

Amélioration génétique des cultures de saules arbustifs (*Salix* spp.) pour la production de bioénergie et la protection de l'environnement aux Etats-Unis

L.B. Smart, T.A. Volk, J. Lin, R.F. Kopp, I.S. Phillips, K.D. Cameron, E.H. White et L.P. Abrahamson

Un programme d'amélioration génétique du saule vise à améliorer sa croissance, à optimiser ses caractères importants et à réduire les coûts de production, afin d'assurer la viabilité à long terme de sa culture pour la production d'énergie, la restauration des sites dégradés et l'amélioration de la qualité de l'eau.

Les saules arbustifs à croissance rapide (*Salix* spp.) peuvent être améliorés génétiquement, afin de devenir des cultures énergétiques spécialisées et constituer, dans les régions tempérées, un produit durable de remplacement des combustibles fossiles. Ils peuvent également servir à un grand nombre d'applications autres que la production de bioénergie, y compris la phytoremédiation (l'utilisation de plantes pour nettoyer les sols contaminés et restaurer les sites dégradés), la gestion des éléments nutritifs, l'établissement de haies vives contre la neige et la stabilisation des berges des cours d'eau. Pourtant, malgré leur capacité exceptionnelle de produire de la bioénergie et de stimuler le développement rural (Volk *et al.*, 2004), ils n'ont pas encore été adoptés à grande échelle aux Etats-Unis, en raison de leurs coûts de production élevés par rapport aux combustibles fossiles utilisés actuellement (Tharakan *et al.*, 2005). La production de nouveaux clones pourrait réduire le coût des cultures de saules en accroissant les rendements en biomasse et en optimisant la xylochimie pour permettre un prétraitement à faible niveau d'intrants, le fractionnement et la conversion dans des usines de bioraffinage.

Le programme d'amélioration du saule réalisé au College of Environmental Science and Forestry de la State University of New York (SUNY-ESF) est le plus important d'Amérique du Nord; il utilise plus de 730 obtentions recueillies sur des sites naturels dans l'ensemble du territoire des Etats-Unis et fournies par des collaborateurs internationaux. Le présent article décrit le travail d'amélioration contrôlée réalisé auprès du SUNY-ESF, qui a produit des croisements dont la croissance s'était

améliorée de 20 à 40 fois par rapport à un cultivar standard. Les auteurs estiment que de tels résultats, s'ils sont confirmés par des essais régionaux menés à long terme, pourraient encourager l'adoption généralisée des cultures de saules aux Etats-Unis.

CULTURES DE SAULES ARBUSTIFS À COURTE RÉVOLUTION

Les plantations de saules sont faciles à établir efficacement à partir de boutures dormantes, à l'aide de systèmes mécaniques. Elles produisent rapidement un système racinaire diffus, qui est dominé par de fines racines. Les saules arbustifs répondent au traitement en taillis après la première saison de végétation par la production prolifique de nouvelles tiges au cours de la deuxième saison. La biomasse ligneuse aérienne est récoltée pendant la saison de dormance après une révolution de trois ou quatre ans, au moyen d'une récolteuse-hacheuse autotractée, dotée d'une tête de fauchage spécialisée. Après la récolte, on applique de modestes quantités d'engrais azotés pour maintenir la fertilité du sol et assurer une croissance vigoureuse. Pendant le printemps qui suit chaque récolte, la partie restante du plant de saule, à savoir la souche, réagit en produisant de nombreuses nouvelles tiges, amorçant ainsi un nouveau cycle de croissance qui pourra être exploité dans les trois ou quatre années qui suivent. On peut répéter ce cycle pour six à huit récoltes, avant de devoir remplacer la souche.

Dans le nord-est des Etats-Unis, les plantations sont établies à l'aide de clones de saule choisis pour leur résistance à la rouille, à l'attaque des herbivores (cerfs et lapins) et aux dommages causés par les insectes, qui sont actuellement les principales menaces. Des systèmes

Lawrence B. Smart, Juan Lin, Richard F. Kopp, Ingrid S. Phillips et Kimberly D. Cameron travaillent auprès du Department of Environmental and Forest Biology, et Timothy A. Volk et Edwin H. White auprès du Department of Forest and Natural Resources Management, au College of Environmental Science and Forestry de la State University of New York (SUNY), Syracuse, Etat de New York (Etats-Unis). Lawrence P. Abrahamson est associé aux deux départements.



