

Construction et développement d'une filière de production d'écotypes ligneux pour l'application des techniques végétales à la renaturation des berges de cours d'eau

Druart Philippe, Leclercq Martine, Joussemet Marie-Anne, Bender Jerry, Adant Stéphan, De Le Court Bernard, Mertens Patrick, Hussson Claude, Chandelier Anne, Mingeot Dominique, Hausman Jean-François, Evlard Aricia, Bajji Mohammed, Delcarte Jérôme, Lambot Francis

Résumé

Les activités décrites dans cet article ont été menées dans le cadre des projets Interreg successifs intitulés «ECOLIRI» et «ECOLIRIMED»*. Elles avaient pour but de contribuer à l'application du génie végétal pour résoudre des problèmes purement hydrauliques rencontrés avec les cours d'eau non navigables de la région transfrontalière comportant la Wallonie, la Lorraine française et le Grand-Duché de Luxembourg, en ciblant la stabilisation des berges, la sauvegarde de la biodiversité et le maintien de la qualité des eaux de surface.

Des écotypes d'aulne glutineux, de saules et de frênes ont été rassemblés à partir de prospections menées sur les berges de rivières faisant partie des bassins du Rhin, de la Meuse et, dans une moindre mesure, de l'Escaut, constituant ainsi des variétés multiclones d'écotypes ligneux. Si le frêne a été rapidement abandonné suite à l'émergence de la chararose, une filière de production d'aulnes et de saules a été mise en œuvre. Elle repose sur l'existence de parcs à bois, la mise au point de conditions de bouturage, d'élevage et de conservation optimisées des plants ainsi que sur des règles de gestion et de diffusion du matériel végétal; l'objectif étant de permettre un approvisionnement régulier et fiable, en plants destinés aux programmes de renaturation des ripisylves et de stabilisation durable des berges de cours d'eau. La multiplication des écotypes est conduite à partir de parcs à bois gérés par des institutions publiques et entretenus selon les pratiques horticoles qui maintiennent la capacité rhizogène du matériel végétal. Traités lorsque nécessaire en vue d'une bonne reprise, les plants sont délivrés en fonction des conditions d'accessibilité aux sites de végétalisation. Bien que la qualité génétique reste inexplorée, la valeur phénotypique (port, vigueur) est connue. Outre l'origine certifiée de tous les clones, certains aulnes ont été repérés pour leur tolérance au dépérissement causé par *Phytophthora alni* alors que d'autres aulnes et saules étaient notés pour leur tolérance

* <http://ecoliri.cra.wallonie.be>

aux éléments-traces métalliques à la suite d'évaluations spécifiques réalisées en complément. Plusieurs aulnes issus de graines collectées sur des arbres sans symptôme en site infecté par *P. alni* ou produits *in vitro* pour induire des propriétés de phytoremédiation par variation somaclonale, ont été intégrés aux collections représentatives de la diversité naturelle. Dans ces conditions, le matériel végétal proposé doit pouvoir s'adapter naturellement aux risques biologiques prévisibles pour une durabilité satisfaisante des travaux impliquant les techniques végétales non seulement pour la renaturation de berges, mais aussi, la végétalisation de zones humides ou écologiquement équivalentes. Il contribuera à valoriser les paysages et à préserver, voire même à améliorer l'équilibre des écosystèmes de la région. La réimplantation de ces essences complémentaires doit permettre, à moyen terme, de mieux raisonner la gestion des phénomènes d'érosion et d'inondation.

Mots-clés : génie végétal, protection des berges, écotype, zone ripicole, renaturation phytoremédiation, inondation.

Creation and development of a woody ecotype production sector for the revitalisation of river and stream banks using plant engineering techniques

The activities described in this article took place in the context of two successive Interreg projects, namely ECOLIRI and ECOLIRIMED. In both cases the aim was to contribute to the application of plant engineering to solving purely hydraulic problems on non-navigable waterways in the cross-border area spanning Wallonia, Lorraine and the Grand Duchy of Luxembourg. Work focused on stabilising banks, preserving biodiversity and maintaining surface water quality.

Ecotypes of black alder, willow and ash were collected after exploring river banks in the Rhine, Meuse and, to a lesser extent, Escaut basins, thus forming multiclinal varieties of woody ecotypes. Whereas the outbreak of ash dieback led to the species promptly being discarded, a production sector for alder and willow was established. It is based on the existence of timber yards, the development of optimized conditions for cutting on a large scale, for plants growth training and for conservation as well as rules of management and distribution of the plant material, the aim being to allow supply regular and reliable in plants for renaturation programs of riparian areas and sustainable stabilization of river banks. Ecotypes were multiplied from stock orchards run by public institutions and managed in accordance with horticultural practices that maintain the plant material's rhizogenic capability. After treating, if necessary, to promote plants regrowth, the plants were delivered according to the accessibility of the different revegetation sites. Although the genetic quality remains unexplored, the phenotypic value (habit and vigour) is known. Apart from the certified origin of all the clones, some alders were picked out for tolerance to blight caused by *Phytophthora alni*, whereas other alders and willows were found to be tolerant to metal trace

elements following specific, additional assessments. Several black alders either grown from seeds collected from symptomless trees on sites infected by *P. alni* or produced *in vitro* to induce phytoremediation properties by somaclonal variation were introduced into the collections representing natural diversity. In these conditions the plant material supplied must be able to adapt naturally to the foreseeable biological risks for the satisfactory sustainability of the plant engineering-based work, not only for revitalising river banks but also revegetating wet or ecologically equivalent areas. The material will help to enhance the countryside and to maintain or even improve the balance of the region's ecosystems. In the medium term, replanting with these complementary species will result in more effective management of erosion and flooding.

Keywords: plant engineering, riverbank protection, ecotypes, renaturation, phytoremediation, flooding, riparian zones.

8.1 Introduction

Pendant des siècles, les cours d'eau et leurs ripisylves ont procuré l'énergie hydraulique, le bois de chauffage et finalement l'hydroélectricité aux populations riveraines qui assuraient par la même occasion l'entretien des berges. Au cours des dernières décennies, ces ressources énergétiques ont perdu de leur intérêt et la végétation ligneuse délaissée a progressivement encombré certains lits de cours d'eau, contribuant ainsi aux inondations locales et à l'érosion.

Par ailleurs, les aménagements coûteux réalisés dans le passé en vue d'une meilleure gestion physique des cours d'eau, n'apportent pas toujours les améliorations souhaitées tandis que des études scientifiques démontrent l'intérêt écologique de restaurer les écosystèmes et de préserver la ripisylve (Lambot et al., 2013).

Face à cette situation, les responsables de la gestion des cours d'eau s'accordent à développer des techniques végétales pour réhabiliter et stabiliser les berges, mariant ainsi les contraintes de l'hydraulique à celles de l'écologie (Lachat, 1998 ; Lambot et al., 2013). Le choix des végétaux se porte prioritairement sur des essences ligneuses complémentaires du point de vue de l'architecture du système racinaire (profond et puissant pour le frêne, traçant pour l'aulne glutineux) et tolérantes aux inondations (pour l'aulne et le saule). Le saule et l'aulne fournissent en même temps des abris stables à la faune piscicole.

À l'entame de nos travaux (2004), les pépinières privées délivraient du matériel végétal d'origines étrangères ne présentant aucune fiabilité de traçabilité. Cette pratique d'importation de plants présente des risques écologiques à différents niveaux :

- L'introduction de nouveaux agents pathogènes n'ayant pas cohabités avec les essences indigènes et pouvant provoquer des épidémies (Chandelier et al., 2013).
- Une mauvaise adaptation des plants aux conditions climatiques et édaphiques régionales.
- Une « pollution » génétique du matériel forestier indigène par le pollen d'origine étrangère.

À l'opposé, les écotypes peuplant nos régions de manière dynamique et évolutive présentent une meilleure garantie d'adaptation et donc de durabilité. Toutefois, il n'existe aucun approvisionnement structuré de ces écotypes ni de connaissances suffisantes relatives à leur état d'équilibre par rapport aux conditions environnementales actuelles.

Il était donc nécessaire, dans un premier temps, de construire une filière d'approvisionnement fiable et régulier de ces ligneux d'origine certifiée (Projet Interreg III ECOLIRI). Dans un deuxième temps, la mise en œuvre de cette filière devait être organisée pour assurer une production à plus grande échelle et pour permettre la diffusion des plants dans le respect d'une diversité évolutive des espèces (Projet Interreg IV-A ECOLIRIMED).

8.2 Construction de la filière d'écotypes ligneux

Le lit, les berges et les rives de chaque cours d'eau forment un tout avec les nappes phréatiques pour chaque bassin versant. La stabilisation durable des berges a des répercussions globales tant sur la capacité hydraulique des cours d'eau, et donc sur le contrôle des inondations, que sur la pérennité des habitats aquatiques. Certaines maladies, dispersées par l'eau, demandent une harmonisation des mesures de prévention sur l'ensemble des réseaux susceptibles d'être touchés. Une intégration transfrontalière permet le maillage écologique non seulement entre les sites mais aussi avec les zones limitrophes.

La zone transfrontalière envisagée comporte la Wallonie (la province du Luxembourg étant prioritaire), le Grand-Duché de Luxembourg et la Lorraine française. De par le passé industriel de cette « Grande Région » d'Europe, les éléments-traces métalliques (ETM) qui s'y trouvent disséminés, risquent de contaminer l'environnement au travers des eaux de surfaces et des sédiments. Du fait des coûts prohibitifs des techniques physico-chimiques de remédiation et de leurs impacts délétères sur l'environnement, l'ingénierie végétale devient aujourd'hui la meilleure solution pour préserver les écosystèmes vis-à-vis des ETM.

La tolérance du matériel végétal aux ETM est donc à considérer pour confiner et mieux contrôler ces polluants inaltérables et dangereux, à la fois pour les écosystèmes

et la santé publique (Bajji et al., 2013; Evlard et al., 2013a; Evlard et al., 2013b) avec à la clé la production d'une biomasse potentiellement valorisable (Delcarte et al., 2013). La constitution de parcs à bois pour les projets de replantation comporte la prospection des bassins, suivie de la fixation et de l'établissement des individus repérés. Tandis que la collecte de l'aulne glutineux débute directement dans trois composantes de la « Grande Région », celle des saules et frênes est seulement menée en Wallonie.

8.2.1 La prospection des bassins versants

Dans un premier temps, il était primordial de rassembler un maximum de provenances différentes, en vue d'assurer une représentativité aussi large que possible de la biodiversité existante. Chez l'aulne en particulier, on pouvait s'attendre à ce que cette contrainte permette de découvrir parmi les génotypes collectés, des formes de tolérance ou de résistance à *Phytophthora alni*, l'agent pathogène omycète responsable du dépérissement des aulnes (Chandelier et al., 2013).

