



**Production durable
de bois déchiqueté à
partir de Taillis à (très)
Courte Rotation**
Manuel d'utilisation



- Auteurs: Jannis Dimitriou & Dominik Rutz
- Traducteurs: Béatrice Mégret - Jacques Bernard – Aurélie Leplus
- Contributions: Rita Mergner, Stefan Hinterreiter, Laurie Scrimgeour, Jannis Eleftheriadis, Ilze Dzene, Željka Fištrek, Tomáš Perutka, Dagnija Lazdina, Gordana Toskovska, Linda Drukmane
- Editeur: Dominik Rutz
- ISBN:
- Translations: L'anglais est la langue originale de ce manuel. Ce manuel est également disponible en : Croate, Tchèque, Français, Allemand, Grec, Letton, and Macedonien.
- Publication: © 2015 par WIP Renewable Energies, Munich, Allemagne
- Contact: WIP Renewable Energies, Sylvensteinstr. 2, 81369 Munich, Allemagne
Dominik.Rutz@wip-munich.de, Tel.: +49 89 720 12 739
www.wip-munich.de
- Contact français: AILE
Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement,
73 rue de Saint Briec, CS56520, 35065 RENNES CEDEX
info@aile.asso.fr, Tel.: +33 299 546 323, www.aile.asso.fr
- Site internet: www.srcplus.eu
- Droit d'auteur: Tous droits réservés. Aucune partie de ce livre ne peut être reproduite sous quelque forme ou par tous moyens, afin d'être utilisé à des fins commerciales, sans l'accord écrit de l'éditeur. Les auteurs ne garantissent pas l'exactitude et / ou l'exhaustivité de l'information et les données incluses ou décrits dans ce manuel.
- Avertissement: La responsabilité du contenu de ce manuel est liée exclusivement aux auteurs. Ce manuel ne reflète pas nécessairement l'opinion de l'Union européenne ou de l'association Aile. Ni EASME ni la Commission Européenne ne sont tenus responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans ce manuel.



Co-funded by the Intelligent Energy Europe
Programme of the European Union

Remerciements

Ce manuel a été élaboré dans le cadre du programme de SRCplus (EIE / 13/574), soutenu par la Commission européenne dans le cadre du programme Energie Intelligente pour l'Europe (EIE) exploité par l'Agence exécutive pour les petites et moyennes entreprises (EASME). Les auteurs tiennent à remercier la Commission Européenne pour le soutien du projet SRCplus ainsi que les différents partenaires de SRCplus pour leur contribution à ce manuel.

Partenaires composant le consortium SRCplus



WIP Renewable Energies, Allemagne (Coordinateur du projet)
Dominik Rutz [Dominik.Rutz@wip-munich.de]
Rita Mergner [Rita.Mergner@wip-munich.de]



Biomassehof Achental, Allemagne
Stefan Hinterreiter [s.hinterreiter@biomassehof-achental.de]



Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement, France
Jacques Bernard [jacques.bernard@aile.asso.fr]



Centre for Renewable Energy Sources and Saving, Grèce
Jannis Eleftheriadis [joel@cres.gr]



Ekodoma, Lettonie
Ilze Dzene [ilze@ekodoma.lv]
Linda Drukmane [linda.drukmane@ekodoma.lv]



Energy Institute Hrvoje Požar, Croatie
Zeljka Fistrek [zfistrek@eihp.hr]



Energy Agency of the Zlin region, République Tchèque
Tomas Perutka [Tomas.Perutka@eazk.cz]



Latvian State Forest Research Institute Silava, Lettonie
Dagnija Lazdina [dagnija.lazdina@silava.lv]



Secondary School Car Samoil – Resen, Macedoine
Gordana Toskovska [gtoskovska@gmail.com]



Swedish University of Agricultural Sciences, Suède
Jannis Dimitriou [Jannis.dimitriou@slu.se]

Table des matières

Remerciements	3
Partenaires composant le consortium SRCplus	4
Préface	7
1 Introduction	8
2 Sélection des sites	9
Climat.....	9
Sol.....	9
Disponibilité en eau.....	10
Accessibilité	10
Surface	11
Situation dans le paysage	12
Schéma d'implantation.....	15
Législation.....	17
Prise en compte de l'aspect durabilité pour la sélection du site	18
3 Espèces d'arbres et de clones	22
Saule.....	22
Peuplier.....	25
Robinier.....	26
Eucalyptus	28
Aulne.....	29
Autres espèces	29
4 La mise en culture de TCR	30
Préparation du site	30
Matériel de plantation	32
Plantation.....	34
Conduite de la plantation.....	38
5 Récolte des TCR	41
Les rendements	41
Cycles de récoltes.....	43
Propriétés du matériel récolté.....	43
Méthodes de récolte.....	44
Le séchage et le stockage des plaquettes de bois	49
6 Logistique et transport	53
7 Remise en culture après un TCR	55
8 Valorisation des TCR	55

Qualité des plaquettes de bois énergie	56
Combustion des plaquettes de bois.....	61
9 Les TCR et leur impact sur l'environnement.....	65
Phytdiversité	65
Zoodiversité	68
Sol.....	72
Eau	73
Epandage de cendres et de boues d'épuration	74
Les systèmes agroforestiers.....	75
10 Rentabilité des cultures de TCR.....	76
Exemple 1: TCR de saule à Grästorp, Suède.....	76
Exemple 2 : TCR peuplier à Göttingen, Allemagne	78
Exemple 3: TCR des saules en Bretagne, France.....	80
Exemple 4 : TtCR de saules chez deux agriculteurs à Saint-Potan dans les Côtes d'Armor, France.....	81
Exemple 5: TtCR de saules à Enköping, Suède	82
Noms latins et communs des plantes.....	84
Unités de conversion	86
Bibliographie	89

Préface

La biomasse joue un rôle clé parmi les sources d'énergie renouvelables (SER). Elle représente près de 70% des énergies renouvelables utilisées dans l'Union Européenne. La demande future de bois pour le chauffage, le paillage et comme biomatériaux pour la construction ou encore le textile est prévue d'augmenter rapidement. Cela s'opèrera par la loi du marché et aussi grâce au soutien de la politique énergétique nationale et européenne, au travers des objectifs fixés par l'Union Européenne d'ici 2020. Il apparaît que la biomasse ligneuse issue des cultures implantées en taillis à courte rotation (TCR) peut contribuer de manière significative à atteindre ces objectifs.

Les pays membres de l'Union Européenne comptant les plus grandes surfaces de TCR pour la production d'énergie sont la Suède, le Royaume-Uni et la Pologne. Dans d'autres pays, la production de TCR reste limitée. Des projets pourraient émerger et la volonté politique pourrait contribuer à accroître le développement des TCR dans un proche avenir. Par conséquent, il est nécessaire de mettre en œuvre des actions de développement et d'accompagnement pour la mise en œuvre de chaînes locales d'approvisionnement à partir de TCR dans d'autres pays de l'Union Européenne. Tel est l'objectif du projet SRCplus qui vise à promouvoir les Taillis à courte rotation pour alimenter les unités de production de chaleur. Sept pays de l'Union Européenne sont impliqués dans le programme SRC+, dont les régions cibles sont citées ci-après :

- Achantal (Allemagne)
- Région Est (Croatie)
- Vidzeme (Lettonie)
- Rhône-Alpes et Bretagne (France)
- Zlin (République Tchèque)
- Kentriki Makedonia (Grèce)
- Prespa (Macédoine)

SRCplus a commencé en mars 2014 pour une durée de 3 ans. Le projet est soutenu par le programme Énergie intelligente pour l'Europe (Dossier n ° IEE / 13/574). Le consortium regroupe 10 partenaires dont les représentants des régions cibles citées précédemment, ainsi que le coordinateur WIP Renewable Energies, basé en Allemagne et le référent technique suédois SLU.

L'objectif global du projet SRCplus est de mettre en œuvre diverses actions de sensibilisation, de formation et d'échange afin de renforcer la capacité des acteurs clés (agriculteurs, collectivités, propriétaires fonciers publics, et exploitants de chaufferies bois et autres unités de cogénération, gazéification) à considérer la culture des TCR comme étant une source bois énergie exploitable et intéressante, au même titre que le bois issu de la forêt, du bocage, etc...

La présente publication « Production durable de plaquettes de bois déchiqueté à partir de Taillis à (très) Courte Rotation - Manuel d'utilisation " a été rédigée en anglais par Dominik Rutz (WIP) et Jannis Dimitriou (SLU). Ce manuel technique présente les différentes pratiques agricoles recensées au niveau européen, en intégrant le cadre législatif de chacun. La valeur ajoutée de ce manuel est l'accent mis sur l'aspect durable d'une chaîne d'approvisionnement en bois énergie avec des TCR implantés localement.

Aile a intégré le projet en Juin 2015 suite au retrait anticipé du partenaire français la Communauté de Communes du Trièves. Aile n'a donc malheureusement pas pu contribuer à alimenter la version originale de ce manuel mais a ajouté quelques retours d'expérience lors de sa traduction.

1 Introduction

Les taillis à courte rotation sont des cultures pérennes implantées sur des terres agricoles. Leur croissance rapide permet d'envisager des récoltes régulières pour la production de biomasse ligneuse. On distingue les TCR (Taillis à Courte Rotation) dont la densité moyenne est de l'ordre de quelques milliers d'arbres par hectare pouvant faire l'objet d'une récolte tous les 8 à 15 ans, des TtCR (Taillis à très Courte Rotation) dont la densité plus importante peut aller jusqu'à 15 000 arbres par hectares dont l'objectif est de réaliser une récolte tous les 2 à 4 ans.

Les cultures ligneuses à courte rotation sont récoltées après une courte période, une nouvelle plantation doit être envisagée après la récolte (pratiqué pour certains clone d'eucalyptus ou de robinier). On les distingue des cultures en taillis qui ne nécessitent pas de replantation systématique (souvent pratiqués pour les saules et les peupliers mais aussi pour le robinier et l'eucalyptus).

Encadré 1: Qu'est-ce qu'un taillis?

Le «**Taillis**» (Photo 1) est caractérisé par la capacité des espèces d'arbres sélectionnées à produire de nouveaux rejets après la coupe. Ce manuel se concentre principalement sur la culture des arbres en taillis. Cependant, il fait parfois référence à des espèces qui doivent être replantées après la récolte. Par conséquent, l'abréviation TCR est utilisée tout au long du manuel pour les cultures ligneuses à courte rotation et les taillis à courte rotation.



Photo 1: Un « taillis traditionnel » de saule au premier plan, et un « taillis moderne » de peupliers au deuxième plan (Source: Rutz D.)

Les TCR sont constitués d'espèces ligneuses comme l'aulne, le frêne, le hêtre, le bouleau, l'eucalyptus, le peuplier, le saule, le robinier faux-acacia, le paulownia, le murier, l'érable sycomore, et d'autres encore. Les principales espèces utilisées dans l'Union Européenne sont le peuplier et le saule. Ainsi, ce manuel se concentre principalement sur ces espèces. Les TtCr peuvent être implantés avec du saule, du peuplier ou du robinier faux-acacia.

Les TCR constituent une alternative intéressante aux cultures énergétiques annuelles, et complémentaire. Elles peuvent avoir un impact positif sur le système de production de l'exploitation agricole. Les services rendus à l'agriculteur et à son système d'exploitation sont détaillés dans le chapitre 9 « Les TCR et leur impact sur l'environnement ».

2 *Selection des sites*

Ce chapitre propose de faire l'inventaire des facteurs de réussite d'une culture de TCR et de TtCR afin qu'elle puisse être exploitée dans de bonnes conditions pour produire du bois énergie tout en produisant d'autres bénéfices.

En premier lieu, il est nécessaire de réunir les conditions permettant une bonne reprise des boutures, facteur conditionnant l'obtention d'un bon rendement et de revenus potentiels.

La sélection des sites détaillée dans cette partie du manuel fait particulièrement référence aux TCR et TtCR de saule et de peuplier qui sont jusqu'à présent les espèces les plus couramment utilisées.

Climat

Le saule et le peuplier, sont originaires de la zone tempérée nordique. Ils s'adaptent à différentes conditions climatiques et sont tolérantes au froid. En Europe méridionale, la tolérance à la sécheresse constitue la principale caractéristique de sélection des espèces et variétés.

Si possible, le matériel végétal utilisé dans une plantation TCR devra avoir été testé dans les conditions locales et empiriquement introduit sur le marché pour en assurer le succès. Certains programmes de recherche ont montré de très bons résultats pour des clones cultivés dans certaines latitudes ayant abouti à de mauvaises reprises et de faibles rendements dans d'autres conditions.

Sol

Les espèces utilisées pour les TCR sont très peu exigeantes vis-à-vis du sol. Cependant, les meilleurs rendements sont observés dans des sols profonds à bon potentiel agronomique et réserve en eau utile suffisante mais pas excessive.

Les besoins en eau des TCR excluront les terres séchantes et superficielles qui fourniront de faibles rendements.

Des sols limono-argileux avec une bonne aération et une rétention en eau sont idéaux pour la culture des TCR.

Les sols à pH 5-7,5 permettront une croissance satisfaisante. La recherche observe qu'il existe un certain nombre d'espèces (par exemple pour le saule et le peuplier) tolérantes à un pH en dehors de cette plage (Caslin et al., 2010).

La plantation sur les terres inondables ou des zones humides sensibles (photo 2, photo 3) doit être soigneusement évaluée car les itinéraires techniques et l'exploitation de cette culture (préparation, plantation, entretien et récolte) peut faire intervenir des machines lourdes dont l'utilisation peut être rendue difficile, voire impossible selon la portance des sols. En terrain humide, le compactage du sol peut avoir un impact négatif lié à la pression exercée sur le système racinaire. Sur ce type de terre, l'utilisation de machines lourdes pourra se faire lors des périodes très sèches ou lorsque le sol est gelé. Sinon une intervention manuelle ou semi-manuelle sera préférable.



Photo 2: TCR de saules plantés sur un champ d'extraction de tourbe en Biélorussie. Le sol contient une grande quantité de matière organique (Source: Dimitriou I.)



Photo 3: Plantation de TCR de saules sur un terrain avec un haut niveau d'eau souterraine en Suède. Malgré le niveau élevé de l'eau, qui doit être évité, le saule TCR peut encore croître de façon satisfaisante car le saule tolère des conditions anoxiques. (Source: Dimitriou I.)

Disponibilité en eau

La demande en eau des TCR est généralement plus élevée que pour les cultures agricoles conventionnelles. Par conséquent, il convient de privilégier les zones où les précipitations sont plus élevées ou ayant accès à l'eau souterraine ou d'autre disponibilité en eau (plans d'eau, eaux usées...) (Photo 4).

De grandes variations en termes d'utilisation efficace de l'eau entre les différents cultivars / variétés / clones de la même espèce ont été signalées. Par conséquent, les pépiniéristes ou les vendeurs de matériel végétal doivent informer l'agriculteur sur la pertinence du matériel végétal choisi au regard des conditions pédo-climatiques du site.

Pendant la plantation des boutures, lorsque les racines ne sont pas encore développées, une bonne humidité du sol est essentielle pour assurer le succès de la plantation. Ce moment doit être bien planifié, en effet des pertes graves se sont produites dans les plantations réalisées au cours de périodes très sèches.

Dans les pays où la disponibilité en eau est limitée et où les espèces utilisées sont adaptées à des climats plus chauds, comme l'eucalyptus, il est nécessaire d'étudier l'impact de la plantation sur les eaux souterraines notamment en zone de protection de captage d'eau potable. Aucun impact majeur n'a pu être relevé à ce jour, seulement de petites parties de zones de captage ont été implantées en TCR (Dimitriou et al., 2012a).

Les racines restent généralement dans la partie supérieure de 40-50 cm du sol. Si un système de drainage a été installé récemment, le producteur peut choisir un autre emplacement pour les TCR afin de minimiser les risques potentiels.

Accessibilité

Les plantations de TCR doivent être facilement accessibles depuis les routes qu'elles soient municipales, départementales ou nationales (photo 5). L'accès des équipements motorisés jusqu'au site aura lieu le plus souvent en hiver au moment de la récolte.

En général, les zones avec des pentes supérieures à 10% ne sont pas adaptées pour les grandes plantations au vu des pratiques de plantation et de récolte mécanisées, en particulier si des conditions humides se présentent. Pour les petites plantations, où les

pratiques de plantation manuelles et de récolte semi-manuelles sont mises en œuvre, l'implantation peut être faite sur des pentes autour de 10%.



Photo 4: TCR de peuplier irrigué avec des eaux usées municipales dans le sud de l'Espagne. Les rendements sont améliorés grâce à l'apport d'eau (Source: Dimitriou I.)



Photo 5: Un champ TCR de saule planté parallèlement à une route avec un accès facile pour les machines et avec des tournières qui facilitent la mécanisation (Source: Nord N-E)

Surface

La surface de la plantation a un impact considérable sur la gestion de la plantation ainsi que sur la logistique et les coûts d'implantation et d'exploitation. Selon le pays et l'objectif de la plantation, la surface de plantation doit être au minimum de 2 à 5 ha pour être économiquement viable.

Toutefois, les plantations de TCR peuvent aussi être cultivées sur des zones plus petites (photo 6), s'il y a par exemple plusieurs autres plantations mises en place dans le secteur qui permettent d'utiliser des synergies (coordonner la récolte dans le même temps et donc réduire les coûts connexes...). Les petites plantations sont envisageables par exemple si celles-ci ont pour objectif de répondre aux besoins énergétiques d'une exploitation tout en valorisant des terres peu productives ou une zone à risque d'érosion en tant que bande ligno-cellulosique. Dans le cas d'un traitement tertiaire d'eau usée en aval d'une station d'épuration, la surface est calculée en fonction des besoins de traitement et de la capacité épuratoire du système sol-TCR. Les petites surfaces peuvent être gérées manuellement (AILE, 2007).



Photo 6: Un champ de TCR de saule de petite taille placé au milieu d'un paysage agricole ; malgré sa petite taille (environ 2 hectares), la plantation est située à proximité d'autres parcelles de TCR ce qui permet de coordonner les travaux (Source: Nord N-E.)

La configuration de la parcelle jouera un rôle sur la facilité de gestion et la durée des chantiers et aura donc un impact économique important. Des champs longs et rectangulaires

sont plus faciles à gérer lors de la plantation et la récolte (en particulier lorsque le déchiquetage est réalisé directement), mais aussi pour la lutte contre les mammifères (lapins, chevreuils, etc.). Cependant, dans la pratique, les cultures traditionnelles sont souvent plantées sur ces parcelles. Par conséquent, les champs de forme plus petite et irrégulière sont souvent choisis pour les TCR (JTI, 2014).

Situation dans le paysage

La gestion des TCR présente davantage de similitudes avec l'agriculture que la sylviculture dans ses pratiques. Toutefois, plusieurs caractéristiques visuelles des TCR, comme la hauteur des arbres (par exemple jusqu'à 8 m de haut au bout de trois à quatre ans), et l'alignement des arbres, ajoute de nouvelles caractéristiques dans un paysage agricole. Le TCR apporte un caractère tridimensionnel et visible, contrairement aux cultures annuelles qui maintiennent des paysages généralement assez ouverts. Par conséquent, le TCR peut avoir un impact négatif sur le paysage ouvert, mais, lorsqu'il est bien conçu, peut apporter des améliorations.

Indépendamment des conditions réglementaires, qui exigent l'obtention d'une permission de planter des TCR auprès des propriétaires des terrains voisins, le fait d'ouvrir le dialogue avec le voisinage permet d'éviter les conflits. De plus, cela permet de sensibiliser et pourquoi pas de susciter de l'intérêt pour des cultures méconnues.

Le TCR ne devrait pas être planté à proximité de sites d'importance historique de par la hauteur des cultures qui pourrait entraîner des impacts négatifs. Une prudence particulière doit être accordée sur les zones de conservation du paysage et de protection de la nature. La législation spécifique sur ces zones doit être respectée.

Les parcelles de TCR situées en dessous des lignes électriques doivent être récoltées plus régulièrement pour éviter de toucher les lignes électriques.

Si le TCR est cultivé pour fournir de la biomasse à une chaufferie de taille importante (Photo 9) et donc concentré autour du site, l'impact d'une forte densité de plantations est à prendre en considération.

Cependant, ce problème sera évité dans le cas de production à plus petite échelle. L'évaluation des surfaces nécessaires est la suivante : pour une chaufferie de 2 MW, environ 15 à 20.000 tonnes la biomasse de bois seront nécessaires. En considérant un rendement de 10 t MS / ha / an, la surface d'approvisionnement s'élève à 1 500-2 000 ha de TCR. Cette surface correspond à environ 1,5% de la surface totale d'une zone avec rayon de 20 km (ce qui est le rayon économiquement souhaitable pour l'utilisateur final de la biomasse). Dans un tel cas l'impact sur le paysage peut être considéré de négligeable.



Photo 7: Une parcelle de TCR de saule rectangulaire de petite taille dans une zone agricole, à proximité de la forêt existante permettant un changement en douceur du paysage. (Source: Nord N-E.)

