

GUIDE DE PRODUCTION DE SAULES EN CULTURE INTENSIVE SUR COURTES ROTATIONS

Michel Labrecque et Simon Louis Lajeunesse
Institut de recherche en biologie végétale



Mars 2017

Table des matières

1. Introduction	3
1.1 La culture de saules sur courtes rotations au Québec	4
1.2 Principes de la culture intensive sur courtes rotations (CICR) de saules	5
1.3 Espèces et cultivars commerciaux	6
2. Technique de production de saules en CICR	8
2.1 Établissement de la plantation	
2.1.1 Choix des sites et types de sols recherchés	8
2.1.2 Préparation des boutures	9
2.1.3 Préparation du terrain avant plantation	9
2.1.4 Plantation	10
2.1.5 Le recépage à la fin de la première saison	13
2.2 Entretien de la plantation	13
2.2.1 Gestion des mauvaises herbes	13
2.2.2 Fertilisation	13
2.2.3 Maladies et ravageurs	15
2.2.4 Récolte	17
3. Rendements potentiels	19
3.1. Rendements attendus selon les régions du Québec	20
4. Aspects économiques	22
5. Les CICR pour des applications environnementales	24
6. Conclusion	24
7. Références	25
Remerciements	29

1. Introduction

La production d'énergie par combustion de la biomasse (c'est-à-dire la bioénergie), directement ou par transformation, est l'une des sources alternatives les plus prometteuses d'énergie durable. Contrairement aux combustibles fossiles, la bioénergie n'entraîne pas nécessairement la production de gaz à effet de serre atmosphérique. Les biocarburants issus de la biomasse cultivée sur des terres agricoles marginales et abandonnées présentent un bilan neutre en ce qui concerne les émissions en dioxyde de carbone carbonique [1]. L'exploitation de biomasse végétale pour des fins énergétiques peut également avoir des impacts positifs sur le milieu permettant la création de nouvelles possibilités de revenus et d'emplois [2].

De nombreuses plantes sont exploitées dans le monde pour des fins de production de biomasse énergétique. Les céréales et les féculés, dont l'utilisation principale est pour l'alimentation et le fourrage, peuvent également être transformé pour produire des biocarburants. Par exemple, l'amidon des grains de maïs (*Zea mays* L.), de blé (*Triticum aestivum* L.) et de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) peut être transformé en sucres puis en éthanol par les procédés de fermentation traditionnels pour être utilisé dans le transport avec d'autres combustibles (par exemple le bioéthanol). Ces cultures peuvent également être utilisées pour produire du biogaz, composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone produit par la digestion anaérobie de la biomasse. Ces plantes ont l'avantage d'être relativement faciles à cultiver. La plupart sont des cultures agricoles traditionnelles et sont introduites dans l'exploitation agricole, car ils ne nécessitent pas de technologies ou d'équipement particulier. Toutefois, l'utilisation de cultures vivrières comme source de bioénergie soulève des questionnements quant à l'approvisionnement alimentaire et aux coûts de production. La production de biocarburant fait donc l'objet de critiques de la part de la communauté scientifique et de la société. En particulier, l'utilisation de ces cultures pour la bioénergie et non pour l'alimentation humaine. De plus, comme bon nombre de ces cultures sont annuelles, elles nécessitent des apports important en engrais pour leur établissement, leur croissance et leur entretien. En contrepartie, les cultures de plantes pérennes peuvent être exploitées avec beaucoup moins de conséquences négatives pour l'environnement [3]. Parmi ces plantes, on retrouve des herbacées tels que le miscanthus (*Miscanthus spp.*), l'alpiste faux-roseau (*Phalaris arundinacea*), le panic érigé (*Panicum virgatum*) mais aussi des plantes ligneuses telles que les saules (*Salix spp.*) et les peupliers (*Populus spp.*) ou les eucalyptus (*Eucalyptus spp.*) qui ont été sélectionnées au cours des dernières décennies pour leur rendement élevé en biomasse, une grande adaptabilité au sol et au climat et une qualité élevée de la biomasse. En général, ces plantes ne nécessitent pas de grandes quantités d'intrants en matière de culture annuelle et d'engrais [4], n'impliquent pas la destruction de forêts indigènes ayant des effets négatifs sévères sur la séquestration du carbone [5] et la biodiversité [6-7].

Une revue récente de la littérature a révélé que plusieurs termes différents sont utilisés en français pour nommer la pratique sylvicole des plantes ligneuses pour la production d'énergie soit : la culture ligneuse sur courtes rotations, la culture intensive sur courtes rotations (CICR, la définition que nous préférons utiliser), le taillis en courte rotation, la plantation en culture intensive, la production de biomasse pour des fins énergétiques / ou de bioénergie, le système de production de biocarburants. En anglais, on verra aussi quelques termes non traduits ou non en usage en français tel que : *short-rotation forestry*, *intensive culture of forest crops*, *energy forestry*, *short-rotation fiber production system*, *mini-rotation forestry*, *silage sycamore* et *wood*

grass [8]. Le même auteur a suggéré l'adoption d'une terminologie standard basée sur un travail antérieur [9] qui avait défini ce système de culture comme « un système sylvicole fondé sur de courts cycles d'abattage, généralement entre un et 15 ans, employant des techniques culturales intensives telles que la fertilisation, l'irrigation et la lutte contre les mauvaises herbes et l'utilisation de matériel de plantation génétiquement supérieur en s'appuyant souvent sur la régénération des taillis puisque la plupart des espèces utilisées sont en mesure de germer à nouveau après la récolte »¹.

Le taux de croissance précoce des pousses de taillis est beaucoup plus élevé que celui des semis ou des boutures et ainsi les arbres gérés comme taillis se caractérisent par une croissance remarquablement rapide et un rendement élevé en biomasse [10-11]. Les principales essences exploitées selon ce régime de culture sont les peupliers (*Populus spp*) [12], les saules (*Salix spp*) [13] et les eucalyptus (*Eucalyptus spp.*) [14] et, dans une moindre mesure, le robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia* L.) [15] et les aulnes (*Alnus spp.*) [16]. Par ailleurs, il faut souligner que les saules et les peupliers peuvent très aisément être propagés de façon végétative à partir de boutures, ce qui leur confèrent un grand avantage par rapport aux autres espèces mentionnées plus haut. Cette caractéristique facilite les opérations d'établissement et la sélection clonale [17].

1.1 La culture de saules sur courtes rotations au Québec

L'intérêt scientifique pour la culture des saules en bioénergie sur courtes rotations au Canada remonte au milieu de la crise pétrolière des années 1970. Cette crise a stimulé l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie. Le programme du gouvernement fédéral ENFOR (ENergy from the FORest) de 1978 coordonné par le Service canadien des forêts faisait partie d'une initiative interministérielle sur l'énergie afin de promouvoir des projets dans le secteur de la bioénergie forestière. Les scientifiques de la Faculté de foresterie de l'Université de Toronto, convaincus que les saules pourraient produire des rendements annuels élevés dans les zones tempérées, ont été les pionniers de l'étude des potentiels de bioénergie au Canada [18-19]. Les travaux de Louis Zsuffa (1927-2003) sur la sélection des peupliers et des saules par des essais génétiques sur de petites surfaces ont inspiré une nouvelle génération de chercheurs, y compris un de ses étudiants diplômés, Andrew Kenney, qui a mis en œuvre une technologie de culture intensive sur rotations de plantes ligneuses pour des fins de production de bioénergie au Canada [20]. De plus, Gilles Vallée, du ministère des Ressources naturelles du Québec, a étudié l'amélioration génétique des peupliers et des saules hybrides dans le but de développer des cultivars adaptés aux périodes de croissance plus courtes des forêts boréales.

À l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), situé au Jardin botanique de Montréal, des chercheurs s'intéressent aux cultures de saules sur courtes rotations depuis le milieu des années 90. Leurs expériences ont montré que le climat et les sols du Québec sont favorables à la croissance de plusieurs cultivars de saule [21]. Des chercheurs des ministères fédéraux et provinciaux ont également mis en œuvre divers projets avec des saules durant les années 1980 et 1990. Cela comprenait l'amélioration d'hybrides de peuplier et de saule adaptés aux courtes périodes de croissance des forêts boréales [22]. Depuis les recherches sur les cultures de saules

¹ Traduction libre

se poursuivent et ces efforts ont permis l'établissement de quelque 300 ha de plantation de saule sur des terres agricoles marginales du Québec au cours des vingt dernières années.

1.2 Principes de la culture intensive sur courtes rotations (CICR) de saules

La culture intensive sur courtes rotations (CICR) de saules constitue une technologie spécifique de culture à haute densité qui utilise des méthodes agricoles afin de maximiser la productivité (culture intensive). Les parties aériennes des saules sont récoltées sur des cycles courts de deux, trois ou quatre ans selon les rendements (courtes rotations). La récolte se fait en fin de saison idéalement après la chute des feuilles. Suivant chacune des récoltes, les souches avec leurs racines sont laissées dans le sol permettant la production de rejets qui pourront être récoltés à leur tour quelques années plus tard à la fin d'un nouveau cycle de production. Tout ce processus peut ainsi être répété plusieurs fois, jusqu'à sept ou huit fois (ou rotations) selon les régions et selon les conditions d'entretien général de la plantation (Figure 1).