□ L'aulne

Côté lorrain, la prospection des aulnes a été menée à l'échelle des bassins versants Rhin–Meuse couvrant les quatre départements en plus de l'Alsace. Ainsi tenait-elle compte du rôle de l'eau de rivière dans la dissémination des graines. Les sites de récolte ont été sélectionnés sur base d'une enquête épidémiologique relative au dépérissement, initiée dès 2004 (Chandelier et al., 2013). Ils ont été caractérisés par le type de cours d'eau, l'environnement local et la prévalence de la maladie due à *Phytophthora alni*. De leur côté, les gestionnaires de cours d'eau locaux ont contribué au repérage d'autres sources de matériel équivalent. L'aire de répartition des sites de récolte était assez large : 36 sites répartis sur 26 cours d'eau différents (**Tableau 8.1**). Pour les rivières les plus importantes de la région, la distance séparant deux sites était d'au moins 4 km. Pour un site, la distance séparant le premier du dernier arbre prélevé était en général d'1 km au maximum et la distance moyenne entre deux arbres de 70 m.

En Wallonie et au Luxembourg, les critères de sélection visuelle étaient limités au seul moment de prospection : état sanitaire général, port peu érigé, âge des rejets de souches éventuels. Au total, 60 sites ont été visités sur 42 cours d'eau (**Tableau 8.1**). Ils appartiennent en majorité au bassin de la Meuse (34), mais aussi aux bassins du Rhin (4) et de l'Escaut (4). Au Luxembourg, il y a 11 cours d'eau et autant de sites prospectés dans le bassin du Rhin.

Dans les trois régions, le protocole initial prévoyait de récolter 20 à 30 pousses apicales sur 5 à 10 individus par site.

Tableau 8.1. Origines des variétés multiclonales d'aulnes «LIRIA».

a) LIRIA W : 370 clones de 42 cours d'eau de Wallonie.

Bassin	Sous-bassin	Cours d'eau	Nombre	Localité
Escaut	Escaut-Lys, Haine, Senne	Escaut, Anneau, Trouille, Samme	21	Obigies, Pecq, Quiévrain, Givry, Spienne, Seneffe.
Meuse	Amblève, Lesse, Meuse amont et Oise, Meuse aval, Ourthe, Sambre, Semois-Chiers	Lienne, Salm, Almache, L'Homme, Lesse, R. du Brou, Wamme, Eau Noire, Houille, Molinee, Samson, Viroin, Hoyoux, Mehaigne, Soile, Aisnes, Chéoux, Ourthe occid., Ourthe orient., Biesme, Eau d'Heure, Hantes, Ligne, Orneau, Ry de Fosses, Ry d'Yves, Thyria, Ture, Mellier, Messancy, Rulles, Ton, Chiers, Meuse, Vire	323	Stoumont, Grand-Halleux, Trois-Ponts, Gembes, Forrières, Daverdisse, Resteigne, Rochefort, Frêne, Harsin, Nismes-Pesche, Vencimont, Maredsous, Gesves, Vierves-sur-Viroin, Havelange, Fallais, Moha, Meeffe, Blier, Bomal, Chéoux, Ferme-au-Pont, Lavacherie, Tenneville, Wyompont, Achouffe, Houffalize, Rensiwez, Aiseau-Presles, Jamioux, Mont s/Marchienne, Leval-Chaudeville, Merbes-le-Château, Montignies St Christophe, Saint-Martin, Onoz, Fosses-la-Ville, Yves-Gomezée, Solre s/Sambre, Marbehan, Messancy, Habay-la-Neuve, Tintigny, Ethe, Saint-Mard, Latour
Rhin	Moselle	Attert, Our, Sûre, Wiltz	26	Attert, Schoenberg, Grumelange, Martelange, Radelange, Wisembach, Benonchamps
Total	11	42	370	60

b) LIRIA F : 251 clones de 26 cours d'eau de Lorraine française.

Meuse	Semois-Chiers	Chiers, Meuse	14	Charency-Vezin, Vigneul-sous Montmédy, Inor
Rhin	Moselle	Avière, Bièvre, Bist, Blies, Blette, Boler, Canner, Durbion, Esch, Fave, Kieselback, Madon, Meurthe, Mortagne, Moselle, Neuné, Nied allemande, Nied française, Plaine, Rulles, Sarre, Sarre rouge, Schwalbach, Vologne	237	Frizon, Sarrebourg, Creutzwald, Mignéville, Blies-Guersviller, Gavisse, Budange, Gugnécourt, Vaxoncourt, Thionville, Martincourt, Frapelle, Ambacourt, Thiaville, Fraize, Rehainviller, Autrey, Eloyes, Millery, Pierre la Treiche, Gondreville, Laveline-devant-Bruyère, Guinglange, Pange, Pont à Chaussy, Allarmont, Rugney, GrosBliederstrof, Gosselming, Sarraltroff, Nitting, Volmunste, Granges-sur-Vologne
Total	2	26	251	36

c) LIRIA L : 116 clones de 11 cours d'eau du Grand-Duché de Luxembourg.

Rhin	Sûre Supérieure	Clerve, Irbich, Wiltz, Woltz, Sûre	55	Schuttburgermühle-Clervaux, Munshausen, Merkholtz, Maulusmühle, Bockholtz
	Sûre Inférieure	Blees, Ernzt Blanche, Our, Tandelerbaach, Tirelbaach	51	Selz-Keiermillen, Ermsdorf-Reisdorf, Wallendorf, Selz, Gilsdorf
	Alzette	Wark	10	Warken
Total	3	11	116	11

❑ Les saules et les frênes

Les écotypes de saules wallons proviennent de 56 sites répartis sur 54 cours d'eau faisant partie des mêmes bassins cités plus haut à savoir la Meuse (45), le Rhin (3) et l'Escaut (6) (**Tableau 8.2**) tandis que ceux du frêne sont issus de 15 sites et 13 cours d'eau wallons du seul bassin de la Meuse (**Tableau 8.3**).

8.2.2 La fixation

La méthode de fixation a été adaptée à l'espèce végétale. Le bouturage à bois sec a été privilégié pour le saule tandis que le bouturage feuillé a été choisi pour l'aulne et le frêne.

Chez le saule, des plançons ou des rameaux dormants ont été récoltés en hiver sur des individus adultes. Ils ont été stockés en chambre froide (+ 2 °C) jusqu'au printemps, puis placés en couches extérieures (**Figure 8.1**) avec ou sans pré-traitement auxinique.

Chez l'aulne, des fragments apicaux de jeunes pousses feuillées de l'année ont été prélevés entre juin et août (de 2004 à 2009). Ces rameaux sont humidifiés dès leur récolte et gardés au frais jusqu'au traitement auxinique. Celui-ci est pratiqué au CRA-W le jour même pour le matériel collecté en Wallonie et au Grand-Duché de Luxembourg ou le lendemain pour le matériel de Lorraine transmis par colis postal conditionné (boîte isolée et réfrigérée).

La méthode d'enracinement mise au point au CRA-W chez *Prunus* pour la multiplication à grande échelle de sujets porte-greffes nanisants du cerisier a été initialement appliquée (Tréfois, 1988).

Tableau 8.2. Origines de la variété multiclonale d'écotypes de saules «LIRIS».

LIRIS W : 491 clones de 54 cours d'eau de Wallonie.

Bassin	Sous-bassin	Cours d'eau	Nombre	Localité
Escaut	Dyle-Gette	Dyle, Grande Gette, Lasnes, Petite Gette	40	Genappe, Jodoigne souveraine, Lasnes, Orp-le-Grand
	Escaut-Lys	Escaut, Trouille	22	Obigies, Givry
Meuse	Amblève	Barechin	10	Vielsalm
	Lesse	Almache, L'Homme, Biran, R. Bonfosse, R. du Brou, R. d'Ave, R. Rochettes, Wamme	75	Gembes, Bras, Rochefort, Forrières, Opont, Wellin, Arville, Hargimont
	Meuse amont et Oise	Molignée, Bocq, Samson, Strouvia	44	Maredsous, Spontin, Faux-les-Tombes, Stru-Haltinne
	Meuse aval	Hoyoux, Soile	23	Verlée, Meeffe
	Ourthe	Trouille, Marchette, Néblon, Ourthe occid., Ourthe orient., R. Cens, R. Chardeneux, R. Erneuville, R. Floumont, R. Heure, R. Naives, R. Tenneville, Serine Fagne	115	Bertogne, Givry, Marche-en-Famenne, Jenneret, Tenneville, Bournimont, Gouvy, Cens, Chardeneux, Erneuville, Ortho, Heure, Melreux, Champlon, Vaux-Chavanne
	Sambre	Ligne, Orneau, Thyria, Ture	36	Saint-Martin, Onoz, Corroy-le-Château, Thy-le-Château, Solre s/Sambre
	Semois-Chiers	Attert, Chevratte, Chiers, Mellier, Messancy, Panwé, R. Aleines, Rulles, R. du Plane, R. du Wé, Semois, Vierre, Vire	99	Attert, Bellefontaine, Torgny, Marbehan, Messancy, Tournay, Bertrix, Rulles, Poncel Sivry, Les Bulles, Chiny, Latour
Rhin	Moselle	Our, Sûre, Wiltz	27	Scönberg, Tintange, Benonchamps
Total	10	54	491	56

Tableau 8.3. Origines de la variété multiclonale de Frênes «LIRIF W».

LIRIF W : 59 clones de 13 cours d'eau de Wallonie.

Bassin	Sous-bassin	Cours d'eau	Nombre	Localité
Meuse	Lesse	Lesse	1	Daverdisse
	Meuse aval	Mehaigne, Soile	8	Moha, Meeffe
	Sambre	Eau d'Heure, Ligne, Orneau, Ruisseau d'Yves, Thyria	20	Berzée, Saint-Martin, Onoz, Yves-Gomzée, Thy-le-Château
	Ourthe	Aisnes, Ourthe occ., Ourthe orient	18	Bomal, Durbuy, Esneux/Tilff, Ferme-au-Pont, Houffalize
	Semois-Chiers	Semois, Étang trapperie	12	Bouillon, Habbay-la-Vieille
Total	5	13	59	15

Comme l'aptitude à l'enracinement des boutures feuillées diminue plus ou moins rapidement avec le vieillissement du pied-mère, il a parfois été nécessaire de recourir à certaines techniques de «rajeunissement» (ou de «juvénalisation») pour récupérer un état physiologique réactif à la rhizogenèse. Elles consistent à provoquer l'émergence de nouvelles pousses vigoureuses par un recépage, une taille des branches, des incisions au niveau du tronc, voire un abattage radical de l'arbre. En fait, la coupe des pieds-mères au ras du sol est la plus efficace à la réussite du bouturage, les rejets situés très près du système racinaire exprimant alors les capacités d'enracinement les plus marquées. Chez certains ligneux, ces pratiques s'accompagnent aussi, de la restauration de caractères distinctifs de leurs semis telles que les feuilles lobées chez l'eucalyptus ou la restitution de l'orthotropie des pousses chez les conifères.

Le frêne est généralement plus récalcitrant à enraciner que l'aulne. Pour cette espèce, un greffage en fente sur des semis d'un an a été le plus souvent privilégié en préparation du bouturage feuillé. Le bois de l'année récolté en hiver et conservé en chambre froide (2 °C), fournissait les greffons en mai, la jonction entre les cambiums du semis et du greffon s'établissant endéans les deux mois qui suivent la manipulation. Dépendant de la réussite du greffage, la méthode présente deux inconvénients majeurs à savoir : la préparation des pieds-mères destinés aux greffages et la nécessité de plusieurs années de culture du fait d'arrêts de croissance récurrents chez le frêne. Répété en cascade, ce greffage produit une amélioration progressive de la réponse à l'enracinement des boutures chez diverses espèces forestières qui ne peuvent être sélectionnées qu'au stade adulte (essais initiés par Franclet dès la fin des années 1970 sur des résineux et étendus ensuite aux feuillus à l'Association Forêt Cellulose, France).