Plantation de saules dans un champ de seigle d'hiver, à l'aide d'une planteuse mécanique reliée à un tracteur

forestiers similaires à courte révolution soumis à un traitement en taillis sont également mis en place dans d'autres parties du monde, à l'aide d'espèces autres que le saule qui sont adaptées aux conditions locales.

APPLICATIONS

Bioénergie

On peut recourir à un grand nombre de techniques différentes pour convertir en électricité et chaleur la biomasse du saule. Cette dernière peut être brûlée avec d'autres types de biomasse ligneuse et avec le charbon, afin de produire de l'électricité dans des centrales électriques opérant sous l'impulsion de turbines à vapeur. Le remplacement de 10 à 15 pour cent du charbon par de la biomasse de saule réduit les émissions de soufre et d'azote d'un pourcentage à peu près équivalent. La biomasse de saule peut également être brûlée avec des copeaux de bois dans de petits fours à bois, afin de générer de l'électricité et/ou de la vapeur à des fins commerciales ou pour le chauffage des habitations de la région. Les nouvelles technologies permettront une conversion plus efficace de l'énergie, grâce à l'emploi de petits gazéificateurs actionnant des groupes électrogènes à moteur diesel ou à étincelles, ou des microturbines.

Du moment que le carbone émis dans l'atmosphère par la combustion de la biomasse a été absorbé pendant la croissance du saule au cours des trois années précédentes – à la différence du carbone libéré par la combustion du charbon, qui a été capturé et fossilisé il y a des millions d'années –, il n'y a aucune augmentation de l'anhydride carbonique atmosphérique lorsque l'électricité est produite par la combustion de la biomasse de saule.

Les rapports d'énergie sont favorables: pour chaque unité d'énergie d'origine fossile servant à la production et au transport du saule et à sa conversion en électricité, de 11 à 16 unités d'énergie électrique utilisable sont produites (Heller, Keoleian et Volk, 2003).

Les efforts de recherche et développement en cours donnent naissance à des méthodes efficaces d'extraction et de conversion de l'hémicellulose et de la cellulose tirées du bois, qui peuvent être transformées en éthanol pour la production de combustibles ou d'autres produits actuellement dérivés du pétrole.

Génie écologique

Comme espèces pionnières, les saules arbustifs s'adaptent bien aux milieux âpres et jouent un rôle efficace dans la phytoremédiation. Leurs taux relativement élevés de transpiration et leur capacité de tolérer les inondations saisonnières, grâce à leurs racines qui mesurent plusieurs mètres de long, sont autant d'avantages notamment en milieu humide, où le contrôle des infiltrations souterraines est essentiel pour bloquer les contaminants. Les saules servant à accumuler les métaux lourds du sol peuvent être brûlés dans les centrales électriques; les métaux lourds se

concentrent dans les cendres qui doivent être éliminées correctement.

Les saules arbustifs indigènes ou naturalisés peuvent aussi être utilisés pour améliorer la qualité de l'eau et maintenir ou restaurer les écosystèmes riverains. Grâce à leur croissance rapide et leurs courtes révolutions, ils peuvent absorber les ruissellements azotés ou phosphorés en excès provenant des activités agricoles (Adegbidi *et al.*, 2001). Certains de ces éléments nutritifs sont éliminés au moment de la récolte, et le recrû rapide que consent le taillis exige des taux élevés et continus d'absorption de nutriments. Les systèmes racinaires pérennes diffus et étendus des saules contribuent à réduire l'érosion du sol des berges des cours d'eau, alors que les arbustes fournissent un habitat à la faune sauvage et améliorent le paysage.

Une nouvelle application consiste à établir des haies vives contre la neige, à proximité des routes battues par le vent. Les saules piègent la neige poudreuse, améliorant ainsi l'état des routes et réduisant les coûts et les impacts environnementaux associés aux traitements mécaniques ou chimiques répétés destinés à éliminer la neige.

AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DES CULTURES DE SAULES ARBUSTIFS DANS LE NORD-EST ET LE MIDWEST DES ÉTATS-UNIS

Caractères recherchés et clones de saule améliorés

Le programme SUNY-ESF a pour objectifs à long terme la production régulière de nouvelles familles de saules arbustifs par l'amélioration génétique et la sélection de clones améliorés qui possèdent des séries particulières de caractères favorisant leur utilisation dans des applications pratiques déterminées (Kopp *et al.*, 2001).

