



INSTITUT
TECHNOLOGIQUE

Phytoremédiation et phytoépuration : de nouvelles perspectives pour les taillis à courtes rotations

Encore peu développées en France, les techniques de dépollution et d'épuration par les plantations forestières denses pourraient se développer dans les années à venir. Leur dimension environnementale et les avantages socio-économiques qu'elles sont censées apporter plaident en leur faveur, d'autant plus que leur recours a été inscrit dans les lois du Grenelle de l'Environnement.

Cet article rend compte des expérimentations que FCBA conduit dans ce domaine.

Pour contacter les auteurs :

Jean-Yves Gautry
FCBA Station Centre-Ouest
Domaine des Vaseix
87430 Verneuil sur Vienne
Tél. 05.55.48.48.10
Mail jean-yves.gautry@fcba.fr

Alain Bailly
FCBA Pôle Sylviculture Avancée
71 Route d'Arcachon
33610 Cestas
Tél. 05.57.88.82.31
Mail alain.bailly@fcba.fr

Notre pays comptait en 2010 plus de 250 000 anciens sites industriels ayant accueilli une activité polluante (hydrocarbures, métaux lourds ou ETM¹, solvants, etc.). Ces sites sont susceptibles de créer des nuisances ou des risques particuliers pour l'homme et l'environnement. C'est pourquoi les pouvoirs publics ont engagé une action pour environ 4 000 d'entre eux, pouvant conduire à des opérations de dépollution.

Parmi les techniques envisagées, figure la phytoremédiation, une technologie végétale, basée sur les capacités des plantes à extraire ou à bloquer des polluants. Ses principaux avantages sont de ne pas modifier l'environnement parce qu'elle utilise des processus naturels, et de coûter de 10 à 100 fois moins cher que les méthodes conventionnelles d'excavation et de traitement (Ademe, 2006). Ses points faibles sont la lenteur du procédé de décontamination (plusieurs années) et l'absence de filière globale incluant le traitement des plantes jusqu'au stade ultime.

Cette technique a été expérimentée sur le peuplier cultivé en taillis, dans le cadre du projet de recherche PHYTOPOP. Par rapport aux espèces annuelles utilisables en phytoremédiation (dites plantes hyper-accumulatrices), les espèces ligneuses ont l'avantage de produire une plus grande quantité de biomasse et d'explorer le sol sur une plus grande profondeur. D'autre part, la valorisation énergétique de ces taillis dans des chaudières adaptées représente une vraie alternative par rapport aux cultures agricoles à vocation alimentaire. Le peuplier est d'autre part un bon compromis sur trois caractéristiques : vitesse de croissance, rusticité et facilité de culture.

La pollution de l'eau résultant des usages domestiques (toilettes, cuisine, machine à laver, etc.) représente une autre forme de pollution, plus diffuse mais non moins dommageable à l'environnement. Elle représente environ

¹ ETM : Eléments-Trace Métalliques (communément appelés métaux lourds)



INSTITUT
TECHNOLOGIQUE

150 litres d'eau usée par habitant et par jour, sous forme de matières organiques, d'azote et de phosphore auxquels s'ajoutent des milliards de germes et des ETM. Après passage dans une unité de traitement, l'eau est restituée au milieu naturel suivant des normes de rejet fixées par la législation. A ce stade, l'idée d'utiliser des eaux usées épurées pour irriguer des cultures constitue une étape supplémentaire dans la protection de la ressource en eau. Les taillis à courtes rotations peuvent être ce dernier étage de traitement avant le rejet 0, et procurer une quantité non négligeable de biomasse pour différents usages dont les bioénergies.

FCBA s'intéresse depuis plusieurs années à la biomasse produite par les taillis sur ces sols dégradés ou irrigués avec des effluents peu chargés. Plusieurs dispositifs ont été mis en place avec pour objectif de mesurer l'efficacité dépolluante et d'apporter des réponses globales sur la faisabilité du système.