Chaque arbre a été enregistré avec ses coordonnées géographiques (GPS) et étiqueté au sein d'une filière appelée «ECOLIRI» (pour «Écotypes ligneux de rivières») avec :

- l'initiale de l'essence récoltée : «A» pour Aulne, «S» pour Saule, «F» pour Frêne ;
- l'initiale de la région d'origine : «W» pour Wallonie, «F» pour la Lorraine française, «L» pour Grand-Duché de Luxembourg ;
- un numéro d'accession propre.

Si la réussite de la fixation des plançons ou des boutures de saules a été totale, les taux enregistrés pour les boutures d'aulnes issues de rejets de souches se sont situés entre 85 et 100 % et ont atteint 80 % pour les frênes juvénilisés.

8.2.3 Établissement en parcs à clones

Chaque région a créé un parc à bois qui regroupe les aulnes fixés provenant de son territoire. Les arbres y ont été plantés en haie, à raison de quatre copies par clone distantes de 0,5 m dans la ligne et de 0,9 m dans l'interligne (**Figure 8.2**) qui peut être enherbé. En vue de garder des taux d'enracinement élevés, la quasi-totalité des pousses latérales et apicales formées sont taillées chaque hiver.

L'installation du parc à clones lorrain a été prise en charge par AREXHOR depuis 2007 à Roville-aux-Chênes avec le suivi de l'INRA. Au Luxembourg, le parc à clones d'aulnes est installé à Merkholtz près de Wiltz et géré par les gestionnaires publics des cours d'eau.

En Wallonie, les clones d'aulnes ont été implantés à Gembloux, sur des parcelles appartenant au CRA-W. Celles-ci jouxtent les collections de saules et de frênes conduites selon des modalités sensiblement identiques (**Figure 8.2**). Le parc à bois des saules fut constitué à partir de plançons établis en nombre suffisant pour garder quatre copies de chaque clone en place. L'interligne enherbé de 3,5 m permet l'entretien mécanique. Les frênes ont été gardés greffés pour certains ou sur leurs propres racines pour d'autres.

Au terme de la prospection, la collection transfrontalière d'aulnes glutineux totalisait 717 clones provenant de 79 cours d'eau des bassins du Rhin (379 clones), de la Meuse (337 clones) et de l'Escaut (21 clones) (**Tableau 8.1A**). Elle est constituée de trois variétés multiclonales de l'écotype correspondant respectivement aux labels LIRIA W, LIRIA F et LIRIA L à raison de 370, 251 et 116 clones, respectivement. L'écotype fixé provient de 11 sous-bassins couvrant toute la zone transfrontalière.

La collection des écotypes de saules wallons (**Tableau 8.2**) compte 491 clones provenant de 10 sous-bassins dont 9 sont communs aux origines d'aulnes fixées, le sous-bassin de la Dyle-Gette faisant exception.

La collection des frênes fixés (**Tableau 8.3**) se compose de 59 clones wallons provenant des sous-bassins de cinq sous-bassins de la Meuse communs aux écotypes de saules et d'aulnes, nos trois essences ligneuses de ripisylve.

Ces variétés multiclonaux rassemblent le matériel végétal de base pour l'application de l'ingénierie végétale à toute la zone transfrontalière. Elles constituent aussi des conservatoires de diversité génétique pour les zones appauvries et pour l'établissement de vergers à graines éventuels.

8.3 Approvisionnement en matériel végétal d'origine certifiée

Les gestionnaires de cours d'eau comptent sur un approvisionnement régulier, suffisant et fiable en plants de qualité pour répondre aux dispositions communautaires relatives à la gestion de l'hydrologie mais aussi à la qualité de l'eau (Directive Cadre sur l'Eau, 2000/60/CE) et au risque d'inondation (Directive 2007/60 et plan P.L.U.I.E.S en Région wallonne) selon un calendrier serré (Lambot et al., 2013). Ce sont les performances de production et les dispositions de diffusion s'appliquant aux variétés multiclonaux qui détermineront les modalités de fonctionnement de la filière en commençant par la gestion des parcs à bois.

8.3.1 La gestion des parcs à bois

La gestion des parcs à bois se conçoit dans le respect d'une diversité évolutive par rapport à certaines maladies et aux milieux contenant des éléments-traces métalliques qui représentent les risques majeurs pour les écosystèmes. Les variétés multiclonaux ont donc été évaluées à l'aide de marqueurs moléculaires (Mingeot et al., 2013) et d'inoculations ou traitements contrôlés (Chandelier et al., 2013; Evlard et al., 2013; Bajji et al., 2013) respectivement.

❑ Des variétés multiclonaux d'aulnes

Les variétés multiclonaux sont constituées de l'espèce *Alnus glutinosa*. Si, à première vue, les graines de peuplements forestiers régionaux ou celles de vergers à graines rassemblant des individus collectés en bord de cours d'eau, semblaient pouvoir satisfaire les besoins en plants de la zone transfrontalière, la spécificité du port non érigé qui était souhaité pour les berges et le temps nécessaire pour disposer de fructifications significatives, ont favorisé l'option du clonage comme seul moyen d'approvisionnement.

En génétique forestière, la diversité génétique d'une espèce s'évalue à l'aide de plusieurs indicateurs (Kremer, 1994) de nature quantitative, c'est-à-dire liés à l'adaptation, à la croissance ou à la qualité de l'arbre, ou bien de nature qualitative qui

se traduit au niveau du polymorphisme allélique pour des propriétés enzymatiques (isozymes) ou des différences de composition ou de longueur de la chaîne d'ADN (marqueurs moléculaires du type RFLP, RAPD ou microsatellites par exemple).

Même si une forte structuration géographique des populations peut déjà se révéler à l'aide de caractères adaptatifs (phénologie, résistance au froid), une diversité intra-population de haut niveau est généralement reconnue aux ligneux, du fait de leur forte hétérozygotie. Il reste enfin à combiner, dans un même paramètre d'évaluation, la mesure de la diversité intraspécifique à celle de la diversité due à l'écosystème.

Dans notre cas, une étude moléculaire réalisée sur des clones provenant de toute la région (**Figure 8.3**), à l'aide de marqueurs microsatellites, démontre que la diversité génétique de la collection d'aulnes wallonne est bien représentative de celle de la région transfrontalière (Mingeot et al., 2013). Elle se distingue pourtant d'autres populations européennes (origines suédoises) soit par la présence d'allèles plus spécifiques, soit par des fréquences alléliques différentes (Mingeot D., communication personnelle).

À partir des études phytosanitaires menées conjointement au CRA-W et à l'INRA-Nancy, il n'a pas été possible de repérer de types totalement résistants à *P. alni* (Chandelier et al., 2013). Parmi les méthodes d'évaluation étudiées, celle qui s'approchait le plus des conditions naturelles de contamination, à savoir l'immersion du système racinaire de plants issus de semis ou de boutures, s'est révélée la plus fiable. En utilisant cette méthode, une large gamme de réponses a été observée, allant de clones très sensibles à des clones peu sensibles à l'infection. Toutefois, ces résultats doivent être confirmés en conditions d'infection naturelle le long des cours d'eau où la maladie est présente. Ces comportements relatifs permettent au moins d'informer avant toute replantation, du risque potentiellement encouru avec certains clones. De plus, des plants de semis issus d'arbres sans symptômes, originaires de sites wallons contaminés, peuvent être proposés pour les nouvelles plantations (Chandelier et al., 2013).

□ Des variétés multiclones d'écotypes chez le saule

Ici, la seule préoccupation est d'identifier les arbres les plus proches possibles des espèces régionales ainsi que le sexe des clones. La morphologie florale des fleurs mâles et femelles du saule conduit à une première identification au niveau de l'espèce ou groupe d'espèces comparables. D'autres caractères tels que le dimensionnement et le port de l'inflorescence, la morphologie du rameau de l'année hivernant et la morphologie foliaire viennent compléter la détermination. La collection de saule rassemble la plupart des espèces indigènes de Wallonie. Par ordre de fréquence décroissante, on trouve *Salix fragilis* (~27%), *S. caprea* (~20,5%),

S. purpurea (~12,5%), *S. viminalis* (~6%), *S. aurita* (~4%), *S. triandra* (~3%) et *S. alba* (~3%). Les clones sont morphologiquement contrastés, principalement à cause d'un degré d'hybridation avancé des arbres (Mertens et al., 2011). Les arbres femelles sont deux fois plus nombreux que les arbres mâles.

Les conditions édaphiques les plus favorables aux espèces de saules (Mertens, 2011) correspondent aux sols assez acides à neutres avec un état hydrique allant de l'humide au non-sec. *S. viminalis*, *S. fragilis* et *S. triandra* correspondent à ces larges facultés d'adaptation. *S. aurita* et *S. atrocinerea* s'adaptent aux sols très acides à assez acides et non-secs. Sur sols secs mais sans trop d'acidité, *S. caprea* et *S. purpurea* sont mieux adaptés. *S. alba* supporte les sols calcaires et humides sans excès. Ce dernier est héliophile strict comme *S. viminalis*, *S. fragilis* et *S. triandra*. *S. caprea* et *S. purpurea* sont deux espèces de fourrés qui supportent une large gamme de sols y compris les sols lourds pouvant aller de l'extrême humidité à la sécheresse.

S. alba, *S. viminalis*, *S. fragilis* et *S. triandra* sont les plus exigeants en lumière. *S. alba* est plus exigeant en humidité du sol que *S. viminalis*. Cette dernière espèce et *S. triandra* ont des développements et adaptabilités édaphiques comparables.

☐ De la variété multiclonale de frênes : émergence de la chalarose !

Au cours de la collecte des clones de *Fraxinus excelsior* L. sur le territoire wallon, une maladie émergente a été signalée (Chandelier et al., 2011). La chalarose du frêne provoquée par le champignon *Chalara fraxinea* est annoncée comme potentiellement très dévastatrice pour l'espèce. Le risque qu'elle représente pour la stabilisation des berges et la durabilité des végétalisations est non négligeable. Dès 2008, l'année de sa détection en France, il a été préconisé de stopper les plantations pour tous usages. Cette recommandation a été étendue, en attendant une évaluation définitive de l'impact de la maladie.

☐ Saules, aulnes et phytoremédiation

Les aulnes et les saules sont connus pour leur bonne capacité à croître même en sites contaminés par les éléments-traces métalliques (ETM) (Evlard et al., 2013). Une production de biomasse élevée et un système racinaire bien développé s'avèrent des critères de capacité de stabilisation de la pollution en deçà des seuils dommageables pour les équilibres écologiques (Delcarte et al., 2013). Des arbres réimplantés, il est attendu une tolérance suffisante vis-à-vis des ETM véhiculés par les eaux de surfaces ou contaminant les berges afin d'atteindre une colonisation durable des sols contaminés par le système racinaire.