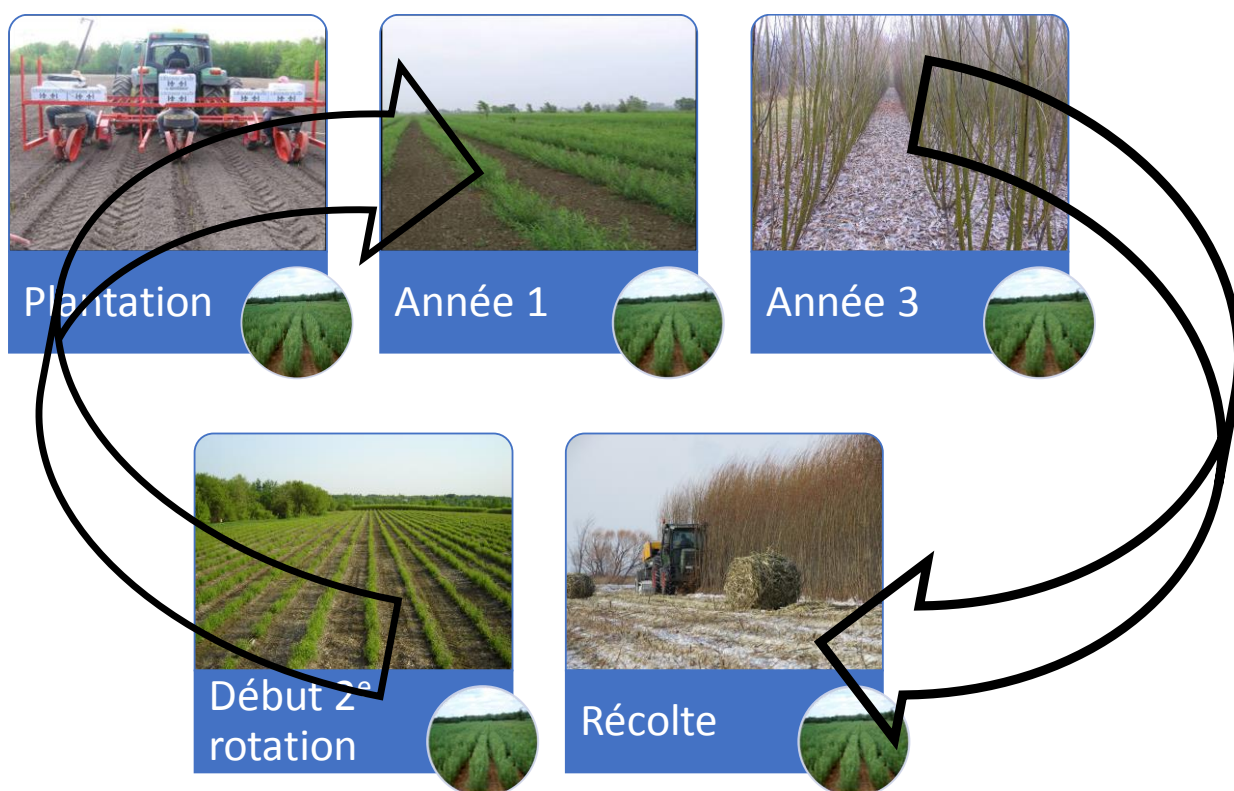


Figure 1. Principes de la culture de saules sur courtes rotations.

1.3 Espèces et cultivars commerciaux

Le rendement des saules varie considérablement en fonction des facteurs environnementaux et génétiques. Le genre *Salix*, auquel appartiennent les saules, comprend de 330 à 500 espèces d'arbres et d'arbustes [27]. Le grand nombre de cultivars d'espèces a favorisé la sélection de cultivars et d'hybrides pour des applications ornementales, sylvicoles ou environnementales. Cependant, un grand nombre d'espèces de saule ne sont pas adaptées à la production de biomasse en raison de leur taux de croissance plus faible. De nos jours, l'exploitation de la grande diversité biologique au sein du genre *Salix* se concentre principalement sur quelques espèces (*S. viminalis*, *S. purpurea*, *S. triandra*, *S. dasyclados*, *S. eriocephala*, *S. miyabeana* et *S. schwerinii*). Le nombre de cultivars hybrides intra et interspécifiques offrant des rendements plus élevés, une meilleure résistance aux ravageurs et aux maladies a beaucoup augmenté au cours des dernières années grâce entre autres au travail des équipes américaines de la *Cornell University* (Tableau 1).

Tableau 1. Taxons de *Salix* les plus communément utilisés avec leurs noms de cultivar commercial pour la production de biomasse au Québec.

Taxon	Nom commun anglais	Noms communs français	Origine	Cultivars commercialisés en Amérique du Nord
<i>S. nigra</i> Marshall	Black willow	Saule noir	Canada	'5005'
<i>S. triandra</i> L.	Almond-leaved willow	Saule à trois étamines	Eurasie	'Noir de Villaines', 'P6010',
<i>S. alba</i> L.	White willow	Saule blanc	Europe	'5044'
<i>S. eriocephala</i> Michx.	Heart-leaved willow	Saule rigide	Canada	'S25', 'S546'
<i>S. discolor</i> Muhl.	American pussy willow	Saules discolore	North America	'S365'
<i>S. x dasyclados</i> Wimm.	Wooly-stemmed willow	Sans nom commun	Eurasie	'SV1'
<i>S. schwerinii</i> E. L. Wolf	Schwerin willow	Sans nom commun	Asie de l'est	
<i>S. viminalis</i> L.	Common osier or basket willow	Saule des vaniers	Europe	'5027'
<i>S. miyabeana</i> Seemen	Miyabe willow	Sans nom commun	Asie de l'est	'SX61', 'SX67', 'SX61' 'Sherburne', 'Canastota'
<i>S. purpurea</i> L.	Fish Creek	Osier pourpre ou rouge	Amérique du Nord	'Fish Creek'
<i>S. acutifolia</i> Willd.	Pointed-leaf willow	Saule violet sibérien	Europe	'5069'
<i>S. purpurea</i> x <i>S. miyabeana</i>	No name	Sans nom commun	Hybride	'Millbrook'
<i>S. eriocephala</i> x <i>S. interior</i>	No name	Sans nom commun	Hybride	'S625'
<i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i>	No name	Sans nom commun	Hybride	'Bjorn', 'Tora', 'Torhild', 'Sven', 'Olof'

Au Québec, les premiers essais d'évaluation du potentiel de la biomasse du saule ont commencé au début des années 90 avec deux espèces, l'une indigène (*S. discolor*) et l'autre européenne (*S. viminalis* '5027'). Après deux saisons de croissance suivant la mise en place, leur biomasse aérienne totale était très similaire (entre 15 et 20 t/ha de matière sèche par an) (Figure 2). Cela confirmait le potentiel de ces deux espèces dans les conditions pédoclimatiques du Québec [28]. Un autre essai a été fait visant à évaluer ces deux espèces comparativement à *S. petiolaris* Smith. Les premières espèces testées (*S. discolor* et *S. viminalis*) se sont montrées supérieures à celle-ci en matière de productivité de la biomasse [21]. Cependant, depuis plusieurs années, les cultivars de *S. viminalis* ont montré une sensibilité aux insectes. Particulièrement à la cicadelle de la pomme de terre (*Empoasca fabae*). Le risque de maladies épidémiques augmente à mesure que la zone de plantation grandit. Un nouvel ensemble de cultivars choisis a subséquemment été étudié. Pour celles-ci, les expériences ont montré que, contrairement à la mauvaise performance de *S. viminalis* en raison de la sensibilité élevée à des ravageurs et à des maladies, d'autres cultivars de saule (*S. miyabeana* 'SX61', 'SX64', 'SX67') pourraient atteindre des rendements élevés en biomasse [29]. Cependant, les cultivars de saules nord-américains, en particulier *S. eriocephala* (cultivars 'S25' et 'S546') et *S. discolor* (cultivar 'S365'), donnent de bons rendements légèrement inférieurs à 'SX67', ce qui permet de les considérer pour les grandes plantations au Québec en raison de leur faible exigence d'entretien et une sensibilité moins grande aux maladies et ravageurs.

Une nouvelle sélection de matériel de plantation a été rendue disponible pour les agriculteurs et les chercheurs intéressés par la culture du saule au Québec. Agro Énergie (www.agroenergie.ca) a été la première pépinière commerciale de grande envergure au Québec à produire divers cultivars de saules et continue de contribuer à l'expansion des CICR dans l'est du Canada.



Figure 2. Tige de trois ans de *S. viminalis* '5027' cultivé à Huntingdon, Québec. Avant les années 2000, ce cultivar était l'un des plus productifs, avec le temps il est devenu particulièrement sensible aux ravageurs.

2. Technique de production de saules en CICR

2.1 Établissement de la plantation

2.1.1 Choix des sites et types de sols recherchés

Afin de diminuer le coût de transport, la plantation devrait être située à proximité des utilisateurs de la biomasse. Le producteur sera avantagé par l'existence d'un réseau routier à l'extérieur et à l'intérieur de la plantation permettant un accès facile des équipements en toute saison. Des parcelles de grandes dimensions de forme rectangulaire sont préférables à de petits lots irréguliers pour minimiser le nombre de manœuvres occasionnées par la manipulation d'équipements tels les tracteurs ou les récolteuses. En général, le sol souhaitable pour la culture de saules en CICR doit présenter un drainage modéré jusqu'à imparfait, une profondeur minimale de 1 m, un pH entre 5,5 et 7,5. Les terrains pierreux, très mal drainés, trop acides, avec une texture très lourde ou sableuse sont à éviter. Sur ces types de sols, la culture de saule est possible, mais les rendements sont moindres et les coûts de production deviennent plus élevés.

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent avoir une influence sur une plantation de saule sur courtes rotations. Afin de maximiser le succès de la plantation, tous ces facteurs devraient être évalués avant son établissement. D'un point de vue écologique, la majorité des espèces de saule sont communes dans les régions tempérées froides et sont adaptées aux habitats mésiques hydriques. Cependant, la plupart des espèces riveraines demandent un substrat bien aéré, un bon drainage et un apport régulier en eau tandis que les espèces non riveraines sont moins exigeantes quant au drainage et l'aération des sols [23]. L'établissement de la plantation et l'obtention de bons rendements en biomasse sont tributaires de la disponibilité de l'eau. En moyenne, le taillis de saules exige plus d'eau pour la croissance que les cultures agricoles conventionnelles [24] et par conséquent, le sol capable de retenir davantage d'humidité est préférable, voire essentiel. Les basses terres de la vallée du Saint-Laurent, où la plupart des plantations de saule au Québec ont été établies avec succès au cours des deux dernières décennies, se caractérisent par un climat tempéré et humide avec une moyenne annuelle des températures de 6,4 °C, une température moyenne de croissance (mai-octobre) de 15,8 °C et une moyenne des précipitations annuelles totales de 970 mm. La période sans gel est en moyenne de 182 jours et le nombre total de degrés-jours de croissance (au-dessus de 5 °C) est de 2 100.

La plupart des terres agricoles abandonnées au Québec sont situées dans des régions tempérées et souvent assez fertiles donc très bien adaptées à la croissance des saules. D'autres considérations préalables à l'établissement des saules sont liées à l'emplacement de la plantation. Les bénéfices économiques et écologiques peuvent être maximisés lorsque les niveaux élevés de production de saules sont atteints combinés à de faibles exigences en matière d'intrants se traduisant par un faible impact environnemental. Pour cette raison, le choix du bon emplacement est crucial pour un système de production d'énergie durable. Pour des raisons pratiques (principalement liées au labour et à la récolte), les terres ne devraient pas avoir une pente de plus de 15 %. Les sites idéaux sont plats ou avec une pente ne dépassant pas 7 à 8 %.

2.1.2 Préparation des boutures

Les plantations de saules se font en utilisant des boutures en bois sec à partir de tiges dormantes idéalement âgées d'une année. Après leur récolte, ces tiges doivent être stockées dans un réfrigérateur à une température de -2 à -4 °C et une atmosphère saturée en humidité. Au printemps, deux à trois semaines avant la plantation, les tiges sont sélectionnées, pour préparer les boutures. Il faut sélectionner des tiges de saule saines (sans symptômes de maladie sur l'écorce) de 1 à 2 cm de diamètre. Les pointes de tiges portant des boutons floraux sont rejetées. Ensuite, le reste des tiges sont coupées en longueurs de 20 à 25 cm à l'aide d'une scie rotative adaptée et elles sont stockées dans des boîtes, prêtes à être plantées (Figure 3).