Définitions

Phytoépuration des eaux : cette technique consiste à faire circuler des eaux usées au travers de racines de végétaux qui, en association avec le sol et les microorganismes, sont capables d'absorber les éléments minéraux issus de la décomposition de la matière organique, mais aussi d'autres catégories de polluants. Dans le cas des taillis à courtes rotations, l'irrigation est faite à partir d'eaux usées épurées.

La **phytoremédiation** (grec phyto : plante, latin remedium : corriger un méfait) est l'utilisation de plantes vertes et de leur microbiote associé, d'amendement du sol et de techniques agricoles pour éliminer, contenir ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux (Cunningham, 1995). Schématiquement deux stratégies sont développées : soit on cherche à réduire la mobilité des polluants en les stabilisant et les séquestrant (phytostabilisation), soit on réduit leur teneur dans le sol en les absorbant ou en les dégradant (phytoextraction ou phytodégradation).

Le projet PHYTOPOP

► Les objectifs

L'objectif général du projet est de mieux exploiter les potentialités du peuplier dans le domaine de la phytoremédiation. Plus spécifiquement les objectifs de ce projet se déclinent suivant trois axes :

- évaluation des itinéraires culturaux et des capacités de phytoremédiation de géotypes cultivés dans les conditions françaises ;
- préconisations pour une valorisation énergétique de la biomasse efficace et respectueuse de l'environnement (devenir des polluants) ;
- recherche et caractérisation de gènes d'intérêt en phytoremédiation.

Le travail de FCBA s'est concentré sur les deux premiers objectifs.

Le projet PHYTOPOP est un projet de recherche financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre d'une action PRECODD. Coordonné par l'Université de Nancy, ce projet a associé six partenaires (FCBA, COFELY, le CEA de Cadarache, le CNRS de Gif-sur-Yvette et l'INRA d'Orléans). Démarré en 2007, ce projet s'est terminé en juin 2011.

Outre l'évaluation de l'efficacité dépolluante de différents cultivars de peuplier, deux autres volets ont été étudiés dans ce projet :

- la valorisation bioénergétique de la biomasse produite avec tests de combustion pour donner une indication sur le cheminement des ETM,
- les mécanismes impliqués dans le transport et le stockage des ETM dans les organes pérennes.

► Les sites expérimentaux

L'étude a porté sur deux terrains touchés par des contaminations polymétalliques, l'un sur sol sableux (Bessancourt, plaine de Pierrelaye dans le Val-d'Oise), l'autre sur sol argileux (Leforest, site près de l'ancienne usine de Métaleurop dans le Pas-de-Calais).

Le premier site est pollué par le déversement d'eaux usées de la région parisienne pendant près d'un siècle. Le second a été pollué par les rejets

atmosphériques de plusieurs usines avoisinantes, dont une spécialisée dans le traitement des métaux non ferreux. Ces deux sites sont fortement contaminés par le plomb, le cadmium, le zinc et le mercure (uniquement sur le site de Bessancourt pour ce dernier).

Les polluants métalliques apportés par les eaux usées de la ville de Paris ont été progressivement incorporés dans l'horizon superficiel, soit par infiltration, soit par les labours annuels. La mise en œuvre de plans de surveillance des cultures et des récoltes issues des périmètres pollués a été initiée en 2005 et s'inscrit dans une optique de « promotion des modes de production respectueux de la santé et de l'environnement ». La reconversion durable des sols pollués par les ETM est orientée dorénavant vers des productions non alimentaires.

Le site industriel de Métaeurop a cessé son activité en 2003 et les activités et occupations du sol sont réglementées depuis cette date dans le cadre d'un Projet d'Intérêt Général (PIG). Malgré cette fermeture, les sols de l'usine sont encore fortement pollués par le cadmium, le plomb et le zinc, ainsi que par d'autres ETM sur une surface d'environ 120 km². Par exemple, les concentrations mesurées sont 39 et 71 fois plus élevées pour Pb et Cd que celles d'un sol agricole de référence (Douay et al, 2008).

