), des facteurs d'eutrophisation (nitrates et phosphates) et élimine éventuellement les pathogènes résiduels. Les techniques les plus utilisées sont la chloration, la filtration ou la micro filtration, la coagulation, la précipitation chimique et l'adsorption par charbon actif ainsi que le traitement tertiaire biologique.

Le traitement **quaternaire** a pour but de potabiliser l'eau grâce à des techniques d'ultrafiltration, échange d'ions, osmose inverse, électrodialyse, distillation, ozonation, ...

3. Phase 2 : Expérimentation

3.1. Implantation des parcelles d'essais de TtCR et du dispositif expérimental

3.1.1. Description des parcelles

Cet essai d'environ un hectare a été implanté en mars 1998 à 100 m de la station d'épuration de Sart-Bernard (commune de Assesse) gérée par l'intercommunale INASEP.

Altitude : 190 m. Dénivelé entre le haut et le bas de la parcelle : 5 %.

a) Le climat : températures et précipitations (Oldenhove de Guertechin, 1972)

La région jouit d'un climat tempéré et humide :

- Température moyenne annuelle : 8,5°C
- Température moyenne du mois le plus froid (janvier) : 2°C, le plus chaud (juillet) : 16,5°C.
- Moyennes des maxima et minima annuels : 32°C et -13°C.
- Première gelée : en moyenne vers le 20 octobre, dernière : en moyenne vers le 10 mai.
- Période annuelle sans gelées : environ 170 jours.
- Période avec une température moyenne supérieure à 10°C : environ 165 jours (30 avril au 10 octobre).

Précipitations annuelles : 950 mm, dont environ 225 mm pour la période de mai à juillet.

b) Le sous-sol et le sol

Les parcelles font parties du bassin de la Meuse et sont situées dans le nord de la région condrusienne, plus précisément dans la bande de Dave du Silurien (schiste).

Le sol appartient à une texture limoneuse, plus précisément "limon fin argileux" : 77,2 % de limons (fraction 2-50 μ m), 18,9 % d'argile (fraction < 2 μ m) et 3,9 % de sables (fraction 50 μ m-2 mm).

Série de drainage AcA : limoneux faiblement gleyfié à horizon B textural. Le drainage y est modéré, relativement peu favorable, c'est à dire que les phénomènes de gleyfication sont faiblement marqués. Il en résulte des sols légèrement humides. ;

Le bas de l'essai (bloc 3) est un peu différent : série de drainage AGcp (complexe de sols faiblement gleyfiés sur matériaux limoneux ou limono-caillouteux).

La séquence des horizons est la suivante :

| | |
|----|--|
| Ah | Ah: horizon humifère |
| Ap | Ap: horizon labouré (jusque 30 cm) |
| E | E : horizon lessivé (appauvri) : n'apparaît que dans le bloc 3 |
| Bt | Bt: horizon argileux (enrichi) |

c) La plantation

Les caractéristiques de la plantation sont les suivantes :

- 2 variétés : *Salix viminalis* cv Jorun et *Salix viminalis* x *schwerinii* cv Tora. Origine : Svalof Weibull AB, Suède.
- Densité de plantation : 18 000 plants / ha
- Espacement entre les boutures : environ 50 cm entre chaque bouture sur une même ligne. Les saules ont été plantés en double rang : 0,75 m entre deux lignes formant un double-rang et 1,25 m entre les double-rangs.
- Désherbage : pulvérisation d'un mélange d'isoxaben (250 gr matière active/ha) et de propyzamide (1250 gr m.a./ha) après plantation. Suite à un problème de camomille, divers fauchages mécaniques ont eu lieu en première et début de deuxième année de croissance.

d) Le dispositif expérimental

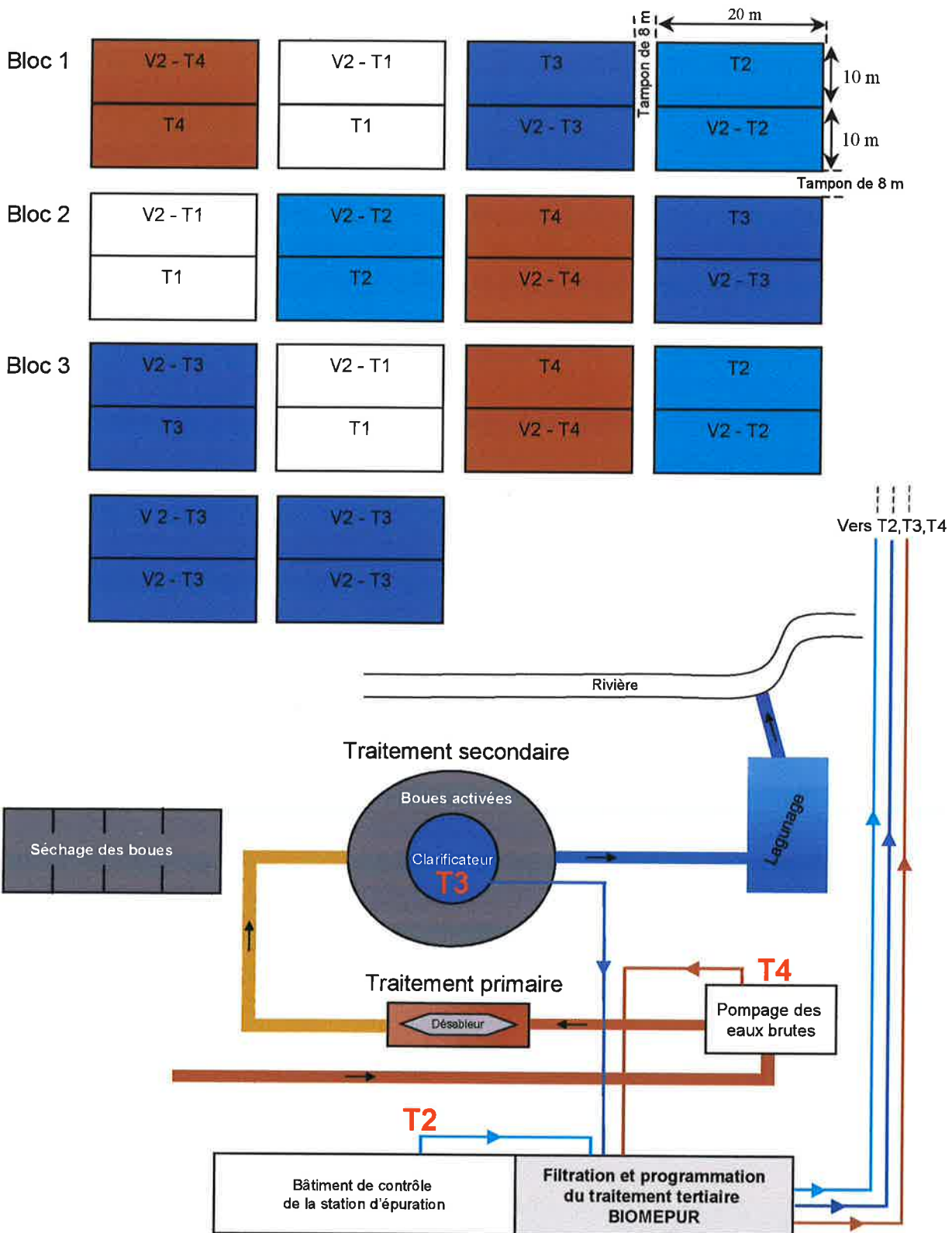
Les différents traitements sont été implantés en Split-Plot. Le Facteur A (parcelles) est l'irrigation et comporte quatre traitements :