Mise à l'essai d'un système de récolte des saules arbustifs, au moyen d'une récolteuse-hacheuse autotractée munie d'une tête de fauchage modifiée



Pour consentir leur commercialisation dans de grandes plantations bioénergétiques, les clones de saule doivent produire des hauts rendements sur une diversité de sites au cours d'un grand nombre d'années, afin de réduire le coût de production de leur biomasse. Le programme SUNY-ESF recherche des clones qui possèdent une xylochimie optimale assurant un traitement à faible niveau d'intrants, la séparation des composantes du bois (cellulose, hémicellulose et lignine) et la conversion en biocombustibles dans des bioraffineries.

Pour les applications relatives au génie écologique, y compris le nettoyage des sols contaminés et le contrôle du lessivage des éléments nutritifs, on choisit des saules arbustifs indigènes et naturalisés capables d'absorber activement les métaux lourds, aptes à soutenir une communauté microbienne pouvant dégrader les contaminants organiques, dotés de taux élevés de transpiration pour le contrôle hydrologique, et caractérisés par une croissance racinaire prolifique capable de stabiliser le sol et d'absorber l'excès d'azote et de phosphore provenant des engrais agricoles ou des eaux usées. Les recherches limitées menées jusqu'ici sur l'utilisation des saules pour éliminer les métaux lourds ont montré que la capacité des différentes espèces et hybrides de saules d'absorber les métaux fait preuve d'une grande variabilité (Landberg et Greger, 2002; Pulford, Riddell-Black et Stewart, 2002; Vyslouzilova *et al.*, 2003). Il est très probable qu'une variation génétique existe entre les clones de *Salix* vis-à-vis de leur capacité d'occuper différents types de sols contaminés et de promouvoir leur correction. De même, les clones se caractérisent par des taux variables de transpiration (Weih et Nordh, 2002), trait important aux fins du contrôle hydrologique de l'eau souterraine contaminée. La sélection des clones de *Salix* qui peuvent être utilisés dans des applications liées à la phytoremédiation peut se faire pour des sites particuliers et pour des objectifs de correction déterminés.

Création d'une collection d'amélioration génétiquement diversifiée

Le Programme SUNY-ESF reçoit différents clones recueillis dans le nord-est et le Midwest des Etats-Unis. Des collabo-

Recrû de nouvelles tiges sur des souches de *Salix eriocephala* au printemps, après la récolte hivernale à la suite d'un taillis



L. SMART

rateurs en Chine, au Japon, au Canada, en Nouvelle-Zélande, en Ukraine et en Suède ont fourni des obtentions à cette collection. Cette dernière a également acquis un certain nombre de clones provenant de pépinières commerciales. Depuis 1994, le SUNY-ESF a archivé plus de 730 obtentions de *Salix* spp., dont la plupart ont été collectées et multipliées à partir de plantes présentes dans leur habitat naturel. Parmi les espèces les plus communes de cette collection, figurent *S. eriocephala*, *S. purpurea* et *S. nigra* (voir tableau). On surveille ces plantes de façon régulière pour en identifier les caractéristiques, y compris le nombre de tiges, le diamètre de la tige, la hauteur et la vulnérabilité aux maladies et aux dommages causés par les insectes nuisibles. On tient également compte de la forme de croissance de la plante, car un comportement compact et un fût vertical facilitent la récolte mécanisée. Du fait que les saules sont dioïques (chaque plante produit des fleurs soit mâles soit femelles), leur genre est déterminé. Sur la base de ces évaluations, des individus sont choisis comme parents pour des croisements contrôlés. La technologie génétique moléculaire fondée sur la variation de séquences d'ADN permet d'estimer la diversité génétique des obtentions comprises dans la collection, de connaître le code génétique de clones particuliers et de contribuer à identifier l'espèce.

Une collection visant à étayer un programme d'amélioration à long terme doit comprendre une fourchette aussi large que possible de diversité génétique. Deux espèces importantes du programme SUNY-ESF sont *S. eriocephala*, originaire du nord-est des Etats-Unis, et *S. purpurea*, introduite aux Etats-Unis il y a plus de