► **Les dispositifs de terrain mis en place**

Le choix s'est arrêté sur 14 clones de peupliers (cultivars) appartenant à plusieurs espèces (*Tableau 1*) dont la plupart sont utilisés en populiculture classique. Ces différents clones ont été conduits selon deux itinéraires de taillis :

- Taillis à courtes rotations (TCR) : plantation à 1 000 plants/ha, exploitation de petits billons vers 7/8 ans ;
- Taillis à très courtes rotations (TTCR) : plantation à 10 000 plants/ha, exploitation de petites perches vers 3/4 ans.

Nom du clone	Espèce botanique
Bakan	<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>
Fritzi Pauley	<i>P. trichocarpa</i>
Muur	<i>P. x euramericana</i>
Skado	<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>
Trichobel	<i>P. trichocarpa</i>
Vesten	<i>P. x euramericana</i>
Dvina	<i>P. deltoides</i>
I-214	<i>P. x euramericana</i>
Lena	<i>P. deltoides</i>
Soligo	<i>P. x euramericana</i>
Triplo	<i>P. x euramericana</i>
Dorskamp	<i>P. x euramericana</i>
Flevo	<i>P. x euramericana</i>
Koster	<i>P. x euramericana</i>

Tableau 1 : Origine botanique des cultivars utilisés sur les essais de terrain du projet PHYTOPOP (P = populus, P. x = peuplier hybride)

Les dispositifs ont été implantés sous forme de placeaux carrés au centre desquels les mesures et analyses sont réalisées régulièrement (*Figure 1*).



Essai de Bessancourt (95001)