La liste suivante présente un certain nombre de facteurs qu'un porteur de projet TCR doit prendre en compte afin d'éviter des perturbations dans le paysage. Sont présentés ici des facteurs généraux, les spécificités du site sont également à prendre en compte en détail (Dimitriou et al, 2014A) :

- La plantation de TCR dans les champs agricoles à proximité de peuplements forestiers donne un sentiment d'un prolongement naturel dans le paysage et doit être privilégiée. Cependant, la plantation dans des zones forestières doit être évitée car le paysage deviendrait trop homogène.
- La récolte espacée de différentes parties de la plantation crée un paysage plus diversifié, qui lui donne également un caractère dynamique.
- La plantation de TCR à proximité des sites culturels importants risque d'entraîner un impact visuel négatif.
- La plantation de différents clones avec des caractéristiques différentes (robustesse, la taille des feuilles et leur forme, les couleurs) augmente la diversité visuelle. Des ouvertures larges entre les champs offrent des possibilités pour les loisirs tels que la randonnée (à vélo, à pied, à cheval, etc...).
- Le TCR peut être cultivé le long des routes communales, départementales, nationales, sur les délaissés et dépendances vertes. Ces dépendances sont des terrains végétalisés (enherbés et/ou boisés) pour des objectifs paysagers ou de biodiversité. Ils représentent des coûts d'entretiens importants pour les gestionnaires routiers dont l'objectif premier est de permettre une bonne visibilité pour les automobilistes et ainsi assurer leur sécurité (Photo 8, Photo 10, Photo 11). L'interdiction de brûler renforce l'idée de valoriser le bois issu de l'entretien des zones boisées et renforce l'intérêt d'approvisionner des chaufferies locales pour compenser les coûts d'entretien et déchetage. Si la politique des gestionnaires routiers visait à boiser ces dépendances vertes avec un objectif de production de bois énergie, le TCR pourrait constituer une alternative adaptée à ce changement malgré l'entretien rigoureux qu'il suscite. La présence potentielle de gros gibier dans les TCR représente un risque à évaluer pour les usagers de la route. La mise en place de clôture est à envisager au cas par cas.
- Les grosses chaufferies qui utilisent des TCR alimentent souvent des sites industriels. La création de TCR peut contribuer au verdissement et à l'embellissement d'une telle zone (photo 9).
- Dans les paysages ouverts et les zones de grande culture, le TCR peut rompre la monotonie du paysage.

Tableau 1: Vue d'ensemble des facteurs qui déterminent le choix du site pour les plantations de TCR

Conditions naturelles et géographiques	Infrastructures et aspects techniques
<ul style="list-style-type: none"> • Climat • Sol • Sensibilité aux risques naturels • Sensibilité aux nuisibles/maladies et dégâts par le gibier • Biodiversité 	<ul style="list-style-type: none"> • Distance des clients • Accès à la parcelle par routes pour la plantation et la gestion • Les lignes électriques traversant la plantation • Disponibilité d'une machine pour la plantation et la récolte



Photo 8: TCR à proximité d'une grande route. Des bords plus larges permettront aux conducteurs d'avoir une vue dégagée. (Source: Nord N-E.)



Photo 9: Plantation TCR de peupliers à côté d'une route en Allemagne: la visibilité de la route ne doit pas être affectée. (Source: Rutz D.)



Photo 10: TCR de saule à côté d'une route en Suède: la visibilité de la route ne doit pas être affectée. (Source: Rutz D.)



Photo 11: Récolte de TCR de saules situés à proximité d'une centrale combinant chaleur et électricité (cheminée en haut à gauche de l'image) qui reçoit des plaquettes de saule. Les coûts de transport sont réduits lorsque la biomasse pour l'énergie est produite à proximité de l'utilisateur final. (Source: Dimitriou I.)

Schéma d'implantation

Plusieurs points doivent être pris en considération pour la mise en place des TCR, au-delà de maximiser le rendement. Ils sont liés aux aspects pratiques et logistiques de sa gestion, mais aussi à l'amélioration de l'impact environnemental du TCR. Des parcelles planes ou dont la pente est inférieure à 10% sont idéales du point de vue de l'exploitation. Toutefois, les TCR s'envisagent aussi sur des pentes plus raides car ils peuvent réduire l'érosion des sols.

Il est important de réserver des tournières de largeur suffisante pour permettre les manœuvres des machines pendant la récolte (ensileuse et/ou tracteurs attelés de remorques lors du déchetage le cas échéant). En Suède les tournières sont très larges car les plaquettes récoltées avec une ensileuse équipée d'un caisson sont temporairement stockées à même le sol. Le climat froid et sec permet un séchage correct avant la livraison en chaufferie (photo 12).

Cette pratique est à mener avec vigilance, la présence de terre étant indésirable en chaufferie.



Photo 12: En Suède, de larges tournières au bout des rangs permettent un stockage/séchage temporaire des plaquettes avant livraison. (Source: Dimitriou I.)

Dans les zones récréatives, à proximité des villes, des espaces de circulation au sein de la plantation peuvent être envisagés, en créant de larges couloirs entre les différents blocs de plantations.

Pour la partie centrale de la plantation, différents schémas de plantation peuvent être choisis en fonction de l'espèce utilisée et du cycle de récolte (Tableau 2, photo 13). Des taillis denses peuvent être plantés avec le saule et le peuplier : 5.000 à 20.000 boutures par hectare. Afin de faciliter les opérations mécaniques pour la plantation, la fertilisation et la récolte, la plantation en rangées simples ou doubles est recommandée.

Tableau 2: Conception de plantation de saules et de peupliers en Allemagne (Selon Wald 21)

	Courte rotation (3-5 ans)	Medium rotation (6-8 ans)	Longue rotation (> 10 ans)
Saule	<ul style="list-style-type: none"> • 13 000 boutures / ha • Double rangée : 2 m * 0.75 m • Densité: 55 cm sur le rang 	<ul style="list-style-type: none"> • Non testé 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 500-3 333 boutures/ha • Simple rang: 2m • Densité: ~ 1.5 – 2 m sur le rang
Peuplier	<ul style="list-style-type: none"> • 8 300-11 000 boutures / ha • Simple rang : 2 m • Densité: ~ 45-60 cm sur le rang 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 000 boutures / ha • Simple rang: 2 m • Densité : ~ 1m sur le rang 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 500-3 333 boutures/ha • Simple rang: 2m • Densité: ~ 1.5 – 2 sur le rang

La plantation en double rang est plus contraignante mais permet un rendement optimisé. Cette configuration est adaptée aux cycles très courts étant donné la capacité des machines de récolte disponibles. Cependant, la faible disponibilité de ces machines laisse penser qu'une récolte sur des cycles plus longs (10ans, 15ans) avec des machines de type sécateur, ne doit pas être écartée.

Les peupliers sont souvent plantés en simples rangs. La distance entre les rangs se situe autour de 2 m et la distance des boutures dans les rangées peut varier de 0,45 m à 2 m, selon la densité souhaitée et en fonction du cycle de rotation envisagé.

Une conception typique de ces doubles rangs est de 0,75 m. Ces mêmes doubles rangs sont écartés de 1,5m. Sur le rang, l'espacement des boutures varie de 0,5 m à 0,8 m selon la densité souhaitée et en fonction du cycle de rotation envisagé.

Une modification de l'espacement entre les lignes peut avoir un impact très fort sur la capacité de récolte de l'outil envisagé, voire compromettre la récolte mécanisée.

Système en simple rang

Système en double rang

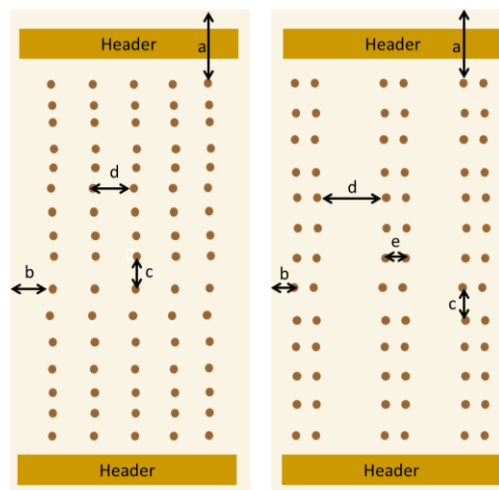


Photo 13: Des exemples simplifiés de schéma de plantation avec des rangs simples et doubles (non conformes à l'échelle) (a = espace de la tournière (8 à 12m); b = espace en bordure de champ (5 m); c = espace entre les boutures sur le rang (de 0,45 à 2 m); d = espace entre les rangs (2 m à 3 m pour les rangs simple et 1,5 m pour les rangs doubles); e = espace dans les doubles rangs (0,75 m) (Source: Rutz D.))



Photo 14: Des TCR de saule de différents âges et plantés avec différents clones diversifient le paysage. Différentes hauteurs et couleurs contribuent à la diversification ; avec les larges bordures les voisins circulent facilement entre les champs. (Source: Nord N-E).

Législation

Dans de nombreux pays, la législation interdit l'installation de nouvelles plantations de TCR sur les terres forestières. Quelques pays seulement considèrent le TCR comme parcelle forestière. Dans certains pays ou régions, comme en Bavière (Allemagne), l'établissement de TCR sur les prairies est interdit. Le TCR est considéré comme une culture agricole si elle est récoltée dans un délai donné (par exemple 20 ans en France).

La localisation de la parcelle au regard des zones à enjeux environnementaux doit également être examinée. La culture de TCR n'est pas toujours immédiatement interdite sur un site protégé, cela dépend du type de protection : protection du paysage, espace naturel protégé, site de conservation de la nature, site Natura 2000. Les questions juridiques par rapport à la gestion de l'eau doivent être également prises en compte: zone de captage d'eau, bordure de rivière, zone inondable ou zone sensible. La législation peut donc avoir un avis sur le choix des variétés et des clones tout comme proscrire toute plantation.

Prise en compte de l'aspect durabilité pour la sélection du site

Avec la demande croissante de biomasse pour l'énergie et des matériaux biosourcés, l'aspect « durabilité » de la production est un critère qui devient primordial. Les aspects de « durabilité » à prendre en compte sont détaillés dans le rapport SRCplus «recommandations sur les critères de durabilité pour les cultures ligneuses à courte rotation" (Dimitriou & Rutz 2014). La description suivante fournit seulement un aperçu sur le contenu de ce rapport.

Le TCR est une culture agricole à faibles intrants qui génère de faibles émissions de GES, en lien avec ce faible usage d'intrant et le caractère pérennes de la culture. L'utilisation de pesticides reste assez limitée et dans certains cas peut être totalement évitée. Cela n'est pas dû à l'absence de maladies ou d'insectes, mais principalement dû à la faible valeur économique comparée à une culture agricole conduite sur un itinéraire technique conventionnel. Le besoin en engrais est faible par rapport aux cultures alimentaires: la fertilisation des arbres n'est pas une pratique courante, et d'autre part ces cultures sont vivaces et exploitées sur plusieurs cycles végétatifs. Elles utilisent ainsi les nutriments recyclés dans le système sol-plante à partir des feuilles tombées. Même dans les cas où la fertilisation azotée est recommandée, comme pour le TtCR de saule, les quantités recommandées sont nettement inférieures à celles des cultures conventionnelles (environ 80 kg d'azote par hectare et par an).

D'autre part, en raison des contraintes techniques (hauteur des arbres), la fertilisation ne peut se faire chaque année, surtout dans le cas du saule et du peuplier lorsque la densité des plantations est élevée.

En plus d'être récoltées pour la production d'énergie, la culture en TCR présente de nombreux avantages en comparaison aux cultures annuelles. En effet, en plus de consommer peu d'intrants elles ont pour effet d'améliorer la qualité de l'eau, la biodiversité, d'être un support pour la lutte biologique des cultures, d'atténuer la migration des maladies des animaux entre les fermes, de limiter les effets indésirables lors de conditions météorologiques extrêmes (limiter l'érosion et les coulées de boues, limiter l'évapotranspiration en condition de canicule, effet brise vent et atténuation des effets des tempêtes), de réduire les intrants minéraux (engrais, pesticides) et de participer à stocker du carbone contribuant à limiter le changement climatique. Ce sont tous ces avantages réunis qui renforcent l'aspect durable du bois énergie en général, et en particulier du TCR (Dimitriou et al. 2014A, Dimitriou & Rutz 2014, Dimitriou & Fistrek 2014).

Néanmoins la concurrence sur l'utilisation des terres est l'aspect le plus controversé. La description qui suit tente d'intégrer ces changements d'utilisation des sols et d'évaluer les conséquences qualifiées de « directes » et « indirectes ».

On distingue :

- la parcelle cultivée : le précédent cultural peut donner des indications sur la qualité du sol et la disponibilité en eau.
- la prairie: une distinction entre prairies permanente et temporaire : le mode de gestion intensif ou extensif est à prendre en compte lors de l'implantation du TCR.
- la forêt existante : dans de nombreux pays les TCR ne doivent pas être cultivés sur des terres classées comme forêts (tant du point de vue juridique, qu'en raison de problèmes environnementaux).
- les terrains délaissés ou les parcelles en friche peuvent présenter des valeurs écologiques renforcées par la présence de TCR.
- les terres protégées, les zones sensibles ou à vocation de traitement tertiaire : cela dépend la protection envisagée et des objectifs (lutte contre l'érosion, phytoépuration, phytoremédiation, exportation de nutriments, etc...).

Compte tenu des prix actuels du bois énergie, la culture de TCR est moins compétitive que les grandes cultures sur les terres arables, ce qui pousse les agriculteurs à implanter les TCR sur des terres délaissées et humides telles que les fonds de vallée.

La conversion d'une prairie en TCR est controversée en raison des bénéfices environnementaux très forts qu'elle génère : piégeage du carbone, écosystèmes à haute valeur de biodiversité, etc.

De la même manière, le TCR peut générer des impacts négatifs dans certaines terres à haut potentiel de biodiversité.

La réhabilitation de sites pollués ou fortement contaminés par les métaux lourds par exemple crée des opportunités pour le TCR qui peut tolérer et se développer de manière satisfaisante dans ce type de condition, les cultures alimentaires y étant de toute façon proscrites.

Une vue d'ensemble des différents impacts de la mise en œuvre TCR est présentée dans le Tableau 3.

Tableau 3: Impacts de la mise en œuvre d'un TCR sur les terres cultivées, les prairies et les forêts (Adapté de BUND 2010; Dimitriou & Rutz 2014)

Critères	Comparaison TCR aux terres cultivées	Comparaison TCR prairies	Comparaison TCR Forêt
Usage de pesticides	Moins important en général mais dépend de la pression des adventices et du choix d'itinéraire	Comparable	Plus important sauf si implantation sur paillage.
Usage de fertilisants	Considérablement plus faible que dans l'agriculture conventionnelle.	Considérablement inférieur à la gestion intensive des prairies.	Plus important.
Risque d'érosion	Fortement inférieur.	Comparable voire inférieurs pendant la période d'exploitation selon la densité plantée et le sens de la pente.	Légèrement supérieur.
Biodiversité	Habituellement, beaucoup plus élevé que dans les cultures conventionnelles	Dépend de l'usage de la prairie, ainsi que de la composition des espèces.	Dépend du type de forêt et la conception des TCR. Par rapport aux forêts naturelles, la biodiversité des TCR est plutôt faible.
Climat et eau	Effet brise vent renforcé limitant les effets dû à la sécheresse. Régulation des amplitudes de température.	Effet brise vent renforcé limitant les effets dû à la sécheresse. Régulation des amplitudes de température.	Impact plutôt négatif.
Capture de Carbone	Fortement supérieur.	Supérieur ou égal; dépend des pratiques de gestion.	Stockage de CO2 beaucoup plus faible, mais capture annuelle supérieure.

Un critère important de durabilité est le rendement énergétique des TCR par rapport à d'autres cultures, et donc son potentiel pour contribuer à l'atténuation des changements climatiques. Une tendance observée par rapport à des sites spécifiques est présentée dans le Tableau 4. Les chiffres sur le bilan énergétique sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 4: La production annuelle d'énergie des TCR, des cultures énergétiques et de la forêt en kWh / ha

TCR	Maïs (biogaz)	Colza (biodiesel)	Forêt
16,000 – 60,000	37,000 – 55,000	11,000 – 21,000	10,000 – 27,000

Tableau 5: Bilan énergétique - entrée / sortie de cultures sélectionnées

TCR (saules)	TCR (peuplier)	Maïs (Plante entière)	Colza (Plante entière)	Blé (y compris la paille)
1:24*	1:16 to 1:26**	1:11*	1:9*	1:11*

Sources: *Börjesson & Tufvesson 2011; **Burger 2011

Comme décrit précédemment, le changement d'utilisation des terres est un aspect qui doit être pris en considération pour l'évaluation de la durabilité. Les impacts sur la phytodiversité, la biodiversité, le sol, l'eau et le changement du paysage sont décrits plus en détail dans ce rapport.

3 Espèces d'arbres et de clones

En Europe, plusieurs espèces d'arbres à croissance rapide sont utilisées à des fins énergétiques. Ce manuel met l'accent sur la culture de saule et de peuplier, car ce sont les espèces les plus intéressantes et les mieux connues de la recherche. Des résultats et des informations relatives à d'autres espèces, telles que le robinier et l'eucalyptus, mais aussi l'aune, le frêne et le bouleau, sont également répertoriés.

Saule

Saules, et osiers forment le genre *Salix* (Photo 15, Photo 16). Ce genre comprend environ 400 espèces d'arbres et d'arbustes feuillus et se trouve naturellement sur les sols humides dans les régions froides et tempérées de l'hémisphère nord. Le saule est l'espèce la plus couramment utilisée pour la culture de TCR à des fins énergétiques en raison de la disponibilité de matériel végétal sélectionné pour des critères tels que la croissance rapide avec des rendements élevés, la capacité à bien se développer sur une large variété de sols dans des environnements de sols argileux lourd ou plus léger, une bonne capacité à développer des rejets de tiges en taillis, ses racines peuvent résister à des conditions d'anoxie (peut être plantés dans des zones gorgées d'eau), ils ont la capacité de tolérer une quantité plus élevée de nutriments et de concentrations de métaux lourds (peuvent ainsi être plantés dans des environnements difficiles, par exemple pour la phytoremédiation). Les saules ont une grande variabilité génétique qui offre des caractéristiques variées. En outre, le saule est une espèce qui est facile à cultiver.



Photo 15: TCR de saule installé en aval de la station d'épuration à Landavran en Ille-et-Vilaine (Source:Aile)



Photo 16: TtCR de saule implanté sur un site industriel pour le traitement tertiaire d'effluents (Source: Aile)

Le saule a bénéficié de programmes de sélection pour une amélioration génétique en Suède et au Royaume-Uni notamment sur la résistance aux maladies et aux ravageurs et sur une croissance qui facilite la récolte mécanique (port droit avec peu de ramifications). La majorité des hybrides développés au travers du programme de sélection suédois à Svalöf-Weibull AB (SW) ont impliqué *S. viminalis*, *S. dasyclados* et *S. schwerinii*. Le matériau parental d'origine a été sélectionné à partir de collections suédoises et européennes, complétées plus tard par des collections de la Russie et de la Sibérie. Le programme de production du Royaume-Uni basée à IACR-Long Ashton (financé par le Partenariat européen de production de saule - EWBP) a utilisé plus de vingt espèces différentes de la collection nationale britannique. Parmi eux *S. viminalis* et *S. caprea*, *S. rehderiana*, *S. udensis*, *S. schwerinii*, *S. decolorent* et *S. aegyptica*.

Le choix des clones dépend des objectifs de plantation (paysage, biodiversité, bois-énergie, phytoremédiation, etc...) et des conditions pédo-climatiques du site.

Il existe actuellement environ 25 variétés européennes certifiées disponibles, dont une dizaine sont exploités commercialement. Chaque année environ une ou deux nouvelles variétés sont développées. Une liste de clones couramment utilisées, créés dans les deux programmes de sélection mentionnés ci-dessus, est donnée ci-dessous dans le Tableau 6. Pour plus d'informations sur les propriétés spécifiques et les qualités des clones de saule, il convient de contacter le fournisseur.

Tableau 6: Liste de clones de saule couramment utilisés, produits par le partenariat européen de production de saule (EWBP) en UK et par le programme de production suédois à Svalöf-Weibull AB (SW) (modifié de Caslin *et al.*, 2012)

Nom commun	Nom latin	Sexe	Caractéristiques	Programme de sélection
Beagle	<i>S. viminalis</i>	Femelle	Plus haut teneur en matière sèche à la récolte que la moyenne	EWBP
Endeavour	<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>	Femelle	Non tolérant aux conditions salines	EWBP
Gudrun	<i>S. dasyclados</i>	Femelle	Sensible à la rouille des feuilles, croissance lente au cours des premières années	SW
Inger	<i>S. triandra</i> x <i>S. viminalis</i>	Femelle	Bonne performance dans les sols secs	SW
Jorr	<i>S. viminalis</i>	Male	Relativement sensible au gel	SW
Olof	<i>S. viminalis</i> x (<i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i>)	Male	Sensible à la rouille, teneur plus élevée en eau dans le bois induisant un pouvoir calorifique moindre	SW
Resolution	(<i>S. viminalis</i> x (<i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i>)) x (<i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i>)	Femelle	Rendements élevés en première rotation, bonne croissance dans les zones sèches, plaquette à faible densité et à faible valeur calorifique	EWBP
Sven	<i>S. viminalis</i> x (<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>)	Male	Rendements élevés en première rotation, peu sensible à la rouille, plaquettes à faible densité mais à haut pouvoir calorifique	SW
Terra Nova	(<i>S. triandra</i> x <i>S. viminalis</i>) x <i>S. miyabeana</i>	Femelle	Rendement relativement bas, mais bonnes performances dans des environnements difficiles (altitude, sols secs)	EWBP
Tora	<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>	Femelle	Rendements élevés, faible sensibilité à la rouille, Rendement élevé en deuxième rotation, adapté à presque tous les environnements	SW
Tordis	(<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>) x <i>S. viminalis</i>	Femelle	Rendements élevés, appropriés dans les sols secs, faible densité apparente, valeur calorifique élevée, faible teneur en matière sèche	SW
Torhild	(<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>) x <i>S. viminalis</i>	Femelle	Rendements relativement faibles, faible teneur en matière sèche	SW

Peuplier

Le peuplier (photo 17) appartient au genre *Populus* de la famille des Salicaceae, et il fait partie, comme le saule, des espèces les plus communes dans les plantations de TCR pour la production de bois-énergie en Union Européenne. La répartition naturelle du peuplier s'étend des tropiques vers les zones tempérées de l'hémisphère Nord. Les espèces du genre *Populus* sont caduques ou (rarement) semi-persistant et divisé en six catégories: Abas (peuplier mexicain), Aigeiros (peuplier d'Amérique et peuplier noir), Leucoides (peupliers des marais), *Populus* (peupliers blancs et trembles), Tacamahaca (peuplier baumier) et Turanga (peupliers tropicaux et arides).

Les producteurs de plants récoltent des pousses d'un an pour une implantation en boutures et de deux ans pour une implantation avec plançons, et davantage pour des plants enracinés.