Trente-sept clones d'aulnes de l'espèce *A. glutinosa* (dont 26 LIRIA W, 7 LIRIA L et 4 LIRIA F) et vingt-six clones de saules hybrides LIRIS (composés majoritairement

de *S. fragilis* x *S. alba*) ont été évalués du point de vue de leur comportement en lysimètres sur sol contaminé (boues de dragage) par un complexe de métaux lourds (Evlard et al., 2013). Chez le saule, il a été constaté une mobilisation du plomb et du zinc vers les feuilles. À l'inverse, la teneur en cuivre était plus importante dans les tiges que dans les feuilles. Au regard des concentrations en ETM mesurées dans les tiges, certains clones plus que d'autres montraient toutefois, une meilleure capacité à l'extraction. D'après la littérature, cette variabilité d'extraction serait tout autant d'origine interspécifique qu'intraspécifique (Evlard et al., 2011 ; Evlard et al., 2013). Chez l'aulne, les teneurs en métaux retrouvées dans les tiges étaient moins importantes par rapport à celles retrouvées chez le saule. Les mêmes tendances sont observées pour le cadmium, le zinc et le plomb. Le comportement par rapport au cuivre pourrait être différent. Par ailleurs, des tests réalisés *in vitro* ont confirmé que les aulnes fixeraient le Cd davantage dans leurs racines (Bajji et al., 2013 ; Evlard et al., 2013). Ici, 7 des 15 clones d'aulnes comparés ont montré une différence de tolérance positive. Ainsi, en fonction des contraintes spécifiques des sites contaminés à renaturer, la phytoextraction et la phytostabilisation peuvent être considérées séparément ou bien en association pour concentrer les ETM et prévenir leur dispersion ainsi que les risques écologiques et de santé publique qui y sont associés.

La biomasse étant limitée sur les ripisylves, des stratégies de gestion doivent être proposées. Si une réduction de croissance intervient en présence d'ETM chez le saule, le niveau de tolérance ne doit pas mettre en péril la survie des plants ni la valorisation du bois (Delcarte et al., 2013), que la pollution provienne des sédiments ou de l'eau (Evlard et al., 2013). Les clones accumulant davantage dans les tiges sont toutefois des éléments-clés comme phytoextracteurs. La valorisation de ce type de matériel nécessitera des précautions particulières (Delcarte et al., 2013).

L'application de la variation somaclonale au cours de bourgeonnements adventifs a conduit à créer de la diversité dans la réponse génétique en ce qui concerne la tolérance *in vitro* au cadmium (Bajji et al., 2013). Bien qu'il reste à la confirmer *in situ*, cette variation induite représente un potentiel d'enrichissement de la collection transfrontalière par rapport à l'adaptation aux pollutions envisageables pour cette région industrielle. D'autre part, des clones d'origine allemande sont venus s'ajouter à la collection dans le cadre d'échanges scientifiques et dans le but de les intégrer à des vergers à graines.

8.3.2 La production du matériel végétal pour la végétalisation

Les clones sont donc reproduits par bouturage feuillé pour l'aulne et à bois sec pour le saule. Afin d'assurer l'équilibre génétique de l'approvisionnement avec des plants de qualité, une maîtrise parfaite de la multiplication végétative est nécessaire.

□ Bouturage feuillé chez l'aulne

Chez l'aulne, le bouturage feuillé a été étudié en vue de définir un protocole performant (80 % d'enracinement) pour le plus grand nombre de clones mais aussi un protocole transférable à d'autres essences ligneuses susceptibles d'être impliquées dans les végétalisations.

a) Le matériel végétal, son conditionnement et son support

Les jeunes pousses de l'année (15-25 cm) sont récoltées dans les parcs à bois wallon, français et luxembourgeois pour être confiées au CRA-W qui dispose des installations pour la production. Dès réception, elles sont habillées et trempées dans une solution d'auxine (**Figure 8.4**) indispensable à l'induction du processus rhizogène. Les phases suivantes que sont l'initiation des primordia racinaires et l'allongement des racines ont lieu successivement dans les mêmes conditions de confinement. L'efficacité de l'induction diffère en fonction de la nature chimique du régulateur, sa formulation en solution-mère, sa concentration et la durée du trempage des boutures. L'acide indole-3-butyrique (AIB) et l'acide indole-3-acétique (AIA) dissous dans l'eau, la potasse ou l'alcool ont été employés pour des traitements à 0,5 ; 1 ; 2 et 4 g/l pendant 5 et 10 secondes.

Le développement du système racinaire peut ensuite, être conditionné par la composition du substrat de bouturage, son apport en éléments minéraux et son économie en eau. Un substrat pauvre évitant le manque ou au contraire l'excès d'eau provoquant l'asphyxie radiculaire, convient le plus souvent. Les boutures tolèrent en général, une gamme de pH assez étendue. D'autre part, le meilleur équilibre entre les phases solide, liquide et gazeuse du substrat est recherché à travers différentes associations de composants tels que terreau horticole ou tourbe blonde d'une part et sable de rivière, perlite ou vermiculite d'autre part.

b) La méthode

L'atmosphère entourant les boutures doit rester saturée en eau pour maintenir la turgescence des boutures feuillées jusqu'à ce que les nouvelles racines adventives soient fonctionnelles. À cette fin, trois conditionnements ont été comparés (**Figure 8.5**) :

- L'étouffée (E) qui consiste à placer les boutures sous une bâche plastique étanche avec un seul apport d'eau au moment de leur insertion ;
- L'« open mist » (OM) où les boutures non couvertes sont pulvérisées d'eau pendant environ 1 seconde toutes les 3 à 5 minutes ;
- Le « closed mist » (CM) dans lequel les boutures placées sous bâche plastique étanche sont pulvérisées pendant environ 1 seconde toutes les 30 à 45 minutes.

Au terme des essais, le protocole de bouturage est devenu le suivant :

- trempage de la base des boutures pendant 10 secondes dans une solution contenant 2 g/l d'AIB (sous forme de sel potassique soluble dans l'eau);
- utilisation du substrat de bouturage composé d'une part de tourbe blonde et de deux parts de vermiculite;
- utilisation du « closed mist » (**Figures 8.4 et 8.5**) qui donne des résultats d'enracinement plus homogènes et un système racinaire de meilleure qualité;
- maintien d'une température d'environ 22 °C dans le substrat, au niveau de la base de la bouture jusqu'au développement complet des racines principales (après 4 à 6 semaines).

Un fongicide à large spectre est appliqué de manière préventive et lorsque nécessaire en curatif avec alternance des matières actives à large spectre (telles que le thirame, captane).

c) La période

L'influence de la période de bouturage a été étudiée de 2009 à 2011. Les taux enregistrés ont conduit à faire une distinction entre la mi-juin et une période plus longue couvrant les mois de juillet et août. Les distributions de fréquence obtenues en répartissant les clones selon leur niveau, en cinq classes d'enracinement (**Figure 8.6**) montrent que pour la majorité d'entre eux, juin est la période à privilégier pour obtenir le meilleur taux de réussite. Cela confirme des observations réalisées antérieurement dans les installations du CRA-W avec d'autres espèces horticoles (cerisiers porte-greffe et ornementaux, pommiers, rosiers...) (Tréfois, 1988) et forestières (production d'une variété multiclonale de merisiers).

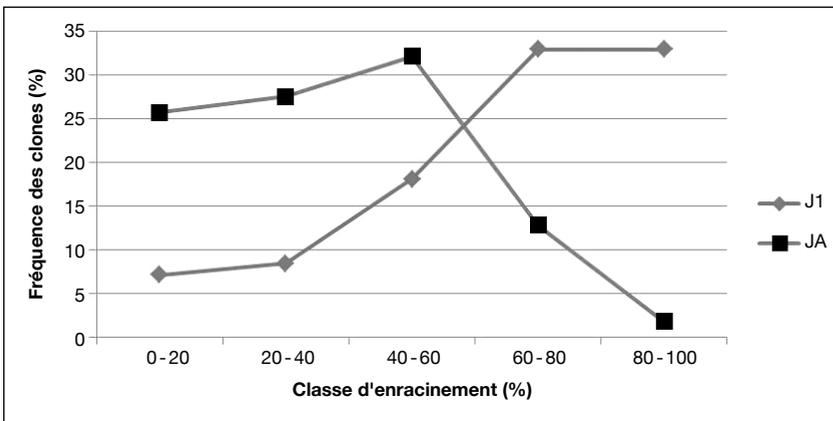


Figure 8.6. Distribution de fréquence des clones d'aulnes LIRIA W (%) en fonction de la classe d'enracinement : comparaison entre la période de mi-juin (J1) et celle de juillet-août (JA). Effectifs totaux :
 J1 : 155 lots de pousses apicales bouturées en juin des années 2009, 2010 et 2011 provenant de 96 clones.
 JA : 109 lots de pousses apicales bouturées de juillet à août en 2009 et 2010 provenant de 57 clones.

Calculé sur 30 des clones impliqués dans les bouturages de 2009 et 2010, l'impact de la période de juillet-août par rapport à celle de juin, correspond à une diminution moyenne du taux d'enracinement de 20 %.

Toutefois, la variation annuelle du taux moyen d'enracinement a dépassé 20 % pour le matériel bouturé en juin et a approché 15 % pour le matériel testé en juillet-août. Cela signifie que des conditions générales (état physiologique, luminosité, température extérieure...) extérieures au protocole d'enracinement, peuvent aussi fortement influencer la réussite du bouturage quelle que soit la période de sa réalisation. Il convient donc de rester très attentif à l'homogénéité des boutures, à leurs conditions de conservation et à leur dimensionnement notamment, avant leur insertion.

d) Évaluation de l'aptitude clonale à l'enracinement

Pour programmer des productions équilibrées du point de vue de leur représentativité de la diversité génétique locale, il est important d'évaluer l'aptitude à l'enracinement des clones. La question était donc de savoir si les taux d'enracinement enregistrés à la fixation des clones étaient représentatifs de l'enracinement exprimé en conditions de production.

Nous avons ainsi comparé les modes de fixation OM et CM pour un matériel produit en CM. Selon les résultats obtenus (**Tableau 8.4**), les taux d'enracinement enregistrés à la fixation du matériel ne sont pas représentatifs de l'enracinement obtenu en production quel que soit le mode de fixation appliqué.

Près de 60 % des clones fixés en mode OM proviennent de la classe de fixation «0-20» alors que 65,8 % des clones fixés en mode CM proviennent à l'inverse, de la classe de fixation «80-100». Bien que certains clones semblent montrer des performances d'enracinement reproductibles en multiplication CM (exemple: W109), elles pourraient être très variables pour d'autres (exemple : W110, W32, W112, W114, W256, W261). Les variations extrêmes d'une année à l'autre, telles que celles enregistrées avec LIRIA W112 pour lequel le taux moyen annuel passe de 20 à 100 %, pourraient vraisemblablement être d'origine accidentelle.

La réussite de la fixation, en termes de taux d'enracinement, est plus élevée en mode CM et les réponses enregistrées sont plus proches des taux obtenus en production. Des valeurs supérieures à 70 % d'enracinement en production ont été obtenues avec 60 % des clones considérés (69) pour cette évaluation de performance (**Figure 8.7**).