200 ans par des colons européens pour la fabrication d'articles de vannerie. Pour caractériser la diversité des populations à partir desquelles les individus destinés à la collection d'amélioration ont été choisis, les chercheurs ont recueilli, le long des cours d'eau de l'Etat de New York, des échantillons de plus de 1 000 individus de ces deux espèces et en ont analysé la variation génétique. Les résultats de ces analyses moléculaires montrent que, s'il est vrai que les populations naturelles des deux espèces sont très différentes, il n'en demeure pas moins que les populations de *S. eriocephala*, l'espèce indigène, font preuve d'une diversité génétique supérieure à celle de *S. purpurea*, l'espèce introduite. De fait, certaines populations de cette espèce naturalisée consistent en individus du même clone qui se sont établis par multiplication végétative (J. Lin et L.B. Smart, données inédites). Une fois complétées, ces analyses indiqueront si les collections réalisées pour établir la pépinière d'amélioration représentent un

Tableau 1. Nombre d'obtentions des espèces de *Salix* les mieux représentées dans la collection d'amélioration du SUNY-ESF

<i>Salix</i> spp.	Nombre d'obtentions
<i>S. alba</i>	16
<i>S. bebbiana</i>	12
<i>S. candida</i>	4
<i>S. cordata</i>	7
<i>S. discolor</i>	7
<i>S. eriocephala</i>	296
<i>S. exigua</i>	8
<i>S. lucida</i>	26
<i>S. miyabeana</i>	11
<i>S. nigra</i>	95
<i>S. purpurea</i>	131
<i>S. sachalinensis</i>	12

sous-ensemble approprié de la diversité génétique naturelle.

Outre l'évaluation de la diversité génétique au niveau de la population, les chercheurs du Programme SUNY-ESF ont aussi collecté des données sur l'héritabilité de certains caractères de base de *S. eriocephala*. Des mesures prises au cours d'essais dupliqués ont montré que l'héritabilité est faible à modérée pour des caractères importants aux fins de la production de biomasse (Phillips, 2002). Ces résultats laissent entendre que, lorsque dans les croisements on utilise comme parents des clones à haut rendement, il est fort probable que les descendants auront aussi un haut rendement grâce aux gènes dont ils ont hérités. Les moyennes par famille des descendances de première génération sont en général supérieures à celles des parents, ce qui montre que les descendances issues de pollinisations contrôlées peuvent faire preuve d'hétérosis. Les études relatives aux descendances de deuxième génération menées en serre ou sur le terrain ont souligné l'absence d'une dépression de consanguinité notable. Ces résultats cumulés indiquent que le croisement contrôlé et la sélection peuvent déterminer des améliorations régulières et croissantes des rendements de *S. eriocephala* (Phillips, 2002).

Pollinisation contrôlée et hybridation

Depuis 1998, des techniques extraire le pollen du saule ont été mises au point

au SUNY-ESF (Kopp *et al.*, 2002), et des pollinisations contrôlées ont été réalisées. Les croisements effectués en 1998 et 1999, afin d'obtenir de nouveaux cultivars à haut rendement pour l'établissement de plantations bioénergétiques ont produit plus de 2 000 individus, que l'on a plantés lors d'études de terrain pour en évaluer le rendement, la forme et la résistance aux insectes nuisibles. Lorsque la hauteur des tiges a été mesurée à la fin de la première saison faisant suite au taillis, de nombreux individus avaient poussé de près de 3 m et étaient supérieurs de plus d'un écart type à la moyenne de leurs plants frères (voir figure). Les hybrides de *S. miyabeana* avec *S. sachalinensis*, *S. purpurea* et *S. viminalis* ont donné naissance à des descendants dont la croissance était de 120 à 150 pour cent supérieure à celle d'un clone standard de *S. dasyclados* (SV1), lors d'essais de sélection répétés. Les hybrides intraspécifiques de *S. purpurea* ont fait preuve d'améliorations spectaculaires par rapport aux moyennes des parents. Du fait qu'une augmentation de 20 pour cent dans le rendement en biomasse des cultures de saule abaisse de 13 pour cent le coût de la biomasse livrée (Tharakan *et al.*, 2005), ces succès précoces renforceront la viabilité économique de l'utilisation de saules pour la production d'énergie.