Figure 3. Boutures de saules prêtes pour leur plantation.

Si les boutures sont laissées à des températures supérieures à 0 °C, il se produira une interruption dans leur dormance, des racines adventives pourraient se développer et des bourgeons pourraient éclater. Cela entraînerait une réduction de la teneur en eau et en éléments nutritifs et par conséquent la viabilité des boutures en serait réduite. Il est donc très important de planifier soigneusement l'opération de plantation, en calculant le nombre de boutures devant être plantées.

Dans certains cas plus exceptionnels, les boutures peuvent être prélevées au printemps sur des tiges directement au champ. Cette procédure comporte cependant plus de chance d'insuccès car souvent l'accessibilité au champ correspond à la période de débourrement des saules et il n'est pas recommandé de prélever des boutures à ce moment.

2.1.3 Préparation du terrain avant plantation

Une bonne préparation du terrain est impérative pour avoir une croissance vigoureuse. Ceci est d'autant plus important si le sol est marginal ou de qualité moyenne. Les travaux doivent avoir comme résultats, une répression efficace des mauvaises herbes avec une forte diminution des rhizomes des vivaces (100%, si possible), un bon ameublissement du sol en profondeur, avec une surface de plantation uniformisée et sans grandes mottes (diamètre < 2-3 cm). Ainsi, avant la plantation, les opérations suivantes sont recommandées :

L'année avant la plantation, au milieu de l'été, on applique 2.5 à 5 litres de Roundup™ (glyphosate) à l'hectare pour réprimer la végétation concurrente (surtout les vivaces). Le traitement est effectué quand les mauvaises herbes présentent une hauteur de 20 à 25 cm, avant qu'elles produisent des semences. Après deux ou trois semaines, le sol est labouré à une

profondeur de 25 à 30 cm. Les équipements agricoles (charrues et pulvérisateurs) peuvent convenir. L'utilisation de glyphosate n'est pas essentielle, dans plusieurs situations d'établissement de plantation de saule, seul un travail mécanique a été utilisé pour préparer le terrain. Cela dépend des conditions initiales du champ et de la volonté des producteurs.

L'année de la plantation, juste avant la plantation, un travail superficiel du sol (15 à 18 cm) par un passage croisé d'une herse à disques ou à dents sur la direction du labour de l'automne est nécessaire.

2.1.4 Plantation

Dans certains pays, par exemple au Royaume-Uni et aux États-Unis, on se sert de planteuses mécanisées appelées « *Step planter* ». Dans ce cas, ce sont des tiges de saule de 1,5 à 2,5 m de long qui sont utilisées et introduites dans la planteuse par deux ou plusieurs opérateurs, selon le nombre de rangées (Figure 4a). La machine coupe les tiges en longueurs de 18 à 20 cm. On insère les boutures verticalement dans le sol et on raffermi le sol autour de chaque coupe. Dans une étude britannique, on a estimé l'efficacité de cette planteuse à 0,6 ha/heure [31].

Au Québec, la machine la plus couramment utilisée est une planteuse à fraisières adaptée pour des boutures de 20 à 25 cm, ce qui permet de planter simultanément trois rangs de boutures (Figure 4b).

Cet équipement ouvre un sillon dans le sol à une profondeur d'environ 18 cm et la bouture y est introduite. Basé sur l'expérimentation empirique, cet équipement peut planter de 3 600 à 4 000 boutures par heure soit un hectare de saules toutes les trois à quatre heures, bien que la durée de cette opération puisse varier en fonction de plusieurs facteurs (topographie du site, type de sol, forme du terrain, etc.).

Le temps de plantation varie également selon les conditions météorologiques. Cependant, en entreprenant la plantation dès que possible au printemps, on permet aux plants de profiter de l'eau de la fonte des neiges, de s'établir rapidement et d'ainsi bénéficier d'une longue saison de croissance. En outre, une plantation tardive est également plus à risque d'échec dû à une sécheresse éventuelle si un été sec devait se produire. Cependant, il existe plusieurs facteurs supplémentaires qui jouent



Figure 4. a) *Step planter* utilisé pour les grandes productions de saules, notamment en Suède. b) Planteuse à fraisières adaptée pour la plantation de boutures de saule.

un rôle important dans la détermination de la date de plantation. Par exemple si un hersage est nécessaire, le sol devra être exempt de neige. S'il est boueux, le travail du sol avec le passage des tracteurs pourrait endommager la structure du sol. La date à laquelle les conditions d'implantation sont remplies varie considérablement d'une année à l'autre. Dans le sud du Québec, c'est en mai que la plantation a usuellement lieu, bien qu'une plantation tardive (jusqu'à la mi-juin) soit possible sans poser de problèmes sérieux dans l'établissement des végétaux. La plantation de saule dans les régions les plus froides du nord du Québec (par exemple, l'Abitibi) peut avoir lieu jusqu'au début de juillet. Dans tous les cas sur des sols fertiles, une colonisation rapide par de mauvaises herbes hautement compétitives peut survenir et nécessiter l'utilisation d'herbicides appropriés afin de maximiser la survie des plantes et la croissance précoce.

Les saules peuvent être plantés selon deux configurations différentes. Dans la plupart des pays d'Europe du Nord (Suède, Royaume-Uni, Danemark) et aux États-Unis, le plan de plantation le plus fréquent est constitué de doubles rangs espacés de 0,75 m et distancé de 1,5 m du prochain rang double (Figure 5). Les plantes sont espacées de 0,4 m à 1 m sur le rang. Cet espacement correspond à une densité de plantation de 10 000 à 25 000 plants à l'hectare. La densité de plantation la plus courante de ces pays est actuellement d'environ 15 000 (1,5 m sur 0,75 m sur 0,59 m) plants à l'hectare [31]. Les plantations rectangulaires sont souvent utilisées pour faciliter les manœuvres de la machinerie. Les tracteurs chevauchent le double rang et les roues circulent dans les bandes plus larges entre ces rangs [32]. Au Québec, un design de plantation de saule plus simple, semblable à celui utilisé pour le peuplier sur courtes rotations, a été utilisé depuis des essais initiaux avec un minimum de modifications. Il est constitué d'un design à simple rang avec des plants espacés de 0,33 m sur le rang et de 1,80 m entre les rangs pour un total d'environ 18 000 plants à l'hectare (Figure 5).



Figure 5. À gauche, design de plantation à rangs simples espacés de 1,80 m. À droite, design de plantation à rang double (0,75 m entre les rangs doubles espacés de 1,5 m).

Cette conception facilite la maîtrise des mauvaises herbes au cours de la phase d'établissement des trois premières années. Il favorise également l'enracinement et la croissance des saules. En fait, le choix de la conception dépend principalement des machines disponibles pour la plantation et la récolte. L'expérience a montré que la conception de la plantation a moins d'effet que la densité des plants sur le rendement des saules, en raison de leur capacité à profiter de l'espace disponible [32]. Le choix de la densité de plantation doit tenir compte de plusieurs facteurs, dont

des facteurs édaphiques. Sur les sites où l'approvisionnement en eau est approprié, l'établissement des plants et la production de biomasse dépendent en grande partie de considérations agronomiques telles que l'espacement entre les plants et les cycles des récoltes. De nombreuses études ont rapporté une corrélation entre la densité de plantation et les cycles de récolte. En général, les rendements maximaux sont atteints au début des plantations à haute densité de saule, mais les plantations avec un plus grand espacement (plus faible densité) garantissent le meilleur rendement de la biomasse à long terme [33-34]. Il faut souligner que les plantations de saule ont une durée de vie relativement courte (25 années), car ils sont susceptibles d'être exposés à plusieurs ravageurs et maladies [35]. À l'heure actuelle, la plupart des plantations en courtes rotations de saules au Québec ont une densité de 16 000 à 17 000 plants à l'hectare et sont récoltées tous les deux ou trois ans.

Toutes les opérations effectuées au cours de la première année visent l'établissement des saules et un taux de survie élevé, assurant ainsi la pérennité et la rentabilité de la plantation. Les mauvaises herbes sont le principal problème rencontré dans la culture des saules. Elles colonisent les champs malgré les traitements de pré-émergence. Il a été établi que durant la première année de plantation, les mauvaises herbes, particulièrement vigoureuses, réduisent la croissance des saules de 50 % à 90 % [36]. La plupart de ces espèces ont des taux de croissance plus élevés que le jeune saule. La compétition repose principalement sur la lumière et dans une moindre mesure sur l'eau et sur les nutriments. Cette rivalité entraîne une mortalité élevée des plants au cours des premiers mois [37]. Par conséquent, tout devrait être mis en œuvre pour contrôler le développement des mauvaises herbes sur le terrain dans les semaines suivant la plantation.

Les recherches conduites à l'IRBV ont permis de recommander un mélange de deux herbicides, le Devrinol et la Simazine pour efficacement réprimer les mauvaises herbes. Ce mélange doit être appliqué en bande sur les rangs, dans les heures qui suivent la plantation (suivre attentivement le mode d'emploi recommandé du fabricant). Puisque le traitement aux herbicides doit atteindre la zone de germination des graines de mauvaises herbes, la plupart des herbicides en pré levée nécessite une incorporation mécanique pour obtenir de meilleurs résultats. Les quantités totales utilisées recommandées sont de 2,3 kg de Devrinol et de 0,375 kg de Simazine à l'hectare. Avec l'utilisation d'un pulvérisateur à rampe d'une largeur de 9 m (six buses), le temps de travail varie de 20 à 30 minutes par hectare en fonction de la forme de la parcelle. Au cours de la première année (juillet et août), deux sarclages mécaniques exécutés avec un rotoculteur seront nécessaires afin de diminuer la population de mauvaises herbes entre les rangs. Pour les deuxième et troisième années de culture, un sarclage mécanique par an devrait suffire.

Plus récemment, SureGuard^{MD} (flumioxazin), un nouvel herbicide, a reçu l'approbation pour l'utilisation en pré émergence sur les peupliers et les saules.

Il est bon de souligner que l'usage d'herbicides dans les plantations de saules n'est fait qu'au cours de la première année de la culture et que ceux-ci n'auront pas à être utilisés pour les vingt ou trente prochaines années d'exploitation.

2.1.5 Le recépage à la fin de la première saison

Il existe de nombreuses preuves que la plupart des plantations nouvellement établies bénéficient d'être rabattus à la fin de la première saison de croissance (Figure 6). Non seulement ce recépage stimule les boutures établies à produire de multiples pousses vigoureuses au printemps suivant, mais il contribue également à réduire la concurrence des mauvaises herbes, permettant une réduction de leur contrôle par des herbicides [38]. En outre, le recépage facilite l'entrée sur le terrain au début de la deuxième saison de croissance, la fertilisation et le labourage entre les rangs. Le rabattage est normalement effectué à l'automne en coupant toutes les pousses nouvellement formées à la hauteur du sol à l'aide d'équipements agricoles classiques, comme une débroussailleuse.