En fait, notre protocole de bouturage feuillé en mode CM s'est avéré performant pour plusieurs centaines de clones d'aulnes mais aussi pour les clones de frênes et pour les saules récalcitrants. Il s'est aussi révélé applicable à différents autres ligneux susceptibles de figurer parmi les essences colonisatrices d'espaces liés à la

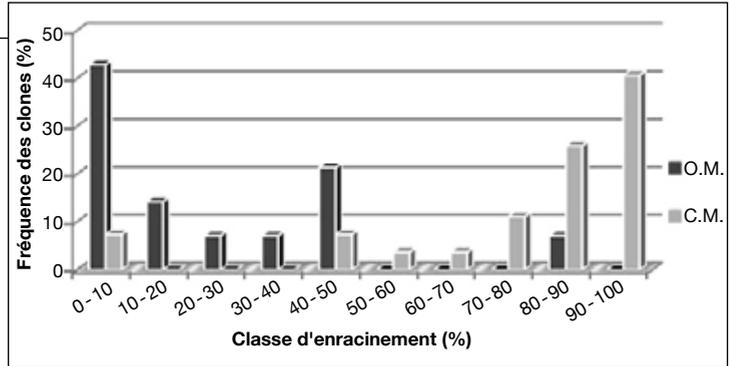
ripisylve, aux zones humides, aux zones tampons, etc. tels le merisier (*Prunus avium*), l'érable (*Acer pseudoplatanus*, *A. saccharinum*, *A. monspessulanum* et *A. palmatum*), le noisetier (*Corylus avellana*), le charme (*Carpinus betulus*), le hêtre pourpre (*Fagus sylvatica purpurea*), le fusain (*Euonymus europaeus*) et la viorne (*Viburnum opulus* var. *lantana*).

Tableau 8.4. Distribution de clones d'aulnes LIRIA W par classe d'enracinement en fonction de leurs performances d'enracinement lors de la fixation en modes OM (W) ou CM (**W**) et de production en mode CM.

		Classe d'enracinement en production CM (%)				
Classes		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Classe d'enracinement en fixation (%)	0-20	W72	W5 W73	W110 W114 W113 W52 W109 W109 W109 W309	W110 W114 W116 W10 W55 W140 W18 W308 W140	W113 W116 W2 W69 W117
	20-40		W32 W112 W15		W32 W112 W115	W112
	40-60				W260 W262 W321	W29 W76 W117 W263 W305
	60-80	W111	W111		W274 W283 W213	W211 W279
	80-100	W23	W256	W31 W217 W216 W261 W313 W289 W215 W318	W256 W212 W217 W208 W312 W323 W301 W284	W31 W31 W212 W216 W261 W209 W287 W294 W210 W315 W251 W271 W214 W252 W299

Figure 8.7. Répartition des clones d'aulnes au taux d'enracinement supérieur à 70 %* en fonction de leur classe de fixation en modes OM et CM.

*53,9 % des clones OM (14/26) et 62,8 % des clones CM (27/43) répondent à ce critère d'enracinement en production.



Dans le cadre d'une multiplication à grande échelle, divers éléments de la préparation des boutures ainsi que du sevrage, de la survie et de la croissance des jeunes plantules sont à adapter aux conditions de production.

Bouturage à bois sec chez le saule

Pour le saule en général, les « plançons » dormants récoltés durant l'hiver et conditionnés en sachets plastiques non hermétiques avec application d'un fongicide en poudre (matière active telle que le thirame), sont placés en chambre froide à 2 °C jusqu'à l'implantation directe sur les berges au printemps.

Recours à la micropropagation chez l'aulne

Un protocole de micropropagation (**Figure 8.8**) optimisé (Bajji et al., 2013) reste d'application pour des cas particuliers tels que la livraison à court terme de quantités importantes de plants d'une part, la fourniture de matériel issu de sélection *in vitro* d'autre part. Ainsi, les vitroclones allemands tolérants au Cd ont été multipliés selon cette méthode en vue de leur intégration ultérieure à des vergers à graines.

Élevage des plants

Bien que les boutures ou vitroplants d'aulnes puissent être laissés à croître en tablette jusque novembre-décembre, leur survie et surtout leur croissance, sont favorisées par un transfert en substrat frais après 4 à 6 semaines. Les jeunes plants sont transplantés en pépinière au printemps suivant, pour y atteindre un développement suffisant à leur implantation sur site.

Une fois sur site, la reprise de ces plants et leur vigueur sont des facteurs essentiels pour la stabilisation durable des berges. Dans le but de renforcer la qualité de ceux-ci, un pralinage des boutures a été testé avec 14 clones (**Tableau 8.5**).

Tableau 8.5. Influence du pralinage* du système racinaire des boutures sur la reprise et la vigueur** moyennes des plants d'aulnes de clones LIRIA W après une année de pépinière en sol limoneux.

Écotype	Témoin			Pralinage			
	Nbre de plants	Reprise (%)	Diamètre (mm)	Nbre de plants	Reprise (%)	Diamètre (mm)	% témoin
W 271	6	100,0	11,0 ± 1,0	6	100,0	11,1 ± 0,9	100,0
W 274	12	75,0	9,6 ± 1,4	6	100,0	14,0 ± 4,1	146,6
W 279	11	81,8	11,1 ± 1,3	8	100,0	16,6 ± 2,0	145,6
W 283	9	77,8	9,6 ± 1,0	8	87,5	12,1 ± 1,4	126,4
W 284	8	75,0	9,0 ± 1,9	3	100,0	14,0 ± 2,7	155,6
W 287	11	72,7	12,9 ± 2,7	8	100,0	11,1 ± 1,3	86,1
W 289	10	100,0	9,0 ± 0,8	10	100,0	12,4 ± 1,6	137,8
W 294	15	60,0	11,0 ± 1,7	5	100,0	15,0 ± 2,6	136,4
W 299	8	100,0	12,5 ± 2,1	7	100,0	13,6 ± 1,9	108,8
W 301	13	76,9	10,1 ± 1,5	10	100,0	13,2 ± 2,9	130,7
W 305	9	100,0	13,6 ± 1,8	8	100,0	14,1 ± 2,2	103,7
W 308	7	85,7	11,5 ± 2,9	7	85,7	11,3 ± 1,6	98,3
W 312	7	100,0	9,7 ± 2,4	6	100,0	10,0 ± 1,6	103,0
W 315	12	75,0	9,7 ± 2,1	8	100,0	12,8 ± 2,9	131,9
Moyenne ± Écart-type		84,3 ± 13,4	10,7 ± 1,5		98,1 ± 4,9	13,0 ± 1,8	121,5 ± 21,7

*Pralinage avec « Pralumus » d'Ard'Innov.

**La vigueur est estimée par la mesure du diamètre au niveau du collet des plants.

Celles-ci ont été trempées au moment de leur transfert en pépinière d'élevage, dans un pralin commercialisé sous l'appellation « Pralumus » par la société Ard'Innov.

Ce pralin est à base de substances humiques issues du traitement de la léonardite dont les propriétés favorables aux développements racinaire et végétatif avaient été mises en évidence au préalable sur des vitroplants et des plants de semis forestiers de diverses espèces. La reprise, la vigueur du plant (**Tableau 8.5**) et le volume du système racinaire (**Figure 8.9**) ont été évalués en fin de saison. En moyenne, la reprise des boutures d'aulnes traitées augmente de 14 %. Le diamètre du collet, qui est généralement représentatif de la vigueur et en relation étroite avec le développement du système racinaire, croît de près de 22 % suite au pralinage. Le

Figure 8.1. Bouturage à bois sec chez le saule : insertion des boutures en substrat sable/tourbe blonde (A) (1 Volume/ 2 Volumes); croissance après 2 mois (B).



Figure 8.2. Établissements des clones d'aulnes (A, B, C) et de saules (D) en parc à bois : installation de LIRIA L à Merkholtz en 2007 (A); croissance de LIRIA F à Roville-aux-Chênes en 2008 (B); repousses après taille en haie de LIRIA W (C); diversité du port chez LIRIS W en 2011 à Gembloux (D). (L, F, W correspondent aux origines luxembourgeoise, lorraine et wallonne, respectivement).

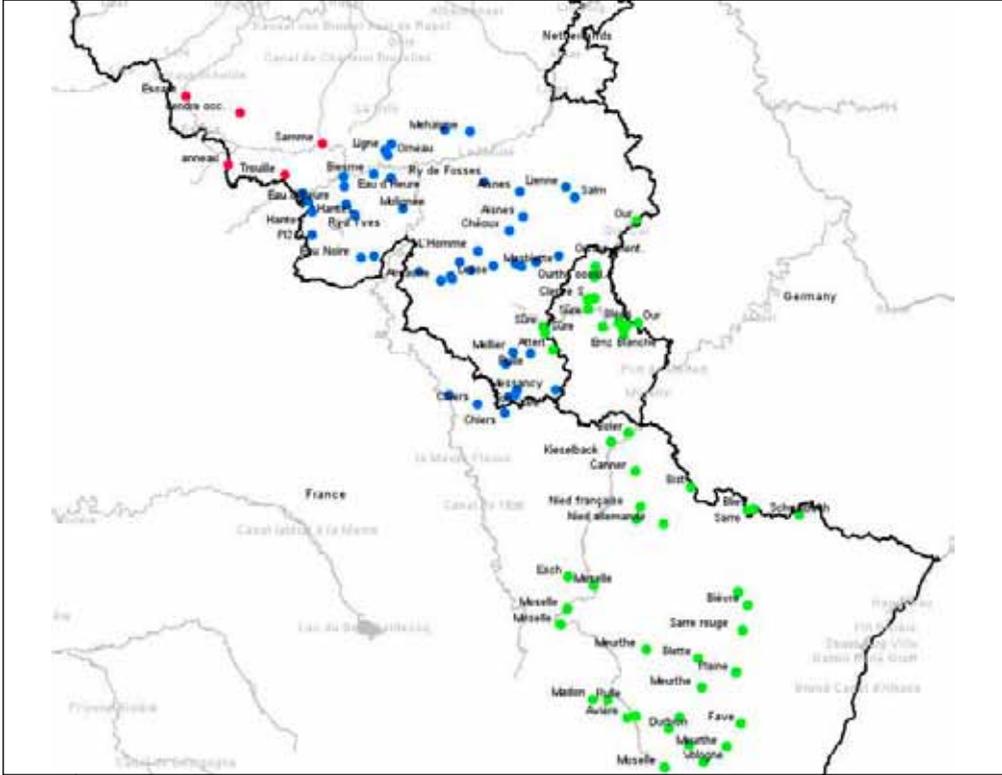


Figure 8.3. Distribution géographique des provenances d'aulnes sur les bassins du Rhin (vert), de la Meuse (bleu) et de l'Escaut (rouge).