- T 1 : traitement témoin, non irrigué
- T 2 : traitement irrigué à l'eau de ville
- T 3 : traitement irrigué avec les eaux sortant du traitement secondaire de la station
- T 4 : traitement irrigué avec les eaux d'entrée de la station

Le facteur B (sous-parcelles) est la variété et comporte deux traitements pour le facteur B :

- Jorun (V1)
- Tora (V2).

e) Plan de l'essai



3.1.2. Système d'irrigation

Plusieurs choix quant au système d'irrigation s'offraient à nous : l'irrigation gravitaire à la raie, l'irrigation par aspersion (sprinkler) et l'irrigation localisée (goutte à goutte).

Ce système d'épuration étant encore à l'étape de l'étude, il est important de maîtriser un maximum de facteurs. Parmi ceux-ci, l'uniformité de l'irrigation est primordiale afin de pouvoir comparer les traitements entre-eux. C'est pourquoi nous avons opté pour le système d'irrigation goutte à goutte malgré son coût plus élevé et la nécessité de filtration plus poussée des eaux. En effet, l'irrigation gravitaire et par aspersion pose un problème quant à l'homogénéité de l'irrigation sur toute la parcelle. De plus, cette dernière peut entraîner la formation d'aérosols d'eaux usées emportant les virus et les bactéries pathogènes sur des distances considérables du site irrigué. Une distance de plus de 200 m est rapportée dans la littérature (Feigin, 1991).

Le système a été conçu et mis en place par la société Barvaux Water Technics de Buzet. Il est composé de trois réseaux distincts afin de ne pas mélanger les différents traitements : eau de ville, eaux secondaires et eaux brutes. Les conduites primaires amenant l'eau jusqu'aux goutteurs (conduites secondaires) sur la parcelle sont enterrées afin de ne pas gêner le passage des machines pour la récolte et l'entretien.

Eau secondaire

Une pompe immergée dans le clarificateur de la station d'épuration amène l'eau au travers d'un filtre à disques et dans le réseau d'irrigation goutte à goutte.

Eau brute

La pompe sera immergée à l'entrée de la station, après le dégrillage. La suite du dispositif est semblable au dispositif utilisé pour l'eau secondaire. Suite à des problèmes techniques dus à la forte charge en matières en suspension de l'eau brute, le système n'est pas encore opérationnel. Les modifications seront réalisées avant le printemps 2000.

Eau de ville

La loi n'autorisant pas le raccordement direct d'un système d'irrigation sur le réseau de distribution d'eau potable, un dispositif particulier a été installé, comprenant : un réservoir-tampon, une pompe régulée par un pressostat et un vase d'expansion. L'eau mise sous pression par la pompe passe au travers d'un filtre à disques et est amenée au réseau d'irrigation goutte à goutte.

La filtration

Les trois filtres utilisés sont identiques. Pour l'eau secondaire et l'eau brute, ils sont équipés, d'un système automatique de nettoyage à l'eau de ville. La maille du filtre est de 140 mesh (130 μ m). Un manomètre à l'entrée et à la sortie de chaque filtre permet de vérifier son état d'encrassement.

Le réseau d'irrigation goutte à goutte

Chaque parcelle irriguée est parcourue par dix tuyaux espacés de 2 m et munis de goutteurs auto-régulants tous les 50 cm, soit un goutteur par m². Ces goutteurs sont composés d'un labyrinthe et d'une membrane. Lorsque la pression augmente, la membrane écrase le labyrinthe, diminuant le flux d'eau et assurant ainsi un débit uniforme tout au long du tuyau malgré les variations de pressions.

Les programmeurs

L'ensemble des électrovannes qui assurent l'irrigation d'une parcelle ou le nettoyage des filtres est commandé par trois programmeurs électroniques eux mêmes programmables à l'aide d'un logiciel dont les données sont transférables facilement, via une disquette. Il est possible de programmer

l'heure de démarrage de l'irrigation ainsi que la durée du cycle d'arrosage. Un débit-mètre placé sur l'arrivée d'eau de chaque parcelle permet de vérifier l'homogénéité de l'arrosage. Chaque programmeur est lié à un traitement (T2, T3 ou T4) et ne peut irriguer qu'une parcelle à la fois. Chaque traitement dispose de trois parcelles correspondant aux trois blocs excepté le traitement irrigué avec les effluents secondaires (T 3) pour lequel deux parcelles supplémentaires ont été implantées dans le bas de l'essai. Ce traitement à 5 parcelles impose donc la limite supérieure de la dose journalière d'irrigation. La période maximale d'irrigation est de 4,8 heures par jour (24h:5) à un débit théorique des goutteurs de 3,5 litres par heure, ce qui fait 16,8 mm d'eau au maximum par parcelle et par jour.

3.1.3. Paramètres évalués

a) Analyse des eaux d'irrigation

Les paramètres analysés sont les suivants.

- Les analyses de routine (déjà réalisées 4 fois par an sur la station) :
 - DCO
 - DBO₅
 - DBO₅/DCO
 - Azote (Kjeldhal, ammonium, nitrates)
 - Phosphore (total, orthophosphates)
 - Matières en suspension (MES)
 - pH.
- Des paramètres supplémentaires :
 - Carbone organique total (COT)
 - Conductivité
 - Sulfates (SO₄²⁻)
 - Hydrogène-carbonates (HCO₃⁻)
 - Dureté totale
 - Chlorures (Cl⁻)
 - Magnésium (Mg²⁺)
 - Calcium (Ca²⁺)
 - Sodium (Na⁺)
 - Métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)
 - Indicateurs de contamination fécale : Coliformes fécaux et totaux, streptocoques fécaux.

Ces analyses sont réalisées tous les deux mois pendant la période d'arrosage. Excepté les métaux lourds et les germes qui sont analysés une fois par an!

Certains paramètres méritent une explication :

- DCO (Demande Chimique en Oxygène).

DCO, DBO ainsi que COT (voir plus bas) sont toutes trois des mesures de contamination organique carbonée des eaux. La DCO correspond à la teneur de l'ensemble des matières organiques, biodégradables ou non. Elle s'exprime par la quantité d'oxygène fournie par le K₂Cr₂O₇ et nécessaire à l'oxydation des substances organiques (protéines, glucides, lipides, ...) présentes dans les eaux (certains composés azotés aromatiques et des chaînes aliphatiques peuvent cependant ne pas être oxydées). DCO et DBO sont exprimées en mg d'O₂ par litre.