Figure 6. Aspect d'une plantation de saules au printemps suivant le recépage d'automne.

2.2 Entretien de la plantation

2.2.1 Gestion des mauvaises herbes

Si la répression des mauvaises herbes a été bien faite au cours de la première saison suivant la plantation, il ne faudra qu'un ou deux sarclages mécaniques pour assurer un bon contrôle de la végétation concurrente.

2.2.2 Fertilisation

Pour de nombreuses raisons, la fertilisation est un aspect controversé de la plantation de saules sur courtes rotations et laisse place à de nombreuses variations dans la pratique. Il semble que l'attitude initialement très favorable à l'utilisation d'engrais chimiques ait tendance à s'atténuer au fil du temps, principalement parce que d'autres facteurs que le rendement en biomasse ont surgi tels que des enjeux économiques et environnementaux. Différentes réglementations ont également été apportées dans la législation de certains pays afin de préserver les sols et la nappe phréatique de surcharges de fertilisant et en privilégiant l'application de biosolides ou de divers résidus organiques. Il n'en reste pas moins qu'en raison des rendements élevés en biomasse récoltée, les sols utilisés pour les CICR sont susceptibles d'être rapidement appauvris en nutriments comme on peut le voir au Tableau 2.

Certains auteurs ont souligné que la fertilisation en azote était généralement un moyen très efficace d'améliorer la croissance des saules en CICR tout au cours de l'exploitation des plantations, à l'exclusion de l'année de plantation [39-47]. D'autre part, les besoins en nutriments des saules sont relativement faibles en raison du recyclage efficace de l'azote dans la litière et de la teneur relativement faible en nutriments de la biomasse (tige). Par conséquent, beaucoup

Tableau 2. Croissance et utilisation durables de la biomasse. Quantité moyenne d'éléments nutritifs (kg) prélevés par tonne de biomasse sèche de saule selon la littérature scientifique.

N	P	K	Ca	Mg	Reference
20.6	6.9	13.7	-	-	[39]
13.6	1.5	8.5	-	-	[40]
13.0	1.6	8.3	-	-	
6.3	1.0	7.5	-	-	[41]
5.7	1.0	3.0	3.0	1.0	[42]
5.3	0.9	3	7.2	0.7	
7.5	0.6	1.8	4.2	0.4	[43]
5.0	0.7	1.8	3.5	0.3	
3.9	0.5	1.5	3.6	0.2	[44]
3.5	0.5	2.5	-	-	[45]

moins d'engrais azoté devrait être appliqué en comparaison de ce qui se fait en agriculture conventionnelle. Le taux d'application de fertilisant devrait cependant être basé sur des analyses du sol effectuées avant l'établissement des saules. Par ailleurs, les considérations économiques constituent un autre facteur à intégrer lors de la détermination de la dose d'engrais à utiliser, puisque ceux-ci représentent un pourcentage significatif du coût de production de biomasse de saules. Une étude récente menée dans l'état de New York a montré que la fertilisation représentait de 10 % à 20 % du coût de production des saules en CICR [48].

La dose moyenne généralement recommandée au Québec varie de 100 kg à 150 kg d'azote, de 15 kg à 40 kg de phosphore et d'environ 40 kg de potassium à l'hectare par an après l'année d'établissement. Puisqu'il n'est pas possible d'introduire de l'équipement lourd sur le terrain après l'établissement des plantations, l'application d'engrais est normalement effectuée un an après la plantation (et suivant le premier recepage d'automne).

Des engrais chimiques peuvent être utilisés pour respecter les formules de fertilisation proposées. Mais l'usage de résidus organiques constitue sans doute la meilleure façon de fertiliser ces plantations. Plusieurs essais ont été réalisés notamment avec des eaux usées municipales [49], des déchets solides comme les boues digérées ou granulées [50] et le purin de porc [51] (Figure 7).

La fertilisation des saules avec ces produits est très appropriée pour plusieurs raisons. Premièrement, il a été déterminé par des modèles d'estimation que cette culture a des taux d'évapotranspiration élevés minimisant le risque de lessivage [24, 52, 53]. De plus, il a été démontré que plantations de saules sur courtes rotations sont capables d'absorber de grandes quantités d'éléments nutritifs présents dans ces résidus durant toute la



Figure 7. Épandage de lisier de porc dans une plantation de saules en CICR.

saison de croissance et même tardivement à l'automne [51, 54]. Dernier point, mais non le moindre, la culture des saules sur courtes rotations est une agriculture non destinée à l'alimentation et l'usage de résidus de ferme ou autres n'entraînent pas de risque pour la santé humaine ou animale [51]. Dans certains essais récents effectués au Québec pour tester la possibilité d'utiliser des boues dans les CICR de saules, on a constaté qu'une dose modérée de boues comprenant l'équivalent de 100 à 150 kg d'azote disponible pouvait constituer un bon engrais pour l'établissement des cultures en particulier sur les sites argileux [55]. La dose maintenant recommandée de boues d'épuration des eaux usées au Québec se situe entre 18 et 21 tonnes à l'hectare ce qui correspond à une dose de 100 à 120 kg d'azote disponible par hectare. La fertilisation est effectuée au printemps de la deuxième année après la plantation avec des épanduses à fumier ordinaire. Un autre projet récent a étudié l'effet de l'utilisation de purin de porc comme engrais sur la productivité des saules dans une CICR (Figure 7). Les résultats ont montré que le purin de porc constituait un bon engrais pour les plantations de saules. De très hauts rendements en biomasse ont été obtenus dans ces conditions permettant de réduire les rotations de trois à deux années permis de prévoir que les cycles de rotation de trois ans pourraient être réduits à deux années [51]. Le fait de pouvoir coupler les plantations de saules avec le recyclage de résidus quelconque permet de réduire significativement les coûts de production et d'accroître les bénéfices environnementaux engendrés par cette pratique agricole.

2.2.3 Maladies et ravageurs

Les saules peuvent être sensibles à certaines maladies fongiques [56]. Ainsi, le feuillage peut souvent être affecté par des rouilles notamment par *Alternaria spp.*, *Melampsora spp.* et *Venturia spp.* Sur les tiges on peut parfois trouver les pathogènes *Cryptodiaporthe spp.*, *Glomerella spp.* et *Valsa spp.* Des maladies racinaires des saules sont plus rares mais parfois, les racines sont atteintes par *Armillaria spp.*, *Fusarium spp.* et *Verticilium spp.* [57]. Le problème fongique le plus fréquent et à craindre pour les plantations de saules, est la rouille des feuilles, causée par *Melampsora spp.* Dans le nord de l'Europe, la rouille des feuilles est considérée comme un facteur majeur de limitation de la croissance des saules en CICR [58]. Il peut provoquer une défoliation prématurée, une mauvaise acclimatation au froid, une sénescence hâtive des feuilles, une prédisposition à la sécheresse et réduire les rendements de 40 % [59].

L'une des principales solutions alternatives à l'usage de fongicides de pulvérisation et qui a été développée dans le nord de l'Europe consiste à cultiver les saules en mélange d'espèces ou de cultivars [60]. Si un cultivar est fortement atteint, les autres cultivars restants peuvent compenser la perte [61]. Dans certaines plantations de saules au Québec, des attaques sévères de *Melampsora spp.* ont été détectées principalement sur un cultivar commercial spécifique le *S. eriocephala x S. interior* 'S625', qui semblait être plus vulnérable à la rouille que tout autre cultivar étudié dans la région [29]. En dehors de ce cas, peu d'attaques sévères de rouille ont été signalées sur la plupart des cultivars commerciaux utilisés au Québec et nous convenons que la lutte chimique ou biologique contre les maladies n'est généralement pas requise.

Les saules sont également sujets à des attaques fréquentes et variées par des insectes ravageurs. Trois espèces principales sont préoccupantes pour les CICR de saules au Québec. Le premier est une espèce de chrysomèle (*Plagioderia versicolora*) introduit d'Europe et considérée comme envahissante en Amérique du Nord. On la retrouve fréquemment sur les feuilles de saule en

plantations. Il s'agit d'un petit insecte d'allure métallique (4 à 6 mm de long) largement réparti partout dans le monde. Au Québec, les adultes sortent de leurs abris hivernaux sous l'écorce et se nourrissent de jeunes feuilles de saule au printemps. La ponte commence à la mi-juin. Les femelles pondent des œufs jaunes regroupés sur le dessous des feuilles. Les jeunes larves émergent quelques jours plus tard et commencent à se nourrir des deux côtés des feuilles et mangent le tissu entre les veines. Les feuilles deviennent squelettiques selon l'ampleur de l'attaque conduisant le plus souvent à une réduction de la croissance des plantes. Cet insecte a été fréquemment observé se nourrissant des feuilles de cultivars de *Salix viminalis* et, dans une moindre mesure, sur les cultivars commerciaux de *S. miyabeana* ('SX61', 'SX64' et 'SX67'). À ce jour, le seuil de dommage causé par cet insecte n'a jamais été suffisamment élevé pour justifier la mise en place de mesures de répression. Toutefois, en cas d'attaque sévère, des produits non toxiques à base de *Bacillus thuringiensis* (BT) se sont avérés efficaces pour éliminer cet insecte [62].

Les autres insectes prédominants qui se nourrissent de saule sont deux pucerons soit le puceron géant du saule, *Tuberolachnus salignus* et le puceron des écorces du saule, *Pterocomma salicis* [63]. Le puceron géant du saule constitue l'un des plus grands pucerons jamais enregistrés, il peut mesurer jusqu'à 5,8 mm de longueur [62]. Il se nourrit presque exclusivement de saule bien qu'il ait été très occasionnellement observé sur du peuplier (*Populus spp.*). L'espèce est fortement agrégative, formant de vastes colonies sur des arbres infestés. Ces colonies peuvent couvrir une



Figure 8. Pucerons géants du saule (*Tuberolachnus salignus*) sur des tiges de *Salix viminalis*.

partie importante de la surface de tiges de saules âgés d'un à trois ans (Figure 8). Des expériences en laboratoire avec des saules cultivés en sol et en culture hydroponique ont révélé que cette espèce peut réduire les rendements en biomasse. Ces pucerons peuvent réduire la survie des arbres nouvellement plantés ou même déjà établis [63]. D'autres études préliminaires réalisées au Royaume-Uni ont montré que le comportement d'alimentation de cet insecte est affecté par des signaux chimiques provenant de l'hôte. Les chercheurs ont découvert que l'un de ses saules préférés était *S. viminalis* [64]. Bien que de grandes colonies de cet insecte aient été souvent trouvées sur plusieurs cultivars de saule au Québec, il n'est pas encore possible d'estimer si cette présence constitue une menace pour les plantations de saules dans l'est du Canada.