Photo 17: TCR de peupliers implanté en double-rang et exploité par la Communauté de Communes Bretagne Romantique en Ille-et-Vilaine ; à gauche parcelle de 7 ans non exploitée, et à droite parcelle récoltée un an avant (Source: Aile)

Habituellement pour la plantation de TCR des croisements sont faits entre *Populus trichocarpa*, *Populus maximowiczii*, *Populus deltoides*, *Populus tremula*, *Populus nigra*, *Populus Koreana* et *Populus tremuloides*.

Les principaux clones utilisés dans le passé comprennent *Max 1 'clones,' Max 3 '*, *Max 4 '*, *Hybrid 275 '*, *Muhle Larsen 'et' Androscoggin '*, comme indiqué dans le Tableau 7 ou *'Rochester' 'Weser 6', 'Beaupré', 'Münden', 'Monviso ', 'Pegaso 'et' AF2 '*.

Les peupliers sont des plantes dioïques (les arbres sont soit mâle soit femelle), et peuvent être régénérés par recépage et à partir de boutures. En Union Européenne les plus diamètres sont utilisés commercialement comme en bois d'œuvre mais également pour la pâte à papier. Au cours des dernières années, l'intérêt pour l'établissement de plantations de peupliers pour la production de bois énergie a augmenté, et plusieurs pays d'Europe du Nord (Suède), d'Europe centrale (Allemagne, France, Belgique et autres) et d'Europe du Sud (par exemple l'Italie et d'autres) ont développé des peupliers appropriés pour les TCR. Sur le marché, il existe plusieurs variétés (clones) et le producteur doit consulter les fabricants de clones.

En comparaison des saules, les peupliers couramment cultivés en Union Européenne pour le bois-énergie sont considérés comme particulièrement propices à la culture : i) dans les climats plus doux que le saule (Europe centrale et du Sud). Il existe également des rendements satisfaisants dans les régions Nord de l'Union Européenne; ii) sur des sols plus secs, les peupliers nécessitent moins d'eau que les saules et peuvent bien pousser dans les sols argileux; iii) les plantations de peupliers sont généralement moins denses que le saule (2-3 m de distance entre les arbres pour une récolte à des intervalles plus longs > 10-15 ans),

bien qu'il y ait des peupliers plantés en taillis à la même densité et dans les mêmes conditions de gestion que les plantations de saules (des exemples sont décrits dans les chapitres suivants); iv) des plantations moins denses que le saule s'effectuent sur de plus petites surfaces et n'induisent pas d'équipement spécifique pour la plantation et la récolte si une période de rotation plus longue est choisie (un équipement forestier ou un travail semi-manuel sera facile à mettre en place pour la plantation et la récolte).

En dépit de ces différences entre les deux espèces dominantes de TCR en Union Européenne, il y a des exemples où le saule et le peuplier peuvent se développer aussi bien dans les mêmes zones. Cela est dû à la très grande sélection de matériel végétal disponible pour ces espèces (différents clones et variétés disponibles, adaptés à différents pays/conditions climatiques), et les différentes stratégies de gestion sélectionnées par les agriculteurs (courte ou longue rotations, densité de plantation et gestion plus ou moins intensive etc.). Ces questions seront traitées dans d'autres parties de ce manuel.

Tableau 7: Liste de clones de peupliers couramment utilisés en TCR. (Adapté de Sailer Baumschulen GmbH)

Nom commun	Nom latin	Sexe	Caractéristiques
Max 1	<i>P. nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Femelle	
Max 3	<i>P. nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Femelle	Production élevée de biomasse.
Max 4	<i>P. nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Femelle	
Matrix	<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>		Production moyenne de biomasse pour tous les sols ;
Androscoggin	<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>	Male	Hybrid et Matrix taux de croissance élevé, spécialement dans les zones froides et humides.
Hybrid 275	<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>		
Muhle Larsen	<i>P. trichocarpa</i>	Femelle	
Fritzi Pauley	<i>P. trichocarpa</i>	Femelle	Production moyenne de biomasse pour tous les sols
Trichobel	<i>P. trichocarpa</i>		
Koreana	<i>P. trichocarpa</i> x <i>P. koreana</i> x <i>P. maximowiczii</i>		Haute production de biomasse après la seconde rotation. Pas approuvé en Allemagne.

Robinier

Le Robinier (*Robinia pseudoacacia* L.) (Photo 18) est une espèce d'arbre de l'Est des États-Unis. Il a été importé en Union Européenne au cours du 17^{ème} siècle. Depuis, il y a eu une propagation rapide dans toute l'Union Européenne (d'abord comme arbres d'ornement puis plus tard établi sur de vastes plantations utilisées pour la production de bois de chauffage et la confection de piquets de clôture). De nos jours, de grandes zones couvertes de robinier peuvent être cultivées dans le centre et dans certaines régions du sud-est de l'Union

Européenne. Cette espèce est relativement résistante à la sécheresse. Il a été montré que le robinier est une espèce d'arbres appropriée pour la régénération des sols et la réhabilitation d'anciens sites miniers. C'est une légumineuse qui fixe l'azote de l'air au niveau de son système racinaire : les nodosités sur les racines hébergent des bactéries qui captent l'azote atmosphérique et le restitue à la plante (symbiose). Il est caractérisé par sa capacité à croître sur des sols pauvres dans des conditions extrêmes. Le robinier est une espèce à croissance rapide produisant un bois dense. De vastes étendues de forêts de robiniers ont été établies en Union Européenne centrale (notamment en Hongrie, mais aussi dans d'autres pays, comme l'Italie et la Pologne). Il doit être mentionné, cependant, que le robinier est considéré dans certains cas comme une espèce envahissante car il développe des rejets de souches encore appelés drageons et doit donc être contrôlé avec soin. A contrario dans le cadre d'un semi, un recépage trop précoce peut ne pas aboutir à la production de rejets. Si le semis est pratiqué il convient d'attendrir au préalable la graine (eau bouillante, bétonnière avec du sable, acide éventuellement) pour assurer un bon taux de germination. La plantation en plant enraciné est un choix plus sûr : en motte en fin d'hiver, spécialement dans les sols où le risque d'engorgement en eau même temporaire existe, assure une bonne reprise ; en racines nues le risque de non reprise est plus aléatoire. Les semis sont faits à une densité de 20000arbres/ha tandis que les plantations se font à 1250 arbres/ha. (Jean-Jacques JEMIN, CRPF). Enfin, le robinier faux acacia est sensible au gel et aux rafales de vent qui peuvent perturber les premiers stades de sa croissance.

Comparé à d'autres types de TCR le robinier pousse sur une large gamme de sols dont des sols pollués, mais il ne supporte pas un sol très sec ou dur. Il préfère les sols avec une structure lâche, surtout les terreaux limoneux et sablonneux. Pour une bonne croissance de robinier, l'aération du sol et le régime hydrique sont les caractéristiques les plus importantes du sol. Un travail du sol léger (10-20cm) suite à un semis peut permettre de diviser les racines et ainsi favoriser les rejets de souche. Attention cela contribue à augmenter fortement la densité mais peut perturber l'alignement initial et donc le passage des engins pour l'entretien et la récolte. Ce phénomène s'observe également après les premières récoltes : les inter-rangs sont colonisés et la répartition des arbres peut devenir anarchique (Photo 19). La présence d'épines très pointues présente également un désavantage certain pour sa culture en TCR. La dureté du bois pénalise, selon la section des arbres à la récolte, le débit des chantiers de récolte.

Bien que le robinier offre de nombreux avantages, tels que la fixation de l'azote, un bois avec une densité élevée et une valeur calorifique intéressante, la reprise, l'entretien et la récolte est plus problématique.



Photo 18: TCR de robiniers implanté en monorang, exploité par la Communauté de Communes Bretagne Romantique pour alimenter la chaufferie de Combourg en Ille-et-Vilaine (Source: Aile)



Photo 19: TtCR de robiniers au printemps suivant la première récolte, malgré en bonne capacité à recéper (photo du bas) l'occupation de l'inter-rang par les nouveaux rejets pose question (Source : Aile)

Eucalyptus

L'eucalyptus (Photo 21) est un genre d'arbres à croissance rapide originaire d'Australie qui a été utilisé pendant de nombreuses années en Union Européenne du Sud pour la pâte à papier. Au cours des dernières années, son utilisation en tant que biocombustible suscite de l'intérêt non seulement en Union Européenne du Sud, mais aussi dans des latitudes plus élevées (par exemple au Royaume-Uni et en Irlande). Le genre *Eucalyptus* contient plus de 700 espèces. Les espèces les plus couramment utilisées en Union Européenne du Sud sont *E. globulus* et *E. camaldulensis*, et dans le nord de l'Union Européenne *E. gunnii* et *E. nitens* qui sont résistants à des conditions climatiques plus froides. En effet, l'eucalyptus craint le gel. D'autre part il ne perd pas ses feuilles en hiver ce qui nécessite un temps entre la coupe et le déchiquetage.

Les plantations d'eucalyptus TCR sont traditionnellement plantées dans les plantations mono-souches en 3 x 3 m de distances (ou similaire) et récoltées après 7-12 ans pour la production de pâte à papier. Cependant, en fonction de la situation du marché, le bois a dans certains cas été utilisé dans le marché du bois énergie. Récemment en testant et en introduisant des systèmes de production plus intensifs au cours des dernières années l'intérêt pour les plantations d'eucalyptus pour la production de biocombustible a augmenté. De tels systèmes sont similaires à des systèmes de culture de TCR de saule avec des rotations très courtes de 2-4 ans, et une gestion qui est plus proche de l'agriculture que de la sylviculture.

En Europe, la plupart de ces TCR agricoles sont actuellement en phase de test, contrairement à d'autres parties du monde (par exemple le Brésil, l'Australie) où les TCR d'eucalyptus ont été mis en œuvre à plus grande échelle. La plantation se produit généralement avec des plants enracinés, qui sont généralement le résultat d'hybridation. La fertilisation, en particulier azotée, est un pré-requis pour obtenir des rendements élevés. Malgré les hauts rendements qui peuvent être obtenus en Union Européenne, l'eucalyptus est un genre controversé d'un point de vue environnemental. De graves préoccupations sont généralement exprimées sur son impact négatif sur plusieurs aspects, tels que la qualité des sols, des nappes phréatiques, la biodiversité et les risques liés aux feux de forêt. Ces préoccupations des parties prenantes locales doivent être prises en compte lors de la planification de l'établissement de TCR. Dans la plupart des cas, les résultats de recherche ont montré que les perceptions à l'égard d'eucalyptus sont exagérées et que les effets sur l'environnement sont similaires à tout système de production intensive en agriculture.



Photo 20: Plantation d'Eucalyptus avec long cycle de rotation cycle en Argentine (Source: Rutz D.)

Aulne

L'aulne est le nom commun d'un genre (*Alnus*) d'arbres à fleurs appartenant à la famille des Bétulacées. Le genre comprend environ 30 espèces d'arbres et d'arbustes monoïques. Ils sont répartis dans toute la zone tempérée nordique avec quelques espèces se prolongeant dans l'Amérique centrale et du nord des Andes.

Peu d'expérimentations ont été menées à ce jour. Seuls certains essais ont été simplement mis en place. L'aulne demande une grande luminosité, des éléments nutritifs et de l'eau, mais peut tolérer des inondations temporaires. L'aulne gris (*Alnus incana*) pousse jusqu'à une altitude de 1500 m et préfère les sols calcaires et le climat tempéré froid. L'aulne noir (*Alnus glutinosa*) préfère les endroits humides avec une bonne disponibilité en eau et un climat tempéré.



Photo 21 Plantation d'Aulne en Allemagne avec clôture de protection contre le gibier (gauche) et feuille d'aulne (droite) (Source: Rutz D.)

Autres espèces

Il existe un grand nombre d'autres espèces telles que *Acacia saligna*, *Ulmus sp.*, *Platanus sp.*, *Acer sp.*, *Corylus avellana*, *Paulownia sp.*, etc. Le succès de leur introduction a été plus faible que pour les espèces mentionnées précédemment. Certaines sont des espèces exotiques et/ou invasives qui pourraient conduire à des perturbations de la flore et de la faune environnante.

Encadré 2: Pourquoi devrais-je planter d'autres espèces ?

En général, il est assez difficile et risqué pour les agriculteurs de faire des essais propres et de recueillir leur propre expérience avec d'autres espèces que le peuplier et le saule. Il est cependant déconseillé de mélanger plusieurs espèces sur une même parcelle : éviter l'alternance de rangs d'espèces différentes ou d'espèces différentes sur le rang. La croissance risque de ne pas être homogène entre les différentes espèces et poser des problèmes au moment de la récolte.

4 La mise en culture de TCR

Ce chapitre identifie les différents itinéraires techniques des TCR de la plantation à la récolte, qui concernent principalement le saule et le peuplier.

Préparation du site

Les TCR cultivés sur des terres agricoles exigent une très bonne préparation initiale du sol, c'est-à-dire profonde et fine, exactement comme pour les cultures agricoles conventionnelles.

Le passage d'un rouleau permet d'aplanir et de tasser légèrement la surface du terrain.

La maîtrise des adventices est l'un des facteurs de succès les plus importants en termes de rendement pour toute la durée de la plantation (photo 23).



Photo 22 Plants de saule dans un champ TCR (cercle rouge) parsemés de mauvaises herbes dans une zone où le désherbage a échoué. (Source: Dimitriou I.)

La connaissance de l'historique de la parcelle et son utilisation antérieure est précieuse. Sur une terre qui a été mis en jachère pendant une longue période, le risque de germination d'adventices est assez élevé (Gustafsson et al., 2007). La technique des faux semis en fin d'été et/ou au printemps précédent l'implantation du TCR est plus que jamais d'actualité. Un faux-semis est un travail superficiel du sol (moins de 5 cm de profondeur) qui a pour objectif de stimuler la levée des adventices puis de les détruire avant l'implantation de la culture. Sa réussite repose sur le choix de bons outils et reste dépendante des conditions climatiques.

Encadré 3: Minimiser l'utilisation de produits chimiques est un facteur important pour augmenter la perception positive des acteurs extérieurs et de la société en général

Le programme Ecophyto a pour objectif de réduire l'utilisation de produit phytosanitaire. Les agriculteurs engagés dans l'agriculture biologique mais aussi les collectivités qui s'engagent dans la pratique du zéro-phyto sont de plus en plus nombreuses. D'autre part l'implantation de TCR dans les périmètres de captage qui proscriit l'utilisation de produits phytosanitaires (périmètre rapproché/immédiat) et les zones sensibles en général est un véritable enjeu pour la protection de l'eau. L'implantation d'un TtCR de saule sur un paillage plastique à Pleyber-Christ (29) en 2007 s'est avéré concluant pour la maîtrise des adventices sur l'inter-rang de 75cm mais n'empêche pas la propagation des ronces et la colonisation de cet l'inter-rang de 75cm qui est stratégiquement déterminant pour éviter le bourrage des machines de récolte. Le paillage plastique nécessite donc une vigilance élevée de la part du propriétaire au même titre qu'une implantation avec un produit antigerminatif. (Aile)

La présence de pierres n'est pas souhaitée, car elles peuvent endommager les planteuses mécaniques et les machines de récolte. En cas de plantation manuelle il faut de toute façon limiter leur présence. Il est donc préconisé de les retirer.



Photo 23: Un champ de TCR de saule nouvellement planté, nettoyé des adventices qui existaient avant la préparation du site (Source: Aronsson P.)

Des dégâts importants (Photo 25) causés par des lapins, des lièvres, des chevreuils, des orignaux (selon les pays), peuvent être constatés pendant les deux premières années. Les clôtures ne doivent être envisagées que dans les zones à haut risque, et si des subventions existent pour couvrir une partie des coûts. La clôture sera installée temporaire, seulement pendant les premières années, ensuite le TCR est moins sensible. Pour les sites endommagés par des mammifères tels que le chevreuil ou le cerf, des répulsifs ont été développés (Photo 24). Cela augmente les coûts de préparation du site et ne peut être pratiqué que lorsque les TCR sont plantés dans des zones à haut risque (Caslin et al., 2012).



Photo 24: Installation d'un répulsif chevreuil en Allemagne (Source: Rutz D.)



Photo 25: Dommages sur une tige de peuplier causé par un chevreuil en Allemagne: les dommages se produisent souvent à la lisière d'une plantation (Source: Rutz D.)

Matériel de plantation

Le type de matériel végétal utilisé est déterminé par l'espèce envisagée et le schéma de plantation. Pour assurer un bon taux de reprise, il est essentiel de travailler avec du matériel de bonne qualité, conservé au frais entre le pépiniériste et le site de plantation. Pour les taillis de TCR plantés à des fins énergétiques, la plantation de boutures (photo 26, photo 27) est la pratique la plus courante, car la moins coûteuse. L'usage de plançons (tiges de deux ans d'environ 1,5m) est un intermédiaire utilisé pour des plantations de peuplier de densité moyenne.



Photo 26: Boutures d'environ 25 cm. Ici: boutures de clones Max3 de peuplier (Source: Rutz D.)



Photo 27: Boutures de 20 cm utilisées pour la plantation des saules (comparaison de la taille d'un crayon) (Source: Aronsson P.)

Dans le cas du saule et du peuplier TCR, le matériel végétal est constitué de tiges d'un an coupées en boutures de 25 cm. Ces tiges sont généralement récoltées en hiver lorsque les bourgeons sont entièrement en repos végétatif. Elles sont stockées à -4°C , avant d'être livrées dans des boîtes quelques jours avant leur plantation. Une fois livrées sur site, il est important que les palettes soient conservées dans des conditions ombragées et fraîches avant la plantation (Gustafsson et al., 2007).

Comme mentionné précédemment, le matériel végétal disponible se compose de clones sélectionnés. Beaucoup de ces variétés commerciales sont protégées par une marque européenne. Cela signifie qu'il est illégal de vendre le matériel de reproduction sans autorisation écrite préalable. Par conséquent, les boutures sont produites par des producteurs spécialisés dans les pépinières, sur la base des contrats et licences de sociétés mères qui fournissent le matériel végétal. Cela est particulièrement vrai pour les saules et les peupliers. (Photo 28). Dans la plupart des cas, ces entreprises donnent une garantie sur un taux de reprise minimal de chaque variété.

Une mise en place réussie dépend de la bonne qualité de coupe de ces boutures. Dans le cas d'une plantation manuelle il est conseillé d'acheter les boutures pré-découpées car une mauvaise coupe peut entraîner un dessèchement de la bouture. Généralement l'extrémité supérieure de la tige n'est pas utilisée car elle permet difficilement l'enracinement souhaité. Les boutures plantées doivent avoir une longueur minimale de 15 cm et un diamètre minimal de 0,8 cm pour assurer une réserve suffisante d'éléments nutritifs dans la plante avant son enracinement. La fraîcheur s'apprécie lorsque l'on gratte à l'ongle l'écorce de la bouture.



Photo 28: Tiges d'un an utilisées sous forme de boutures pour la plantation de TCR de saule. Les tiges sont livrées par un pépiniériste privé en Suède. La qualité des tiges est importante pour le développement de la plantation. (Source: Dimitriou I.)

Pour les boutures ou plants d'une espèce donnée, il est recommandé de mélanger différentes variétés pour réduire la sensibilité de la plantation aux ravageurs et maladies. Cela réduit le risque d'échec d'implantation.

Plantation

La stratégie choisie pour la plantation est à adapter en fonction de l'espèce choisie, de l'équipement de plantation, des coûts de main-d'œuvre, de la gestion de la récolte, etc. Tous ces facteurs sont analysés dans les paragraphes suivants en ne considérant que l'utilisation de boutures de TCR. Dans le cas de mise en place de plants, les pratiques sont tout à fait semblables aux pratiques forestières déjà largement diffusées. Par conséquent, elles sont mentionnées ici sans être analysées en détail.

Il est important d'organiser la plantation avec soin afin que l'entretien et la récolte puissent être effectués de façon rationnelle, tout en parvenant à une utilisation optimale de du terrain. La plantation en rangées est la méthode la plus appropriée, les lignes doivent être disposées dans le sens de la plus grande longueur de la parcelle si la récolte est faite à l'ensileuse (automotrice ou trainée). Dans le cas d'une récolte en tiges entière les rangs ne doivent pas être trop longs. On considère que la longueur des rangs doit être comprise entre 100m et 200m selon le rendement, pour éviter à la machine de récolte de sortir du rang pour débarder. La sortie du rang fait perdre du temps, avec des risques de crevaison. Des astuces existent en mettant à disposition une remorque accompagnatrice qui récupère les tiges à l'endroit où la machine est pleine. Dans les bonnes conditions la récolteuse tige entière fait le débardage des tiges au bout du rang pour permettre un déchetage ultérieur.

Idéalement, la fin de la ligne sera une route d'accès. Sinon à la fin de la ligne il doit y avoir une zone de rotation de 10 à 12m, appelée tournière, pour permettre les manœuvres des machines de récolte. Si des fossés profonds ou un linéaire boisé jouxte la parcelle, 15 m de retournement seront nécessaires. Une zone limite d'environ 5 m doit être laissée sur les côtés de la plantation.

La plantation se fait quand le sol est ressuyé, généralement au printemps, en avril-mai dans le nord de l'Europe et se pratique plus tôt dans le sud de l'Europe, lorsque les conditions météorologiques permettent la préparation du sol. La plantation des boutures est également possible dans les périodes ultérieures (mai ou juin) car le matériel végétal utilisé est stocké à basse température. Les boutures commencent à produire des racines quand le sol se

réchauffe, et la disponibilité de l'eau est un facteur déterminant au développement des racines. Une implantation précoce débouche sur une saison de croissance plus longue. Une plantation plus tardive en saison comporte plus de risques de déboucher sur une période sèche.

D'importants travaux de recherche se sont intéressés à la densité et au schéma d'implantation des TCR. En réalité, la plupart des choix sont liés aux moyens matériels disponibles localement pour la récolte. Si la récolte est réalisée avec des machines spécifiques aux TCR, le système en doubles rangs est préféré (voir chapitre 2.3).