- DBO₅ (Demande Biologique en Oxygène après 5 jours).

La DBO₅ est la quantité d'oxygène utilisée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique présente dans un échantillon. Contrairement à la mesure de la DCO, l'entièreté de la matière organique n'est pas oxydée (en général 70 à 80 % est oxydé en fonction de la biodégradabilité de l'eau). Par convention, cette mesure est réalisée sur 5 jours et à une température de 20°C dans l'obscurité. L'ajout d'un inhibiteur de nitrification peut s'avérer nécessaire (ATU ou allythiourée) pour éviter de prendre en compte dans la DBO₅ la quantité d'O₂ nécessaire à la nitrification de l'ammonium (principalement sur l'eau de sortie des stations, car la nitrification s'y opère beaucoup plus rapidement)

- DBO₅/DCO.

C'est un rapport reflétant la biodégradabilité de l'effluent. Au plus ce rapport est élevé, au plus l'effluent est biodégradable.

- Azote (nitrates, ammonium, Kjeldhal)

Azote nitrique : NO₃⁻

Azote ammoniacal : NH₄⁺

Azote Kjeldhal (N_k) : à ne pas confondre avec l'azote total. En effet, l'azote Kjeldhal est une mesure de l'azote réduit c'est à dire de l'azote organique et de l'azote ammoniacal.

$$N_k = N_{org} + N-NH_4^+$$

- Phosphore (total et orthophosphates)

Les orthophosphates (Ortho-P) ainsi que les polyphosphates (Poly-P) sont présents sous forme minérale dans les eaux (ils proviennent des lessives principalement).

Les Ortho-P sont les phosphates ioniques (PO₄³⁻) libres dans la solution du sol.

Les Poly-P sont les phosphates complexés à la matière organique.

Le phosphore organique (P_{org}) est le phosphore contenu dans la matière organique (protéines des bactéries).

Sous l'action des micro-organismes, les poly-P et les P_{org} peuvent être hydrolysés en ortho-P.

La mesure du phosphore total comprend toutes les formes sous lesquelles le phosphore est présent : le phosphore organique, les polyphosphates et les orthophosphates.

$$P_{tot} = P_{org} + Poly-PO_4 + Ortho-PO_4$$

- MES (matières en suspension).

Un contenu classique en matières en suspension (composés solides organiques et inorganiques) est de 100 à 350 mg/l dans les eaux usées brutes. L'EH¹ standard définit un rejet de 90 g MES/EH.jour, ce qui est rarement atteint compte tenu des dilutions des eaux usées par des eaux parasites, la sédimentation éventuelle dans les conduites, ... C'est un paramètre important pour évaluer la convenance d'une eau usée à l'irrigation étant donné que ces solides peuvent boucher à la fois les pores du sols et les composants du système d'irrigation.

¹ Voir définition p. 20

- COT : Carbone Organique Total.

Cette mesure n'a qu'une valeur relative pour évaluer le risque sur la santé (il n'y a pas de normes pour les eaux potables mais on recommande son suivi). L'intérêt de cette mesure est qu'elle peut permettre de suivre l'évolution d'une "pollution" organique. Pour un type d'eau défini, il existe une corrélation entre DCO, DBO₅ et COT.

- Conductivité.

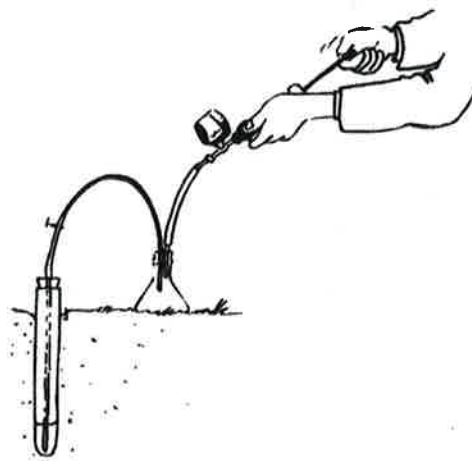
Calculée grâce à la mesure de la résistance de l'eau au passage du courant. Les sels étant des ions, ils conduisent le courant, ainsi la résistance sera d'autant plus faible que la salinité est élevée. Elle est exprimée en μ Siemens par cm.

- Indicateurs de contamination fécale : coliformes fécaux et totaux, streptocoques fécaux.

Les eaux brutes contiennent beaucoup de micro-organismes (bactéries, virus, parasites protozoaires) qui peuvent être pathogènes. La plupart de ces germes sont rabattus durant le traitement biologique (boues activées à Sart-Bernard). Le dénombrement des coliformes totaux et des coliformes fécaux est un indicateur standardisé de contamination des eaux par les micro-organismes. Une quantité typique dans les eaux usées est de 10^7 à 10^9 coliformes par 100 ml.

b) Analyse de la solution du sol

Deux possibilités ont été envisagées pour la récolte des percolats : les bougies poreuses et les plaques lysimétriques. La première solution a été choisie pour sa facilité d'installation vu le grand nombre de parcelles à étudier. En effet, bien que les solutions récoltées par la technique des plaques lysimétriques, soient plus représentatives quant à leur quantité et leur qualité, cette technique demande de creuser pour chaque plaque (24 dans notre cas) une fosse de 2 m de profondeur pour l'installation. Différents articles scientifiques nous ont permis de comparer les deux techniques (Goor *et al*, 1999, Clapp *et al*, 1999, Addiscott, 1990, Scokart *et al*, 1990) et d'apprécier les avantages et inconvénients des systèmes.



Bougie poreuse et système de récupération de l'eau.

Les 24 bougies ont été placées à 30 cm de profondeur dans un premier temps afin d'observer si les quantités d'eau ainsi récoltées étaient suffisantes. On a pu ainsi observer qu'il était possible de prélever facilement 300 ml par bougie après avoir laissé une dépression de 60 kPa pendant trois

jours dans chaque bougie. Ceci nous a permis de descendre les bougies à une profondeur de 60 cm. Il est important de ne pas trop élever la dépression dans les bougies afin de ne pas pomper l'eau liée du sol qui n'aboutira de toute façon pas jusqu'à la nappe. D'un autre côté, si l'on se contente de maintenir une dépression identique à la capacité au champ, les quantités d'eau récoltées dans les bougies sont insuffisantes pour l'analyse. Une dépression de 60 kPa semble un bon compromis.

Les éléments analysés sont les suivants :

- pH, éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg) et autres anions et cations principaux de la solution du sol (Na, Cl, SO₄, HCO₃) qui permettront de faire des balances ioniques et d'étudier les anions qui contribuent au lessivage.
- Indicateurs de pollution organique : DCO, DBO₅, COT
- Métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).
- Indicateurs de contamination fécale : Coliformes fécaux et totaux, Streptocoques fécaux.