Le puceron des écorces du saule, *Pterocomma salicis*, peut effectivement représenter une menace seulement si des attaques graves et fréquentes surviennent. Il semble que cette espèce soit moins dommageable que le puceron géant du saule. Au Québec, des populations de haute densité de cette espèce ont récemment été

découvertes à la fin du mois de juin sur une plantation de saule dans la région de Huntingdon, principalement sur *S. miyabeana* (SX67 et SX61).

D'autres insectes moins nocifs ont été trouvés sur des plantations de saule au Québec. *Calligrapha multipunctata bigsbyana* adultes et ses larves peuvent se nourrir de feuilles de saule sans détruire les veines de la feuille, avec des conséquences très similaires à celles de *Plagioderia versicolora*. Des espèces de *Crepidodera spp.* sont rapportées sur des feuilles de *Salicaceae* [65]



Figure 9. Dommages causés par le cèphe du saule (*Janus abbreviatus*) sur des tiges de *S. miyabeana*.

et sont faciles à reconnaître par leur surface supérieure métallique brillante et bicolore, la tête bleue ou verte et le pronotum teinté de bronze, de cuivre ou de violet. Ce coléoptère se nourrit sur la surface supérieure ou inférieure de la feuille, en consommant l'épiderme et les tissus en-dessous. Les cultivars de saules développés en Europe, basés sur des pedigrees avec *Salix viminalis* ou *S. viminalis* x *S. schwerinii*, sont sensibles à la cicadelle de la pomme de terre (*Empoasca fabae*), qui cause des dommages sérieux à cette espèce et à ses cultivars ou hybrides. Des larves de cèphe du saule (*Janus abbreviatus*) sont également fréquentes sur plusieurs variétés de saules au Québec (Figure 9). Les larves creusent des tunnels profonds sur les jeunes tiges de saules (notamment *S. miyabeana*) provoquant un flétrissement, un changement de couleur (brun ou noir) et une brisure des tiges. Dans la région d'Huntingdon au Québec, on a observé dans des plantations de *S. miyabeana* 'SX64' où plus de 30 % des individus présentaient des signes d'attaques par cet insecte. Cependant, les saules récupèrent généralement assez bien de ces attaques sans trop affecter les rendements à moyens termes.

2.2.4 Récolte

Au Québec, la récolte de la biomasse de saule se fait généralement à l'automne après la chute des feuilles. Il existe diverses façons de récolter des saules, le choix de la destination finale de la biomasse et l'équipement disponible est déterminant dans la manière de faire. Nous présentons ici trois méthodes les plus couramment utilisées.

La récolte en balles de saules

Les saules peuvent être récoltés à l'aide d'équipement qui effectue des déchiquetages légers et met en balles les tiges de saule. Le Biobaler^{MD}, conçu par une équipe de l'Université Laval, peut convertir la biomasse des saules en balles de 1,20 m, attachée, compactée et prête pour un usage industriel [22]. Il a une capacité de produire jusqu'à 40 balles par heure (20 t à l'hectare) sur les plantations de saule (Figure 10). Le principal avantage repose sur le fait que les balles peuvent

être laissées au champ pour leur permettre de sécher avant d'être déchiquetées. Les risques liés à la manipulation de la biomasse humide sont ainsi réduits [66].



Figure 10. Le Biobaler à l'œuvre dans une plantation de saules à Varennes, Québec.

La récolte par mise en copeaux directe au champ

Une autre possibilité demande l'utilisation de machines récolteuses par mise en copeaux directement au champ. Il s'agit de fourragère automotrice de plus grande puissance et modifiées spécialement pour récolter des tiges de saule et les mettre en copeaux. Les tiges sont découpées, déchiquetées et les copeaux sont soufflés dans une remorque soit entraînée parallèlement à la moissonneuse, soit directement reliée à celle-ci. Bien que ce modèle de récolte soit très efficace sur le plan économique et recommandé dans de nombreux

pays, il présente également plusieurs inconvénients qui doivent être soigneusement évalués. La biomasse de saule a une teneur en humidité de 50-55 % (base humide) à la récolte. Par conséquent, le stockage et le séchage du bois fraîchement coupé peuvent causer des problèmes. Il a été démontré que les copeaux de bois frais entreposés dans des piles peuvent chauffer jusqu'à 60 °C dans les 24 heures et commencer à se décomposer. Les piles de biomasse nécessitent une gestion attentive parce que la fermentation interne peut causer une combustion et un haut développement de champignons produisant des spores pouvant entraîner divers problèmes. Les



Figure 11. Autre modèle de récolteuse conçu pour des plantations de plus grandes dimensions.

processus de décomposition provoquent une perte de biomasse allant jusqu'à 20 % et une réduction significative de la valeur calorifique de la biomasse [67]. Ainsi, ce type de système de récolte nécessite des infrastructures pour sécher mécaniquement la biomasse (par exemple ventilation, chauffage, mélange à la machine) et ces opérations de post-récolte augmentent le coût de production. Alternativement, le matériel fraîchement coupé doit être livré aux installations de chauffage dès que possible.

La récolte en bâtonnets (« *billet harvesting* »)

Une autre méthode utilise une récolteuse à cannes à sucre légèrement modifiée. Moins productive que la mise en copeaux directe au champ, cet équipement permet la récolte d'un matériau qui peut plus aisément être entreposé pour une longue durée. Cet appareil a été désigné au Royaume-Uni et est couramment employé pour la co-combustion du bois de saule dans les centrales thermiques au charbon.

3. Rendements potentiels

Comme pour toute autre culture agricole, le rendement en biomasse du saule sur courtes rotations dépend de nombreux facteurs comme les cultivars, le site, le climat et les opérations de gestion. Le type de sol, la disponibilité en eau et la lutte contre les ravageurs et les mauvaises herbes affectent également le rendement. Les données provenant de sites commerciaux existants au Royaume-Uni suggèrent que les rendements moyens d'environ 8 à 10 tonnes de masse sèche à l'hectare par année sont représentatifs des plantations utilisant des cultivars plus anciens, alors que les rendements de biomasse aussi élevés que 15 à 18 tonnes de matière sèche à l'hectare par année peuvent être obtenus en utilisant du matériel génétique sélectionné [31]. Dans d'autres pays d'Europe septentrionale, on a observé une croissance annuelle moyenne de 15 à 20 tonnes de matière sèche à l'hectare par année dans les premières expériences [68], bien que des chiffres plus récents donnent à penser qu'une moyenne de 10 tonnes de matière sèche à l'hectare par année serait plus réaliste [69].

Des rendements allant de 24 à 30 tonnes de matière sèche à l'hectare par année ont été obtenus dans plusieurs plantations expérimentales aux États-Unis et au Canada [43, 44], bien que les rendements typiques se situent le plus souvent dans la plage de 10 à 12 tonnes de matière sèche à l'hectare par année [70]. Des essais à long terme réalisés sur des CICR de saules sous les conditions pédoclimatiques du sud du Québec ont par ailleurs permis de montrer que des rendements élevés pouvaient être obtenus pendant de nombreuses années, même si les résultats variaient selon les cultivars utilisés [71].

Dans un essai de comparaison de divers cultivars réalisé dans la région de Huntingdon, on a trouvé au terme de trois rotations (15 ans) que les cultivars les plus productifs étaient 'SX64' (moyenne de 19 t.s a⁻¹ ha⁻¹) et 'SX61' (moyenne de 17 t.s a⁻¹ ha⁻¹), deux cultivars de *S. miyabeana* (Figure 12) [72]. De plus, les cultivars de saule nord-américains, en particulier les cultivars *S. eriocephala* ('S25') et *S. discolor* ('S365'), présentaient un potentiel élevé de biomasse (13-15 t.s a⁻¹ ha⁻¹). Une autre étude conduite également à Huntingdon a montré que les saules pouvaient toujours maintenir un haut niveau de productivité après cinq cycles d'élevage. Les plantes peuvent rester vigoureuses et produire des rendements élevés (14 tonnes de

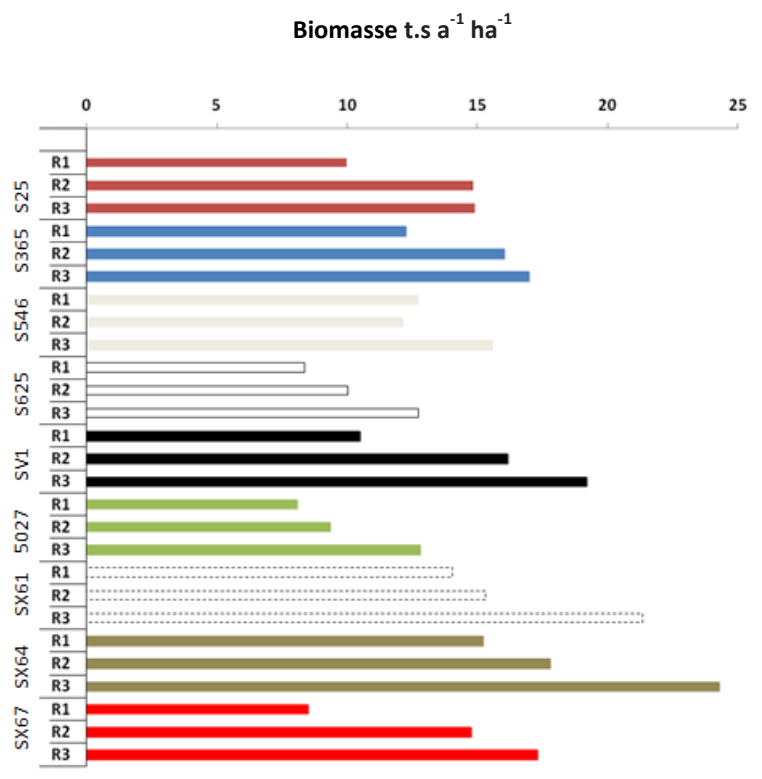


Figure 12. Rendement en biomasse moyen de neuf cultivars de saule cultivés en CICR durant trois rotations dans la région de Huntingdon, Québec.

matière sèche à l’hectare par année) même après 18 ans de culture. Cela constitue une démonstration très importante de la viabilité de l’exploitation économique à long terme des saules.

3.1. Rendements attendus selon les régions du Québec

Des travaux de recherche ont été conduits par l’équipe de l’IRBV dans le cadre du Réseau des plantes bio-industrielles du Québec (RPBQ) afin de vérifier le potentiel de rendements de cinq cultivars de saule (‘SX61’, ‘SX64’, ‘SX67’, ‘SV1’ et ‘5027’) commercialement disponibles dans huit régions du Québec présentant des conditions pédoclimatiques contrastées (Figure 13 et Tableau 3).