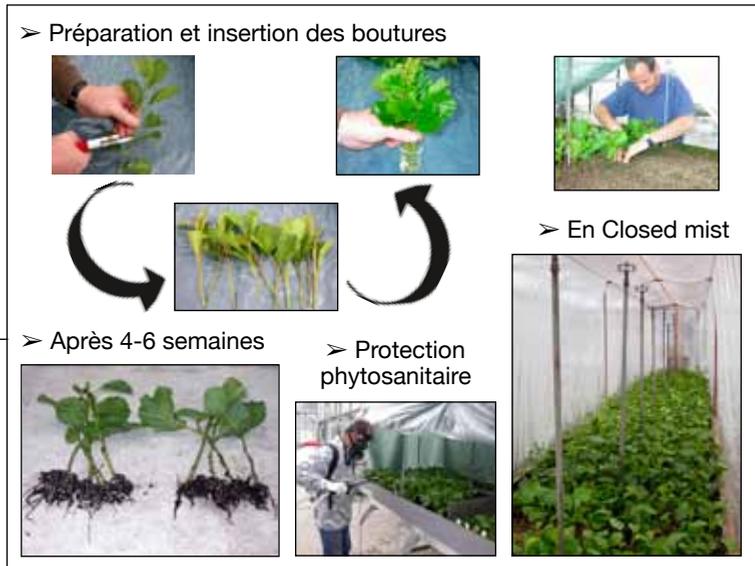


Figure 8.4. Phases de bouturage feuillé de l'aulne en « Closed mist ».



Figure 8.5. Types d'environnement comparés pour le bouturage feuillé à 22°C.

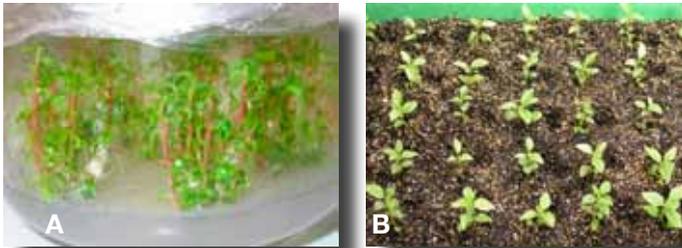


Figure 8.8. Aulnes en fin de bourgeonnement axillaire *in vitro* (A) et au début du sevrage de l'acclimatation (environ 3 semaines) (B).

Figure 8.9. Développement du système racinaire après traitement avec Pralumus (P+) ou pas (T) chez l'aulne glutineux : variabilité clonale du volume global après un an de pépinière.

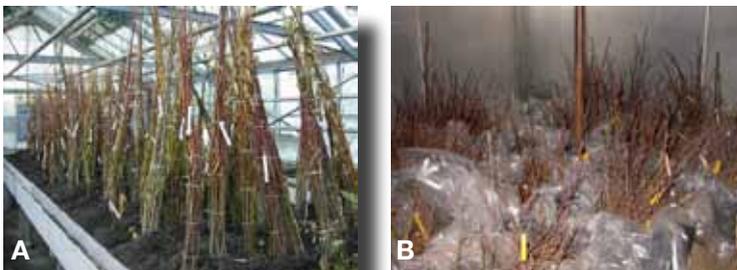


Figure 8.10. Plants de saules en serre (A) et d'aulnes en frigo à +2°C, prêts pour la livraison (B).

volume de racines apprécié visuellement de manière relative par rapport au témoin non traité (**Figure 8.9**) indique que 8 clones sur 14 présentent un système racinaire plus développé après pralinage.

Les réactions au traitement paraissent toutefois très différentes d'un clone à l'autre (+50 % au niveau du diamètre). La principale explication de ces différences de comportement pourrait être la variabilité de la capacité rhizogène des clones déjà constatée au bouturage (**Tableau 8.4**).

❑ Conservation et conditionnement des plants

Le plus souvent, les berges sont inaccessibles avant que débute la végétation. Dans ces conditions, la plantation d'un matériel ayant entamé sa croissance végétative conduit fréquemment à des taux de mortalité non négligeables requérant un remplacement très onéreux des plants. Il est donc nécessaire de préserver le repos végétatif des plants jusqu'à ce que les berges soient accessibles. À cette fin, chaque année en novembre-décembre, le matériel végétal est récolté, conditionné (en bacs ou sacs) et stocké en chambre froide à 2°C. Les plançons de saules et les plants enracinés de saules et d'aulnes peuvent être conservés jusqu'au début juillet. À cette date, la reprise est encore excellente sur les berges de cours d'eau. La température de conservation ne semble pas avoir d'influence sur le taux de survie ou sur la croissance ultérieure.

8.4 Conditions de diffusion des variétés multiclones

Les modalités de diffusion des variétés multiclones d'écotypes destinées à l'ingénierie végétale doivent assurer une durabilité du boisement par rapport aux aléas climatiques, phytosanitaires ou hydrologiques et au travers de la régénération naturelle ultérieure. Notre analyse s'appuie sur les méthodes pratiquées par les améliorateurs forestiers.

8.4.1 Précautions à la construction de la filière

La construction de nos variétés multiclones est inspirée de méthodes appliquées par les généticiens forestiers. En France, les premières formes de ressources génétiques forestières conservées *ex situ* trouvent leur origine dans des collections qui ont été constituées au fil du temps de manière pragmatique en fonction de l'émergence des besoins (Collin, 2000 ; Le Bouler et al., 2009). C'est le cas des peupliers noirs et des merisiers mais aussi des noyers et surtout des ormes menacés de disparition par l'épidémie de graphiose. Les objectifs des plantations des peupliers noirs étaient aussi la végétalisation des berges et l'aménagement

paysager comme l'était notre objectif premier. Leur utilisation s'est ensuite étendue à des actions de phytoremédiation, de protection des sols et d'amélioration de la qualité des ressources en eau. Parmi les variétés figuraient toutefois deux sources de pollens étrangers et contaminants pour les populations naturelles de peupliers. L'INRA a alors réagi en mettant sur pied trois variétés multiclonales autochtones constituées pour chacune d'elles de 25 clones représentatifs de la diversité génétique des bassins versants d'origine (Loire, Rhin alsacien, Garonne).

Pour notre filière d'écotypes ligneux de rivières, la diversité naturelle a été collectée avec le phénotype de ripisylve (caractérisé par un port peu érigé et une vigueur modérée) comme critère de sélection souhaité par les gestionnaires de cours d'eau. Les parcs à bois rassemblent dans des espaces publics et privés, les copies des arbres repérés, formant ainsi des conservatoires des ressources génétiques de ripisylves des bassins versants de la zone transfrontalière. Ils représentent la base génétique nécessaire à de futurs vergers à graines.

Cette forme de conservation des génotypes est pratiquée pour le développement de variétés forestières améliorées (Arbez, 1994).

8.4.2 Enjeu de la diffusion des variétés multiclonales d'écotypes

Notre filière diffuse donc une diversité locale au sein de laquelle des tests d'évaluation ont été réalisés pour relever d'une part, des niveaux de tolérance relative à la maladie du dépérissement de l'aulne (Chandelier et al., 2013) et d'autre part, certaines propensions d'adaptation aux conditions de pollution environnementales par les ETM chez certains clones d'aulne et de saule (Evlard et al., 2013; Bajji et al., 2013). Les clones LIRIA W2, W124, W252 seraient ainsi potentiellement tolérants/résistants à *Phytophthora alni* alors que les clones W137, W169 W62 seraient les plus sensibles. Ce matériel aux comportements contrastés devrait être utile à la détermination des clones à replanter en fonction des particularités des sites.

Les propriétés de reproduction générative sont aussi à prendre en compte. *Alnus glutinosa* est une essence monoïque où coexistent sur un même arbre les fleurs mâles et les cônes femelles. La pollinisation éolienne et la séparation physique des fleurs des deux sexes sont des éléments qui contribuent à un haut degré de « brassage » génétique (Mc Vean, 1953). La capacité des graines à garder leur pouvoir germinatif jusqu'à l'apparition des conditions favorables à leur germination qui peut atteindre plusieurs années, a pour conséquence d'augmenter la diversité locale. La distance annuelle de migration serait de 2000 m selon Huntley et al. (1983) mais pourrait atteindre 70 km et plus encore, le long des cours d'eau importants (Fossit, 1996; Bennet, 1995).

L'aulne glutineux constitue une alternative significative pour les sols gorgés d'eau de manière saisonnière. Il se cantonne principalement sur des buttes dans les habitats humides à marécageux, souvent dans les dépressions et les fonds de bassins versants et convient pour les espaces soumis à l'étiage et inondables. Claessens (2006) situe les conditions des forêts alluviales à base de chêne pédonculé, les sols à argiles blanches d'Ardenne, les parcelles forestières où l'épicéa est exploité ainsi que les terres humides abandonnées par l'agriculture comme sites d'implantation naturels d'aulnaies. Il faut toutefois retenir que les sols couverts de végétation sont moins propices à la régénération naturelle ultérieure dans nos régions.

La conservation des écotypes ligneux dans les conditions naturelles de stress biotiques et abiotiques de l'environnement, constitue une contrainte forte pour nos variétés multiclones qui continueront à révéler librement leurs capacités d'adaptation au travers du comportement des clones et de leurs descendants. Le suivi de ceux-ci sur les sites de replantation choisis par les pathologistes pour ce qui concerne les aulnes (Chandelier et al., 2013) et par les gestionnaires de cours d'eau pour ce qui concerne les saules, est dès à présent assuré. Les clones réimplantés sur les berges de Lorraine française et de Wallonie doivent confirmer leurs propriétés. Il en est de même du matériel originaire de placettes nettement contaminées collecté sur 12 cours d'eau différents des provinces wallonnes de Hainaut, Namur, Liège et Luxembourg, et sélectionné (parmi environ 500 individus) eux aussi après une inoculation volontaire de *Phytophthora alni* (Chandelier et al., 2013). Avec l'étude épidémiologique de la maladie (Chandelier et al., 2013), nous préciserons davantage comment et dans quelle mesure la pression s'exerce sur cette espèce. Toute l'information ainsi recueillie des sites d'implantation alimentera, les connaissances relatives aux contextes spécifiques d'adaptation des replantations. Ceci fera progresser la composition clonale des végétalisations du point de vue qualitatif. De plus, chez l'aulne, la traçabilité génétique est assurée. L'unicité d'un clone peut, en effet, être démontrée de manière non équivoque à l'aide de marqueurs microsatellites comme outil de discrimination (Mingeot et al., 2013).

Chez le saule, comme il s'agit d'espèces dioïques, un certain équilibre des sexes doit être respecté à la replantation en vue de permettre la régénération ultérieure sur le parcours des cours d'eau végétalisés. Le choix des espèces doit tenir compte de l'humidité des sols et d'un optimum écologique spécifique qui permet l'adaptation au milieu (Mertens, 2011). Ces espèces se distribuent naturellement dans les espaces libres d'implantation selon leurs niveaux d'exigence en lumière, en eau et selon les propriétés physico-chimiques des sols. L'analyse réalisée par Mertens (2011) sur le territoire wallon constitue, à ce point de vue, une référence pour toute application d'ingénierie végétale. Les besoins en saules, des gestionnaires de cours d'eau, diffèrent selon que le site à revégétaliser se situe en zone urbaine, rurale ou forestière

et selon l'importance de l'habitat aquatique à restaurer. Les gestionnaires choisissent leurs clones sur le phénotype et le système racinaire (Lambot, 2011).