Fréquence des analyses: tous les deux mois pendant toute l'année. Excepté les métaux lourds et les germes : une fois par an. Dans la mesure du possible, les différentes formes d'azote sont analysées tous les mois afin d'étudier avec plus de précision le cycle de l'azote dans le système. Ces analyses d'eau (irrigation et percolats) sont réalisées par le laboratoire de l'INASEP à Philippeville.

c) Analyses du sol

Une analyse complète du sol (pH, % humus, azote organique et azote minéral, phosphore, potassium, magnésium, sodium, calcium) est réalisée en début et en fin de période de croissance chaque année (mars et novembre).

Les métaux lourds (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, Hg) sont analysés une fois par an à la fin de la période de croissance.

Une analyse granulométrique a permis de déterminer la structure du sol.

Les analyses de sol sont réalisées par le laboratoire de La Hulpe (centre provincial de l'agriculture et de la ruralité).

d) Analyses du matériel végétal

Le rendement de la plantation sera estimé après chaque année de croissance. L'établissement d'une corrélation entre la mesure du diamètre des tiges et le rendement pour les deux variétés testées permettra de réaliser des mesures de rendement non destructives et de comparer les traitements de cet essai.

L'analyse du bois est prévue lors de la récolte finale et concerne les éléments azote, phosphore, potassium et métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).

3.2. Premiers résultats

3.2.1. Eaux d'irrigation

La station d'épuration de Sart-Bernard reçoit une charge organique moyenne d'environ 300 EH (calcul ECOP), une charge volumique de 600 EH (calcul ECOP) pour une charge nominale de 1500 EH (annuaire de l'environnement 1996).

Rappel : 1 équivalent habitant (EH) représente ce que produit en moyenne un habitant chaque jour.

1 EH = 180 l contenant : 60 g DBO₅
135 g DCO
90 g de matières en suspension
9,9 g d' azote
2,2 g de phosphore

a) Caractéristiques des eaux irriguées

Composition moyenne (1996-97-98) des eaux de la station de Sart-Bernard (analyses de l'INASEP)

| Constituants | Eaux brutes | | | Eaux secondaires ² | | |
|-----------------------|-----------------------|------|------|-------------------------------|------|------|
| | Concentrations (mg/l) | | | | | |
| | Max | Moy | Min | Max | Moy | Min |
| DCO | 415 | 264 | 63 | 87 | 24 | 17 |
| DBO ₅ | 190 | 112 | 8 | 10 | 3,5 | 1 |
| DBO ₅ /DCO | 0,63 | 0,42 | 0,13 | 0,3 | 0,17 | 0,03 |
| Phosphore (P) | | | | | | |
| Total | 12,13 | 5,4 | 0,48 | 4,6 | 1,88 | 0,55 |
| Orthophosphates | 9,71 | 4,36 | 0,3 | 3,9 | 1,47 | 0,16 |
| Azote (N) | | | | | | |
| Kjeldhal | 52 | 34 | 12,6 | 11,5 | 4,9 | 2,5 |
| Ammonium | 41,65 | 21,7 | 2,5 | 1,75 | 0,54 | 0,14 |
| Nitrates | 5,28 | 1,7 | 0,4 | 15,45 | 9,5 | 0,78 |
| MES | 172 | 96 | 42 | 11 | 5,5 | 1,6 |
| pH | 7,77 | 7,46 | 7 | 7,67 | 7,41 | 7,1 |

² Voir définition p 11, eau portant du traitement secondaire

Composition des eaux utilisées pour l'irrigation 2 semaines avant le démarrage de l'arrosage
(analyses réalisées le 17/08/99 et/ou le 30/09/99)

| | Eaux brutes | Eaux secondaires | Eau de ville |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------|---------------|
| | Concentrations (mg/l) | | |
| DCO | 301 | 18 | |
| DBO ₅ | 130 | 2 | |
| DBO ₅ /DCO | 0.43 | 0.11 | |
| Phosphore | | | |
| Total | 3.4 | 0.975 | < 0.01 [0] |
| Orthophosphates | 2.42 | 0.840 | < 0.01 |
| Azote | | | |
| Kjeldhal | 23.8 | 3.3 | |
| Ammonium | 11.2 | 1.18 | < 0.01 [0] |
| Nitrates | 0.69 | 3.7 | 5.37 [4.76] |
| Résidus 105°C | 129 | 7 | |
| pH | 7.71 | 7.23 | 7.34 [7.5] |
| Conductivité (□S/cm) | 836 | 892 | 742 [672] |
| Sulfates | 59.85* | 53.9* | 50.7 [38.1] |
| Hydrogénocarbonates | 344.7 | 225.7 | 372.1 |
| Dureté totale | | | [34.7 °F] |
| Chlorures | 67.4* | 66.3* | 36.8 [33.1] |
| Magnésium | 12.9* | 11.5* | 25.22 [23.7] |
| Calcium | 53.06* | 58* | 117.4 [101.7] |
| Potassium | 9.7 | 11.6 | 1.83 |
| Sodium | 54.3* | 57* | 14.86 [13.7] |
| Métaux lourds (□g/l) | | | |
| Cuivre | 9.3 | 4.6 | 2.1 [1.5] |
| Cadmium | < 0.1 | 0.1 | [0.1] |
| Chrome | 0.6 | < 0.2 | [15.9] |
| Plomb | 6 | 2 | [0.4] |
| Nickel | 13.7 | < 1 | [1.3] |
| Zinc | 149 | 11 | 377 [151.8] |
| Mercure | | | [0] |
| Analyses bactériologiques (/100 ml) | | | [SWDE, 1998] |
| Coliformes | 11 000 000 | 140 000 | |
| Coliformes fécaux | 2 500 000 | 21 000 | |
| Streptocoques fécaux | 300 000 | 5 000 | |

*Moyenne des analyses du 17/08/99 et 30/09/99

b) Apport d'eau et d'éléments minéraux par l'irrigation

L'irrigation a débuté le 17 septembre 1999 et a été arrêtée le 19 octobre 1999 afin d'éviter les risques dus au gel (les filtres étant particulièrement vulnérables). La programmation a été réglée à 4 heures d'irrigation par jour ce qui correspond, vu que les goutteurs ont un débit théorique de 3,5 mm/h, à une dose de 7 mm/jour (6 mm étant la dose pour un rendement optimum d'après les travaux de Hasselgren). La quantité d'eau théorique ainsi apportée a été de 217 mm ce qui fait 2 170 m³ par hectare. On peut donc sans crainte (d'après les travaux de Haselgren) épandre 2 000 m³ d'eau par mois et par hectare sur les saules pendant la période de croissance (6 mois). Ceci fait un total d'environ 10 000 m³ d'eau, c'est à dire un volume de 150 EH par an et par hectare.