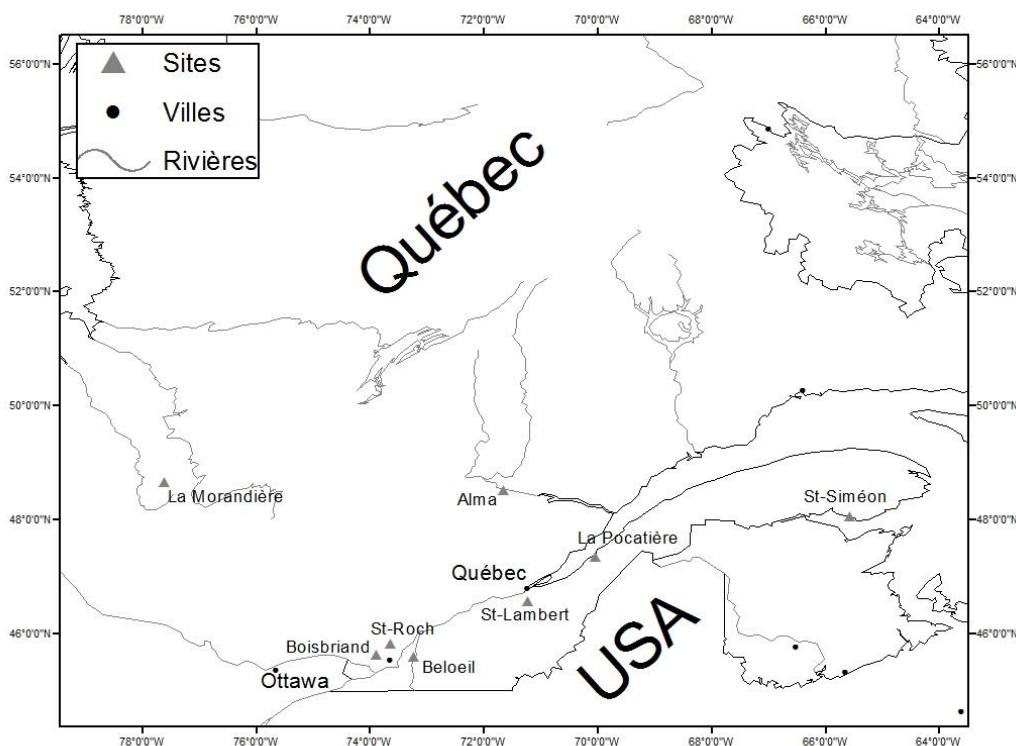


Figure 13. Localisation des plantations expérimentales pour l.

Tableau 3. Localisation et principales caractéristiques climatiques¹ des sites d’étude.

Site	Température annuelle moyenne (°C)	Précipitation annuelle moyenne (mm)	Température moyenne M-J-J-A ² (°C)	Précipitation totale M-J-J-A ² (mm)	Degrés-jour Annuel (> 5°C)
Alma	2,7	987	15,2	386	1581
Beloeil	6,3	1040	18,0	304	2122
Boisbriand	5,9	1093	17,6	401	2029
La Morandière	1,5	929	14,3	390	1423
La Pocatière	4,5	933	15,1	361	1582
St-Lambert	4,4	1253	16,2	472	1745
St-Roch	6,4	998	18,4	360	2166
St-Siméon	4,0	957	14,6	374	1504

¹ Les données climatiques sont tirées des normales climatiques publiées par Environnement Canada pour la période 1981-2010 (Environnement Canada, 2015).

Ces travaux ont permis de comparer la survie, la résistance aux maladies et ravageurs et les rendements au terme d'une première rotation de trois ans en CICR [73]. D'une manière générale, le rendement des plantations semble particulièrement influencé par le total des précipitations et l'accumulation de chaleur (c.-à-d. degrés-jour) au cours de la saison de croissance.

L'étude a permis de montrer que certains cultivars semblaient mieux performer que les autres, peu importe leur région d'implantation. Cependant, il a aussi été trouvé que pour certaines régions un ou des cultivars semblaient nettement mieux adaptés (Figure 14). Ainsi le cultivar '5027' qui

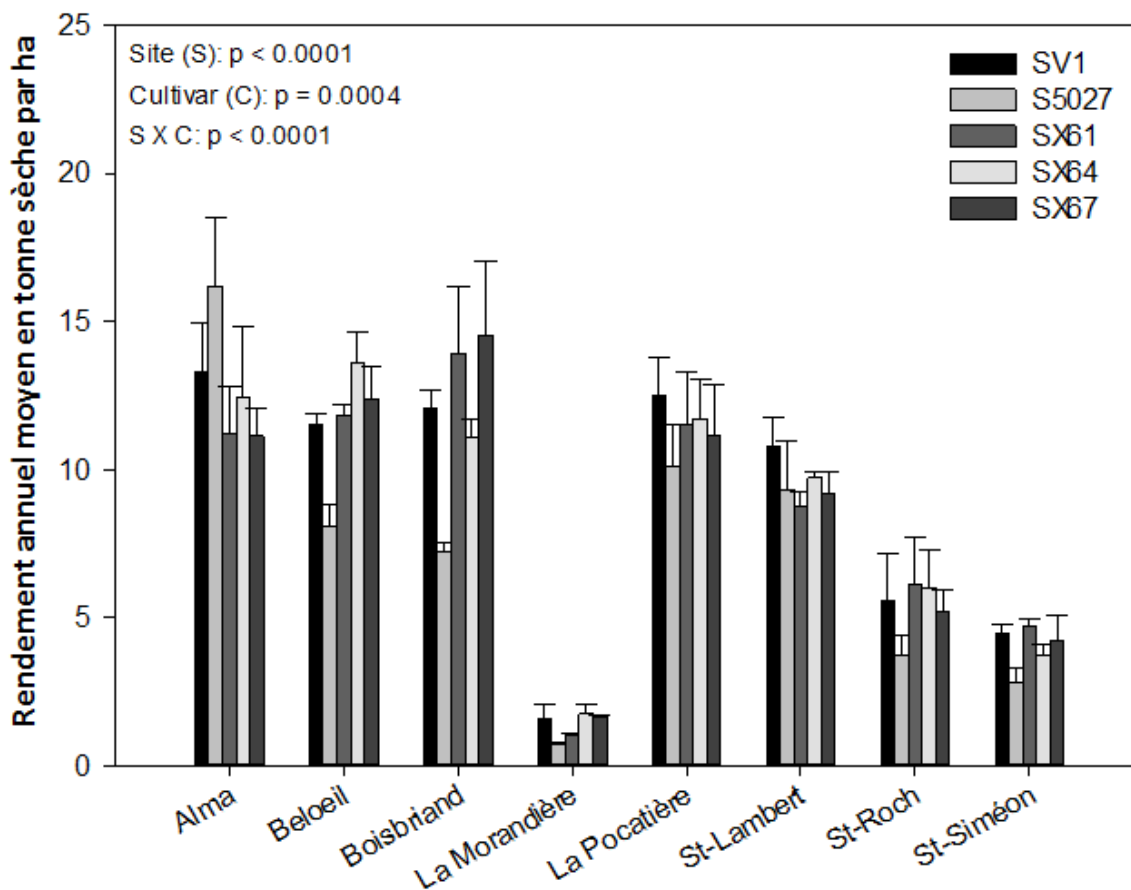
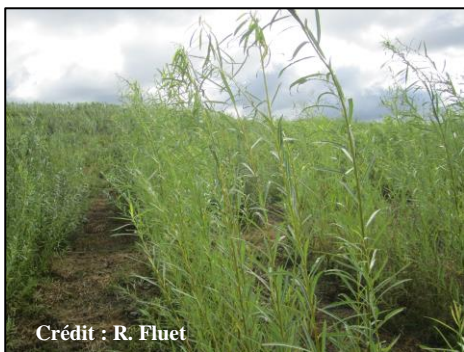


Figure 14. Comparaison des rendements (biomasse sèche par ha) annuels moyens de cinq cultivars des saules cultivés dans huit régions pédoclimatiques différentes du Québec au cours d'une première rotation.

Note : Les résultats pour La Morandière (Abitibi) ne devraient pas être considérés car ceux-ci n'ont été cumulés que pour deux saisons contrairement aux autres sites où les rendements moyens ont été calculés après trois saisons de croissance.

présentait des rendements généralement plus bas dans la majorité des régions, a particulièrement bien poussé dans la région d'Alma où il a été le cultivar le plus productif avec un rendement annuel moyen de 16,2 tonnes sèches par hectare. Cela est probablement attribuable au fait que ce cultivar, particulièrement vulnérable au cèpe du saule (*Janus abbreviatus*) dans le sud du Québec, a été beaucoup moins affecté dans la région d'Alma, lui permettant d'exprimer son plein potentiel. Le cultivar 'SV1' s'est aussi révélé particulièrement productif à La Pocatière, alors qu'à Beloeil, Boisbriand et St-Roch-de-l'Achigan ce sont les cultivars de *S. miyabeana* ('SX61', 'SX64', 'SX67') qui ont montré les meilleurs rendements.



Crédit : R. Fluet

Figure 15. Saules en CICR à Alma où la croissance de *S. viminalis* '5027' d'un an s'est révélée particulièrement impressionnante.

Un autre résultat surprenant concerne les faibles rendements présentés par l'ensemble des cultivars pour l'essai réalisé à St-Roch-de-l'Achigan, une municipalité pourtant située dans le sud du Québec (Lanaudière). Cette situation pourrait s'expliquer par les conditions édaphiques du sol utilisé pour cet essai caractérisées par un long historique de culture et de labours répétés ayant conduit à une forte compaction du sol [74]. Cette compaction limite sans doute la croissance des racines et

la prospection du sol en profondeur ce qui restreint l'accès à l'eau et aux nutriments [75].

En général, cette étude aura montré que les cinq cultivars testés ont généralement bien performés partout au

Québec et seules les régions les plus extrêmes (Gaspésie et Abitibi) semblent avoir significativement entraîné des baisses de rendements en biomasse.

4. Aspects économiques

Les producteurs éventuels de saules seront sans doute intéressés à avoir une idée des coûts que pourraient représenter la production de biomasse suivant ces approches de CICR. Au cours des dernières années, l'équipe de l'IRBV a eu l'occasion de travailler à de telles estimations. Ces coûts ont pu être validés par certains producteurs de saules. Il demeure que ces estimations peuvent varier selon plusieurs facteurs et que selon la région, la qualité du sol, la disponibilité des équipements agricoles, etc., les coûts de production pourront être passablement différents.

Ainsi les coûts de production de la biomasse de saule en CICR ont été estimés en tenant compte du temps de travail pour chacune des opérations exécutées (travaux d'entretien et de récolte, etc.), des taux horaires de la main-d'œuvre et des coûts de location des équipements. Cette estimation est basée sur le suivi de plantations établies dans le sud-ouest du Québec et pour la production de biomasse qui pourrait être exploitée pour huit rotations de trois ans chacune. Cette période représente la durée de vie productive probable d'une plantation de saules. Ces évaluations de coûts sont basées sur des saules plantés sur des terres récemment abandonnées par l'agriculture qui présentent une texture du sol moyenne ou lourde.