essai de dépollution de sites avec des taillis de peuplier

Date de plantation: 16 au 19 avril 2007

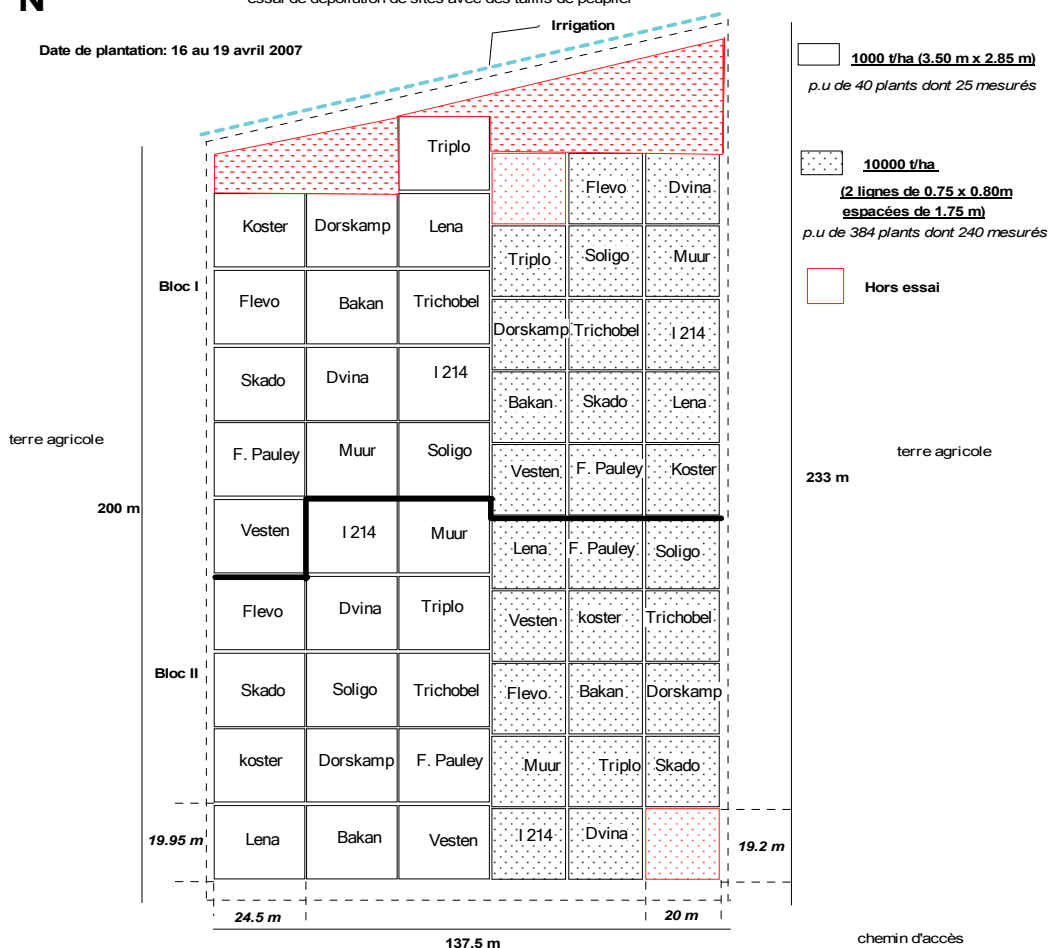


Figure 1 : Répartition des différents cultivars sur le site de Pierrelaye en mode TCR (1 000 t/ha) et TTCR (10 000 t/ha) sur une surface de 3 ha composée de 2 répétitions (blocs I et II) pour chaque mode de culture avec 14 clones par bloc

Le potentiel de phytoremédiation du peuplier a pu être évalué sur la partie TTCR du site de Bessancourt à partir des paramètres du sol et de la biomasse.

Les teneurs en ETM initiales du sol ont été déterminées à partir d'un « point zéro » puis après récolte, et cela dans chaque plateau élémentaire, en

distinguant les éléments facilement extraits par les plantes (phytodisponibles) de ceux retenus dans les matières organiques.

Les capacités de phytoextraction des différents cultivars après une rotation ont été obtenues en combinant deux paramètres (biomasse x concentration en ETM) et cela pour chaque compartiment (feuilles, branches, tronc) choix de l'espèce.

Enfin, le bois récolté sur sols pollués a été utilisé dans une chaudière expérimentale identique dans son principe à des chaudières industrielles.

▶ **Principaux résultats**

- Les données de biomasse recueillies montrent que les cultivars les plus productifs produisent autant que ces mêmes cultivars dans des contextes non pollués.
- Le peuplier possède un potentiel accumulateur important de métaux, en particulier le zinc et le cadmium, mais il varie en fonction du cultivar (*Figure2*). Ce potentiel est principalement lié à la production de matière sèche mais aussi à la capacité de concentration dans les tissus.
- Des cultivars apparaissent plus intéressants pour la phytostabilisation et la production de biomasse peu contaminée. Ce sont des cultivars productifs mais peu accumulateurs.
- Les analyses révèlent un appauvrissement généralisé de la fraction biodisponible des ETM dans le sol, mais pas d'impact sur la fraction liée aux matières organiques.
- En utilisant un dispositif de filtration efficace sur les cheminées de chaudières, il est possible de contenir les polluants dans les cendres et de maintenir ainsi les émissions dans l'atmosphère à un seuil très inférieur au seuil réglementaire.