En pratique, l'ouverture des électrovannes étant réglable, la dose apportée réelle (selon les compteurs de passage à l'entrée de chaque parcelle) a été différente de la dose calculée. D'après la composition de l'eau d'irrigation, on peut également calculer les doses d'éléments minéraux déjà apportées.

| | | | Quantités apportées (kg/ha) | | | | | |
|------------|------|------------------------|-----------------------------|-------|------|-----|----|----|
| Eau | Bloc | Dose (m ³) | N tot | P tot | K | Ca | Mg | Na |
| Ville | 1 | 20 | 2.63 | 0 | 0.90 | 57 | 12 | 7 |
| | 2 | 76 | 10.21 | 0 | 3.5 | 223 | 48 | 28 |
| | 3 | 65 | 8.71 | 0 | 3 | 190 | 41 | 24 |
| Secondaire | 1 | 65 | 11 | 1.6 | 19 | 95 | 19 | 93 |
| | 2 | 52 | 9 | 1.3 | 15 | 76 | 15 | 74 |
| | 3 | 58 | 10 | 1.4 | 17 | 84 | 17 | 83 |

| | | | Quantités de métaux lourds apportées (g/ha) | | | | | | |
|------------|------|------------------------|---|------|-------|------|------|------|----|
| Eau | Bloc | Dose (m ³) | Cu | Cd | Cr | Pb | Ni | Zn | Hg |
| Ville | 1 | 20 | 1 | 0.05 | 7.78 | 0.20 | 0.64 | 185 | 0 |
| | 2 | 76 | 4 | 0.19 | 30.23 | 0.76 | 2.47 | 717 | 0 |
| | 3 | 65 | 3.4 | 0.16 | 25.79 | 0.65 | 2.11 | 612 | 0 |
| Secondaire | 1 | 65 | 8 | 0.16 | 0.33 | 3.26 | 1.63 | 1.63 | 0 |
| | 2 | 52 | 6 | 0.13 | 0.26 | 2.61 | 1.30 | 1.30 | 0 |
| | 3 | 58 | 7 | 0.15 | 0.29 | 2.90 | 1.45 | 1.45 | 0 |

On observe qu'en un mois, ces doses sont loins d'être élevées par rapport aux exportations d'éléments minéraux exportés par le saule lors de la récolte.

En effet, lorsque la récolte a lieu en hiver (sans les feuilles), les exportations annuelles d'éléments minéraux du saule se situent en moyenne (Jossart *et al*, 1999) à 60-80 kg.ha⁻¹ d'azote, 10 kg.ha⁻¹ de phosphore (26 kg de P₂O₅) et 35 kg.ha⁻¹ de potassium. Il existe toutefois de larges variations en ce qui concerne les exportations suivant le type de sol, la fertilisation apportée et l'espèce cultivée. Il faut également prendre en compte la consommation de "luxe" des plantes qui lorsqu'elles sont fertilisées au delà de leurs besoins, absorbent des surplus d'éléments minéraux.

3.2.2. Analyses de la solution du sol

Une série d'analyses a déjà été réalisée, les résultats complets se trouvent en annexe. Aucune analyse statistique de la variance n'a encore été effectuée sur ces données car le nombre n'est pas encore significativement conséquent, mais on peut déjà observer les moyennes des analyses pour chaque traitement.

Analyse du 5 octobre 99. Moyenne pour les traitements T1 (témoin), T2 (eau de ville), T3 (eaux secondaires), T4 (eaux brutes) et normes pour la distribution d'eau potable (20/07/89)

| | | T 1 | T 2 | T 3 | T 4 | Normes |
|-------------------------|---------|--------|--------------|--------------|--------|---------|
| N Kj | mgN/l | 1.42 | 1.36 | 1.25 | 2.47 | 1 |
| NH4 | mgN/l | 0.27 | 0.25 | 0.27 | 0.36 | 0.39 |
| NO3 | mgN/l | 1.22 | 4.94 | 6.89 | 1.57 | 11.3 |
| P total | µgP/l | 19.00 | 18.00 | 37.33 | 29.50 | 2183 |
| OrthoP | µgP/l | 16.83 | 11.00 | 19.00 | 11.00 | |
| HCO3⁻ | mg/l | 518.48 | 443.27 | 432.23 | 524.60 | |
| CO3²⁻ | mg/l | 7.00 | 5.00 | 3.43 | 12.00 | |
| PH | | 7.76 | 7.68 | 7.68 | 7.90 | 6.5-9.2 |
| Cl | mgCl/l | 37.17 | 37.33 | 44.71 | 45.00 | 200 |
| SO4 | mgSO4/l | 113.67 | 105.33 | 97.00 | 127.00 | 250 |
| K | mg/l | 9.81 | 12.44 | 10.37 | 11.26 | 12 |
| Ca | mg/l | 193.07 | 197.97 | 203.49 | 190.77 | 270 |
| Mg | mg/l | 7.70 | 6.03 | 6.20 | 7.73 | 50 |
| Na | mg/l | 102.27 | 75.67 | 77.00 | 111.87 | 150 |

Analyse du 26 octobre 99. Moyenne pour les traitements T1 (témoin), T2 (eau de ville), T3 (eaux secondaires), T4 (eaux brutes) et normes pour la distribution d'eau potable (20/07/89)

| | | T 1 | T 2 | T 3 | T 4 | Normes |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| DCO | MgO ₂ /l | 23.60 | 16.50 | 11.60 | 23.50 | |
| N Kj | MgN/l | 0.95 | 0.83 | 0.69 | 1.00 | 1 |
| NH4 | MgN/l | 0.04 | 0.24 | 0.15 | | 0.39 |
| NO3 | MgN/l | 1.12 | 0.93 | 2.12 | 1.40 | 11.3 |
| Cu | µg/l | 6.70 | 5.22 | 3.96 | 10.35 | 1000 |
| Ni | µg/l | 2.55 | 1.16 | 1.11 | 3.90 | 50 |
| Pb | µg/l | 9.60 | 96.50 | 98.60 | 5.00 | 50 |
| Cr | µg/l | 0.37 | 0.53 | 0.33 | 0.50 | 50 |
| Cd | µg/l | 0.10 | 0.27 | 0.10 | 0.40 | 5 |
| Zn | µg/l | 3.82 | 6.18 | 4.63 | 5.45 | 5000 |

Remarque : à ces deux dates, le traitement 4 n'a pas encore été irrigué et correspond donc au traitement témoin.

Vu la courte période d'irrigation, il n'est pas encore possible à l'heure actuelle de tirer quelques conclusions, mais on peut néanmoins déjà observer que la quantité de nitrates analysée à 20 jours d'intervalle n'a jamais dépassé la norme des 50 ppm (11,3 mg d'azote par litre). Tous les éléments analysés dans les bougies présentent des concentrations inférieures aux normes de potabilité de l'eau excepté l'azote Kjeldhal lors de la première analyse et le plomb. Concernant ce dernier, sa

concentration dépasse les normes d'un facteur deux dans les parcelles ayant été irriguées (96 et 98 µg/l). On ne note pas de différence significative (à priori car l'analyse statistique n'a pas été réalisée) entre les parcelles irriguées par l'eau de ville ou par l'eau de la station. La concentration en plomb des eaux utilisées pour l'irrigation est très faible et vaut 2 et 0,4 µg/l respectivement pour les eaux secondaires et l'eau de ville, ceci n'explique donc pas les concentrations observées. La concentration en plomb dans le sol révélée par les analyses du sol est également faible (18 mg/kg de sol sec, la norme étant à 100 mg/kg) et n'explique pas non plus les concentrations retrouvées dans les bougies. Par contre une hypothèse tout à fait envisageable, serait que ce plomb provienne de la céramique de la bougie elle-même (communication orale du Pr De Backer, unité de Génie Rural). Les bougies des traitements n'ayant pas reçu d'eau auraient été traversé par de plus faibles volumes d'eau.