Pour la plantation, différentes méthodes sont envisageables. Des planteuses adaptées ont été développées : elles coupent des longues tiges en tronçons de 20-25cm et les enfoncent dans le sillon, préalablement ouvert par les disques ouvreurs (photo 29). Ces machines peuvent planter 2 ou 3 doubles rangs en même temps. Le débit de chantier est d'environ 1 heure à l'hectare. D'autres machines peuvent ne planter que les boutures prédécoupées (photo 30).



Photo 29: Machine de plantation de TtCR de saule. La machine plante trois rangs doubles soit six rangs au total. Cette machine nécessite quatre personnes en plus du chauffeur. (Source: Nordh N-E.)



Photo 30: Machine pour la plantation automatique de boutures de TCR de peuplier (Source: Wald 21)



Photo 31: Plantation manuelle de peupliers en rangs simples (Source: Dimitriou I.)

La plantation manuelle peut être préférée dans le cas où le matériel de plantation mécanique n'est pas disponible ou trop loin du site de plantation pour être rentable (Photo 31, Photo 32, Photo 33). Aussi, si les coûts salariaux sont moins élevés que pour la location de l'équipement ou si les parcelles sont très petites (généralement moins de 1 ha), la plantation manuelle est une option intéressante. Dans ce cas, il est important de reproduire les distances pratiquées par la machine de plantation afin de ne pas compromettre la récolte mécanisée. Les boutures doivent être enfoncées à la main et/ou au pied, dans un sol préalablement préparé. Le bourgeon doit toujours être orienté vers le haut (flèche verte). La partie supérieure de la bouture doit se trouver à 2 à 3 cm au-dessus du sol ; il faut éviter que la bouture soit entièrement enfoncée et recouverte de terre.

Dans le cas d'une plantation sur un paillage plastique, la solution est de réaliser des pré-trous au moment du déroulage du plastique afin d'indiquer l'emplacement des boutures et ainsi assurer le respect des espacements entre les rangs et sur le rang. Les plantations manuelles peuvent être réalisées par des chantiers d'insertion dont les coûts de main d'œuvre peuvent être en partie déductibles d'impôts pour les entreprises. Le débit de chantier observé est de l'ordre 1 ha par jour avec une équipe de 7 à 8 personnes (Aile).



Photo 32: Poussez les boutures à la main dans le sol (flèche rouge): le bourgeon (flèche verte) doit toujours se diriger vers le haut ! (Source: Rutz D.)



Photo 33: Poussez les boutures avec le pied si le sol est trop compact (Source: Rutz D.)

Pour le saule notamment plusieurs systèmes de plantation ont été testés pour remplacer le système de double rang tout en obtenant une production élevée. Au lieu de planter des boutures verticalement dans le sol, les tiges entières sont plantées horizontalement dans le sol (Photo 34). Cette méthode de plantation est utilisée pour stabiliser des pentes ou bords de berges. Les résultats montrent que la production de biomasse peut être aussi élevée que dans le cas d'un système à double rang, mais l'entretien ultérieur et la récolte sont plus difficiles. D'autre part la plantation horizontale est plus coûteuse car elle fait appel à davantage de matériel végétal.



Photo 34: Tige de saule plantée horizontalement : elle doit être recouverte de terre (Source: Rutz D.)

Après la plantation, le passage d'un rouleau permet d'aplanir et de tasser légèrement la surface du terrain pour favoriser l'application éventuelle d'un herbicide.

Conduite de la plantation

Contrôle des adventices après la plantation: l'application d'un produit antigerminatif, directement après la plantation et avant que les boutures aient commencé à produire des pousses permet un contrôle efficace des adventices (Gustafsson et al., 2007).

Selon les conditions d'application (hygrométrie, risques de dérive liés à la vitesse du vent) l'efficacité du produit antigerminatif dure entre 2 et 6 semaines. Passé ce délai, on observe souvent une germination très massive des adventices qu'il convient de maîtriser vis-à-vis des plantations conventionnelles environnantes et pour éviter de concurrencer la jeune plantation de TCR. La pression des adventices peut être très concurrentielle (chardon, liseron des champs, chénopodes blancs, etc...) et nécessiter trois opérations mécaniques au cours de la saison (herse, binage, rotavator adapté) ou des opérations de type débroussaillage. Les années suivantes, il faut contrôler l'apparition d'espèces vivaces telles que les ronces qui sont susceptibles de se développer malgré l'ombrage apporté par le TCR. Le développement de ce type d'adventices est à maîtriser pour permettre de récolter la parcelle dans de bonnes conditions (Aile, 2007).

L'implantation des boutures sur plastique (Photo 35) permet un contrôle efficace des adventices sur le double rang de 0,75m mais nécessite une intervention de type broyage dans l'inter-rang de 1,5m deux à trois fois dans la saison. Il faut notamment être vigilant à la prolifération des ronces et autres vivaces dans cet inter-rang.

Les enjeux de durabilité de la filière TCR doivent prendre en compte la réduction voire la suppression de l'usage d'herbicides.



Photo 35: TtCR de saules implanté manuellement sur un périmètre de captage à Pleyber-Christ dans le Finistère en partenariat avec les écoles du canton. Un couvert herbacé a été semé sur l'inter-rang, il est ensuite broyé régulièrement (Source: Aile)

Lutte contre les insectes: En cas de problèmes avec les insectes dans un site spécifique, un larvicide ou un insecticide peut être appliqué. Cependant, l'application de produits chimiques doit être évaluée avec soin et évitée autant que possible. En règle générale, l'application d'insecticide n'est pas nécessaire.

Recépage : En fin de première année, le TtCR de saule est très souvent recépié. La coupe des tiges d'un an (en particulier de saule) permet de stimuler le développement d'un taillis plus vigoureux et une meilleure mise en place des racines au cours de la deuxième année. Le recépage peut être réalisé à l'aide d'une barre de coupe à section, d'une épareuse à disques, d'une débroussailleuse à disque et autres tondeuses à disques.

Il n'est pas prouvé qu'une plantation recépiée produise plus de biomasse, cette pratique n'est donc pas indispensable. La valeur ajoutée du recépage fait d'ailleurs l'objet de controverses. Si le contrôle des adventices n'a pas été fait correctement, le jeune plant ne sera pas vigoureux et risque de périr après le recépage.

Dans les plantations de peupliers, il est parfois recommandé de supprimer tous les rejets sauf le plus grand (Photo 36) pour favoriser le développement et la croissance de la tige unique. Cependant, les expériences ont montré que l'effort pour réaliser cette sélection est très consommateur en main d'œuvre vis-à-vis du gain de productivité.



Photo 36: Pousse d'un an de peuplier en Allemagne, la tige secondaire a été coupée pour améliorer la croissance de la tige principale (Source: Rutz D.)

Fertilisation: Comme pour toute culture à haut rendement, le TCR a besoin d'apports en nutriments, qui seront en partie exportés lors de la récolte.

Une partie des apports de nutriments est reconstituée à partir de la litière composée par la chute des feuilles. Dans plusieurs pays, des recherches approfondies ont été menées sur la quantité et la fréquence de la fertilisation pour les principaux types de TCR (saule et de peuplier), mais il semble qu'il ne soit pas possible de proposer des recommandations concrètes puisque dans la plupart des cas, les besoins de fertilisation sont spécifiques à la station retenue.

La fertilisation au cours d'année d'implantation n'est pas recommandée, pour éviter de favoriser la croissance des adventices, et parce que le système racinaire du saule n'est pas encore suffisamment développé pour permettre une absorption efficace des minéraux.

Une fois la plantation établie, la fertilisation peut être envisagée. Plusieurs expériences ont montré que sur des sols fertiles, en particulier dans les premières rotations, l'application d'engrais n'entraîne généralement pas de réponse positive. Dans des sols plus pauvres, une fumure est nécessaire pour maintenir la productivité. Généralement, l'apport d'azote sera nécessaire, les sols étant souvent bien alimentés en phosphate et potassium.

L'application de boues de stations d'épuration ou l'irrigation d'eaux usées traitées permet d'apporter les éléments nutritifs.

Les besoins en azote varient en fonction de l'âge de la plantation et du développement des pousses. Dans les plantations âgées l'azote sera libéré par la couche de feuilles mortes qui se forme, la nécessité d'une fertilisation est ainsi réduite.

Les quantités de nutriments exportés pour le saule implanté en TtCR varient, mais sont de l'ordre de 150-400 kg N, 180-250 kg K, et 24-40 kg P par hectare pour une rotation de 3 ans sur la base d'environ 8 t MS / ha / an de production de biomasse en Suède. A titre de comparaison, pour l'herbe en gestion intensive, il faudrait environ 900 kg N / ha sur 3 ans, ce qui montre les faibles besoins en N des TCR par rapport à d'autres cultures. Pour calculer les quantités de N qui pourraient être nécessaires pour la fertilisation, l'efficacité de l'utilisation de l'azote doit être pris en compte, étant donné qu'une proportion importante de nutriments sera utilisée par la microflore du sol, perdue dans l'atmosphère, ou stockée dans les racines et les feuilles, ces derniers étant recyclés plus tard.

Les ajouts de phosphore et de potassium ne sont généralement pas nécessaires. Pour une augmentation réelle du niveau de phosphore dans le sol, il faut de nombreuses années d'applications consécutives mais les faibles exigences des TCR vis-à-vis du phosphore ne justifient pas de telles applications. Le potassium est un élément relativement stable dans les sols et peu disponible pour absorption efficace par la plante. Le retour des cendres de bois sur la parcelle peut compenser le potassium exporté lors de la récolte.

L'apport en éléments nutritifs dans le TCR ne doit pas dépasser l'équivalent de 120-150 kg N, 15-40 kg P et 40 kg K par hectare et par an ; les valeurs inférieures indiquées étant les plus sûres (Gustafsson et al., 2007). Les mêmes principes de calcul doivent être utilisés pour les autres espèces qui sont utilisées en TCR. Un producteur de TCR devra prendre en compte que la fertilisation est techniquement possible dans les plantations en première voire deuxième année de croissance. Ensuite, la hauteur de la plante ne permet plus d'intervenir avec des machines.

Des recherches récentes se sont intéressées à l'influence de la fertilisation sur la production de biomasse. Elles ont montré que les plantations cultivées avec des clones récents ont réagi positivement à l'apport de fertilisant contrairement à des clones plus anciens (Aronsson et al., 2014). Néanmoins, la réponse à la question de fertiliser ou non dépend du prix de l'engrais mais aussi du prix de marché du bois énergie.

5 Récolte des TCR

La récolte est un sujet très important dans le cycle de vie des TCR car ce poste correspond à 50-80 % des coûts de production totaux (Liebhard, 2007). Par conséquent cette opération influe considérablement la viabilité économique de ce type de plantation.

La récolte est effectuée préférentiellement en hiver, après la chute des feuilles et avant le débourrement. Idéalement, cette opération se déroule sur sol gelé pour éviter les risques de dessouchage et d'enlèvement des machines qui pourraient compromettre la reprise liée à la compaction du sol ou compromettre les opérations suivantes (entretien, récolte).

Selon l'objectif du produit final, la récolte des TCR se fait de 2 à 20 ans d'intervalle. Différentes pratiques, techniques et matériels disponibles existent pour la récolte. Ils dépendent des facteurs suivants :

- Les espèces et variétés implantées : nombre et diamètre des tiges, espèces en mélange.
- Le schéma de plantation : simple ou double rang, distance entre les lignes et sur la ligne.
- Le produit final désiré: plaquettes, broyats, granulés, bûches densifiées, balles rondes de tiges entières.
- La qualité du produit final : granulométrie, taux d'humidité.
- L'utilisation finale du produit : combustion, pyrolyse, gazéification, etc...
- La quantité du bois récolté: besoins logistiques de transport et de stockage, fréquence des récoltes, sur tout ou une partie de la surface plantée.
- La disponibilité des machines : en propre, en location.
- La taille et la forme de la parcelle: grand ou petit, pentu ou plat, etc... l'accessibilité.
- L'humidité du sol: circulation et portance des machines.

Les tiges doivent être coupées à proximité du sol à la première récolte, puis il est possible de rehausser la hauteur de coupe d'un ou deux cm les récoltes suivantes. Une coupe nette permet une bonne reprise et surtout, évite le pourrissement des souches.

Les rendements

Les rendements des TCR dépendent beaucoup du climat (exposition à la lumière, variation de température et disponibilité en l'eau) et du type de sol. Espèces, variétés et clones doivent être soigneusement sélectionnés pour chaque emplacement afin de maximiser les rendements. Dans le nord de l'Union Européenne, le principal critère de sélection peut être la tolérance au froid (gel) et dans le sud de l'Union Européenne, la tolérance à la sécheresse. Le Tableau 8 montre les caractéristiques et rendements clés pour le saule, le peuplier et le robinier selon les zones géographiques.

Le facteur humain influence également considérablement les rendements : le soin apporté à l'entretien est un facteur capital.

Le cycle de récolte dépend de l'objectif global de la plantation. Il est généralement compris entre 1 et 7 ans, mais peut également être étendu à 20 ans. Habituellement, après 20-30 ans, la culture est soit replantée ou remplacée par d'autres cultures.

Les rendements annuels atteignables en Union Européenne se situent dans une plage comprise entre 5 et 18 t / ha de plaquettes exprimés sur matière sèche (MS). On considère un taux d'humidité compris entre 55 et 60% pour le bois récolté frais. Par exemple, si le rendement annuel de plaquettes est de 10 t MS/ha/an, le cycle de récolte de 4 ans et la

teneur en eau de 50%, la quantité totale de bois humide récoltée est d'environ 80 t / ha, soit 40 tMS / ha.

En général, les rendements de la première récolte sont plus faibles que les rendements des deuxièmes et troisièmes récoltes. Ensuite, les rendements peuvent rester stables ou diminuer lors des récoltes suivantes. Les recommandations générales sur la façon de maximiser les rendements sont précisées dans l'encadré 4.

Tableau 8: Aperçu des principales caractéristiques des taillis à courte rotation (TCR)
(Source: modifiée d'après Dallemand et al., 2007)

Espèces	Saule	Peuplier	Robinier
Région d'Union Européenne	Centre de l'Europe	Sud de l'Europe	Europe méditerranéenne, Hongrie, Pologne
Nombre (arbres/ha)	12,500 – 15,000	8,000 - 12,000	8,000 - 12,000
Cycle de récolte (ans)	1 - 4	1 - 6	2 - 4
Diamètre moyen de la tige à la récolte (mm)	15 - 40	20 - 80	20 - 40
Hauteur moyenne à la récolte (m)	5 - 10.0	2.5 - 7.5	2.0 - 5.0
Biomasse fraîche récoltée (t / ha)	30 - 60	20 - 45	15 - 40
Teneur en eau du bois (%)	45 - 62	50 - 55	40 - 45

Encadré 4: Comment maximiser le rendement ? (modifié d'après Lindegaard 2013)

Planifier tôt : Il faut commencer à penser à la plantation un an avant sa réalisation pour envisager une commande dans les délais, éventuellement organiser un groupement d'achat. Cela permet également de détruire le précédent cultural pour limiter la pression des adventices. À la fin de l'été / début de l'automne précédent la plantation, un couvert hivernal peut être implanté ou des faux semis démarrés.

Connaitre le précédent cultural et le potentiel agronomique du sol : Les TCR de saule poussent mieux sur les terres arables fertiles avec une gamme de pH de 5,5-8,0 et sur les terres à bonne réserve en eau, tandis les sols superficiels devront être évités. Le TCR de saule a besoin d'une pluviométrie annuelle comprise entre 600-1000 mm. Les petits champs ou les champs de forme irrégulière risquent d'augmenter les temps de manœuvre et ainsi augmenter le coût de la plantation et la récolte.

Contrôler l'apparition des mauvaises herbes: En amont de la plantation favoriser la pratique des faux semis et redoubler de vigilance le mois qui suit la plantation. Continuer à entretenir chaque année au printemps. Privilégier une intervention mécanique.

Utiliser les variétés les plus adaptées : Les TCR doivent être soigneusement testés et approuvés avant d'être utilisés. Choisir un mélange de variétés à haut rendement et faible sensibilité aux maladies et aux infestations de ravageurs.

Assurer la liaison avec le fournisseur de plants : Si une structure peut vous

accompagner dans la mise en place du projet, la contacter pour visiter des sites de TCR et bénéficier de retours d'expérience, voir une assistance à la mise en place des plantations (conseils, achat groupée de boutures, etc.). Contacter plusieurs fournisseurs suffisamment tôt à l'avance et demander des références et des devis incluant les frais de transport.

Réduire les dommages causés par les animaux: à défaut de mettre en place une clôture coûteuse qui sera utile seulement les deux premières années, la coopération avec les chasseurs locaux peut faciliter la régulation du gibier. Il est également possible d'opter pour l'utilisation de répulsifs olfactifs.

Comblent les manques : Au moment du recépage, les éventuels espaces vides peuvent être plantés avec les tiges des TCR voisins.

Fertiliser avec des résidus organiques: les TCR prospèrent sur sol riche en éléments nutritifs. Privilégier l'apport d'engrais organiques, comme le fumier, les boues de station d'épuration, les eaux usées traitées, ou le digestat provenant d'unités de biogaz. Il est préférable d'utiliser l'engrais en amont de la plantation et après la récolte tout en respectant le plan d'épandage. Les apports sont de l'ordre de 120kg N, 15kg P et 40 kg K par hectare et par an.

Maximiser les rendements à la récolte: l'entretien et la gestion des adventices est un préalable à la récolte. Une taille des arbres adaptée et homogène, notamment concernant la section des tiges mais aussi leur hauteur doivent être communiquées au prestataire qui assurera la récolte.

Minimiser les pertes au stockage : Le bon déroulement des processus lors de la phase de séchage des plaquettes dépend de la méthode de récolte (coupe dissociée de la transformation en plaquette ou combinée) et du mode de stockage choisi.

Cycles de récoltes

Généralement les intervalles de récolte sont de 1 et 7 ans, mais peuvent également être étendus à 20 ans. Habituellement, après 20-30 ans, on procède à une remise en culture.

La décision de récolter appartient en fait moins au propriétaire de la plantation qu'au prestataire de récolte qui connaît la capacité de sa machine, sa disponibilité et les déplacements à envisager dans le cadre d'une tournée de récolte.

D'autre part, la capacité de stockage peut être limitante dans le cas de longs intervalles produisant de très grandes quantités ponctuelles. Il est envisageable de différer la récolte afin de disposer chaque année, de matière fraîche. En effet, le stockage des plaquettes de bois, lorsqu'il dépasse un an, peut être à l'origine de pertes par fermentation.

Propriétés du matériel récolté

En général, le produit final des TCR est du bois déchiqueté, principalement utilisé pour la combustion. Les TCR peuvent également être utilisés pour l'industrie papetière ou pour d'autres produits biosourcés.

Pour une utilisation en combustion, en particulier pour alimenter les chaudières de faible puissance, la teneur en eau et la granulométrie des plaquettes doivent correspondre au cahier des charges du chaudiériste.

La présence de feuilles au moment de la coupe peut avoir plusieurs impacts négatifs. En effet, à l'issue du déchiquetage la proportion de particules fines peut être ainsi anormalement élevée. Un taux de particules fines trop important peut engendrer des problèmes au niveau du convoyage (transfert par vis sans fin) et au niveau du rendement de l'installation (les particules risquent de se déposer sur les échangeurs situés après la chambre de combustion).

La récolte en tiges entières est suivie d'un déchetage 1 à 3 mois après la coupe. Attendre 6 mois permet un abattement du taux d'humidité de 30%. Néanmoins le déchetage 1 mois après la coupe permet de produire des plaquettes de bois de granulométrie plus homogène. En effet, une tige sèche risque davantage de casser dans l'organe de coupe (action des couteaux et contre-couteaux en interaction avec les grilles de calibrage) et entraîner la formation de brins longs appelés « queues de déchetage ».

Méthodes de récolte

Différentes méthodes de récolte sont possibles. Les cultures de TCR peuvent être coupées et déchetées en une seule opération de récolte. Elles peuvent être également coupées et laissées en bout de rang pour faciliter l'opération de déchetage et l'évacuation des plaquettes de bois avec les remorques.

Un inventaire non-exhaustif est proposé dans le Tableau 9. En effet, les machines spécifiques sont toujours au stade de prototype en développement.

L'ensileuse attelée à un tracteur (Photo 37) et l'ensileuse automotrice (Photo 38) ont un principe similaire : Une tête de récolte équipée de scies circulaires permet de coucher les tiges à l'aide d'une barre de poussée, puis l'action de rouleaux à axes verticaux, combinée à l'avancement de la machine, permet d'amener horizontalement les tiges vers un rotor équipé de couteaux. Les ensileuses automotrices utilisées classiquement pour la récolte du fourrage telles que Claas (Jaguar), CaselH (Austoft 7700), et New Holland (FR9090) (Photo 39 et 40) peuvent être équipées de têtes spéciales plus ou moins performantes pour les récoltes de TtCR. D'autres améliorations et développements peuvent être attendus dans les années à venir, si la culture se développe.

Idéalement, les longueurs de ligne permettraient le remplissage d'une ou de deux remorques avec des plaquettes de bois avant que l'ensileuse soit contrainte de manœuvrer pour changer de rang (JTI 2014). Cela bien entendu dépend de la quantité de matière à récolter.



Photo 37: Ensileuse Nyvraa attelée en poste inversé. TtCR de saules en double rangs (Source: Aile)



Photo 38 : Ensileuse New Holland de l'entreprise Martin dans un TtCR de peuplier à Combourg en Ile-et-Vilaine. Malgré un espacement trop grand des doubles rangs à l'implantation (0,9m au lieu de 0,75m), la récolte a pu être effectuée (Source Aile)

L'intérêt de l'ensileuse automotrice est que son usage pour la récolte de TCR vient en complément d'une autre activité le restant de l'année ce qui permet un amortissement financier plus court par son propriétaire.

La Stemster (Photo 39 et 40) récolte des tiges entières grâce à un convoyeur. Conçue par l'entreprise danoise Nordic Biomass, la Stemster présente l'avantage de pouvoir récolter les tiges en feuille (dès le mois de septembre). Cette récolte tôt en saison est effectuée dans les terrains particulièrement humides en saison hivernale, dans les zones où il ne gèle pas comme en Bretagne.