Nous rapportons au Tableau 4 les données prévues sur un maximum de huit cycles de production. Le coût d'acquisition des boutures a été fixé à 0,15 \$ l'unité mais ce prix pourrait légèrement être réduit si la préparation des boutures se faisait directement par le producteur à partir de ses propres plantations. D'ailleurs, il est conseillé aux futurs producteurs de saules en CICR d'acheter au début une quantité limitée de boutures de différents cultivars afin de réaliser une surface de pieds mères pour pouvoir produire eux-mêmes leur matériel.

On remarque aussi qu'à partir du troisième cycle de recépage, la productivité en biomasse a été revue à la baisse parce qu'actuellement nous ne disposons de données fiables que pour les premiers cycles de récolte.

Tableau 4. Estimations des coûts de production pour une plantation de saule d'une superficie d'un hectare dans le sud-ouest du Québec des terres récemment abandonnées par l'agriculture qui présentent une texture du sol moyenne ou lourde.

PÉRIODE		OPÉRATIONS	\$/ha
PREMIÈRE ANNÉE			
Année avant plantation	Désherbage chimique (Roundup),		100
	Labour d'automne		100
		Total	200
1 ^{ère} année	Travaux mécaniques, sol agricole de texture moyenne (herse à disque au printemps)		100
	Coût des boutures (0,15 \$ par unité, 16 000 unités/ha)		2400
	Plantation mécanique 3 rangées (coût d'opération)		600
	Désherbage chimique mauvaises herbes annuelles (Devrinol, Simasine)		150
	Entretien de la culture (sarclages mécaniques, 2 fois)		150
		Total	3400
2 ^e année	Transport et fertilisation avec des boues d'usines d'épuration (30 t/ha, boues gratuites)		200
	Sarclages mécaniques entre les rangées (une fois)		75
	Traitements antiparasitaires (au besoin)		100
	Total		375
3 ^e année	Première récolte	Total	1 250
Coût total première rotation			5 225
DEUXIÈME ROTATION			
4 ^e année	Fertilisation		200
	Entretien de la culture (sarclages mécaniques, une fois)		75
	Traitements antiparasitaires (au besoin)		100
		Total	375
5 ^e année	Pas de travaux	Total	0
6 ^e année	Récolte	Total	1 825
Coût total seconde rotation			2 200
TROISIÈME ROTATION			
7 ^e année	Fertilisation		200
	Entretien de la culture (sarclages mécaniques, une fois)		75
	Traitements antiparasitaires (au besoin)		100
		Total	375
8 ^e année	Pas de travaux	Total	0
9 ^e année	Récolte	Total	1 525
Coût total troisième rotation			1 900
Coût d'élimination de la plantation de saules			400
EN RÉSUMÉ			
1 ^{ère} rotation	50 tonnes		5 225
2 ^e rotation	70 tonnes		2 200
3 ^e rotation	60 tonnes		1 900
4 ^e rotation	45 tonnes		1 850
5 ^e rotation	45 tonnes		1 850
6 ^e rotation	45 t/ha		1 850
7 ^e rotation	45 t/ha		1 850
8 ^e rotation	45 t/ha		1 850
	Remplacement de la culture		400
Total	405 t/ha		18 975
Coût par tonne de biomasse sèche récoltée			46,85

Note: À partir du quatrième cycle jusqu'au huitième cycle la productivité pourrait baisser à 45-50 t/ta biomasse sèche. Les coûts de récolte seront aussi diminués.

La production totale en biomasse sur 24 ans est évaluée à 405 t/ha. Le prix moyen réactualisé par tonne de biomasse de saule réduite en copeaux, calculé sur la période de vie de la plantation, est de 46,85\$ par tonne, livraison aux utilisateurs non incluse. On comprendra qu'une productivité en biomasse supérieure et l'utilisation à grande échelle d'équipements mécanisés spécialisés pourraient diminuer le prix de la tonne de biomasse de saule.

Des chercheurs américains basés à la *State University of New York (SUNY)* ont conçu un modèle économique d'analyse financière pour la production de saules en CICR. L'outil appelé EcoWillow 2.0 (<http://www.esf.edu/willow/download.htm>) est disponible en ligne et peut être gratuitement téléchargé. Il permet d'anticiper les coûts de production suivant différents scénarios et paramètres.

5. Les CICR pour des applications environnementales

L'utilisation des saules en CICR a une incidence positive sur la conservation et la restauration des écosystèmes, la fixation du gaz carbonique, la diversification des habitats fauniques et la beauté des paysages. Ces cultures améliorent à long terme la structure et la texture des sols, augmentent la quantité de matière organique et réduisent l'érosion éolienne et hydrique. Les saules en CICR peuvent être utilisés pour la filtration des eaux usées [76], la décontamination de sols pollués [77-79] ou plantés en bandes riveraines comme filtre biologique pour limiter les pertes en nutriments et pesticides qui autrement sont accumulés dans le réseau hydrique [80]. Plus récemment, il a été démontré que des saules plantés densément pouvaient avoir une certaine efficacité pour filtrer certains pesticides, (notamment certains composés de dégradation du Manzate, un fongicide abondamment utilisé par les pomiculteurs) qui se retrouvent dans les eaux souterraines qui sortent d'un verger [81].

6. Conclusion

L'est du Canada est une région où les CICR de saule ont fait l'objet de nombreux projets de recherche au cours des 20 dernières années. La plupart des données expérimentales publiées au cours de cette période ont confirmé que les CICR de saules représentaient un potentiel intéressant pour le Québec. Ceci s'expliquerait notamment par des conditions pédoclimatiques favorables à la production de saules et l'incidence relativement faible des ravageurs et des maladies pour la majorité des cultivars commerciaux disponibles. Des rendements élevés en biomasse ont été obtenus dans plusieurs de ces plantations. Toutefois, l'évolution future des productions de saules sera certainement influencée par le développement d'un marché actif pour cette biomasse. En particulier, l'évolution de la technologie de transformation des matières premières et l'exploitation de composés à haute valeur ajoutée extraits des saules méritent d'être approfondies.

7. Références

1. Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., Hawthorne, P., 2008. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science* 319, 1235–1238
2. FAO, 2012. Impacts of Bioenergy on Food Security—Guidance for Assessment and Response at National and Project Levels, Environment and Natural Resources Working Paper, Rome, p. 64.
3. Tilman, D., Socolow, R., Foley, J.A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., Somerville, C., Williams, R., 2009. Beneficial Biofuels—The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science* 325, 270–271.
4. Nassi, O., Di Nasso, N., Guidi, W., Ragolini, G., Tozzini, C., Bonari, E., 2010. Biomass production and energy balance of a twelve-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *Global Change Biology Bioenergy* 2, 89–97.
5. Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M.H., Parrish, D.J., 2006. Potential Soil Carbon Sequestration and CO₂ Offset by Dedicated Energy Crops in the USA. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25, 441–472.
6. Londo, M., Dekker, J., Ter Kreuz, W., 2005. Willow short-rotation coppice for energy and breeding birds: An exploration of potentials in relation to management. *Biomass and Bioenergy* 28, 281–293.
7. Bellamy, P.E., Croxton, P.J., Heard, M.S., Hinsley, S.A., Hulmes, L., Hulmes, S., Nuttall, P., Pywell, R.F., Rothery, P., 2009. The impact of growing miscanthus for biomass on armland bird populations. *Biomass and Bioenergy* 33, 191–199.
8. Dickmann, D., 2006. Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass and Bioenergy* 30, 696–705.
9. Drew, A.P., Zsuffa, L., Mitchell, C.P., 1987. Terminology relating to woody plant biomass and its production. *Biomass* 12, 79–82.
10. McAlpine, R., Brown, C., Herrick, A., Ruark, H., 1966. “Silage” sycamore. *Forestry Farmer* 26 7–16.
11. Herrick, A.M., Brown, C.L., 1967. A new concept in cellulose production: silage sycamore. *Agricultural Science Review* 5, 8–13.
12. Auclair, D., Bouvarel, L., 1992. Intensive or extensive cultivation of short rotation hybrid poplar coppice on forest land. *Bioresource Technology* 42, 53–59.
13. Kenney, W., Sennerby-Forsse, L., Layton, P., 1990a. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass* 21, 163–188.
14. Sims, R.E.H., Senelwa, K., Maiava, T., Bullock, T., 1999. Eucalyptus for energy in New Zealand-Part II: coppice performance. *Biomass and Bioenergy* 17, 333–343.
15. Grünwald, H., Böhm, C., Quinkenstein, A., Grundmann, P., Jörg Eberts, J., von Wühlisch, G., 2009. *Robinia pseudoacacia* L.: A Lesser Known Tree Species for Biomass Production. *Bioenergy Research* 2, 123–133.
16. Rytter, L., Šlapokas, T., Granhall, U., 1989. Woody biomass and litter production of fertilized grey alder plantations on a low-humified peat bog. *Forest Ecology and Management* 28, 161–176.
17. Keoleian, G.A., Volk, T.A., 2005. Renewable energy from willow biomass crops: Life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24, 385–406.
18. Grislis K, Labrecque L., 2009. Proliferating Willow for Biomass. *Silviculture Magazine* summer 2009, 12–15.
19. Mosseler, A., 1990. Hybrid performance and species crossability relationships in willows (*Salix*). *Canadian Journal of Botany* 68, 2329–2338.
20. Kenney, W.A., Sennerby-Forsse, L., Layton, P., 1990b. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass* 21, 163–188.