En ce qui concerne les analyses bactériologiques (voir annexe 3), l'analyse du 26 octobre 1999 sur les percolats n'a décelé aucun signe de contamination fécale si ce n'est dans trois bougies : traitements 1 et 2 (témoin et eau de ville) : 10 coliformes fécaux/100 ml et traitement 3 (eau secondaire) : 300 coliformes fécaux/100 ml. Ceci est probablement dû à une contamination ultérieure lors de l'échantillonnage.

3.2.3. Analyses du sol

Une **analyse granulométrique** a été réalisée afin de déterminer la texture du sol de l'essai. Le sol appartient à une texture limoneuse, plus précisément "limon fin argileux".

Une **analyse du pH, Norg, Nmin, P, K, Ca, Mg, Na, humus** a été réalisée le 3 août 1999. Les résultats sont les suivants.

| Eléments | 0 à 30 cm | | 30 à 60 cm | |
|--------------------|--------------|--------|--------------|--------|
| | Blocs 1 et 2 | Bloc 3 | Blocs 1 et 2 | Bloc 3 |
| pH _{KCl} | 7.2 | 7.4 | 7 | 7.2 |
| % humus | 2.3 | 2.3 | 0.9 | 1.1 |
| Norg tot (mg/100g) | 110 | 114 | 56 | 60 |
| N min (kg/ha) | 7 | 5 | 3 | 3 |
| P tot (mg/100g) | 12 | 13 | 2 | 3 |
| Psoluble (mg/100g) | 0.6 | 0.6 | 0.2 | 0.2 |
| K (mg/100g) | 24 | 19 | 17 | 14 |
| Mg (mg/100g) | 8 | 7 | 6 | 6 |
| Na (mg/100g) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ca (mg/100g) | 339 | 323 | 251 | 256 |

On remarque que les parcelles ont un taux d'humus en dessous de la moyenne souhaitée (3,2 %), ce qui devrait être amélioré par la culture du TtCR de saule.

Une **analyse des métaux lourds** a été réalisée le 5 août 1999. Elle sera répétée chaque année.

| Eléments | Résultats (mg/kg MS) | | | | Moyenne | Moniteur belge 12/4/95 |
|----------|----------------------|--------|--------------|--------|---------|---------------------------|
| | 0 à 30 cm | | 30 à 60 cm | | | |
| | Blocs 1 et 2 | Bloc 3 | Blocs 1 et 2 | Bloc 3 | | |
| Cuivre | 20 | 13,4 | 15 | 14,4 | 15,7 | 50 |
| Zinc | 80 | 73,2 | 64,3 | 62,6 | 70,03 | 200 |
| Chrome | 135 | 116,2 | 123,2 | 115,8 | 122,6 | 100 |
| Nickel | 28 | 23 | 29,5 | 26,6 | 26,8 | 50 |
| Plomb | 18 | 17,4 | 10,5 | 12,4 | 14,6 | 100 |
| Cadmium | 0,4 | 0,3 | 0 | 0,2 | 0,23 | 2 |
| Mercur | 0,097 | 0,052 | 0,026 | 0,032 | 0,052 | 1 |

On peut observer qu'avant toute application d'eau usée sur les parcelles, la concentration en chrome est déjà élevée.

3.2.4. Analyses du matériel végétal

Un recépage des tiges a été réalisé le 17 mars 1999. Les rendements obtenus après la première année de croissance étaient les suivants : Tora : 786 kg MS/ha, Jorun : 690 kg MS/ha. L'analyse statistique de la variance ne révèle pas de différence significative de rendement entre les deux variétés.

Une mesure de la relation entre le diamètre des tiges et rendement est en cours et permettra de suivre la croissance et l'augmentation du rendement pour chaque traitement sans destruction des tiges.

4. Bibliographie

- Addiscott T.M., 1990. "Measurement of nitrate leaching : a review of methods" in *Nitrates – Agriculture – Eau*, International Symposium, 7-8 Novembre 1990, INRA, Paris, France, p. 159-168.
- Alker G., Riddell-Black D., Smith S.R. *et al.*, 1998. "Nitrogen removal from a nutrient rich wastewater by *Salix* grown in a soil-less system", in *Biomass for Energy and Industry*, 10th European conference and technology exhibition, 8-11 June, Würzburg, CARMEN, Allemagne, p. 984-987.
- Alker G., Riddell-Black D. and Smith S.R., 1997. "Investigations of nutrient uptake by willow in a soil-less system", in *Aspects of Applied Biology* 49, *Biomass and energy crops*, p. 173-180.
- Börjesson P. 1999. " Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden. I : Identification and quantification", in *Biomass and Bioenergy* 16, p. 137-154.
- Clapp *et al.*, 1999. "Nitrates in Soils and Waters from Sewage Wastes on land" in *Managing risks of nitrates to humans and the environment* by Wilson W. S. *et al.*, Royal Society of Chemistry, United Kingdom, p. 139-154.
- DGRNE, inc. *L'eau en Région Wallonne*, édité par la Région Wallonne, Belgique, 122 p.
- Feigin A., Ravina I., Shalhevet J., 1991. *Irrigation with Treated Sewage Effluent*, Advanced Series in Agricultural Sciences 17, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 224 p.
- Goor F., Brahy V., Hupin F. and Ledent J.-F., 1999, "N-cycling study under agricultural crops : comparative assessment of soil solution quality using capillary-wicks samplers", paper accepted for the AgEnergy conference, 2-5 June 1999, Athens, Greece, 8pp.
- Hamish T. Lowe, Ralph E.H. Sims, Jim A. Cooper, 1994. "Utilization of short rotation forestry for fuelwood from an effluent disposal scheme". Paper presented at the Mechanization in Short Rotation, Intensive Culture Forestry Conference, Mobile, AL, March 1-3, 1994.
- Hasselgren K., 1998. "Use of municipal wastewater in short rotation energy forestry –full-scale application", in *Biomass for Energy and Industry*, 10th European conference and technology exhibition, 8-11 June, Würzburg, CARMEN, Allemagne, p.835-838.
- Haselgren K., 1996. "Municipal wastewater recycling in energy forestry", in 9th European Bioenergy Conference & 1st European energy from biomass technology exhibition, 24-27 June, Copenhagen, Denmark, p. 37-38.
- Hasselgren K., inc. "Soil-Plant Treatment System", in *Landfilling of Waste : Leachate*, Elsevier Applied Science Publishers, Essex, p. 361-380.
- Jossart J.-M., Goor F., Nérinckx X. et Ledent J.-F., 1999. *Le taillis à très courte rotation, alternative agricole*, seconde édition, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Laboratoire d'Ecologie des Grandes Cultures – ECOP, Belgique.
- Lemineur M., 1998. <http://www.ciger.be/inasep/chap5/rep56.shtml>
- Nielsen K. H., 1994. "Environmental aspects of using waste waters and sludges in energy forest cultivation", in *Biomass and Bioenergy* Vol. 6, No. 1/2, p 123-132.
- Oldenhove de Guertechin F. B., 1972. *Carte des sols de la Belgique*, texte explicatif de la planchette Naninne 155 E, IRSIA, 101 p.
- Perttu K. L. and Kowalik P. J., 1997. "*Salix* vegetation filters for purification of waters and soils", in *Biomass and Bioenergy* 12, p. 9-19.