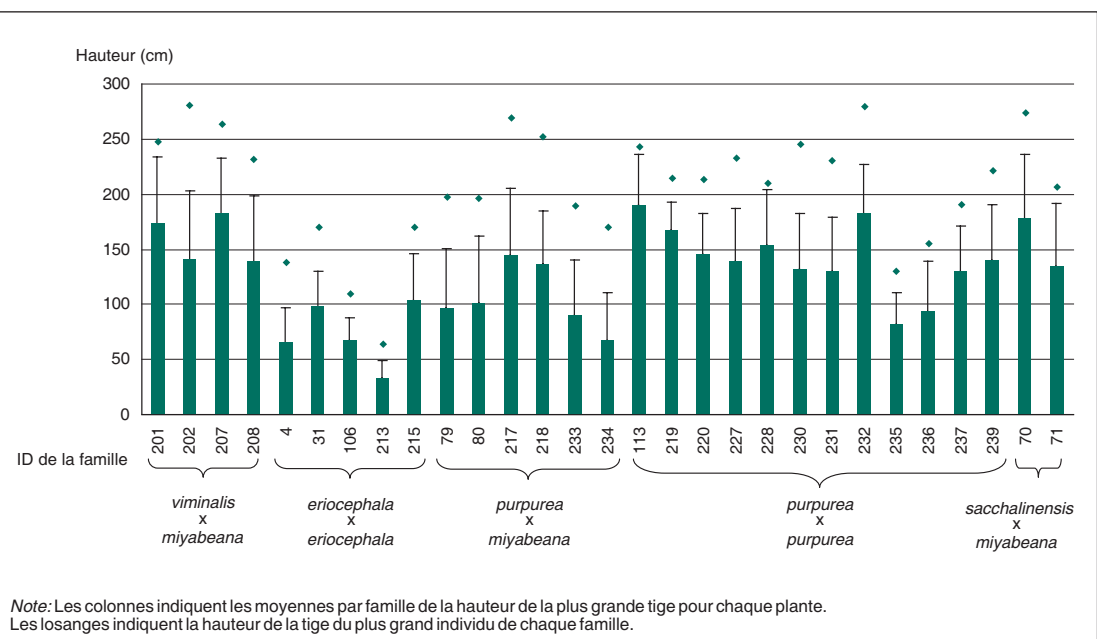
Des essais sont en cours pour examiner un sous-ensemble formé des clones de saule les plus prometteurs pour une vaste

gamme d'utilisations. Les premiers résultats montrent que les clones qui produisent le plus de biomasse ne sont pas nécessairement les mieux adaptés à d'autres applications. Les sélections futures porteront sur une gamme élargie de caractéristiques, afin de permettre l'identification de clones convenant aux multiples usages auxquels se prêtent les saules arbustifs.

PERSPECTIVES POUR UNE ADOPTION GÉNÉRALISÉE DES CULTURES DE SAULES AUX ÉTATS-UNIS

Aux États-Unis, des années de recherche, développement et démonstration ont affiné le système de production de cultures de saules établies à des fins de biomasse, ont aidé à quantifier ses avantages pour l'environnement et le développement rural, ont montré ses applications dans un grand nombre de systèmes de conversion, et ont entraîné des changements de politique menant à l'utilisation de cultures énergétiques spécialisées pour la production d'énergie renouvelable. Cependant, des obstacles s'opposent à l'application à grande échelle du système, y compris le manque de capitaux à investir dans l'équipement nécessaire et l'absence d'engagement, de la part des parties prenantes, à utiliser la biomasse tirée des saules pour la production de chaleur et d'électricité. Ces obstacles représentent un grave risque pour les producteurs qui désirent établir des plantations énergétiques de saules.

Moyenne par famille des hauteurs des tiges de clones produits par croisement contrôlé l'année qui suit le taillis



Sélection de clones de saule qui se développeront vigoureusement dans une décharge industrielle

Les saules arbustifs pourraient jouer un rôle important dans un site gravement dégradé près de Syracuse, dans l'Etat de New York, aux Etats-Unis. Ce site contient des volumes considérables de déchets laissés par l'usine Solvay, qui produit du carbonate de sodium pour la fabrication de verre et de décolorants. Le système Solvay utilise comme intrants le sel et le calcaire, et produit comme déchets du chlorure de calcium. Une grande partie de ces déchets issus des opérations de l'usine Solvay entre 1887 et 1986 ont été déposés sous forme de boue liquide dans de grands bassins de décantation à proximité du lac Onondaga. Les dépôts de déchets qui en résultent contiennent de fortes concentrations de pH et de sel. A l'heure actuelle, les sels lessivés à partir des déchets de l'usine ruissellent dans les baies environnantes et le lac Onondaga, produisant des volumes anormalement importants de chlorure et de calcium, qui perturbent profondément l'écosystème du lac.