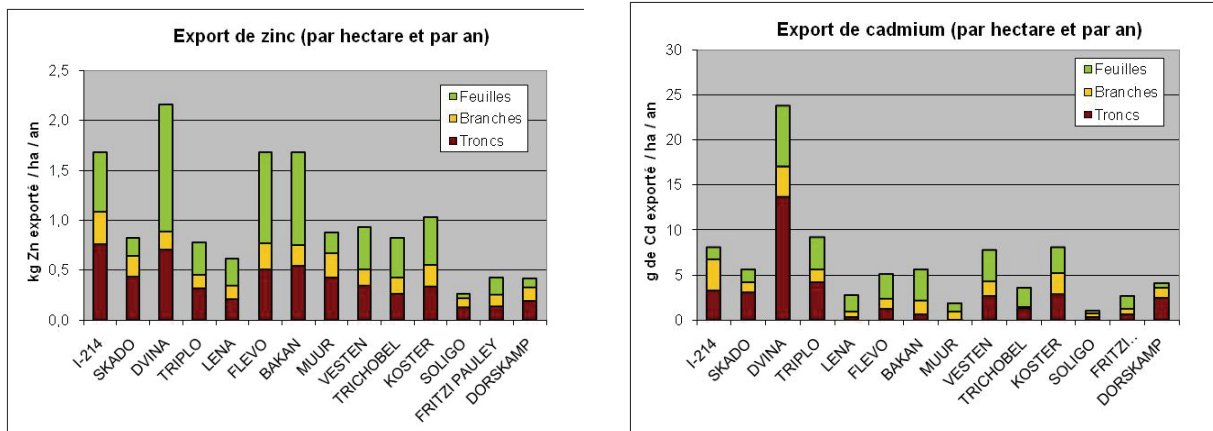


Figure 2 : Capacités d'exportation de zinc et de cadmium (mg/kg de matière sèche) des 14 cultivars de peupliers sur le site de Pierrelaye, parcelle TCCR

Les résultats obtenus après la première récolte de TCCR sont en accord avec ceux rencontrés dans la littérature et confirment des durées de dépollution estimées à plusieurs décennies. Il est toutefois trop tôt pour conclure sur le choix de l'itinéraire le plus approprié dans une optique de phytoextraction.

Les investigations vont se poursuivre pour estimer notamment :

- l'efficacité de la dépollution lors de la seconde rotation, compte tenu du développement du système racinaire,
- la part de polluants stockée dans les racines.

Vers l'irrigation de taillis à courtes rotations avec des eaux usées épurées

L'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation de zones boisées ou d'espaces verts paysagers vise une épuration complémentaire des eaux traitées en station d'épuration avant d'être rejetées dans un cours d'eau. Conduite correctement, cette opération présente un double avantage : atteindre le rejet zéro, objectif qui pourrait devenir obligatoire pour toutes

les communes dans les années à venir et produire une matière première renouvelable et non alimentaire.

► **État des connaissances**

Les systèmes utilisant les plantations forestières comme traitement tertiaire des eaux usées ont été développés dans des pays où la réglementation impose des rejets nuls dans les eaux superficielles (États-Unis, Australie, Nouvelle-Zélande) et où les déficits hydriques sont avérés. D'autres pays comme la Suède couplent clairement ce traitement à la production d'énergie renouvelable.

Les espèces les plus communément utilisées dans ces systèmes sont réputées exigeantes en eau et en nutriments, azote et phosphore principalement, et aptes à produire des quantités importantes de biomasse. Parmi celles-ci on peut citer les saules, les peupliers et les eucalyptus, mais d'autres espèces dites secondaires ont aussi de fortes potentialités, telles que l'aulne, le séquoia ou le frêne.

La conduite en taillis, par la forte densité des tiges, apparaît comme la sylviculture la mieux adaptée à cet usage, assurant à la fois une bonne épuration et une production importante de biomasse dès les premières années d'implantation.

Les retours d'expériences montrent globalement une bonne efficacité dépolluante (demande chimique en oxygène ou DCO en abrégé, nitrates, phosphates...) par l'absorption par le sol et la végétation (arbres plus végétation d'accompagnement) et une production de bois nettement augmentée.

Le fonctionnement d'un tel système peut être perturbé si les principes de base ne sont pas respectés (effluents peu chargés, sol adapté, doses ajustées...). Dans ce cas, on peut assister aux phénomènes suivants :

- colmatage du sol,
- augmentation de la salinité du sol,
- saturation en azote du système.