Sont recherchés des saules buissonnants se développant en pied de berge, s'étalant pour former un couvert de branches et de racines comme abris des poissons contre les prédateurs, en période de hautes eaux et de gel hivernal. Les buissons hauts de 1 à 4 m sont privilégiés pour ne pas réduire excessivement la capacité en crue et limiter l'entretien. Les gestionnaires retiennent parfois des arbres ou arbustes à développement plus important, mais toujours avec un port étalé au niveau des basses branches ou comportant un réseau dense de tiges rampantes et surtout avec un système racinaire dense pour fixer les berges. Ces saules pourront même être installés en extradors de méandre. Si un peu d'érosion s'opère, la mise à nu des racines et la création de cavités en sous berge, soutenues par les racines, constituent des habitats extraordinaires pour les poissons.

On se tourne vers des espèces qui ont un rapport volume racine/volume tige élevé. La littérature renseigne un rapport racine/tige de 1,5 pour le saule pourpre et une taille adulte de 2 à 6 m ; c'est donc une des espèces indigènes qui remplit le mieux ces fonctions, et qui représente le 1^{er} choix pour des plantations de type multifonctionnel. À cela, il faut ajouter que le saule pourpre est un des seuls à tolérer un ombrage léger. Le suivi qu'effectueront les gestionnaires, sur les plançons issus de ces écotypes, permettra d'évaluer la relation entre le port particulier et le génotype. Une part relativement importante de la première sélection réalisée par les gestionnaires est constituée de saule marsault, saule qui jusqu'à présent, était peu retenu pour les plantations de berges. L'évaluation en rivière nous dira si ce choix s'avère pertinent.

8.4.3 Gestion des risques et maintien des performances des écotypes

Bien que le contrôle de la plupart des risques écologiques ou biologiques repose sur le niveau de diversité génétique des variétés multiclonales, c'est la bonne transposition de celle-ci sur site qui déterminera finalement la stabilité à long terme des replantations.

Deux règles s'imposent en général, pour diffuser le matériel végétal le plus performant sur le plan de l'adaptation au milieu (Lacaze, 1986) :

- n'utiliser ces variétés multiclonales que dans les bassins versants des fleuves d'origine des arbres et les régions écologiquement proches ;
- respecter en permanence les proportions dans les mélanges de clones et d'espèces.

□ Les règles de composition en fonction des risques

Pour diffuser une composition génétiquement équilibrée des clones, la réflexion internationale porte sur la limitation des risques dont les règles générales sont rappelées dans de nombreuses publications (Horgan, 1991).

Toutefois, déterminer le niveau d'un risque donné n'est pas chose aisée (Bishir et al., 1999). Si la maladie de l'aulne due à *Phytophthora alni* par exemple, fait bien partie des risques connus, l'émergence de pathogènes aujourd'hui inconnus, le changement climatique, les effets de « mode », etc. sont, par contre, imprévisibles aussi bien au point de vue ampleur que fréquence de manifestation. Ils font partie des risques incertains. Ce qui est essentiel, c'est de fournir aux utilisateurs de la filière, une information relative au comportement du matériel végétal la plus complète possible dès le choix du matériel pour l'implantation. En foresterie, la bonne adaptabilité d'une variété est définie par un nombre optimum de constituants génétiques, que celle-ci soit produite par multiplication végétative ou en verger à graines (Hubert et al., 1999). Pour cela les avis sont partagés.

Chez les conifères, la présence de 20-30 constituants non apparentés est recommandée dans les vergers à graines (Giertych, 1974; Chollet, 1986) afin d'éviter deux risques biologiques connus en cas de pollinisation libre : une dépression de consanguinité trop marquée et une grande variabilité de floraison (Lindgren et al., 1997). Plusieurs études théoriques s'accordent à définir à quelques dizaines, le nombre de clones non apparentés à inclure dans une variété multiclonale aux performances stables dans l'espace et dans le temps (Hühn, 1988; 1992). Pour tester un caractère donné, les expérimentations de variétés forestières prévoient cinq sites d'implantation représentatifs de la diversité des conditions pédoclimatiques (Hubert et al., 1999). Leur choix tient compte de la diversité écologique des stations d'accueil et de leur longévité mais aussi de la surface relative occupée par la variété sur la zone de replantation (Stelzer, 1997). Finalement, c'est leur suivi *in situ* qui déterminera le niveau des performances enregistrées et leur stabilité au sein de nos variétés multiconales.

Les expérimentations relatives à l'évaluation des variétés forestières sont toutefois coûteuses et de longue durée. C'est la raison pour laquelle, très fréquemment, le choix du nombre de constituants de la variété s'effectue à partir de simulations de l'occurrence de l'événement climatique ou biologique défavorable (Libby, 1982; Hühn, 1988; Roberds et al., 1990; Bondesson et al., 1993; Roberds et al., 1997).

Selon certains généticiens forestiers (Hubert et al., 1999), l'augmentation du nombre de constituants réduit le risque d'échec de plantation de façon exponentielle plutôt que linéaire. Avec un niveau de sensibilité de la population initiale modéré (fréquence d'individus sensibles $p < 0,5$) et pour un niveau tolérable d'attaques inférieur à 50 %, le risque d'échec peut être limité à 5-10 % avec 5 à 10 constituants

seulement (Roberds et al., 1990). À l'extrême, afin d'assurer un risque d'échec minimum, différents auteurs s'accordent par contre sur des nombres de constituants variant entre 20 et 40 (Roberds et al., 1997). Avec des conifères pour lesquels le risque est connu, il apparaît que 18 génotypes approcheraient le nombre 'optimum' de clones pour couvrir le risque d'un caractère biotique inconnu (Yanchuk et al., 2006). Toutefois, les essais en champ sont toujours considérés comme recours essentiels à l'évaluation (Weng et al., 2010).

En ce qui concerne «LIRIA F» de Lorraine, la majorité des clones proviennent de sites suivis depuis près de 10 ans déjà. Quant aux clones sélectionnés qui y sont installés (Chandelier et al., 2013), les observations de comportement bénéficieront des connaissances relatives déjà disponibles. Selon Pliūra (2008), chaque famille d'aulnes combine de multiples niveaux d'adaptation et les plus importantes différences entre familles se retrouvent parmi les populations les plus productives.

En Wallonie, la variété multiclonale de merisiers qui a été diffusée par le CRA-W entre la fin des années 1980 et la moitié des années 1990 (avec le soutien du «Groupement Régional pour l'Amélioration et la Gestion des Essences Forestières») constitue une référence de modalités de diffusion que nous nous appliquerons à respecter pour la filière «ECOLIRI». Chaque année, il s'agissait de produire un nombre précis de lignées distinctes de telle sorte qu'une diversité de 60 clones soit atteinte dans la région, endéans une période de 2 à 5 ans de production; la livraison en mélange se faisant par le Comptoir forestier de Marche-en-Famenne, agréé pour cette fonction.

□ Les règles d'usages à adopter

Le matériel produit à partir des variétés multiclones est mis à la disposition des reboiseurs pour la fixation de berges, la renaturation de ripisylve et la réhabilitation de zones fluviales, humides et équivalentes. Une analyse préparatoire du site d'implantation est à réaliser avec l'identification de ses particularités et contraintes spécifiques. Celles-ci vont orienter la composition clonale et définir le dispositif de plantation à adopter.

Le respect capital de la diversité génétique du matériel diffusé reste de la responsabilité des pouvoirs publics en vue d'anticiper les défauts de fonctionnement éventuels parmi lesquels l'insuffisance de plants disponibles.

Les plants sont délivrés en mélanges clonaux équilibrés, après un an d'élevage en pépinière (**Figure 8.10**). D'après les résultats de bouturage obtenus chez l'aulne (**Tableau 8.4**), le facteur de correction à appliquer pour atteindre une représentation équilibrée des clones au sein du matériel diffusé pourrait atteindre une valeur allant de 2 à 10. Il s'agit donc de planifier les productions annuelles par groupes de clones

constitués sur base de performances d'enracinement préalablement évaluées pour adapter les quantités à l'équilibre recherché.

Ainsi, maintenir le potentiel rhizogène des clones par la répétition des tailles annuelles en parcs à bois est primordial pour l'équilibre de la diffusion. Veiller à maintenir l'évolution des collections initiales, du point de vue de leur composition, avec l'injection de nouveaux clones est positive pour la diversité naturelle générée ultérieurement à partir des zones replantées. Une telle base génétique transposée au sein de vergers à graines d'élites fixerait les propriétés liées aux besoins évolutifs et perpétuerait celles-ci de manière homogène et définitive au travers de la descendance. Ce procédé appliqué chez *Pinus taeda*, a notamment montré que 95 % de la diversité allélique des populations naturelles se retrouvaient au sein des graines (Williams et al., 1995).

Le risque de dysfonctionnement doit toutefois être raisonné (quel que soit d'ailleurs, le type de régénération utilisé, végétative comme reproductive). Si l'origine est prioritaire, le choix de clones définit le niveau d'adaptation. Engager les reboiseurs à évaluer préalablement les risques pathogènes ou de pollutions par les ETM sur le site est aussi préventif. Leur recommander le matériel sélectionné pour garantir une adaptabilité potentiellement meilleure est encore plus important. Les clones les plus tolérants aux métaux lourds seront par exemple, orientés, en priorité, vers les zones les plus proches des risques de pollution. Le suivi des multiclonaux replantés contribuera à adapter la composition ultérieure des groupes de clones.

Chez le saule, la connaissance des caractéristiques du sol (pH, drainage, composition, etc.) décidera de l'espèce à réimplanter. La règle pratique à adopter pour la prise en compte du sexe, consisterait à toujours assurer pour chaque espèce des variétés constituées d'au moins 10 arbres femelles et de 5 arbres mâles provenant de différents (2) bassins versants. Cette précaution tient compte du fait que ces populations installées par pratiques culturales vont se régénérer spontanément dans des conditions de milieu différentes de celles-ci durant la décennie suivant cette installation. Complémentairement, ces variétés devront être recomposées toutes les demi-décennies pour assurer leur aspect évolutif en fonction des conditions changeantes du milieu.

Le long des berges de cours d'eau, ce sont certainement les clones dont le système racinaire assure à la fois une bonne reprise et la stabilisation à long terme qui seront réclamés en priorité. Le traitement « Pralumus » qui stimule le développement racinaire chez l'aulne, devrait aider à l'intégration de clones récalcitrants à l'enracinement dans les dispositifs de plantation.

Chez les forestiers, ne pas dépasser 50 plants d'un même clone par site permet de limiter l'exposition au risque dans l'espace (Hubert et al., 1999). Utiliser des

systèmes d'exploitation à courte révolution diminuerait ainsi la durée d'exposition du matériel replanté, ce qui minimiserait l'impact du risque potentiel. Ainsi en France, des variétés clonales ne sont en cours de développement que pour des espèces à croissance rapide (le peuplier, le douglas et le pin maritime).

Pour ces espèces forestières, aucune réglementation quant à la composition et à l'utilisation n'existe à ce jour pour les variétés multiclones. L'effort d'amélioration est continu de manière à offrir du matériel végétal de plus en plus performant, plus homogène phénotypiquement, avec toujours un nombre de constituants non apparentés compris entre 10 et 20. Seul l'usage de minimum 5 clones en mélange équilibré par plantation était recommandé pour le merisier. Dans d'autres pays, tels que l'Australie, la Nouvelle-Zélande, le Brésil ou les États-Unis, les réglementations d'usage ne porteraient ni sur la composition, ni sur le test des variétés forestières (Hubert et al., 1999).