Les saules arbustifs sont l'une des premières espèces pionnières ligneuses à avoir été établies dans ces âpres conditions (Hewlett, 1956). Les plantations à haute densité de ces saules sur des déchets, auxquels ont été ajoutées diverses substances organiques, sont actuellement testées pour évaluer leur capacité de réduire ou d'éliminer l'eau filtrant à travers les dépôts de déchets, grâce à l'interception des précipitations, à l'évapotranspiration accrue et à une plus grande capacité de rétention de l'eau du sol. Un premier examen effectué sur 38 clones de saules établis sur des dépôts de déchets dans une serre et des essais de terrain ont montré qu'il existe parmi les clones de grandes différences entre la biomasse aérienne et la biomasse souterraine. Plusieurs clones provenant de croisements contrôlés au SUNY-ESF produisaient un volume de biomasse supérieur à celui d'un cultivar standard, le clone SV1 de *S. dasyclados*.

Les recherches menées au SUNY-ESF continuent à se concentrer sur la réduction des coûts de production et la démonstration de la viabilité à long terme des systèmes comprenant des cultures de saules. Des essais sont en cours pour vérifier dans les plantations commerciales les augmentations de rendement des nouveaux clones provenant du programme d'amélioration. Un ensemble de divers facteurs – rendements accrus découlant de ces travaux, révision récente des politiques permettant aux agriculteurs de certaines régions des Etats-Unis de cultiver et d'exploiter le saule sur des terres mises hors production, dégrèvements fiscaux fédéraux et étatiques et hausse des prix des combustibles fossiles – ont promu la viabilité économique des cultures de saules.

L'utilisation à grande échelle des saules arbustifs pour la phytoremédiation dépendra des données à long terme obtenues des projets de démonstration et des cas d'essai montrant le nettoyage et la restauration réussis de sols contaminés réalisés à un coût beaucoup plus faible. Si les ingénieurs-conseils, les opérateurs d'installations municipales et les organes de réglementation peuvent se

convaincre que ces systèmes sont fiables et efficaces, les avantages économiques stimuleront l'utilisation des systèmes de phytoremédiation à base de saules.

L'établissement réussi et généralisé de plantations de saules exigera la formation judicieuse et efficace des producteurs et consommateurs potentiels, l'investissement dans des entreprises et l'engagement communautaire à adopter cette énergie renouvelable et durable tirée de la biomasse. ♦



Bibliographie

- vegetation on the Solvay waste beds*. Mémoire de maîtrise. Syracuse, New York, Etats-Unis, SUNY College of Forestry.
- Kopp, R.F., Maynard, C.A., Rocha De Niella, P., Smart, L.B. et Abrahamson, L.P.** 2002. Collection and storage of pollen from *Salix* using organic solvents. *American Journal of Botany*, 89: 248-252.
- Kopp, R.F., Smart, L.B., Maynard, C.A., Isebrands, J.G., Tuskan, G.A. et Abrahamson, L.P.** 2001. The development of improved willow clones for eastern North America. *Forestry Chronicle*, 77: 287-292.
- Landberg, T. et Greger, M.** 2002. Interclonal variation of heavy metal interactions in *Salix viminalis*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21: 2669-2674.
- Phillips, I.S.** 2002. *Quantitative genetics of traits predictive of biomass yield in first- and second-generation Salix eriocephala*. Mémoire de maîtrise. Syracuse, New York, Etats-Unis, SUNY College of Environmental Science and Forestry.
- Pulford, I.D., Riddell-Black, D. et Stewart, C.** 2002. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: The potential for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 4: 59-72.
- Tharakan, P.J., Volk, T.A., Lindsey, C.A., Abrahamson, L.P. et White, E.H.** 2005. Evaluating the impact of three incentive programs on cofiring willow biomass with coal in New York State. *Energy Policy*, 33: 337-347.
- Volk, T.A., Verwijst, T., Tharakan, P.J., Abrahamson, L.P. et White, E.H.** 2004. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 411-418.
- Vyslouzilova, M., Tlustos, P., Szakova, J. et Pavlikova, D.** 2003. As, Cd, Pb and Zn uptake by *Salix* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements. *Plant, Soil and Environment*, 49: 191-196.
- Weih, M. et Nordh, N.E.** 2002. Characterising willows for biomass and phytoremediation: growth, nitrogen and water use of 14 willow clones under different irrigation and fertilisation regimes. *Biomass and Bioenergy*, 23: 397-413. ♦
- Adegbidi, H.G., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D. et Bickelhaupt, D.H.** 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*, 20: 399-411.
- Heller, M.C., Keoleian, G.A. et Volk, T.A.** 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, 25: 147-165.
- Hewlett, J.D.** 1956. *The development of*