Les tiges fraîchement coupées sont laissées en bout de rang pour faciliter l'intervention de la déchiqueteuse et l'évacuation des plaquettes de bois. En laissant javeler les tiges quelques semaines, les feuilles ont le temps de tomber au sol (Aile, 2007).



Photo 39: Récolte de saule avec la Stemster appartenant à la Cuma Bretagne Services (Source: Aile)



Photo 40: Possibilité de récolter les tiges en feuilles avec la Stemster (Source: Aile)

Une presse à balles rondes appelée «Biobaler» (photo 41) a été conçue par la société Anderson au Canada (Caslin et al., 2010). La balle fait 120 cm de diamètre une fois compactée ce qui n'est pas compatible avec les déchiqueteuses présentes sur le marché, l'idée étant d'utiliser les balles directement dans un usage industriel de type four à charbon.



Photo 41: Biobaler appartenant à Andersons Canada (Source: Anderson Group)

Contrairement à toutes les machines citées précédemment pour lesquelles les préconisations des constructeurs requièrent une fréquence de récolte de deux à trois ans maximum, la pelle sécateur peut intervenir sur des cycles plus longs. Elle est utilisée en forêt et en zone bocagère (haie, talus) (photo 42). Ces machines peuvent couper les arbres de gros diamètre et ont la capacité de couper des cépées entières. Le débit de chantier est de

l'ordre de 2 jours par hectare. Un débardage est très souvent envisagé en accompagnement de la coupe selon la logistique du chantier. Le déchiquetage est réalisé dans un deuxième temps.



Photo 42: Exemples de systèmes de tête abatteuse montée sur une pelleteuse avec de gauche à droite : sécateur, disque à chaîne (Source: Aile), disque de type dessoucheuse (Source : Hantsch)

La récolte manuelle reste une alternative envisageable. Sur la commune Saint Ebremond de Bonfossé dans la Manche, 6 ha de TtCR ont été implantés pour le traitement tertiaire d'effluents. Deux hectares sont récoltés manuellement chaque année par une équipe de huit personnes d'un chantier d'insertion. La récolte est réalisée entre janvier et février, en l'absence de feuille permettant de réaliser le déchiquetage au fur et à mesure de la coupe. Le chantier dure environ un mois (Source : Aile).



Photo 43: A gauche, disque monté sur une débroussailleuse à main plutôt adapté à un recépage ou à de petites sections de tiges , à droite exemple d'adaptateur pour tronçonneuse Apuri permettant à l'opérateur de tenir la tronçonneuse d'une seule main assurant une coupe horizontale pour un meilleur confort d'utilisation (Source Aile).

Tableau 9: Les méthodes de récolte, leurs description et caractéristiques (avec la contribution de la FLM 2011, Kofman 2012)

Description	Caractéristiques
Récolte manuelle ou semi-manuelle au moyen d'une tronçonneuse à chaîne ou d'une débroussailleuse à scie, ou autre équipement similaire.	
<ul style="list-style-type: none"> • Coupes à l'aide de tronçonneuses, débroussailleuses, etc. • Récolte des arbres à la main ou à l'aide d'un tracteur • Stockage des arbres entiers pour le séchage ou le déchiquetage • Alimentation manuelle dans la déchiqueteuse ou par une petite grue 	<ul style="list-style-type: none"> • Contribution personnelle possible ou avec un chantier d'insertion • Pression forte vis-à-vis des adventices. • Travail exigeant et dangereux • Faible productivité • Réduction des coûts, les équipements existants peuvent être facilement utilisés • Convient pour les petites parcelles de moins de 5 ha, pour des chaudières individuelles ou communales • Le travail doit être effectué par un minimum de deux travailleurs pour alterner les tâches
Récolte mécanique des arbres entiers avec la Stemster ou avec une pelle sécateur.	
<ul style="list-style-type: none"> • Récolte de grands arbres avec la pelle sécateur. • Débardage à envisager pour la pelle sécateur. • Déchiquetage dans un second temps. 	<ul style="list-style-type: none"> • Confort de travail amélioré. • Pression vis-à-vis des adventices forte pour la Stemster, faible pour la pelle sécateur. • Débits de chantiers en lien avec la présence des adventices. • Le service est réalisé par un prestataire. • Le séchage est facilité et présente une souplesse de calendrier intéressante et de gestion des stocks. • Economique pour de grandes parcelles • Convient pour toutes sortes de chaudières à plaquettes. • La granulométrie des plaquettes de bois peut être impactée à cause des cycles courts de 2 à 3 ans maximum concernant la Stemster.
Ensileuse attelée ou automotrice.	
<ul style="list-style-type: none"> • La récolte et le déchiquetage ont lieu simultanément. • Les remorques qui transportent les plaquettes de bois doivent être disponibles et il faut anticiper le salissement potentiel des routes. • Les plaquettes de bois sont directement utilisées, entreposées ou séchées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Confort de travail amélioré mais pression forte vis-à-vis des adventices • Débits de chantiers réduits si présence d'adventices. • Service réalisé par un prestataire. • Séchage des plaquettes de bois parfois difficile. Des pertes par fermentation peuvent être observées surtout avec le peuplier. • Principalement adapté pour l'alimentation en plaquettes de grosses chaufferies et de centrales de cogénération. • Outre la teneur en humidité, la granulométrie des plaquettes de bois peut être impactée à cause des cycles courts de 2 ans maximum.

Dans le cas d'une récolte semi-manuelle, avec la Stemster ou avec une pelle sécatrice il convient de réaliser un déchiquetage de qualité pour apporter une plus-value au produit final. Un bois trop sec lors du déchiquetage peut risquer de produire des queues de déchiquetage et des particules fines (poussières), cet aspect sera développé dans la partie 8 « Usage des TCR ». Les arbres sont en général laissés un à trois mois au sol avant le déchiquetage. Un débardage peut être réalisé aussitôt après la coupe pour acheminer les arbres sur une plateforme bétonnée avant le déchiquetage.

Les déchiqueteuses sont désormais disponibles localement. Leurs tarifs varient en fonction des débits de chantiers proposés (30 à 120m³/heure). Le choix de l'équipement est à adapter à l'accessibilité et à la portance des terrains. La majorité des déchiqueteuses actuelles sont munies d'un rotor équipé de couteaux et d'un contre couteaux.

D'autres prototypes de récolte associant la coupe et la transformation commencent à émerger. L'objectif premier de ce type d'engins est d'abord l'ouverture de milieux boisés et/ou buissonnants et n'ont pas encore été testés sur les TtCR.



Photo 44: Broyeur récupérateur : à gauche Photo 45: Plaisance équipement sans système de récupération, à droite broyeur Mera monté sur une dameuse équipée d'un caisson de 20 m³ (Source Aile)

Le séchage et le stockage des plaquettes de bois

Après que le TCR ait été transformé en plaquettes, le bois doit généralement être stocké avant d'être utilisé en chaufferie. Dans le cas d'une vente vers une grosse unité, le séchage peut être pris en charge par le client selon les caractéristiques de l'installation de chauffage.

Le séchage à l'air libre sous abri peut réduire la teneur en humidité de 50-55% jusqu'à 30% en l'espace de quelques mois.

Tableau 10: Classification de la teneur en eau en quatre catégories

Catégorie	Taux d'humidité
Bois anhydre	0%
Bois séché artificiellement avec de l'air chaud	15%-20%
Bois séché à l'air libre sous abri	< 30-35%
Bois frais	> 50%

Un stockage long d'un bois fraîchement récolté est associé aux risques suivants (LWF 2012):

- Perte de la biomasse : 2-4% de perte de biomasse en raison de la fermentation entraînant la décomposition du bois.
- Risque pour la santé : production de spores de champignons qui ont des impacts négatifs sur la santé.
- Qualité : augmentation de la teneur en eau dans les tas non protégés en raison des précipitations et de ré-accumulation d'eau de condensation en haut du tas
- Risques techniques : gel des plaquettes qui forment un amas congelé difficile à manipuler.
- L'auto-inflammation : l'augmentation des températures par l'activité microbienne dans le tas peut conduire à l'auto-inflammation.
- Les impacts environnementaux : les odeurs peuvent déranger les voisins et les lixiviats peuvent polluer l'eau.

La récolte semi-manuelle, avec la Stemster ou avec une tête abatteuse montée sur une pelleuse permet de réaliser un séchage préalable au déchetage qui facilite le séchage du bois en tas une fois décheté.

Encadré 5: Quel est l'impact de l'essence d'un bois sur le pouvoir calorifique ?

Le pouvoir calorifique d'un bois dépend davantage de la teneur en eau que de la teneur en carbone qui varie assez peu d'une essence à l'autre (48 à 52%). Plus la teneur en eau est importante, moindre est l'efficacité énergétique lors de la combustion (voir le chapitre 22), étant donné qu'une partie de l'énergie est "perdue" pour le séchage. La valeur calorifique est beaucoup plus élevée si le bois est séché (4,3 kWh / g), que s'il est frais ou humide (1,5 kWh / g) (Liebhard 2007). La relation de la valeur calorifique du bois par rapport à la teneur en eau est représentée sur la photo 47.

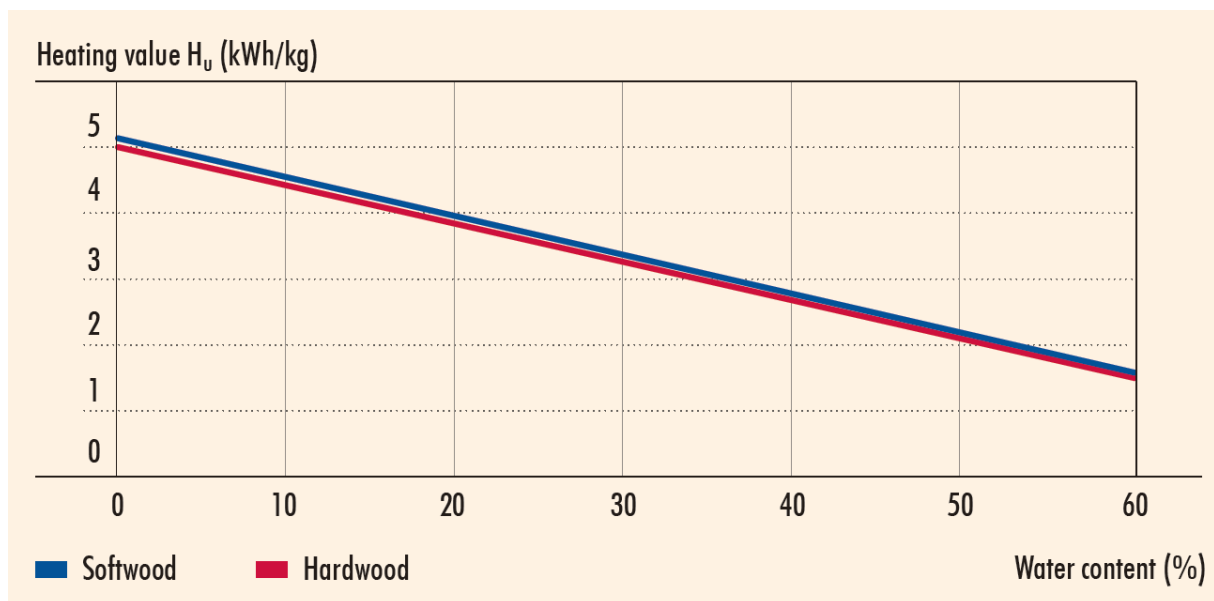


Photo 46: La valeur calorifique du bois en fonction de la teneur en eau comparée entre un bois tendre (Softwood) et un bois dur (Hardwood) (Source: LWF 2012)

Le séchage artificiel peut-être envisagé dans la mesure où la chaleur latente d'une autre installation est disponible telle qu'une unité de méthanisation qui fait fonctionner un moteur de cogénération qui produit de la chaleur en plus de l'électricité. Plusieurs technologies existent et sont présentées dans le Tableau 11 : caillebotis, système amovible à double fond avec une remorque ou un caisson amplyroll, à tapis ou à palles. (Photo 48 à la Photo 53).

Les remorques et les caissons peuvent être bâchés pour accélérer le processus de séchage.

Le système sur caillebotis présente l'avantage de pouvoir procéder facilement à un mélange pour homogénéiser le séchage. Des systèmes à palles tournantes permettent cette homogénéisation de manière automatique, continue ou discontinue. Des systèmes à tapis permettent l'acheminement des plaquettes.

Tableau 11: Technologies de séchage et leurs principales caractéristiques (Source: Rutz et al. 2012)

Catégories de séchage artificiel	Caractéristiques
Séchage classique artificiel	L'air chaud est soufflé horizontalement en partie basse puis l'air chaud monte verticalement à travers un double fond équipé de grille sur laquelle sont entreposées les plaquettes. Ce système est adaptable dans des silos fixes, des remorques ou des caissons amplyroll. C'est l'un des systèmes de séchage artificiel le plus simple et économique pour de petites quantités.
Séchoir à palles	L'air chaud est soufflé à travers une grille en double fond. Des palles tournent pour mélanger le produit.
Tapis de séchage	L'air chaud sèche les plaquettes qui passent sur un tapis roulant. Les coûts d'investissement sont relativement élevés.



Photo 47 Séchage en caisson amplyroll avec l'air chaud issu de la cogénération (Source:Aile).



Photo 48: Remorque agricole adaptée (Source: Rutz D.).



Photo 49 Illustration d'un système de grille utilisé en double fond d'un caisson amplyroll (Source : Aile)



Photo 50: Systèmes caillebotis (Source:Aile).



Photos 51 et 52: Installation de stockage de bois à l'air libre sous hangar (Source: Aile)

Enfin, une méthode spécifique pour le séchage des plaquettes de bois de TCR a été développée et brevetée (PCT / EP2005 / 009241) par l'Université Technique de Dresde (Allemagne). Le système est basé sur le principe du séchage dont la première phase est une montée en température dès la mise en tas. Comme l'indique le schéma de la photo 43, des tuyaux perforés facilitent l'entrée d'air à la base du tas et un tuyau de sortie agit comme une cheminée en libérant l'air chaud qui a été chauffé par les plaquettes de bois. Ce processus de ventilation est une méthode efficace pour le séchage du bois sans apport d'énergie externe mais qui nécessite la mise en place d'une bâche couvrante respirante et la mise en place des tuyaux. Avec cette méthode, il est possible de réduire la teneur en eau à 30% dans un délai de trois mois (Grosse et al., 2008). Le tas peut être fait directement au bord de la plantation ou à l'endroit de la consommation des plaquettes de bois.

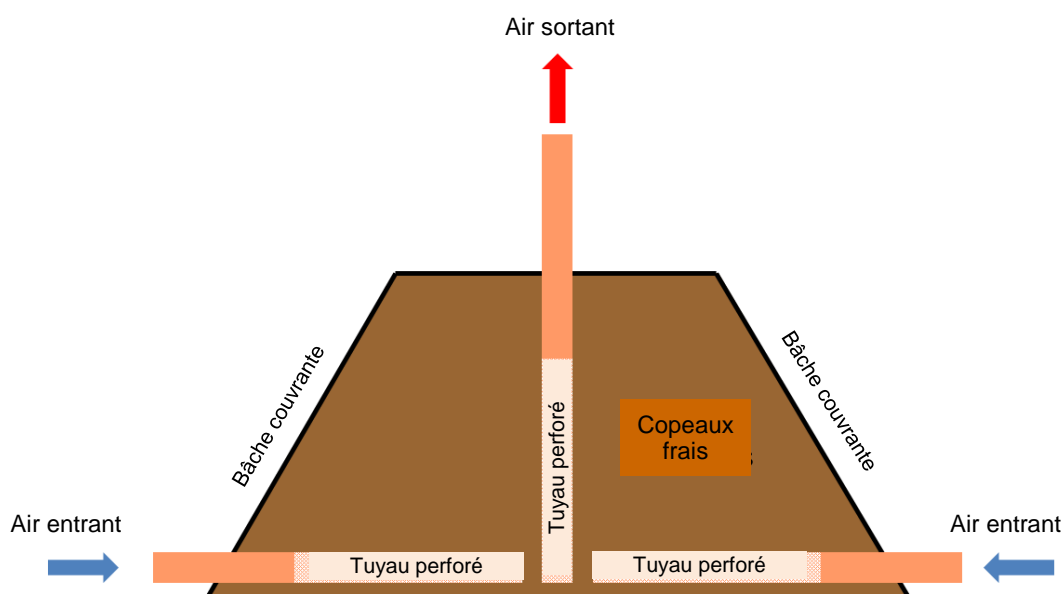


Photo 53: Schéma d'un tas de plaquette avec séchage par ventilation (Source: Rutz D.)

Comme l'indique le schéma ci-dessus, le moyen le plus simple et efficace pour le séchage reste l'utilisation d'un hangar, à partir du moment où il est bien conçu : aéré, bitumé et si possible bien orienté.

6 Logistique et transport

Les frais de transport et les distances avec les clients potentiels devront être examinés attentivement avant le démarrage d'un projet de TCR. Le transport de plaquettes doit être minimisé autant que possible, car le transport cause un impact négatif sur les émissions de GES et la rentabilité. Les distances maximales recommandées et le type de transport approprié pour les plaquettes de bois dépend des circonstances et contraintes locales et peuvent être résumées comme ceci :

- 0-40 km : Tracteurs agricoles ou caisson ampliroll sur porteur
- 30-90 km : Semi-remorques de capacités de 70-90 m³
- > 70 km : Trains

Il est également important de prendre en compte le poids maximum autorisé sur les routes permettant d'accéder aux parcelles ainsi que la hauteur maximale des ponts.

La masse volumique des plaquettes de bois dépend de la teneur en eau, des espèces d'arbre, de la taille et de la forme des plaquettes, ainsi que du rapport écorce / bois. Une tonne de plaquette de bois sec représente environ 3 mètres cube et une tonne de plaquette de bois humide représente environ 4 mètres cube. Le Tableau 12 donne des repères sur la masse volumique selon les espèces et le taux d'humidité.

Tableau 12: Poids des plaquettes de bois en MAP (m³ apparent plaquettes), d'espèces TCR et autres espèces (moyenne / valeurs typiques; les valeurs réelles dépendent de plusieurs facteurs!)

Teneur en eau [%]	0	15	20	30	50
Masse [kg]					
Peuplier (TCR) (densité 353 kg matière sèche/ m ³)	164	145-174***	181**	203** 167-200***	284**
Saule (TCR) (densité 420 kg matière sèche/ m ³)	168*	181-217***	181**	208-250***	n.a.
Aulne(TCR) (densité 530 kg matière sèche/ m ³)	n.a.	177-212***	n.a.	204-245***	n.a.
Robinier (TCR) (densité 750 kg matière sèche/ m ³)	n.a.	264-317***	n.a.	304-365***	n.a.
Epicéa (non TCR) (densité 379 kg matière sèche/ m ³)	151	178	189	216	302
Hêtre (non TCR) densité 558 kg matière sèche/ m ³)	222	261	278	317	444

(Source: CARMEN 2014, * SLL n.d., ** Biomasseverband OÖ n.d., *** ETA Heiztechnik GmbH n.d. (first value for G50, second value for G30), other sources)

Dans le cas d'une exploitation sur des cycles longs (>8-10ans) avec une coupe au sécateur, le débardage est très souvent pratiqué. Les arbres sont soit stockés temporairement aux abords de la route d'accès, soit transportés directement sur plateforme de stockage ou sur l'unité de valorisation pour y être décheté.

En cas d'accès difficile, comme en forêt par exemple où les chemins ne sont pas forcément empierrés, si l'engin de transport qui assure la livraison finale est de forte capacité (70-90m³) et ne peut accéder au lieu de déchetage, une vis de transbordement peut être

installée à l'arrière d'une remorque agricole qui réceptionne les plaquettes de bois en sortie de la déchiqueteuse. Les plaquettes sont ainsi déversées par la vis de transbordement depuis la remorque agricole jusqu'à la remorque de transport pour la livraison finale (Source : Aile).

7 Remise en culture après un TCR

Diverses raisons peuvent être à l'origine d'un dessouchage. Un agriculteur peut décider de convertir les terres en pâturages ou en terres arables ou de replanter de nouveaux TCR. La fin d'une plantation de TCR est considérée par de nombreux agriculteurs comme un obstacle majeur à cette culture. La possibilité d'obtenir un rapide retour à l'état d'origine est tout à fait possible car les racines sont peu profondes.

La méthode doit être choisie en fonction de l'utilisation future souhaitée mais intervient toujours après une récolte, souvent le printemps suivant.

Par exemple, pour la conversion en prairie, un labour suivi d'un simple ensemencement de l'herbe peut être suffisant. Dans certains cas, cela peut être également suffisant pour la remise en culture dans les terres arables. La capacité des machines de labour et de travail du sol (cultivateur) pour émietter le bois en petits morceaux sans faire remonter à la surface de jeunes rameaux influe sur la décision d'un traitement supplémentaire. Des outils utilisés pour broyer les souches peuvent être utilisés en complément. Si le site le permet, un traitement chimique en plein peut être utilisé deux semaines avant le travail du sol classique (charrue, cultivateur) lorsque les rejets annuels mesurent 20 à 30 cm.



Photo 54: Broyeur de souches (Source: Mergner R.)



Photo 55: Sol recultivé en Autriche (Source: Mergner R.)

8 Valorisation des TCR

Comme expliqué précédemment les différents cycles et matériels de récolte exigent un espacement adapté entre les arbres. Dans le cas de plantations à fortes densités avec des cycles de récolte entre 2 et 8 ans, le matériel récolté sera toujours déchiqueté alors que sur des cycles de récolte plus longs avec des densités moindres, il peut être envisagé de fournir l'industrie papetière ou de produire du bois d'œuvre pour générer plus de revenus. Cela concerne principalement le peuplier ou l'eucalyptus, car les saules ne produisent pas de

tiges de sections suffisamment conséquentes. Ce manuel met l'accent uniquement sur l'utilisation énergétique des plaquettes de bois.