Si, pour l'aulne, les peuplements à graines forestiers locaux paraissent suffisants pour couvrir les besoins, le phénotype de ripisylves et l'adaptation au dépérissement dû à *Phytophthora alni* qui s'exerce plus intensément en milieu rivulaire, sont des critères spécifiques pris en compte exclusivement par nos multiclones. Chez le saule, la seule contrainte à la diffusion concerne la meilleure qualité possible du point de vue sanitaire sans pour autant imposer de normes.

8.5 Conclusions

Une filière de production de multiclones de ligneux d'aulnes et de saules originaires de la Grande Région a été construite et mise en œuvre pour l'approvisionnement en plants lors de renaturations des berges de cours d'eau, des zones humides à drainage déficient et de surfaces naturelles écologiquement équivalentes. Elle est structurée autour de la certification de l'origine du matériel végétal, de sa représentativité de la diversité naturelle et de la diffusion en accord avec les règles généralement appliquées aux variétés multiclones de plants forestiers. Cette dernière s'accompagne d'informations de comportement, plus spécifiques par rapport à la maladie due à *Phytophthora alni* chez l'aulne, à l'adaptation aux hydro-systèmes chez le saule et vis-à-vis de pollutions accidentelles dues aux métaux lourds.

En ce qui concerne les reboiseurs, c'est vers une information claire et une responsabilisation qu'il faut se diriger. Néanmoins, pour permettre des choix pertinents dans l'utilisation des variétés, les recherches doivent se poursuivre pour parfaire les connaissances relatives à la variabilité génétique réinstallée en lien avec l'adaptabilité aux risques ainsi que les pratiques de replantation et d'aménagement global des territoires (Claessens et al., 2009 ; Mouchet et al., 2010). De toute évidence, le caractère évolutif des populations doit être prioritaire. La composition est fonction des conditions du milieu d'implantation et de la durée de colonisation prévue.

Dans son état actuel, la filière pourrait aussi participer au développement d'activités spécifiques telles la production de biomasse, la remédiation de zones marginalisées (Aldric et al., 2011 ; Evlard et al., 2011) ou encore la vannerie plus particulière au saule (Hogge, 2011).

Des politiques identiques menées dans d'autres pays de l'Union Européenne devraient permettre de mettre ces collections en réseau.

Remerciements

Les recherches présentées dans ce chapitre ont été menées dans le cadre des projets Interreg III-WLL/ECOLIRI et Interreg IV-A Grande Région/ECOLIRIMED soutenus financièrement par le FEDER, le Service Public de Wallonie et la Région Lorraine.

Les auteurs remercient R. Gruselle pour son investissement personnel dans la construction et la mise en œuvre de la filière. Ils sont aussi reconnaissants à R. Baleux et S.M. Hautenoven qui se sont investis respectivement dans les applications des méthodes d'analyse moléculaire et de multiplication végétative.

8.6 Bibliographie

- Aldric J.M. et al., 2011. Potentialités d'application des technologies biologiques pour la dépollution des sols en Wallonie. *J. Ingénieurs*, **132**, 7-13.
- Arbez M., 1994. Fondement et organisation des réseaux européens de conservation des ressources génétiques forestières. *Génét. Sé. Évol.*, **26**, 301-314.
- Bajji M. & Druart Ph., 2013. Apports de la culture *in vitro* dans l'amélioration de la phytoremédiation : cas de l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) dans le cadre de la stabilisation des berges de cours d'eau. In : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 91-105.
- Bennet K.D., 1995. Insularity and the quaternary tree and shrub flora of the British isles. In: Preece RC. (ed.) *Island Britain: a quaternary perspective*. London: The Geological Society, Special Publications, **96**(1), 173-180.
- Bishir J.W. & Roberds J.H., 1999. On numbers of clones needed for managing risks in clonal forestry. *For. Genet.*, **6**, 149-155.
- Bondesson L. & Lindgren D., 1993. Optimal utilisation of clones and genetic thinning of seed orchards. *Silvae. Genet.*, **42**(4/5), 157-163.
- Chollet F., 1986. Les Vergers à graines. *Rev. For. Fr.*, **XXXVIII**, n° spécial « Amélioration génétique des arbres forestiers », 74-80.
- Claessens H., 2006. Réflexion sur la place de l'aulne en sylviculture, *For. Wallonne*, **80**, 27-35.
- Claessens H. et al., 2009. Le suivi des bandes riveraines des cours d'eau de Wallonie. *Rev. For. Fr.*, **LXI**(6), 595-610.

- Collin E., 2000. La multiplication végétative au service de la conservation des ressources génétiques végétales : l'exemple des ormes. *In* : Verger M. et al. *Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux: seconde rencontre du « Groupe de la Sainte Catherine », Antibes, 24-26 novembre 1998*. Paris : ASTREDHOR, 131-139.
- Chandelier A., Delhaye N. & Helson M., 2011. First report of ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* (anamorph: *Chalara fraxinea*) on *Fraxinus excelsior* in Belgium. *Plant Dis.*, **95**(2), 220.
- Chandelier A., Mertens P., Marçais B. & Husson C., 2013. Aspects sanitaires de la filière aulne glutineux, frêne commun et saule dans le cadre de la renaturation des cours d'eau. *In* : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 33-48.
- Delcarte J., Gossiaux L. & Evlard A., 2013. Valorisation énergétique du bois produit à des fins de phytoremédiation. *In* : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 107-119.
- Evlard A., Vanobbergen F., Campanella B. & Paul R., 2011. La phytoremédiation par le saule. *For. Wallonne*, **112**, 36-46.
- Evlard A. & Campanella B., 2013. Impact des éléments-traces métalliques sur les plantes et les techniques de phytoremédiation. *In* : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 59-75.
- Evlard A. et al., 2013. Étude du saule et de l'aulne pour la phytoremédiation des berges de cours d'eau non navigables. *In* : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 77-89.
- Fossit J.A., 1996. Late quaternary vegetation history of the western isles of Scotland. *New Phytol.*, **132**, 171-196.
- Giertych M., 1974. Seed orchard designs. *For. Comm. Bull.*, **54**, 25-37.
- Hogge F., 2011. La vannerie et les autres utilisations traditionnelles du saule. *For. Wallonne*, **112**, 47-50.
- Horgan G.P., 1991. Risk analysis for forestry. Proceedings of clonal forestry workshop. *FRI Bull.*, **160**, 155-157.
- Hubert C. & Bastien C., 1999. Gain génétique, risque économique, risque écologique : quels liens ? *Rev. For. Fr.*, **LI**, 4, 496-510.
- Hühn M., 1988. Theoretical studies in the necessary number of components in mixtures. 3. Number of components and risk considerations. *Theor. Appl. Genet.*, **72**, 211-218.

- Hühn M., 1992. Multiclonal mixtures and number of clones. II. Number of clones and yield stability (deterministic approach with competition). *Silvae. Genet.*, **41**, 4/5, 205-213.
- Huntley B. & Birks J.B., 1983. *An atlas of past and present pollen maps for Europe: 13000 years ago*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kremer A., 1994. Diversité génétique et variabilité des caractères phénotypiques chez les arbres forestiers. *Génét. Sél. Évol.*, **26**, 105-123.
- Lacaze J.F., 1986. Amélioration des arbres forestiers. *Rev. For. Fr.*, **XXXVIII**, n° spécial « Amélioration génétique des arbres forestiers », 20-25.
- Lachat B., 1998. Conserver, aménager, revitaliser les cours d'eau avec une logique naturelle. *Ann. Limnol.*, **34**(2), 227-24.
- Lambot F., 2011. Le saule dans le génie végétal : maintien des berges et talus. *For. Wallonne*, **112**, 29-35.
- Lambot F. & Adant S., 2013. La revégétalisation des cours d'eau : une stratégie écologique nécessaire. In : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 19-32.
- Le Bouler H. & Collin E., 2009. La valorisation des ressources génétiques des arbres forestiers conservées dans les Collections nationales françaises. *Rev. For. Fr.*, **LXI**(5), 447-455.
- Libby W.J., 1982. What is a safe number of clones per plantation? In: Heybrock H.M., Stephan B.R., von Weissenberg K. *Resistance to diseases and pests in forest trees: Proceedings of the third International Workshop on the genetics of host-parasite interactions in forestry, Wageningen, 14-21 Sept. 1980*. Wageningen, The Netherlands: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 342-360.
- Lindgren D., Gea L.D. & Jefferson P.A., 1997. Status number for measuring genetic diversity. *For. Genet.*, **4**(2), 67-76.
- Mc Vean D.N., 1953. Biological flora of the British isles: *Alnus glutinosa* L. Geartn. *J. Ecol.*, **41**, 447-466.
- Mertens P., Elschot P., Ramelot F. & Stordeur G., 2011. Diversité et détermination des saules en Wallonie. *For. Wallonne*, **112**, 7-19.
- Mertens P., 2011. Diversité des milieux de développement pour les saules indigènes. *For. Wallonne*, **112**, 20-28.
- Mingeot D., Husson C., Mertens P. & Druart Ph., 2013. Évaluation par marqueurs moléculaires microsatellites de la diversité d'une collection d'aulnes glutineux provenant de Wallonie (Belgique), de Lorraine (France) et du Grand-Duché du Luxembourg. In : Druart Ph., Husson C. & Paul R. (eds.). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux. p. 49-58.

- Mouchet F. et al., 2010. *Guide d'entretien des ripisylves*. Namur, Belgique : SPW, DGARNE; Gembloux, Belgique : Université de Liège, GxABT, 42 p.
- Pliūra A., 2008. Estimation of eco-genetic lability of populations and families : *Alnus glutinosa* example. In: *Seminar on plasticity adaptation in Forest Trees, Treebreedex, Madrid, 27-29 February 2008*.
- Roberds J.H., Namkoong G. & Skroppa T., 1990. Genetic analysis of risk in clonal populations of Forest Trees. *Theor. Appl. Genet.*, **79**, 841-848.
- Roberds J.H. & Bishir J.W., 1997. Risk analysis in clonal forestry. *Can. J. For. Res.*, **27**, 425-432.
- Stelzer H.E., 1997. Evaluating genetic diversity concerns in clonal deployments. *Can. J. For. Res.*, **27**, 438-441.
- Tréfois R., 1988. *Description des techniques de bouturage feuillé des nouveaux sujets porte-greffe nanifiants du cerisier*. Note Technique du CRA Gembloux N°10/50. 15 p.
- Weng Y., Park Y.S. & Krasowski M.J., 2010. Managing genetic gain and diversity in clonal deployment of white spruce in New Brunswick, Canada. *Tree Genet. Genomes*, **6**(3), 367-376.
- Williams C.G., Hamrick J.L. & Lewis P.O., 1995. Multiple-population versus hierarchical conifer breeding programs: a comparison of genetic diversity levels. *Theor. Appl. Genet.*, **90**, 584-594.
- Yantchuk A.D., Bishir J., Russell J.H. & Polsson K.H., 2006. Variation in volume production through clonal deployment: results from a simulation model to minimize risk for both a currently known and unknown future pest. *Silvae Genet.*, **55**(1), 25-37.