► **Aspects réglementaires**

- Les taillis à courtes et très courtes rotations ont le statut de cultures agricoles dans la mesure où leur cycle de production n'excède pas 20 ans.
- L'arrêté de janvier 1998 pris en application du décret du 8 décembre 1997 définit les règles selon lesquelles les épandages de boues et d'effluents issus du traitement des eaux usées peuvent être effectués sur les sols agricoles.
- L'arrêté du 2 août 2010 « *fixe les prescriptions sanitaires et techniques applicables à l'utilisation d'eaux usées traitées à des fins d'irrigation de cultures ou d'espaces verts.* »

C'est la charge organique de l'effluent qui définit le cadre dans lequel peut s'effectuer l'épandage : plan d'épandage (arrêté du 8 janvier 1998) ou demande d'autorisation (arrêté du 2 août 2010). Dans les deux cas, les opérations sont validées par un arrêté préfectoral.

- La directive Nitrates s'applique également à cet usage des taillis compte tenu de la charge en azote des effluents.

► **Le principe de fonctionnement**

Les eaux usées provenant des réseaux collectifs et non collectifs sont envoyées dans une station d'épuration, installée à l'extrémité du réseau de collecte. Ces eaux usées sont ensuite traitées selon plusieurs procédés

(primaires, physico-chimiques, biologiques) qui assurent à chaque stade l'extraction des polluants.

Les eaux usées ainsi épurées (environ 90 % des polluants sont éliminés) contiennent encore des fertilisants comme l'azote et le phosphore, qui peuvent être utilisés à des fins d'irrigation de parcelles de taillis (TCR ou TTCR), plutôt que d'être envoyées dans une lagune de décantation puis dans le lit d'un cours d'eau.

Comme le montre la Figure 3, en régime d'été, les eaux usées épurées provenant de la station d'épuration s'écoulent dans un bassin tampon, à partir duquel va s'effectuer l'irrigation de la plantation. Dans le cas présent, les eaux usées proviennent des réseaux collectifs et non collectifs (matières de vidange).