Qualité des plaquettes de bois énergie

Les critères qualitatifs illustrés (photo 57, photo 58) sont décrits ci-après. Ces critères s'ils ne sont pas respectés peuvent impacter la qualité de la combustion et donc entraîner une baisse de la production d'énergie combinée à des rejets nocifs dans l'atmosphère, mais peuvent également impacter les coûts de maintenance de l'installation.

Outre la teneur en eau déjà largement expliquée précédemment, la granulométrie est un aspect capital :

- Homogénéité et taille des plaquettes de bois: Les dimensions doivent être adaptées au système de convoyage et à la chambre de combustion.
- Présence de fines particules: les particules fines (poussières) sont un risque pour la santé mais peuvent également provoquer des blocages dans les vis de convoyage et s'envoler dans la chambre de combustion jusqu'à se déposer sur les échangeurs, provoquant ainsi une baisse du rendement. La présence de feuilles augmente le taux de fines.
- Présence de queues de déchiquetage : elles peuvent amplifier les effets de voutage dans le silo et provoquer le blocage des vis de transfert.

La teneur en cendres est un autre critère à prendre en compte. Moins la teneur en cendres est élevée, plus la production d'énergie est élevée et moins il sera passé de temps à vider le cendrier. La proportion d'écorce et la présence de matériaux inertes (terre, sable, cailloux) augmente la teneur en cendres. La gestion des cendres est un critère à prendre en compte dès le début de la réflexion du projet de chaufferie bois.



Photo 56: Haute qualité (à gauche) mauvaise qualité (au centre et à droite) plaquettes produites en Allemagne (Source: Rutz D.)

Afin de donner des repères aux fournisseurs et aux utilisateurs de bois énergie le Comité européen de normalisation (CEN) a élaboré des normes concernant les propriétés granulométriques des plaquettes de bois, briquettes, et granulés. Ces normes ont été modifiées en 2014 et développées en tant que normes internationales ISO (Organisation internationale de normalisation). Les normes suivantes sont applicables aux biocombustibles ligneux :

- ISO 17225-1:2014-09 (former EN 14961-1:2010) Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles – Part 1: Dispositions générales
- ISO 17225-2:2014-09 (former EN 14961-2:2011) Biocombustibles solides -Partie 2 : Classes de Pellets
- ISO 17225-3:2014-09 (former EN 14961-3:2011) : Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles - Partie 3: Classes de briquettes de bois
- ISO 17225-4:2014-09 (former EN 14961-4:2011) Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles – Part 4: Classes de Plaquettes ISO 17225-5:2014-09 (former EN 14961-5:2011) Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles – Part 5: Classe de Bois de chauffage



Photo 57: Répartition granulométrique faite avec une tamiseuse ENDECOTTS, modèle EFL 2000, depuis les poussières <1mm (en bas à droite) jusqu'aux particules >63mm. Essai granulométrique réalisé avec des plaquettes issues d'un TtCR de saules à Pleyber-Christ récolté avec la Stemster et séchées sous la plateforme de la SCIC Coat Broz Montroulez (Source: Aile).

Un exemple de fourniture détaillé de plaquettes est donné par Alakangas (2009) dans le Tableau 13, selon la norme EN 14961-1 où figurent notamment à titre informatif le soufre (S), l'azote (N) et de chlore (Cl).

Tableau 13: Exemple d'analyse de plaquettes de bois (Source: Alakangas 2009, modifié)

EN 14961-1		
Détails généraux	Producteur	EAA Biofuels
	Lieu	Jyväskylä, Finland
	Origine	1.1.1.1 and 1.1.1.2 (Whole tree)
	Transformation	Plaquettes de bois
	Quantité (t)	4.00
Détails normatifs	Dimensions	P45A
	Teneur en eau, % sur brut	M35
	Teneur en cendres, % sur sec	A1.5
Compléments d'information	Masse volumique kg/m ³	BD250
	Pouvoir calorifique MJ/kg	Q11.5
	Soufre, % sur sec	0.05
	Azote, % sur sec	N0.3
	Chlore, % sur sec	Cl0.03

La norme ISO 17225 , en plus de permettre une bonne compréhension des acteurs du marché du bois énergie, facilite la formulation des exigences des chaudiéristes concernant l'adaptabilité du combustible aux exigences des installations de chauffage.

Tous ces critères peuvent impacter le prix du combustible dans le cas d'une livraison et peuvent indiquer les marges de progrès du producteur en terme qualitatif dans le cas d'une autoconsommation.

La liste suivante montre le panel d'utilisation des plaquettes de bois :

- Pour la combustion et des systèmes de chauffage à petite échelle (taille de l'exploitation ou pour quelques ménages)
- Pour les grands systèmes de combustion et de chauffage (pour les réseaux de chauffage urbain, pour plusieurs foyers connectés)
- Pour des unités combinant production de chaleur et électricité pour les plaquettes de bois (cycles ORC, turbines à vapeur)
- Pour la production d'électricité à partir de la gazéification des plaquettes.
- Pour la co-combustion de plaquettes de bois dans les grandes centrales électriques (à base de combustibles fossiles)
- En tant que matériau de matière première pour les procédés de bioraffinage (par exemple de pyrolyse, la gazéification, la torréfaction, carburant de seconde génération, bioplastiques)
- Pour la fabrication de granulés
- Pour des applications de niche: comme paillage, comme matériau de litière pour l'élevage, comme substrat pour la production de champignons, comme matériau de structure pour les biofiltres ou comme matériau de revêtement de terrains de jeux

La principale application des plaquettes de bois aujourd'hui en Union Européenne est à des fins de chauffage, de cogénération et de co-combustion. Le chapitre 22 fournit des détails sur la combustion de plaquettes de bois et de granulés.

A l'avenir, la demande de plaquettes pour les procédés de bioraffinage peut augmenter. Des plantations TCR sont déjà établies pour la production de biocarburants dits liquides de deuxième génération. Le processus BtL (Biomass To Liquid) transforme la biomasse lignocellulosique, comme les plaquettes de TCR, par conversion thermo-chimique en biocarburants synthétiques. La technologie de conversion biochimique, où la matière lignocellulosique est convertie en sucres et ensuite fermentée en éthanol (Photo 59) est un peu plus avancée. L'éthanol est un substitut à l'essence. Plusieurs usines européennes et internationales étudient, au stade pilote pour la démonstration, l'utilisation de plaquettes de bois pour ce processus, sachant que la recherche portait jusqu'à présent principalement sur l'utilisation de la biomasse herbacée (tels que la paille, graminées, etc.).

A plus petite échelle, la pyrolyse et la gazéification peuvent être envisagées sur une exploitation agricole (Photo 60).



Photo 58: Usine d'éthanol - Seconde génération - ABENGOA en Espagne (Source: Rutz D.)



Photo 59: Gazéificateurs de petite échelle dans un container (gauche) et dans une usine (droite) de la compagnie « SpannerRE » (Source: Rutz D.)

Les granulés étaient au départ produits à partir de sciure de bois, considérée comme résidu à faible valeur ajoutée (Photo 61). Aujourd'hui, les granulés sont également produits à partir de bois dédié telles que les plaquettes forestières à partir de billons. On peut espérer qu'en exploitant des plantations de TCR avec des cycles plus longs, le rapport écorce / bois diminuera et les plaquettes de TCR pourraient être intégrées dans le processus de fabrication de ces granulés.



Photo 60: Presse à granulés (gauche) granulés de haute qualités (droite) (Source: Rutz D.)

Combustion des plaquettes de bois

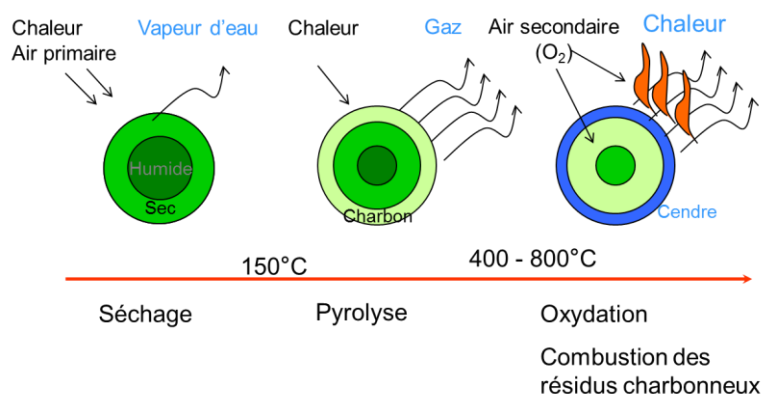
L'usage principal des plaquettes de TCR est leur combustion pour la production de chaleur en substitution aux énergies fossiles (voir encadré 6). L'investissement et les coûts de maintenance d'une chaudière à plaquettes de bois sont souvent plus élevés que pour une chaudière à combustible fossile. Cependant, le coût des combustibles est moins cher, surtout si l'utilisateur produit lui-même sa ressource, de sorte qu'à long terme ces chaudières sont plus économiques que les chaudières à combustibles fossiles.

La biomasse végétale se compose essentiellement de carbone (C), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O). La proportion de carbone détermine l'énergie libérée lors de la combustion (oxydation). En outre l'hydrogène contenu dans la biomasse solide fournit de l'énergie lorsqu'il est brûlé. Avec le carbone, il détermine la valeur calorifique du combustible sec. Contrairement aux autres énergies fossiles, le bois contient de l'oxygène qui facilite le processus de combustion, mais ne contribue pas au contenu énergétique du combustible.

Les combustibles bois ont une teneur élevée en carbone, entre 47 et 50%. Leur teneur en oxygène est comprise entre 40 et 45% et la teneur en hydrogène entre 5 et 7%. S'ajoute à ces trois éléments chimiques d'autres éléments minéraux qui peuvent, en dépit de leurs faibles proportions, avoir des effets importants sur les émissions. Le soufre, le chlore et l'azote sont parmi les éléments qui ont le plus d'effet sur les émissions atmosphériques.

Le processus de combustion est précisé dans le tableau 14. C'est une réaction exothermique qui résulte de l'action chimique de l'oxygène de l'air sur certains éléments du combustible. Elle s'accompagne d'un dégagement de chaleur. La combustion du bois se divise en plusieurs étapes relevant de divers processus chimiques et physiques.

Tableau 14 Les trois étapes de la combustion (Source : Aile)



En règle générale, les chaudières à plaquettes de bois (photo 62, photo 63) sont utilisés pour les installations de chauffage à partir d'environ 50 kW, tandis que les chaudières à granulés sont utilisés pour les systèmes de chauffage plus petits. Le chauffage avec des plaquettes de bois est uniquement économique pour les grandes maisons, les fermes, ou plusieurs maisons, ou encore des petits villages. Le chauffage à granulés s'utilise habituellement au niveau d'une maison individuelle.

Les fabricants proposent désormais des chaudières mixtes qui peuvent fonctionner avec des plaquettes ou des granulés voire même du miscanthus, des résidus de cultures. Comme l'indique le tableau 15, une précaution importante est de considérer le point de fusion des cendres qui s'opère à des températures différentes selon la nature du combustible. La température de fusion de bois est supérieure à 1200°C alors que les résidus de cultures peuvent fusionner dès 800°C. Les risques liés à des températures basses de fusion des cendres peuvent générer la présence de mâchefers (cendres fusionnées) dans la chambre de combustion et engendrer des coûts de maintenance supplémentaires. Sur cet aspect, et sans parler de la gestion des rejets atmosphériques, il est donc plus facile de brûler du bois que toute autre ressource agricole. Néanmoins les risques de produire du mâchefer avec le bois ne sont pas nuls. Il convient de s'assurer que la qualité du combustible bois est en adéquation par rapport à la technologie de l'installation de chauffage, et cela de manière homogène sur toute la saison de chauffe.

Encadré 6: Pourquoi la combustion de bois est-elle neutre en terme d'émissions de gaz à effet de serre ?

Le principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique émanant des procédés de combustion est le dioxyde de carbone (CO₂). Le dioxyde de carbone est émis lors de la combustion des combustibles fossiles (par exemple charbon, houille, pétrole, gaz naturel), mais aussi de la biomasse ligneuse telle que le bois. L'effet de serre est dû au fait que, la matière organique (majoritairement arbres pour le charbon, plancton pour le pétrole) a été piégée dans les couches géologiques, et s'est lentement (plusieurs millions d'années) transformée en hydrocarbures sous l'effet de la chaleur et de la pression. A la suite de leur combustion (voiture, chaudière), ces émissions provoquent l'effet de serre car le stockage du carbone a été très lent, et est brusquement rejeté en quelques siècles.

La combustion du bois rejette également du CO₂ mais sur un cycle beaucoup plus court (quelques dizaines d'années) que dans le cas des ressources fossiles. C'est pourquoi on estime que le bilan par rapport à l'effet de serre est neutre, à condition que cette biomasse soit renouvelée régulièrement.

Aussi pour une plantation à courte rotation, le renouvellement par coupes régulières représente un bilan environnemental favorable.

D'autre part, l'accumulation du carbone du sol dans les plantations de TCR est généralement plus élevée que pour les cultures annuelles et présente donc un effet positif supplémentaire sur l'atténuation du changement climatique.

Encadré 7: Quelle est la différence entre Pouvoir Calorifique Supérieur et Inférieur ?

Des informations importantes sur les propriétés du carburant sont fournies par les pouvoirs calorifiques.

On distingue le pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui indique la quantité de chaleur qui est libérée lors de la combustion complète de la biomasse. Cette valeur ne tient pas compte de la chaleur de condensation (chaleur d'évaporation) de la vapeur d'eau contenue dans les gaz d'échappement. Ainsi, la valeur calorifique inférieure diminue avec l'augmentation de la teneur en eau de la biomasse.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) tient compte de la chaleur latente nécessaire à la condensation lors de la première phase de la combustion qui est la phase de séchage du bois. Le PCS est la valeur qui est prise en compte dans les installations équipées d'un condensat qui récupère l'énergie contenue dans la vapeur d'eau des fumées.

Tableau 15: Caractéristiques de combustion de combustibles solides (Hiegl et al. 2011) (Valeurs typiques moyennes; les valeurs réelles dépendent de plusieurs facteurs)

Type de combustible	PCI [MJ/kg]	PCS [MJ/kg]	Taux de cendres [%]	Température de fusion des cendres [°C]
Bois de peuplier	18.5	19.8	1.8	1,335
Bois saule	18.4	19.7	2.0	1,283
Bois de hêtre	18.4	19.7	0.5	-
Bois d'épicéa	18.8	20.2	0.6	1,426
Ecorce	19.2	20.4	3.8	1,440
Paille de blé	17.2	18.5	5.7	998
Grain de blé	17.0	18.4	2.7	687
Houille	29.7	NA	8.3	1,250



Photo 61: Chauffage d'un petit élevage de porcs. Chaudière à plaquettes ETA (70 kW) équipée d'un bac à cendres, le système d'alimentation par vis et le stockage de plaquettes (à gauche), un ballon tampon (à droite) (Source : Aile).



Photo 62: Chaudière à plaquette de forte puissance (2,000 kW) la chaudière (droite) le traitement des fumées (gauche) – CIDERAL à Loudéac (Source: Aile).



Photo 63: Système ORC (1,520 kWel) - en Allemagne (Source: Rutz D.)

9 Les TCR et leur impact sur l'environnement

En général, en raison de ses faibles besoins en intrants, le TCR présente de nombreux impacts environnementaux positifs.

Phytodiversité

La phytodiversité représente la diversité des plantes dans un milieu, leur coexistence et les interactions entre elles et avec les autres éléments composant le milieu. Une série d'expériences a été menée dans les domaines des TCR principalement en Suède et en Allemagne. L'identification, la quantification et l'évaluation des différences entre les TCR et les autres usages des terres telles que la production de céréales et de fourrage dans les terres agricoles, mais aussi des différences entre les TCR et la forêt (Dimitriou et al., 2012a) sont présentés succinctement ci-dessous:

- Les plantations de TCR peuvent représenter une valeur ajoutée au paysage structurel composé des grandes cultures.
- Les TCR fournissent des habitats pour des espèces différentes, en particulier dans les zones dominées par les terres arables et les forêts de résineux.
- La composition des espèces couvrant le sol des TCR est un mélange d'espèces de prairies, rudérales (première espèce susceptible de coloniser des sites perturbés) et d'espèces de sous-bois, tandis que les terres arables contiennent des espèces principalement rudérales et arables.
- La culture du TCR suggère des zones non plantées et non productives pouvant générer de la phytodiversité.

- Les parcelles de TCR sont jusqu'à trois fois plus riches en espèces végétales que les terres arables, et dans certains cas plus riches que les forêts de résineux et forêts mixtes.



Photo 64: Végétation dans une parcelle de peupliers de 3 ans au printemps en Allemagne (Source: Rutz D.)



Photo 65: Végétation dans une parcelle de TtCR de saules en automne en France (Source: Aile)



Photo 66: Végétation dans un TtCR de saules au printemps en Suède (Source: Rutz D.)



Photo 67: Un champ de saules plantés de deux différents clones augmentera le nombre d'espèces de plantes dans la parcelle (Source: Weih M.)

- La contribution des TCR vis-à-vis de la diversité des espèces végétales change au fil du temps. Avec la diminution de la disponibilité de la lumière, la végétation au sol tend vers une augmentation d'espèce évoluant en milieu forestier. Ainsi, les espèces d'arbres plantés, leur densité de plantation et la fréquence de récolte influence la composition des espèces.
- Les plantations de saules sont plus appropriées pour accompagner les espèces forestières que les plantations de peupliers en raison d'un feuillage moins ombragé qui permet un ensoleillement plus élevé.

Il convient de rappeler certaines recommandations afin d'éviter les impacts négatifs sur la phytodiversité (Dimitriou et al., 2012a) :

- Il faut éviter la plantation de TCR dans les zones ayant un statut écologique reconnu: une zone protégée, abritant des espèces rares, une zone humide, une tourbière, un marais.
- Une bonne hétérogénéité structurelle fournit un habitat favorable à la phytodiversité : alterner les clones et éventuellement les coupes sur une même parcelle peut y contribuer.
- Un pourtour de TCR boisé telle qu'une haie bocagère ou un talus est conseillé.
- L'allongement des rotations favorise la propagation de plantes évoluant en milieu forestier. Une autre possibilité est d'aligner la plantation en rangées dans la direction est-ouest pour réduire le rayonnement atteignant la végétation au sol, en assombrissant la culture plantée.



Photo 68: Bord d'un champ de TtCR de saule fleuri au printemps (Source: Aile)

Zoodiversité

De même que pour les plantes et la phytodiversité, la zoodiversité concerne la diversité des communautés animales.

Les TCR de saule en Suède sont un moyen bien connu pour attirer le gibier tel que le cerf et beaucoup de plantations en Suède ont été établies pour la chasse. En outre, les TCR abritent des sangliers qui y ont trouvé un habitat plus favorable que les paysages agricoles.



Photo 69: Un lapin dans une plantation de TCR. Dans certaines plantations les mammifères causent des dégâts, mais l'installation de clôtures n'est pas nécessaire car cela engendre des frais importants non rentabilisés (Source: Dimitriou I.)



Photo 70: Chevreuil entrant dans une parcelle de TCR de saule, ces plantations sont bien connues pour attirer les mammifères de la région, car ils offrent refuge et nourriture. (Source: Nordh N-E.)

Il y a eu plusieurs discussions sur l'augmentation des oiseaux dans des paysages avec des plantations de TCR. Une liste détaillée des résultats les plus importants est décrite ci-dessous (Dimitriou et al., 2012a).

- Quelques espèces d'oiseaux en voie de disparition ont été repérés dans des jeunes plantations de TCR ou à la lisière des plantations.
- La qualité de l'habitat TCR pour les oiseaux nicheurs est en général fortement dépendante de l'âge et de la structure du TCR,
- Lorsque la plantation grandit, la population oiseaux nichant dans les arbustes fait place à des populations d'oiseaux familiers des habitats forestiers.
- La plus grande diversité d'espèces d'oiseaux a été enregistrée sur des plantations de 2 à 5 ans.
- La diversité et l'abondance d'oiseaux est également liée à la densité de la plantation et à l'augmentation du nombre d'adventices.
- L'effet global sur la zoodiversité dépendra dans une large mesure des terres sur lesquelles sont plantés les TCR et du paysage environnant.

Dans l'hypothèse où une grande partie du paysage était plantée en TCR (par exemple 20%), alors il y aurait (Dimitriou et al, 2012a.) :

- plus d'espèces d'oiseaux nicheurs, parce que les TCR fournissent de nouvelles structures d'habitat.
- des espèces d'oiseaux habituellement associés aux milieux forestiers, à condition que la hauteur des arbres du TCR corresponde (hauteur des peupliers / saules environ. 8 m à 12m).

Un autre impact positif des TCR est la diversité des invertébrés, comme les vers de terre, les araignées, les coléoptères et les papillons qui peuvent évoluer dans la biomasse aérienne et dans le sol d'un TCR. Une augmentation des vers de terre dans les plantations établies depuis un certain nombre d'années a été enregistrée en comparaison à des terres arables. Tout cela dépend des pratiques culturales : un niveau d'intrants importants et plus particulièrement l'utilisation de pesticides réduit la population des invertébrés notamment.



Photo 71: Tour d'observation pour les oiseaux et le gibier placée en bord d'un champ de saule. Plusieurs espèces d'oiseaux sont attirées en bordure de plantation de TCR. (Source: Dimitriou I.)



Photo 72: Pollinisation des fleurs de saule (Source: Nordh N-E., (gauche) Rutz D. (droite))

Les abeilles sont également très sensibles aux produits chimiques et les TCR constituent donc un milieu favorable à leur présence. Le saule fleurit assez tôt dans la saison et permet une reprise d'activité précoce à l'abeille à la sortie de l'hiver. La résine de bourgeons de peupliers et d'aulnes est une source importante de propolis, substrat utilisé par les abeilles comme matériau antiseptique pour maintenir l'hygiène dans la ruche et comme produit d'étanchéité dans la ruche.

D'autre part, la végétation d'accompagnement des TCR fournit des sources importantes de nectar. De même, les fleurs de robinier produisent de grandes quantités de nectar, fournissant ainsi une précieuse source d'alimentation pour les abeilles.