- Riddel-Black D.M., Sims R.E.H., Clothier B., Green S., Edwards R., 1994. "Water nutrient use by fuel wood species – 1st year results from an intensively monitored lysimeter study" in *9th European Bioenergy Conference & 1st European energy from biomass technology exhibition*, 24-27 June, Copenhagen, Denmark, p. 212-213.
- Scokart *et al*, 1990. "Lixiviation des nitrates sous différents systèmes de culture : premiers résultats d'études en cases lysimétriques" in *Nitrates – Agriculture – Eau*, International Symposium, 7-8 Novembre 1990, INRA, Paris, France, p. 227-232.
- Sims R.E.H., Mitchell C.P. et Ford-Robertson J. B., 1992. "Disposal of effluent on to tree crops used for heat and power generation" in Proc. Of the International Conference on Biomass for Energy and Industry, 7th EC Conference, 5-9 Oct 1992, Florence, Italy.

5. Annexes

Annexe 1 : Résultats de l'analyse des éléments minéraux dans les percolats récupérés dans les bougies (5 octobre 1999).

Annexe 2 : Résultats de l'analyse de l'azote et des métaux lourds dans les percolats récupérés dans les bougies (26 octobre 1999).

Annexe 3 : Résultats de l'analyse bactériologique dans les percolats récupérés dans les bougies (26 octobre 1999).

Annexe 4 : Analyses des eaux réalisées et à prévoir.

Annexe 1 : Résultats de l'analyse des éléments minéraux dans les percolats récupérés dans les bougies (5 octobre 1999).

| Ech. | Bloc | Var | T | N Kj mgN/l | NH4 mgN/l | NO3 mgN/l | P total µgP/l | OrthoP µgP/l | HCO3- mg/l | CO3-- mg/l | pH | Cl mgCl/l | SO4 mgSO4/l | K mg/l | Ca mg/l | Mg mg/l | Na mg/l |
|------|------|-----|---|---------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|------|--------------|----------------|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | 1 | 1 | 4 | 4.45 | 0.64 | 1.83 | <10 | 0 | 347.7 | 30 | 8.18 | - | 128 | 17.46 | 89.8 | 6.6 | 127.4 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0.86 | 0.25 | 0.28 | <10 | 11 | 600.8 | 9 | 7.76 | 19 | 103 | 9.54 | 165.6 | 8.2 | 113 |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 1.38 | 0.29 | 8.93 | <10 | 4 | 335.5 | 0 | 7.85 | 39 | 85 | 21.32 | 152.2 | 5.4 | 56.2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 1.17 | 0.09 | 0.64 | 29 | 39 | 326.3 | 9 | 7.91 | 9 | 50 | 10.96 | 137.8 | 3.4 | 59.8 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 1.86 | 0.32 | 19.22 | <10 | 2 | 411.8 | 9 | 7.76 | 29 | 73 | 15.78 | 192.6 | 6 | 70.2 |
| 6 | 1 | 1 | 3 | 1.44 | 0.15 | 22.25 | 10 | 14 | 427 | 0 | 7.75 | 34 | 113 | 12.56 | 212 | 6.2 | 72.6 |
| 7 | 1 | 2 | 1 | 2.07 | 0.32 | 1.26 | 26 | 21 | 558.1 | 21 | 8.25 | 40 | 145 | 11.48 | 185.2 | 9 | 152.6 |
| 8 | 1 | 2 | 4 | 2.01 | 0.27 | 0.55 | <10 | 9 | 561.2 | 18 | 7.96 | 39 | 110 | 7.08 | 170.2 | 8.4 | 132.2 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1.45 | 0.18 | 0.92 | 17 | 23 | 536.8 | 12 | 7.86 | 53 | 163 | 7.25 | 208 | 8.8 | 104 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 1.33 | 0.29 | 0.17 | 12 | 5 | 524.6 | 12 | 7.86 | 43 | 128 | 13 | 207.2 | 6.8 | 91.4 |
| 11 | 2 | 2 | 4 | 1.13 | 0.31 | 0.17 | <10 | 11 | 542.9 | 18 | 8.05 | 33 | 108 | 8.96 | 230.4 | 6.8 | 85.2 |
| 12 | 2 | 2 | 3 | 1.42 | 0.35 | 0.08 | <10 | 20 | 478.8 | 9 | 7.6 | 40 | 90 | 10.34 | 231.8 | 5.8 | 54 |
| 13 | 2 | 1 | 3 | 1.19 | 0.22 | 3.35 | <10 | 2 | 439.2 | 0 | 7.51 | 59 | 128 | 9.63 | 215.4 | 6.8 | 80 |
| 14 | 2 | 1 | 4 | 1.88 | 0.21 | 4.53 | <10 | 5 | 512.4 | 0 | 7.64 | 45 | 150 | 9.45 | 217.6 | 8.2 | 99.6 |
| 15 | 2 | 2 | 2 | 1.38 | 0.26 | 0.29 | <10 | 0 | 494.1 | 0 | 7.52 | 49 | 133 | 7.39 | 214.4 | 7.6 | 96.2 |
| 16 | 2 | 2 | 1 | 1.18 | 0.26 | 0.32 | <10 | 9 | 512.4 | 0 | 7.54 | 57 | 108 | 11.5 | 213.8 | 7.8 | 93 |
| 17 | 3 | 1 | 3 | 1.37 | 0.19 | 1.3 | <10 | 4 | 390.4 | 0 | 7.54 | 51 | 105 | 7.24 | 204.2 | 5.2 | 61.6 |
| 18 | 3 | 1 | 1 | 1.89 | 0.43 | 4.22 | 13 | 12 | 494.1 | 0 | 7.57 | 43 | 123 | 9.88 | 203.2 | 6.8 | 94 |
| 19 | 3 | 2 | 4 | 2.77 | 0.39 | 0.28 | 23 | 7 | 603.9 | 6 | 7.67 | 61 | 138 | 10.95 | 232.6 | 8.4 | 126.8 |
| 20 | 3 | 2 | 2 | 1.19 | 0.28 | 7.5 | 13 | 0 | 457.5 | 0 | 7.53 | 71 | 115 | 15.08 | 224.2 | 7.2 | 87.2 |
| 21 | 3 | 1 | 2 | 1.24 | 0.25 | 1.8 | 18 | 20 | 445.3 | 0 | 7.52 | 23 | 133 | 12.42 | 211.6 | 5.2 | 49.2 |
| 22 | 3 | 1 | 4 | 2.55 | 0.32 | 2.03 | 36 | 34 | 579.5 | 0 | 7.87 | 47 | 128 | 13.68 | 204 | 8 | 100 |
| 23 | 3 | 2 | 1 | 1.04 | 0.15 | 0.29 | 20 | 25 | 408.7 | 0 | 7.59 | 11 | 40 | 9.23 | 182.6 | 5.6 | 57 |
| 24 | 3 | 2 | 3 | 0.94 | 0.19 | 8.9 | 15 | 0 | 369.1 | 15 | 7.69 | 65 | 118 | 6.05 | 211 | 6.8 | 82.8 |
| 25 | 3 | 2 | 3 | 1.03 | 0.53 | 3.39 | 87 | 89 | 585.6 | 0 | 7.82 | 25 | 40 | 5.44 | 197.8 | 7.2 | 131.8 |