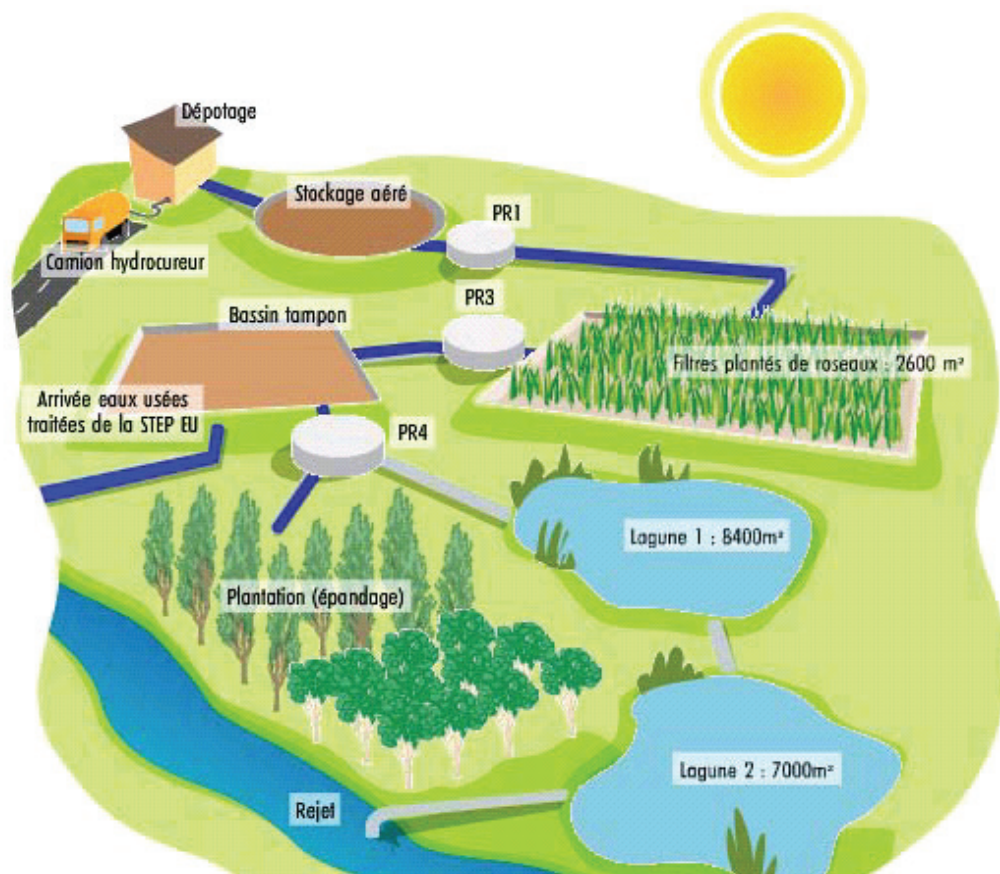


Figure 3 : Schéma de réutilisation d'eaux usées épurées sur une plantation en régime d'été

(Source : CCTVA - www.epuration-negrepelisse.com)
Illustration réalisée par l'agence de communication Pixfolio
www.pixfolio.net

FCBA assure le suivi expérimental d'une plantation de quatre hectares de TCR de peupliers et d'eucalyptus, située à proximité de la station d'épuration de la commune de Négrepelisse (Tarn-et-Garonne). Cette plantation sera bientôt irriguée avec les eaux usées épurées selon la technique des filtres plantés de roseaux (FPR). Cette expérimentation présente la particularité d'utiliser les arbres comme traitement tertiaire des matières de vidange avant rejet dans le milieu naturel, et constitue en cela

une première du genre en France. L'irrigation va démarrer au printemps 2012 et les premiers résultats devraient être connus en 2013/2014.

► **Quels paramètres faut-il prendre en compte ?**

Un projet d'irrigation de taillis avec des eaux usées épurées doit tenir compte d'un ensemble de paramètres qu'il convient d'analyser dans une étude préalable, en particulier sur les points suivants :

- **choix du site** : proximité de la station, surface disponible, foncier, présence d'habitations,
- **dispositions réglementaires** : cadre législatif applicable,
- **caractéristiques du site** : données climatiques (pluviométrie, évapotranspiration), vents dominants, topographie, accès et proximité de la station d'épuration,
- **sol** : contexte géologique, profondeur et texture, capacité d'infiltration, principales propriétés chimiques (pH, teneurs en éléments),
- **choix de l'espèce et de la variété** : adaptation, croissance, aspects paysagers, culture mixte (arbres plus prairie),
- **itinéraire de culture du taillis** : densité, espacements (penser à l'exploitation future), risques de prédation par le gibier, entretiens,
- **quantité et qualité des eaux épurées** : volumes quotidiens, teneur en azote, phosphore, sodium,
- **choix d'un matériel d'irrigation** : ajutage ou micro-aspersion,
- **dose journalière et durée annuelle d'irrigation** : à établir à partir des données climatiques, de consommation estimée du peuplement et des caractéristiques des eaux d'irrigation,
- **exploitation du bois et débouchés**

Les problèmes posés dans ce type de projet se situent au carrefour de plusieurs domaines (administratif et réglementaire, technique, sociologique, économique). Le porteur du projet (collectivité ou industriel) devra en intégrer toutes les dimensions et bien s'informer, sinon le projet risque d'aboutir à un échec irréversible.

▶ **Perspectives**

La phytoépuration des eaux usées par les arbres offre des possibilités de développement des taillis sur des terrains dans les communes rurales qui ne rentrent pas en concurrence avec les productions alimentaires.

L'expérimentation conduite par FCBA permettra d'obtenir des informations sur l'impact de cette pratique tant au niveau du sol que de la quantité et la qualité de la biomasse produite.