Photo 73: Bords larges entre les champs de saule qui permettent aux autres espèces de plantes de croître, mais créer aussi un corridor pour la faune sauvage (Source: Nordh N-E.)

Les recommandations qui suivent préviennent les impacts négatifs et peuvent accroître les effets positifs sur la zoodiversité. Elles sont utiles dès la planification du TCR (Dimitriou et al, 2012a.):

- Préférer les grandes tournières
- Mélanger les variétés et les clones en variant les date de floraison
- Préférer une récolte par bloc
- Privilégier un itinéraire technique en zéro-phytosanitaire.

Sol

Les effets positifs sur la qualité du sol, lorsque le TCR est cultivé plusieurs années sont détaillés ici et comparés aux cultures traditionnelles (Dimitriou et al., 2012b) :

- Le stockage du carbone (C) dans la matière organique du sol est plus élevé et celle-ci est également plus stable.
- L'érosion du sol est inférieure avec des TCR. Ce facteur dépend de l'orientation de la plantation par rapport à la pente.
- La quantité d'azote total est plus élevée et la proportion d'azote (N) disponible pour la croissance des plantes est inférieure car le rapport C / N de la matière organique du sol est supérieur sous un TCR.
- La disponibilité en Phosphore (P) pour les plantes est plus faible pour le TCR que pour une culture agricole conventionnelle.
- Le pH du sol d'un TCR peut être légèrement inférieur.
- L'activité microbienne est légèrement inférieure au fur et à mesure que la biomasse se développe (feuilles, racines). Cela contribue à l'accumulation de matière organique.
- Des concentrations de Cadmium (Cd) dans le sol d'un TCR est inférieur.

En général, le compactage du sol est plus faible dans les TCR que les cultures récoltées chaque année. Le compactage du sol peut être évité si la récolte se produit lorsque le sol est gelé en hiver.



Photo 74: Tige d'un peuplier de 3 ans - Clones Max 3 - Mars en Allemagne: les feuilles de la saison précédente couvrent encore le sol (Source: Rutz D.)

Enfin, les TCR peuvent être utilisés pour la phytoremédiation des sols contaminés. La phytoremédiation est le traitement des terres contaminées (par exemple avec des métaux lourds, les pesticides, les solvants) par l'utilisation de plantes, sans nécessité d'extraire la terre contaminée pour la traiter ailleurs. Certaines espèces de saules ont la capacité d'absorber les métaux lourds ce qui peut être intéressant pour l'épandage de boues de station d'épuration.

Certains sols à forte concentration de Cadmium causée par exemple par l'utilisation à long terme d'engrais phosphoré pourraient être plantés en TCR à condition de laisser au minimum trois cycles de végétation au TCR.

Eau

Les recherches sur l'impact des TCR sur l'eau ont porté sur la capacité des TCR à limiter le lessivage des nutriments dans les eaux souterraines. De ce fait, l'impact attendu est habituellement positif. D'autre part, les TCR offrent des avantages lorsqu'ils sont utilisés en zone tampon, plantés dans des zones d'agriculture intensive, ils sont efficaces pour la rétention des nutriments et autres pollutions diffuses. L'assimilation des pertes d'éléments nutritifs et leur exportation par le bois lors des récoltes réduit l'accumulation et le risque de fuite de quantités dangereuses de nutriments dans les plans d'eau adjacents ou les eaux souterraines.

Les conclusions détaillées des expériences menées en comparant les plantations de TCR avec d'autres usages agricoles en termes de qualité de l'eau sont présentés ci-dessous (Dimitriou et al 2012) :

- La lixiviation de NO₃-N dans les eaux souterraines est sensiblement plus faible dans les cultures TCR.
- La lixiviation de PO₄-P dans les eaux souterraines est presque égale ou, dans certains cas, légèrement supérieure dans les cultures de TCR.
- La lixiviation légèrement accrue de PO₄-P vers les eaux souterraines n'a pas été corrélée à l'épandage de boues de station d'épuration sur le TCR.
- Les TCR peuvent réduire la pollution diffuse des pesticides.

Les recommandations suivantes peuvent être appliquées lors de la sélection de l'emplacement et de la planification de la plantation pour prévenir les impacts négatifs et augmenter les impacts positifs sur l'eau :

- Les TCR peuvent être implantés autour de zones d'excédent structurel, des usines de traitement des eaux usées, etc.) pour diminuer pour limiter les fuites d'azote vers les plans d'eau.
- L'application des boues d'épuration pour le recyclage des éléments nutritifs n'affecte pas la qualité de l'eau.
- Des récoltes plus fréquentes conduisent à une recharge des eaux souterraines en moyenne supérieure.

Malgré l'intérêt fort de cette application, peu de TCR sont implantés sur un périmètre de captage d'eau potable du fait de la technique d'implantation classique du TCR qui intègre l'utilisation des produits phytosanitaires. L'usage de produits phytosanitaire est bien évidemment interdit en périmètre rapproché d'un captage d'eau. Des essais d'implantation de TCR avec désherbage mécanique ont montré de bons résultats et répond aux contraintes d'implantation sur un périmètre de captage d'eau

Epandage de cendres et de boues d'épuration

Le TCR est une culture non-alimentaire cultivée sur un sol agricole et peut à ce titre recevoir des boues de station d'épuration. Les politiques au niveau européen encouragent le recyclage du phosphore (dont la ressource est limitée) et de l'azote en agriculture.

L'épandage de boues sur TCR implique la réalisation d'analyses du niveau des métaux lourds dans les boues et dans le sol, avant et après épandage. L'enjeu est d'éviter l'accumulation de métaux lourds qui pourrait affecter la culture suivante. Chaque pays européen légifère les quantités à épandre et les concentrations autorisées de métaux lourds dans les sols après l'épandage des boues.

D'autre part les boues d'épuration ne constituent pas un engrais équilibré en termes d'éléments nutritifs. Elles contiennent peu d'azote (principalement sous forme organique), des quantités élevées de phosphore, et très peu de potassium. Par conséquent, l'utilisation des cendres sous foyer en mélange avec les boues permet d'obtenir un produit fertilisant équilibré (Dimitriou et al., 2006).

En effet, les cendres de bois contiennent des quantités élevées de potassium, très peu de phosphore et pas d'azote. On distingue les cendres sous foyer qui peuvent contenir des métaux lourds dans de faibles concentrations et les cendres volantes qui contiennent plus de métaux lourds. Les grosses unités sont équipées de filtres (électrofiltre, filtre à manche) pour traiter ces cendres volantes. Les cendres volantes font l'objet d'un traitement en centre d'enfouissement.

Les mélanges de boues et de cendres sont appliqués au TCR pendant la phase de mise en place et après chaque récolte et peuvent compenser l'exportation des nutriments par la récolte. Dans la pratique, les doses sont ajustées à l'apport maximal autorisé en phosphore. Ces taux sont habituellement assez restrictifs, par exemple pour la Suède ces taux sont d'environ 22 à 35 kg de phosphore par hectare et par an.

Pour des raisons techniques, l'épandage ne peut se faire qu'après la récolte, soit tous les 3 ans pour un TtCR.



Photo 75: Epandage des boues d'épuration (ici en mélange avec les cendres de bois) est pratique courante en Suède (Source: Dimitriou I.)

L'irrigation d'eaux usées prétraitées en sortie d'épuration permet d'apporter des éléments nutritifs et de l'eau. Il faut pour cela disposer de foncier à proximité de la station d'épuration. Ce type d'application a été freiné en France suite à une interdiction d'irriguer les eaux usées d'origine urbaine avec un système d'aspersion (Photo 76 : canon d'aspersion), l'arrêté du 2 août 2010 2010 laissait la possibilité d'irriguer ce type d'effluents via un système de goutte à goutte (Photo 77 : tuyau Bioline). L'arrêté du 25 juin 2014 ouvre de nouveau la possibilité d'irriguer des eaux usées traitées sur des cultures ou espaces verts.



Photo 76: Canon d'aspersion utilisé pour irriguer la fraction liquide du digestat de Géotexia Mené (Source : Aile).



Photo 77 : Tuyau Bioline irrigant en gouttes à gouttes les eaux prétraitées en provenance de la station d'épuration (Source Aile).

Les systèmes agroforestiers

L'agroforesterie est un mode d'exploitation des terres agricoles associant des plantations d'arbres cultivés autour et/ou au milieu de cultures, des vergers, des vignes, des pâturages et autres aires utilisées pour le parcours des animaux élevés dans des bâtiments hors-sol. Les arbres plantés peuvent avoir plusieurs intérêts : biodiversité, production de fruits, de fleurs, de feuilles, de bois d'œuvre, de bois énergie, etc...

Des opportunités pour les systèmes agroforestiers avec le TCR existent en particulier sur les terrains présentant un risque élevé d'érosion des sols. Des études ont montré que la plantation des TCR a un impact positif sur le microclimat. Même l'ombre accrue en été a un impact positif sur les rendements des productions de blé et de colza à côté du champ TCR.

Il existe des exemples où l'agroforesterie combine une exploitation de TCR et l'élevage d'animaux, comme les poulets. Il a été démontré, surtout dans les régions tropicales, que l'agroforesterie améliorerait la qualité et la vie du sol et favorisait ainsi la présence de lombrics notamment et pouvait contribuer à réduire les quantités d'aliments donnés aux animaux (Kaufmann et al. N.d.).



Photo 78: Système agroforestier sur un terrain de 40 ha à Dornburg, Allemagne: Les bandes TCR de peuplier agissent comme brise-vent et ont une influence positive sur ce grand champ. Autrefois, les 40 ha étaient en monoculture de cultures annuelles. (Source: Rutz D.)

10 Rentabilité des cultures de TCR

Les calculs concernant la rentabilité des TCR varient considérablement et il y a eu de nombreux cas où les TCR pouvaient générer des recettes directes satisfaisantes, mais également d'autres où les recettes n'étaient pas au rendez-vous. La variabilité des facteurs de réussite sont propres au site et à sa préparation pour une bonne reprise. L'implantation, l'entretien, et surtout la récolte représentent les principaux éléments de coûts. Un autre aspect est le prix d'achat du combustible qui peut varier d'une région à l'autre, et bien sûr d'un pays à l'autre. Ce dernier dépend aussi du prix des énergies fossiles. Aussi il a été jugé préférable par les auteurs de ce manuel Dominik Rutz (WIP) et Jannis Dimitriou (SLU) de ne pas généraliser les chiffres de rentabilité des TCR.

Aussi, les auteurs ont préféré pointer du doigt des détails économiques au travers d'exemple précis.

Exemple 1: TCR de saule à Grästorp, Suède

Cet exemple présente la culture du TtCR de saule implanté sur les terres agricoles. Les plaquettes de bois de saule, mais aussi d'autres sources de bois, sont utilisées pour la production de bioénergie dans une chaufferie bois communale. A la ferme Puckgården (50 ha), 21 ha sont cultivés avec des TCR de saule pour la production de bois énergie. Le reste est cultivé en avoine, blé, pois et colza. Puckgården est une association de 12 agriculteurs ayant planté 100 ha de saules. Ils coopèrent dans tous les aspects de la gestion : l'association engage des entrepreneurs pour la récolte (qui sont payés séparément par chaque membre en fonction des coûts de revient), pour le transport et la vente des plaquettes. A Puckgården les agriculteurs produisent des plaquettes provenant d'autres origines de bois pour fournir la chaufferie qui rémunère les agriculteurs en €/m³ de plaquettes de bois ce qui est avantageux pour les agriculteurs, car les aspects qualitatifs ne sont pas pris en considération, l'humidité notamment.

Les différents champs de saules à Puckgården ont été établis en 1991, 1992 et 1993, lorsque la subvention était de 10.000 SEK (environ. 1.110 Euros, 1 € = 9 SEK) et couvraient ainsi tous les coûts de plantation à cette époque. L'agriculteur a épandu environ 100 kg d'azote par hectare après chaque récolte. La plantation reçoit également des eaux usées provenant des fermes locales, mais les quantités d'éléments nutritifs par hectare sont faibles et elles sont davantage utilisées en compensation hydrique pendant l'été.

Les saules sont récoltés tous les 4 ans au début du printemps (mars) lorsque le sol est encore gelé. La récolte est effectuée avec une ensileuse Claas Jaguar par un entrepreneur local. La production de biomasse a varié entre 8 et 10,7 t MS / ha par an. Les plaquettes de saule sont stockées dans des tas pendant environ 1 mois sur les bords de champs, avant d'être transportées et vendues à la chaufferie de Grästorps. La chaufferie communale a une capacité de 3,5 MW et est détenue à 40% par la municipalité et 60% par Lantmännen (Syndicat agricole majoritaire des agriculteurs actifs en Suède). Celle-ci chauffe des bâtiments municipaux de Grästorps (population : 5 641 habitants) et des habitations privées. Pendant une période de 6 mois, la chaudière est alimentée uniquement par des plaquettes de saule (le reste de l'année avec des plaquettes forestières).

Ci-dessous sont présentés les calculs sur les coûts de production et le revenu en € / ha / an pour les niveaux de prix de 2011. Les DPU ne sont pas inclus. La subvention et les dépenses liées à la plantation (matériel de plantation, les boutures et les coûts de main-d'œuvre) étaient environ. 1.110 € / ha sont inclus dans le Tableau 15.

Tableau 16: Coûts de production, et bénéfice en €/ha/an pour le champ de saule à Puckgården.

Coûts (€/ha/an)	
Fertilisation	38
Surveillance/Entretien	22
Récolte	139
Transport	105
Dépenses générales	55
Taux d'intérêt	11
Total	370
Revenus (€/ha/an)	
Plaquettes	864
Total	864
Bénéfice (€/ha/an)	494

* Calculs faits avec un taux de change 1 € = 9 SEK et pour un champ de 4 ans de cycle de coupe de saule cultivé dans le 5^{ème} cycle de coupe ** Tous les frais, à l'exception des coûts de propriété foncière sont inclus

*** Coûts administratifs, téléphone et conduite sont inclus dans "Dépenses générales"

Le Tableau ci-dessous intègre toutes les coupes y compris la première rotation.

Tableau 17: Calculs du bénéfice généré par la plantation de saule à Puckgården au cours du 5^{ème} cycle et une fréquence de coupe de 4 ans, mais aussi en prenant en compte tous les cycles de coupes (y compris le premier cycle de coupe moins productif).

	Production de biomasse (t/ha/an)	Prix des plaquettes (€/t MS)	Coûts de production (€/t MS)	Subvention de plantation (€/ha/an)	Bénéfice (€/ha/an)
5^{ème} cycle de coupes	9.5	91	38.5		494
Toutes les coupes	8.8	91	52	50.5	392

* Les calculs sont fait avec un taux de change de 1 € = 9 SEK et pour un 5^{ème} cycle et une fréquence de coupe de 4ans, coûts de propriété foncière sont inclus

Exemple 2 : TCR peuplier à Göttingen, Allemagne

Le fabricant allemand de chaudières Viessmann a lancé il y a quelques années un programme "Efficiency plus ". Dans ce programme, l'objectif principal est de fournir de la chaleur produite avec de la biomasse ligneuse et essentiellement avec du TCR de peuplier pour leurs bâtiments industriels. La chaudière biomasse est alimentée par des plaquettes de TCR, qui poussent sur 180 ha de terres agricoles.

Afin d'alimenter cette chaudière à plaquettes de bois, Viessmann a créé une société d'expérimentation pour mettre en place les essais. Leur propre site de plantation d'origine a été récolté en 2007 et mai 2008, la récolte a été utilisée pour planter les 130 premiers hectares de TCR de peupliers. D'autres espèces de TCR comme Paulownia, Igniscum, Saule et autres, ont été plantées.

Les plantations de TCR ont été récoltées en 2009/10 pour la première fois et les plaquettes produites ont été utilisées pour le chauffage de l'usine Viessmann. Cette plantation est l'un des meilleurs exemples de bonnes pratiques en Allemagne, pour les raisons suivantes :

- Dès les premières étapes du projet, tous les partenaires suivants ont été impliqués : l'autorité de la protection de la nature, le gestionnaire de la ressource en eau, les autorités locales et les municipalités, les chambres d'agricultures, l'Union locale des agriculteurs et la Coopérative de chasse locale.
- Autour de cette plantation et sur le site d'Allendorf, plusieurs projets de recherche ont été menés, certains sont encore en cours d'exécution, comme "ELKE", "ProLoc II" et "Naturschutzfachliche requirements un KUP". Ces projets offrent de bonnes références et contribuent à la durabilité des TCR en Allemagne.
- Le projet s'est vu attribuer plusieurs prix, comme le prix allemand de développement durable (2009, 2011), le prix de l'efficacité énergétique 2010 et le World Award Energy Globe 2012.

Les premiers essais ont été plantés en 2008, mais il n'y a pas de données disponibles en termes de densité (par exemple plants par ha) et la quantité de plants. Cela est dû au fait que chaque plantation a mis au point son propre plan de gestion.

La plantation TCR s'intègre parfaitement dans la chaîne d'approvisionnement en bois énergie d'Allendorf. Elle réduit la pression de prélever la biomasse ligneuse disponible en forêt. Cependant, les techniques de récolte doivent être améliorées, et une attention particulière doit être donnée à la qualité des plaquettes.

Un calcul a été effectué sur la base des pratiques de récolte à Allendorf. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 18, conjointement avec certaines hypothèses qui sont également indiquées.

Tableau 18: Vue d'ensemble des charges et recettes (en €) de la plantation TCR à Allendorf (Source: von Harling and Viessmann ; 2009)

Coûts / revenus categories	Charges	Recettes*	Commentaires
Boutures	1,650		11,000 boutures/ha Prix/ boutures 0.08-0.23 €/pièce (0.15 €/pièce)
Boutures (propre production)	0		
Herbicide en automne	20		
Protection chimique	22		
Labour, automne	94		Application de protection chimique: 5 l/ha
Herbicide, printemps (protection chimique)	12		Application de protection chimique: 3 l/ha
Application de protection chimique	22		
Hersage, printemps	47		
Coûts pour la plantation et la mise en place	1,100		
Paillage, début d'été	33		
Coût de récolte	7,500		Broyage 15 €/t Transport logistique 10 €/t
Etats financiers et taxes	2,071		
Charges sociales employés	1,036		
Consultant	31		
Coût de personnel Viessmann	3,000		
Reconversion (1,000 €/ha)	1,000		
Vente des plaquettes à Viessmann		19,500	Prix de vente (plaquettes): 65 €/t absolument sèche
Subventions		571	
Recettes d'occupation (de location de prairies et pâturages)		166	
Bonus (cultures énergétiques)		300	
Recettes de la vente des boutures de la production propre		0	
Balance	-4,000	6,899	2,899

*hypothèse : 30 années d'utilisation (récolté tous les 3 ans)

Exemple 3: TCR des saules en Bretagne, France

100 ha de TCR de saules ont été plantés en Bretagne, de 2004 à 2007, pour la production de chaleur dans le cadre d'un projet Life Environnement, appelé Wilwater=. Le but du projet était de planter des TCR dans la région et de démontrer leur intérêt pour différents types d'application.

- Objectif 1: produire des plaquettes de bois pour la production de chaleur
- Objectif 2: protection des milieux naturels, l'irrigation avec des eaux usées ou la protection des captages d'eau potable
- Objectif 3: l'épandage des boues des stations d'épuration

Le projet Wilwater a été lancé pour trouver une approche multi-critères des TCR, afin de surmonter les problèmes économiques liés à la production de TCR en France. En effet, les plantations TCR pour la production de chaleur étant sur petite échelle dans le pays et le soutien politique pour TCR étant marginal, il était important de trouver de nouvelles façons d'introduire cette culture. Tous les acteurs impliqués dans les projets insistent sur le fait qu'ils n'avaient pas seulement des motivations purement économiques :

- motivations à devenir plus autonomes (produire leur propre énergie, avoir un système durable du traitement des eaux usées, créer des chaînes d'approvisionnement locales)
- motivations pour créer de nouveaux partenariats régionaux et locaux (renforcement des relations entre les parties prenantes)
- motivations en termes d'image (communication sur les activités innovantes)

Des partenariats de coopération ont été lancés entre les municipalités locales, qui gèrent les unités locales de production de chaleur, les usines de traitement des eaux usées municipales locales, les agriculteurs et les entreprises énergétiques locales. Plusieurs sites pilotes ont été mis en place au cours du projet, avec des stratégies commerciales spécifiques pour chacun d'eux. Voici la stratégie de l'un des sites mis en place au cours du projet Wilwater dans le village de Pleyber-Christ :

Situé en Nord-Finistère, Pleyber-Christ est un village de 2.800 habitants qui compte près de 15 ha de TtCR de saules : 10 ha pour l'épandage des boues de la station d'épuration et 5 ha pour la protection du captage d'eau potable.

Trois à quatre hectares sont récoltés chaque année pour permettre une épandage de boues de station d'épuration tous les ans. L'épandage est effectué par la Cuma (Coopérative d'utilisation de matériel agricole) de Pleyber-Christ qui utilise du matériel classique d'épandage. La récolte est réalisée par CBS (Cuma Bretagne Service) équipé de la récolteuse tiges entières Stemster. Une fois laissées en tas quelques temps (1 à 3 mois), les tiges sont déchiquetées et transportées sur la plateforme de la Scic Coat Bro Montroulez (Société Coopérative d'Intérêt Collectif) pour y être séchées.

La Scic valorise le bois issu de TtCR en mélange avec d'autres origines de bois pour approvisionner des chaufferies bois de secteur.

La commune de Pleyber-Christ est équipée de 2 chaufferies bois de 140 et 320 kW, la première alimente un réseau de chaleur (mairie, médiathèque, genarmerie, perception) et la seconde un réseau de chaleur qui dessert principalement des bâtiments médico-sociaux (Ehpad, foyer de vie).

Les deux chaufferies bois communales consomment 350 tonnes de bois par an à 30% d'humidité.

Sur la dernière récolte réalisée en 2015, 130 tonnes de plaquettes ont été récoltées sur une surface de TtCR de 3,5ha. La récolte du tiers des surfaces plantées permet d'alimenter la moitié des besoins des chaufferies bois communales.