Annexe 2 : Résultats de l'analyse de l'azote et des métaux lourds dans les percolats récupérés dans les bougies (26 octobre 1999).

| Echantillons | DCO | N Kj | NH4 | NO3 | Cu | Ni | Pb | Cr | Cd | Zn |
|--------------|--------|-------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | mgO2/l | mgN/l | mgN/l | mgN/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l |
| 3 | 15 | 1.1 | 0.334 | 5.49 | 6.5 | 3.1 | 75 | 1.2 | 0.1 | 9.7 |
| 3' | 11 | 0.7 | 0.178 | 0.17 | 5.4 | 2.7 | 6 | 0.2 | <0.1 | 6.7 |
| 4 | 12 | 0.7 | 0.089 | 0.12 | 4.4 | 1.1 | 20 | 1.1 | <0.1 | 5.8 |
| 5 | 18 | 1.1 | 0.19* | 0.56 | 5.3 | 1.1 | 9 | 0.4 | <0.1 | 6.3 |
| 6 | 17 | 1 | 0.185* | 5.84 | 5.7 | 0.9 | 135 | 0.4 | 0.1 | 2.9 |
| 7 | 23 | - | - | 1.16 | 7.2 | 2.1 | 17 | 0.7 | <0.1 | 6 |
| 9 | 23 | 1.1 | - | 1.16 | 5.3 | 1.4 | 1 | 0.2 | <0.1 | 2.4 |
| 10 | 16 | 0.8 | 0.34 | 1.61 | 6 | 1.8 | 85 | 0.4 | 0.3 | 4.1 |
| 11 | 20 | 1 | - | 0.22 | 10.6 | 4.4 | 6 | 0.7 | 0.4 | 5.8 |
| 12 | 13 | 0.5 | 0.060* | 0.03 | 2.9 | 0.7 | 165 | 0.1 | 0.1 | 7.1 |
| 12' | 7 | 0.5 | 0.072* | 0.23 | 4.3 | 0.2 | 115 | <0,1 | <0.1 | 3.5 |
| 13 | 18 | 0.9 | 0.143 | 1.41 | 4.6 | <0.2 | 85 | 0.1 | 0.1 | 4.6 |
| 14 | 27 | - | - | 2.14 | 10.1 | 3.4 | 4 | 0.3 | <0.1 | 5.1 |
| 15 | 17 | 0.9 | 0.125* | 0.13 | 6 | 1.2 | 170 | 0.2 | <0.1 | 11 |
| 16 | 26 | - | - | 0.11 | 8.5 | 3.4 | 3 | 0.2 | <0.1 | 3.4 |
| 17 | 15 | 0.9 | 0.089* | 1.96 | 3.6 | 0.4 | 85 | <0,1 | 0.2 | 5.8 |
| 18 | 34 | - | - | 3.11 | 9 | 3.3 | 1 | <0,1 | <0.1 | 1.8 |
| 19 | - | - | - | 1.84 | - | - | - | - | - | - |
| 20 | 15 | 0.8 | 0.203 | 2.62 | 4.7 | 0.6 | 180 | <0,1 | 0.1 | 6.3 |
| 21 | 21 | 0.7 | 0.34 | 0.54 | 4.9 | <0.2 | 115 | <0,1 | 0.4 | 3.6 |
| 23 | 12 | 0.8 | 0.042 | 0.07 | 3.5 | <0.2 | 26 | <0,1 | 0.1 | 5.5 |
| 24 | 12 | 0.6 | 0.149 | 0.89 | 3.4 | <0.2 | 200 | <0,1 | <0.1 | 2.6 |
| 24' | 8 | 0.7 | 0.107 | 5.14 | 3.2 | 0.9 | 120 | <0,1 | <0.1 | 3.4 |

* échantillons filtrés sur filtre sans N
Les paramètres marqués d'un - n'ont pu être analysés faute de volume suffisant.

Annexe 3 : Résultats de l'analyse bactériologique dans les percolats récupérés dans les bougies (26 octobre 1999).

| Echantillons | Coli total nb/100 ml | Coli fécaux nb/100 ml |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 3 | 0 | 0 |
| 3' | 0 | 0 |
| 4 | 10 | 10 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 300 | 300 |
| 9 | 10 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 |
| 12' | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 |
| 24' | 0 | 0 |

Annexe 4 : analyses des eaux réalisées et à prévoir.

| Date | Eaux d'entrée et de sortie | | | | | | Percolats | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------|------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| | 15 08 99 | 29 09 99 | M A R S | M A I | J U I L | A O U T | S E P T | 05 10 99 | 26 10 99 | D E C | J A N V | F E V R | M A R S | A V R | M A I | J U I N | J U I L | A O U T | S E P T | O C T | N O V | D E C | |
| N _k , NO ₃ , NH ₄ | R | R | X | X | X | | X | R | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| P _{tot} , OrthoP | R | R | X | X | X | | X | R | X | | | | | | | | | | | | | | |
| Conductivité | | R | X | X | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K, Ca, Mg, Na | R | R | X | X | X | | X | R | X | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Cl, SO ₄ , HCO ₃ | R | R | X | X | X | | X | R | X | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| pH | R | R | X | X | X | | X | R | X | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| MES | R | | X | X | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DCO | R | R | X | X | X | | X | | | | | | | | | | | | | X | | | |
| DBO ₅ | R | R | X | X | X | | X | | | | | | | | | | | | | X | | | |
| COT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg | R | | | | | | X | R | | | | | | | | | | | | X | | | |
| Colli fécaux, totaux, Strept. fécaux | R | | | | | | X | R | | | | | | | | | | | | X | | | |

R: analyse Réalisée

X : analyse à réaliser