21. Labrecque, M., Teodorescu, T., Cogliastro, A., Daigle, S., 1993. Growth patterns and biomass productivity of two *Salix* species grown under short-rotation intensive culture in southern Quebec. *Biomass and Bioenergy* 4, 419–425.
22. Lavoie, F., Savoie, P., D'Amours, L., Joannis, H., 2008. Development and field performance of a willow cutter shredder baler. *Applied Engineering in Agriculture* 24, 165–172.
23. Dickmann, D.I., Kuzovkina, J., 2008. *Poplars and willows of the world, with emphasis on silviculturally important species*. FAO Rome, Italy
24. Persson, G., 1995. Willow stand evapotranspiration simulated for Swedish soils. *Agricultural Water Management* 28, 271–293.
25. Jackson, M., Attwood, P., 1996. Roots of willow (*Salix viminalis* L) show marked tolerance to oxygen shortage in flooded soils and in solution culture. *Plant and Soil* 187, 37–45.
26. Ledin, S., 1996. Willow wood properties, production and economy. *Biomass and Bioenergy* 11, 75–83.
27. Argus, G.W., 1999. Classification of *Salix* in the New World. *Botanical Electronic News* 227, <http://www.ou.edu/cas/botany-micro/ben227.html>.
28. Labrecque, M., Teodorescu, T., Daigle, S., 1997. Biomass productivity and wood energy of *Salix* species after 2 years of growth in SRIC fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy* 12, 409–417.
29. Labrecque, M., Teodorescu, T.I., 2005b. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy* 29, 1–9.
30. Labrecque, M., Teodorescu, T.I., Babeux, P., Cogliastro, A., Daigle, S., 1994. Impact of herbaceous competition and drainage conditions on the early productivity of willows under short-rotation intensive culture. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 493–501.
31. Defra, 2004. *Growing Short Rotation Coppice—Best Practice Guidelines For Applicants to Defra's Energy Crops Scheme*. London (UK).
32. Bergkvist, P., Ledin, S., 1998. Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems *Biomass and Bioenergy* 14, 149–156
33. Mitchell, C., 1995. New cultural treatments and yield optimization. *Biomass and Bioenergy* 9, 11–33.
34. Proe, M., Craig, J., Griffiths, J., 2002. Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry *Biomass and Bioenergy* 23, 315–326
35. Sennerby-Forsse, L., Ferm, A., Kauppi, A., 1992. Coppicing ability and sustainability. In: Mitchell, C., Ford-Robertson, J., Hinckley, T., Sennerby-Forsse, L. (Eds.), *Ecophysiology of short rotation forest crops*. Elsevier, London, pp. 146–184.
36. Willoughby, I., Clay, D.V., 1996. *Herbicides for Farm Woodlands and Short Rotation Coppice*. London.
37. Sage, 1999. Weed competition in willow coppice crops: the cause and extent of yield losses. *Weed Research* 39, 399–411.
38. Mitchell, C.P., 1992. Ecophysiology of short rotation forest crops. *Biomass and Bioenergy* 2, 25–37.
39. Kopp, R.F., White, E.H., Abrahamson, L.P., Nowak, C.A., Zsuffa, L., Burns, K.F., 1993. Willow biomass trials in Central New York State. *Biomass and Bioenergy* 5, 179–187.
40. Potter, C.J., 1990. Coppiced trees as energy crops. Final report to ETSU for the DTI on contract ETSU B 1078.
41. Caslin, B., Finnan, J., McCracken, A.R., 2010. *Short Rotation Coppice Willow Best Practice Guidelines*.
42. Hytönen, J., 1995. Ten-year biomass production and stand structure of *Salix 'aquatica'* energy forest plantation in Southern Finland. *Biomass and Bioenergy* 8, 63–71.

43. Labrecque, M., Teodorescu, T., 2003. High biomass yields achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-years coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 25, 135–146.
44. Adegbidi, H., Volk, T., White, E., Abrahamson, L., Briggs, R., Bickelaup, D., 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantation in New York State. *Biomass and Bioenergy* 20, 399–411.
45. Ericsson, T., 1994. Nutrient cycling in energy forest plantations. *Biomass and Bioenergy* 6, 115–121.
46. Alriksson, B., Ledin, S., Seeger, P., 1997. Effect of nitrogen fertilization on growth in a *Salix viminalis* stand using a response surface experimental design. *Scandinavian journal of Forest Research* 12, 321–327.
47. Ledin, S., Willebrand, E., 1996. *Handbook on How to Grow Short Rotation Forests*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Short Rotation Forestry, Uppsala.
48. Buchholz, T., Volk, T., 2011. Improving the Profitability of Willow Crops—Identifying Opportunities with a Crop Budget Model. *BioEnergy Research* 4, 85–95.
49. Perttu, K., 1999. Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 16, 291–297.
50. Labrecque, M., Teodorescu, T., 2001. Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada). *Forest Ecology and Management* 150, 223–239.
51. Cavanagh, A., Gasser, M.O., Labrecque, M., 2011. Pig slurry as fertilizer on willow plantation. *Biomass and Bioenergy* 35, 4165–4173.
52. Hall, R., Allen, S., Rosier, P., Hopkins, R., 1998. Transpiration from coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 275–290.
53. Guidi, W., Piccioni, E., Bonari, E., 2008. Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter. *Bioresource Technology* 99, 4832–4840.
54. Aronsson, P., Bergstrom, L., 2001. Nitrate leaching from lysimeter-grown short rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. *Biomass and Bioenergy* 21, 155–164.
55. Labrecque, M., Teodorescu, T., Daigle, S., 1995. Effect of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two *Salix* species. *Plant and Soil* 171, 303–316.
56. Pei, M.H., McCracken, A.R. (Eds.), 2005. *Rust Diseases of Willow and Poplar* CABI Publishing, CAB International Wallingford, Oxfordshire OX10 8DE UK.
57. Vujanovic, V., Labrecque, M., 2002. Biodiversity of pathogenic mycobiota in *Salix* bioenergy plantations, Québec. *Canadian Plant Disease Survey* 82 138–139.
58. Pei, M., Lindegaard, K., Ruiz, C., Bayon, C., 2008. Rust resistance of some varieties and recently bred genotypes of biomass willows. *Biomass and Bioenergy* 32, 453–459.
59. Parker, S.R., Pei, M.H., Royle, D.J., Hunter, T., Whelan, M.J., 1995. Epidemiology, population dynamics and management of rust diseases in willow energy plantations. Final Report of Project ETSU B/W6/00214/REP. Energy Technology Support Group, Department of Trade and Industry, UK.
60. McCracken, A.R., Dawson, W.M., 1997. Growing clonal mixtures of willow to reduce effect of *Melampsora epitea* var. *epitea*. *European Journal of Forest Pathology* 27, 319–329.
61. McCracken, A.R., Dawson, W.M., 2003. Rust disease (*Melampsora epited*) of willow (*Salix spp.*) grown as short rotation coppice (SRC) in inter- and intra-species mixtures. *Ann. Appl. Biol.* 143, 381–393.
62. Bauer, L.S., 1992. Response of the Imported Willow Leaf Beetle to *Bacillus thuringiensis* var. San Diego on Poplar Willow. *Journal of Invertebrate Pathology* 59, 330–331.

63. Collins, C.M., Rosado, R.G., Leather, S.R., 2001. The impact of the aphids *Tuberolachnus salignus* and *Pterocomma salicis* on willow trees. *Ann. Appl. Biol.* 138, 133–140.
64. Aradottir, G.I., Karp, A., Hanley, S., Shield, I., Woodcock, C.M., Dewhurst, S., Collins, C.M., Leather, S., Harrington, R., 2009. Host selection of the giant willow aphid (*Tuberolachnus salignus*). *Proceedings of the 8th International Symposium on Aphids. REDIA, XCII*, 223–225.
65. Seago, A., Lingafelter, S.W., 2003. Discovery of *Crepidodera Bella Parra* (Coleoptera: Chrysomelidae: Alticini) in Maryland and redescription. *Journal of the New York Entomological Society* 111, 51–56.
66. Gigler, J.K., van Loon, W.K.P., van den Berg, J.V., Sonneveld, C., Meerdink, G., 2000. Natural wind drying of willow stems. *Biomass and Bioenergy* 19, 153–163.
67. Jirjis, R., 1995. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy* 9, 181–190.
68. Ceulemans, R., McDonald, A., Pereira, J., 1996. A comparison among eucalyptus, poplar and willow characteristics with particular reference to a coppice, growth-modelling approach. *Biomass and Bioenergy* 11, 215–231.
69. Mola-Yudego, B., Aronsson, P., 2008. Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 32, 829–837.
70. Volk, T., Kiernan, B., Kopp, R., Abrahamson, L., 2001. First and second-rotation yield of willow clones at two sites in New York State. *Proceeding of the 5th Biomass Conference of the Americas*, Orlando, FL.
71. Guidi, W., F. E. Pitre, Teodorescu, T.I., Labrecque, M., 2013. Long term biomass productivity of bioenergy plantations maintained in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 56, 361-369.
72. Guidi, W., F.E. Pitre, M. and M., Labrecque, 2013. Short-rotation coppice of willows for the production of biomass in Eastern Canada. In *Biomass Now - Sustainable Growth and Use*, ISBN 978-953-51-1105-4, edited by Miodrag Darko Matovic In Biomass, In Tech Open Science. Chapter 17, 421-448.
73. Lafleur B., Lalonde, O., Labrecque, M., 2017. First-Rotation Performance of Five Short-Rotation Willow Cultivars on Different Soil Types and Along a Large Climate Gradient. *Bioenergy Research* 10, 158–166.
74. Fontana, M., Lafleur B., Labrecque, M., Courchesne, F, Bélanger, N., 2016. Maximum Annual Potential Yields of *Salix miyabeana* SX67 in Southern Quebec and Effects of Coppicing and Stool Age. *Bioenergy Research* 9, 1109–1125.
75. Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron Sustain. Dev.* 33, 291–309.
76. Guidi Nissim, W., Jerbi, A., Lafleur, B., Fluét, R., Labrecque, M., 2015. Willows for the treatment of municipal wastewater: long-term performance under different irrigation rates. *Ecological engineering* 81, 395-404.
77. Bissonnette, L., St-Arnaud, M., Labrecque, M., 2010. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field trial. *Plant and Soil* 332, 55–67.
78. Mosseler, A., J.E. Major, Labrecque M., 2014. Growth and survival of seven native willow species on highly disturbed coal mine sites in eastern Canada. *Can. J. For. Res.* 44: 340-349.
79. Grenier, V., Pitre, F.E., Guidi Nissim, W., Labrecque, M., 2015. Genotypic differences explain most of the response of willow cultivars to petroleum-contaminated soil. *Trees Structures and function* 29 (3), 871-881.
80. Hénault-Ethier, L., Smedbol, E., Dagenais, G., Racine, J.F., Juneau, P., Lepage, L., Labrecque, M., Lucotte, M., 2014. Les bandes riveraines en agriculture : Une approche pluridisciplinaire pour une application concrète. *Vecteur Environnement*, Septembre 2014, 52-57.
81. Lafleur, B.S., S., Sauvé, Duy, V., Labrecque, M., 2016. Phytoremediation of groundwater contaminated with pesticides using short-rotation willow crops: a case study of an apple orchard. *International Journal of Phytoremediation* 18 (11), 1128-1135.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en partenariat avec le CEROM et le Réseau des plantes bio-industrielles du Québec (PPBQ). Les auteurs tiennent à remercier Traian Ion Teodorescu et Werther Guidi Nissim, tous deux anciennement attachés à l'Institut de recherche en biologie végétale, pour avoir grandement contribué au développement de la technologie de CICR des saules au Québec. Benoit Lafleur, de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, a aussi été impliqué dans certaines phases des études conduites au cours des dernières années. Nous remercions tous les propriétaires de terrains privés de même que les gestionnaires de sites publics qui ont accepté que des plantations de saules soient établies pour conduire ces recherches. Enfin nous remercions le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) pour son soutien financier au RPBQ.