Tableau 19: Prix de revient du bois récolté en 2015 sur 3,5ha

Coûts / revenus categories	Coûts €	Commentaires
Coupe des TtCR (3,5ha)	3 500	700€/ha + 100€/heure soit 27€/t
Déchiquetage et transport (5ha)	2 210	Soit 17€/t
Annuités plantation/entretien	2 450	Pour une plantation de 20 as, avec un coût d'implantation de 3000€/ha, entretien 500€/ha/an, remise en culture 1000€/ha
total	8 160	

Les coûts d'acquisition foncière ne sont pas inclus.

Les coûts d'épandage ne sont pas comptés ils sont inclus dans les coûts de traitement.

Le prix de revient du bois produit est de 63 €/tonne livré à la plate-forme. Ces bénéfices économiques n'intègrent pas les avantages suivants :

- Environnemental :
 - o le captage d'eau potable est désormais exploité à nouveau et permet de fournir 90 000m³ d'eau potable
 - o les TtCR permettent de sécuriser le plan d'épandage de boues de la commune
- Social :
 - o les enfants et habitants de la commune ont participé à la plantation du périmètre de captage qui a été l'occasion de les associer au projet
 - o les agriculteurs à travers la Cuma se voient renouer des liens à travers les services rendus par l'épandage des boues de la station d'épuration
 - o la création d'emploi à la Scic Coat Broz Montroulez

Une vidéo à l'initiative de l'agence de l'eau Loire Bretagne est disponible en ligne (<https://www.youtube.com/watch?v=Ogp4Zpmht6A>) met en scène le maire de Pleyber-Christ de l'époque Jean-Claude Kerdilès ainsi que Louis Laurent gérant de la Scic Coat Broz Montroulez, principaux initiateurs du TtCR en Bretagne.

Exemple 4 : TtCR de saules chez deux agriculteurs à Saint-Potan dans les Côtes d'Armor, France

Deux frères éleveurs ont installé une chaudière automatique de 110kW pour chauffer l'eau de buvée des veaux (700/an) en substitution du gaz (16000€/an). Un petit réseau de chaleur raccorde également les deux maisons des associés.

Les éleveurs ont implantés deux parcelles en TtCR en 2009 : l'une de 2ha et l'autre de 3ha. La coupe a été effectuée en Septembre 2013. Au total 1250m³ de plaquettes ont été déchiquetées soit un rendement frais de 250m³/ha (près de 65 m³/ha ou encore 15t MS/ha).

Environ 850m³ ont été stockés par les agriculteurs pour leur autoconsommation. Les 400m³ restant ont été vendu à la Scic (Société Coopérative d'Intérêt Collectif) Enr Pays de Rance.

Tableau 20:: Charges et recettes (en €) de la chaudière et de la plantation de TtCr de saules

	Charges	Recettes	Commentaires
Chaudières élevage de veaux + 2 maisons (110kW)		16 000 4 000	Facture annuelle de gaz pour l'élevage Facture annuelle pour les deux maisons
Coupe des TtCR (5ha)	5 500		700€/ha + 100€/hre
Déchetage et transport	5 500		Soit 17€/t
Vente plaquettes		6 800	400m3 à 17€/m3
Annuités plantation/entretien/remise en culture pour les 5ha	3 500		Pour une plantation de 20ans, avec un coût d'implantation de 3000€/ha, entretien 500€/ha/an, remise en culture 1000€/ha
Balance	14 500	26 800	12 300

Les coûts d'acquisition foncière ne sont pas inclus.

Les coûts d'épandage ne sont pas comptés.

Exemple 5: TtCR de saules à Enköping, Suède

Ce projet présente une plantation de 76 ha de TCR de saule qui est irriguée avec des eaux usées provenant de la station d'épuration municipale. La biomasse est utilisée pour l'énergie dans l'usine de chaleur et d'électricité locale.

Nynäs Gård, nom de la ferme, coopère avec ENA-Energi, qui produit chaleur et d'électricité. La plantation de saule est irriguée avec environ 200.000 m³ de mélange d'eau traitée et d'eaux usées non traitées (20 000 m³ d'eaux usées non traitées riches en éléments nutritifs). Un contrat de 15 ans a été signé entre les agriculteurs et l'usine de traitement des eaux usées. Dans l'accord, il est indiqué que l'ENA-Energi recevra des plaquettes de saule de Nynäs Gård suivant le prix du marché. La récolte a été organisée au début par Ena Energi, mais aujourd'hui l'agriculteur contractualise lui-même avec des entrepreneurs de la région.

La plantation de saules de 76 ha a été plantée en 1998 et 2000. La zone est divisée en différents domaines, le plus gros étant d'environ 30 ha et d'autres parcelles étant comprises entre 6 et 15 ha. La subvention de plantation valable à l'époque s'élevait à 5.000 SEK (environ 550 euros) par hectare et couvrait environ la moitié des frais d'établissement. Les plants sont irrigués avec de l'eau usée pendant la période de végétation pendant environ 100 jours.

La plantation de saule est récoltée tous les trois ans avec une récolteuse spécifique. Les plaquettes n'ont pas besoin d'être séchées et peuvent être transportées directement à l'unité de cogénération qui est situé à environ 2 km de la plantation de saule. La chaudière a une capacité de chauffage de 55 MW et une capacité électrique de 24 MW. Les plaquettes de saules sont utilisées en mélange avec d'autres origines de bois.

Les calculs ci-dessous sont présentés pour les coûts de production et le revenu en € / ha / an pour les niveaux de prix de 2011. Les DPU ne sont pas inclus. Les dépenses liées à la plantation (matériel de plantation, les boutures et les coûts de main-d'œuvre) étaient environ 1.222 € / ha et sont incluses dans le Tableau 22. La subvention de plantation était de 555 € / ha.

Tableau 21: Coûts de production, recettes et bénéfice en € / an / an pour le champ de saule à Nynäs Gård

<i>Coûts (€/ha/an)</i>	
Surveillance/Entretien	22
Récolte	238
Transport	148
Dépenses générales	55
Taux d'intérêt	15
<i>Total</i>	478
<i>Recettes (€/ha/an)</i>	
Vente des plaquettes	896
Indemnisation eaux usées	219
<i>Total</i>	1115
Bénéfice (€/ha/an)	637

* Calculs faits avec un taux de change 1 € = 9 SEK et pour un champ de 4 ans de cycle de coupe de saule cultivé dans le 5^{ème} cycle de coupe ** Tous les frais, à l'exception des coûts de propriété foncière sont inclus

*** Coûts administratifs, téléphone et conduite sont inclus dans "Dépenses générales"

Le Tableau 22 intègre toutes les coupes y compris la première rotation.

Tableau 22: Calculs du bénéfice généré par la plantation de saule à Nynäs Gård au cours du 3^{ème} cycle et une fréquence de coupe de 4 ans, et prenant en compte tous les cycles de coupes (y compris le premier cycle de coupe moins productif).

	Production de biomasse (t/ha/an)	Prix de vente du bois (€/t MS)	Coût de production (€/t MS)	Subvention de plantation (€/ha/an)	Compensation eaux usées	Bénéfice (€/ha/an)
3th cycle de coupe	9	99.5	53		219	637
Tous les cycles	8.3	99.5	65	227	219	529

* Calculs réalisés avec le taux de change 1 € = 9 SEK et pour un champ de saule de avec un cycle de récolte de 4 ans au 3^{ème} cycle de récolte

** Tous les frais à l'exception des coûts de propriété foncière sont inclus

Noms latins et communs des plantes

Remarque: En général, ce sont des espèces qui sont utilisées soit directement pour le TCR soit pour les croisements de clones, ou mentionnés pour convenir aux TCR. Pour certaines espèces, les expériences pour son aptitude à la culture TCR sont limitées. Les noms anglais communs sont largement utilisés, mais parfois pas précis.

<u>Noms botanique</u>	<u>Noms communs en français</u>
<i>Alnus spp.</i>	Aulne
<i>Alnus glutinosa</i>	Aulne glutineux, l'aulne noir, l'aulne poisseux
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc, aulne rugueux, aulne de montagne
<i>Amorpha fruticosa</i>	Amorphe buissonnante
<i>Acacia melanoxylon</i>	Acacia à bois noir,
<i>Acacia saligna</i>	Mimosa eucalyptus.
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Erable sycomore
<i>Betula spp.</i>	Bouleau
<i>Broussonetia papyrifera</i>	Mûrier d'Espagne, mûrier de Chine ou mûrier à papier
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier ou Coudrier
<i>Eucalyptus spp.</i>	Eucalyptus
<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalyptus commun ou Gommier bleu
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Gommier de Camaldoli ou Gommier des rivières
<i>Eucalyptus gunnii</i>	Eucalyptus à feuilles rondes
<i>Eucalyptus nitens</i>	Eucalyptus nitens
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun ou Frêne élevé
<i>Morus papyrifera</i>	Mûrier à papier
<i>Nothofagus</i>	Hêtre du sud
<i>Paulownia</i>	Paulownia
<i>Platanus occidentalis</i>	Platane d'Amérique, Platane occidental ou Sycamore
<i>Populus spp.</i>	Peuplier
<i>Populus deltoides</i>	Peuplier deltoïde
<i>Populus koreana</i>	Peuplier Korean
<i>Populus maximowiczii</i>	Peuplier Maximowicz'
<i>Populus nigra</i>	Peuplier noir
<i>Populus tremula</i>	Peuplier tremble, Tremble ou Tremble d'Union Européenne
<i>Populus tremuloides</i>	Peuplier faux-tremble
<i>Populus trichocarpa</i>	Peuplier de l'Ouest
<i>Robinia pseudoaccacia</i>	Robinier faux-acacia ou Acacia
<i>Salix spp.</i>	Saule
<i>Salix aegyptiaca</i>	Saule d'Egypte

<i>Salix caprea</i>	Saule marsault ou Saule des chèvres
<i>Salix dasyclados</i>	n.a.
<i>Salix discolor</i>	Saule discolore
<i>Salix rehderiana</i>	n.a.
<i>Salix schwerinii</i>	n.a.
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines
<i>Salix udensis</i>	n.a.
<i>Salix viminalis</i>	Saule des vanniers Osier
<i>Ulmus spp.</i>	Orme champêtre

Unités de conversion

Tableau 23: Préfixe des unités d'énergie

Prefixe	Abbréviation	Facteur	Quantité
Deca	Da	10	Dix
Hecto	H	10 ²	Cent
Kilo	K	10 ³	Mille
Mega	M	10 ⁶	Million
Giga	G	10 ⁹	Milliard
Tera	T	10 ¹²	Billon
Peta	P	10 ¹⁵	Billiard
Exa	E	10 ¹⁸	Trillion

Tableau 24: Terminologie de volume des différents types de biomasse ligneuse dans différentes langues

Language	Terminology		
English	Solid cubic meter Solid m³	Bulk cubic meter Bulk m³	Stacked cubic meter Stacked m³
Croatian	Puni kubni metar m³	Nasipni metar Nasipni m³	Prostorni metar Prostorni m³
Czech	Plnometr-pevný metr (plm) [m3]	Sypný metr (prms) [m3]	Prostorový metr-rovnaný (prm) [m3]
French	Mètre cube de bois plein m³	Mètre cube apparent plaquette MAP	Stère Stère
German	Festmeter Fm	Schüttraummeter Srm	Schichtraum. (ster) rm
Greek	Συμπαγές κυβικό μέτρο κ.μ. ή m³	Χωρικό κυβικό μέτρο χύδην χ.κ.μ. χύδην	Χωρικό κυβικό μέτρο στοιβαχτού χ.κ.μ. στοιβαχτού
Italian	Metro cubo m³	Metro stero riversato msr	Metro stero accastato msa
Latvian	Kubikmetrs (ciešskubikmetrs) m³	Berkubikmetrs m³_{ber}	Kraujmetrs vai sters m³_{kr}
Macedonian	poln kuben metar	nasipen kuben metar	prostoren kuben meatr
Polish	metr sześcienny m³	metr nasypowy mn	metr przestrzenny mp
Slovenian	Kubični meter m³	Prostrni meter prm	Nasut kubični meter Nm³

Tableau 25: Conversion des unités énergétiques

	kJ	kcal	kWh	Tec	m³ CH₄	Tep	Baril
1 kJ	1	0.2388	0.000278	$3.4 \cdot 10^{-8}$	0.000032	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$1.76 \cdot 10^{-7}$
1 kcal	4.1868	1	0.001163	$14.3 \cdot 10^{-8}$	0.00013	$1 \cdot 10^{-7}$	$7.35 \cdot 10^{-7}$
1 kWh	3.600	860	1	0.000123	0.113	0.000086	0.000063
1 Tec	29,308,000	7,000,000	8,140	1	924	0.70	52
1 m³ CH₄	31,736	7,580	8.816	0.001082	1	0.000758	0.0056
1 Tep	41,868,000	10,000,000	11,630	1.428	1,319	1	7.4
1 Baril	5,694.048	1,360.000	1,582	0.19421	179.42	0.136	1
1 BTU	1.055						

Tableau 26: Conversion des unités de puissance (kilocalories par seconde, kilowatt, cheval-vapeur)

	kcal/s	kW	hp (cheval-vapeur anglais)	PS (cheval- vapeur allemand)
1 kcal/s	1	4,1868	5,614	5,692
1 kW	0,238846	1	1,34102	1,35962
1 hp	0,17811	0,745700	1	1,01387
1 PS	0,1757	0,735499	0,98632	1

Tableau 27: Conversion des unités de température

	Unité	Celsius	Kelvin	Fahrenheit
Celsius	°C	-	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$	$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times 1.8$
Kelvin	K	$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$	-	$\text{K} = (^{\circ}\text{F} + 459.67) \times 1.8$
Fahrenheit	°F	$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1.8 + 32$	$^{\circ}\text{F} = \text{K} \times 1.8 - 459.67$	-

Bibliographie

- AILE (2007). Projet Life Environnement Wilwater. Guide technique : De la production d'énergie renouvelable à la valorisation d'effluents pré-traités : 100 hectares de Taillis à Très Courte Rotation de Saule dans le Grand Ouest. Guide technique des bonnes pratiques agricoles.
- Alakangas (2009) Fuel specification and classes, multipart standard. - http://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/05_Workshops_Training_Event_s/Taining_materials/english/D19_2_EN_Fuel_specification.pdf [accessed: 29.08.2014]
- Anderson Group (www.grpanderson.com/de/resources/photos) [accessed: 09.09.2014]
- Aronsson, P., Rosenqvist, H., Dimitriou, I., 2014. Impact of nitrogen fertilization to short-rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy. *Bioenergy Research*, 7: 993-1001.
- Bärwolff M., Hansen H., Hofmann M., Setzer F. (2012) *Energieholz aus der landwirtschaft.* – FNR, Gülzow-Prüzen, Germany
- Burger F. (2011) Energiebilanz klar positive: Kurzumtriebsplantagen. - 13/2011 AFZ-DerWald; http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/afz_der_wald_nr_13.pdf [accessed: 18.05.2015]
- Biomasseverband OÖ (no date) >Masse und Energiegehalt von Hackgut in Abhängigkeit vom Wassergehalt. - Biomasseverband OÖ, Austria, http://www.biomasseverband-ooe.at/uploads/media/Downloads/Publikationen/Umrechnungstabellen_Brennstoff_Holz-BMV-OOe.pdf [accessed: 09.09.2014]
- CARMEN (2014) Heizwert , Wassergehalt und Gewicht. <http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/brennstoffe/hackschnitzel/579-heizwert-wassergehalt-und-gewicht> [accessed: 09.09.2014]
- Caslin B, Finnan J, Mc Cracken A (eds) (2012) *Willow Varietal Identification Guide.* ISBN: 10 1-84170-590-X.
- Caslin B., J. Finnan, Mc Cracken A. (eds.) (2010) *Short Rotation Coppice; Willow Best Practice Guidelines.* - http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Willow_Best_Practice_Guide_2010.pdf [accessed: 21.07.2014]
- Dallemand J. F., Petersen J.E., Karp A. (eds.) (2007) *Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and perennial grasses in the Union Européennean Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives.* - JRC; Proceedings of the Expert Consultation; 17 and 18 October 2007, Harpenden, United Kingdom
- DEFRA (2004) *Growing Short Rotation Coppice; Best Practice Guidelines For Applicants to Defra's Energy Crops Scheme.* - http://www.naturalengland.org.uk/Images/short-rotation-coppice_tcm6-4262.pdf [accessed: 21.07.2014]
- Dimitriou I., Rutz D. (2014) *Sustainability criteria and recommendations for short rotation woody crops.* – WIP Renewable Energies, Munich, Germany; Report elaborated in the framework of the IEE project SRCplus (Contract No. IEE/13/574)
- Dimitriou I., Fištrek Z., Mergner R., Rutz D., Scrimgeour L., Eleftheriadis I., Dzebne I., Perutka T., Lazdina D., Toskovska G., Hinterreiter S. (2014a) *Optimising the Environmental Sustainability of Short Rotation Coppice Biomass Production for Energy.* – Proceedings Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development; 26-28 November 2014, Zagreb, Croatia; Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Croatia; ISBN 978 953 6893 04 1; pp. 117-123

- Dimitriou I., Fištrek Z. (2014) Optimising the Environmental Sustainability of Short Rotation Coppice Biomass Production for Energy. *South-east Eur for* 5 (2): 81-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.15177/seefor.14-15>
- Dimitriou I., Mergner R., Rutz D. (2014b). Best practice examples on sustainable local supply chains of SRC. WIP Renewable Energies, Munich, Germany; Report elaborated in the framework of the IEE project SRCplus (Contract No. IEE/13/574)
- Dimitriou, I., Baum, C., Baum, S., Busch, G., Schulz, U., Köhn, J., Lamersdorf, N., Walter-Schmidt, P., Leinweber, P., Aronsson, P., Weih, M., Berndes, G., Englund, O., Bolte, A. 2012a. RATING-SRC Final Report. ERA-NET Bioenergy Internal Report.
- Dimitriou, I., Mola-Yudego, B., Aronsson, P., Eriksson, J., 2012b. Changes in organic carbon and trace elements in the soil of willow short-rotation coppice plantations. *Bioenergy Research* 5(3) 563-572.
- Dimitriou, I., Mola-Yudego, B., Aronsson, P., 2012c. Impact of willow Short Rotation Coppice on water quality. *Bioenergy Research* 5(3) 537-545.
- Dimitriou, I., Eriksson, J., Adler, A., Aronsson, P., Verwijst, T., 2006. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice. *Environmental Pollution* 142 (1), 160-169.
- Dimitriou, I., Aronsson, P., 2005. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 221 (56); 46-50.
- Ehlert, D.; Pecenka, R.; Wiehe, J.(2012): Harvesters for Short Rotation Coppices: Current Status and New Solutions. In: Proceedings. International Conference of Agricultural Engineering CIGR-Ageng 2012. Valencia, p. 1-6. Online: http://cigr.ageng2012.org/images/fotosg/tabla_137_C0365.pdf
- ETA Heiztechnik GmbH n.d.Brennstoffdaten – Scheitholz, Hackgut, Pellets. - http://www.bad-klein.de/pdf/Broschuere_Brennstoffdaten_dt_01.pdf [accessed: 09.09.2014]
- FNR (2012) Bioenergy in Germany: Facts and Photos. – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR); Gülzow, Germany; http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_484-basisdaten_engl_web_neu.pdf [10.07.2012]
- Grosse W., Landgraf D., Scholz V., Brummack J. (2008) Ernte und Aufbereitung von Plantagenholz. - *Schweiz Z Forstwes* 159 (2008) 6: 114–119
- Gustafsson, J., Larsson, S. & Nordh, N. (2007). Manual för salixodlare. Available from: <http://www.bioenergiportalen.se/attachments/42/406.pdf>
- von Harling H.M., Viessmann F. (2009) Die Holzfelder der Fa. Viessmann – 3 Jahre KUP-Praxis. Proceeding of „The Institute for Applied Material Flow Management (IfaS)“, http://www.stoffstrom.org/fileadmin/userdaten/bilder/Veranstaltungen/Biomasse/Harling_KUP_Praxis_Biom-Tag_Birkenfeld_5-11-09-1.pdf.
- Hiegl W., Rutz D., Janssen R. (2011) Information Material Module Biomass. - Training material of the Install+RES Project, Updated Version 2011; WIP Renewable Energies; <http://www.resinstaller.eu/en/training-material>
- ISO (2014): ISO 17225-4:2014(en) Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 4: Graded woodchips <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17225:-4:ed-1:v1:en> [accessed: 29.08.2014]
- JTI (2014) Inför plantering av energiskog Lokalisering, samråd och investeringsstöd JTI:s skriftserie 2014:1 (in Swedish).
- Kofman P.D. (2012) Harvesting short rotation coppice willow. – CONFORD; Harvesting / Transport No. 2; Dublin, Ireland; http://www.woodenergy.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/HAR29_LR.PDF [accessed: 21.07.2014]

- Kaufmann F., Lamond G., Lange M., Schaub J., Siebert C., Sprenger T. (no date) Benwood – Short Rotation Forestry in CDM Countries and Union Européenne. -
- Landgraf D., Setzer F. (2012) Kurzumtriebsplantagen: Holz vom Acker - So geht's. – DLG Verlag, Frankfurt am Main, Germany
- Liebhard P. (2007) Energieholz im Kurzumtrieb: Rohstoff der Zukunft. - Leopold Stocker Verlag, Graz, Austria
- Lindegaard K. (2013) 10 ways to maximise yield from your short rotation coppice (SRC) crop
- LWF (2012) Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. – Merkblatt 10 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; Freising, Germany
- LWF (2011a) Anbau von Energiewäldern. – Merkblatt 19 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; Freising, Germany
- LWF (2011b) Der Energieinhalt von Holz. – Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; Freising, Germany
- Rutz D., Janssen R., Letsch H. (2006) Installateurs-Handbuch Biomasseheizanlagen. - EU-IEE EARTH Project; 241p; WIP Renewable Energies, Munich, Germany; http://www.wip-munich.de/images/stories/6_publications/books/installateurs_handbuch.pdf
- Rutz D., Mergner R., Janssen R. (2012) Sustainable Heat Use of Biogas Plants – A Handbook. WIP Renewable Energies, Munich, Germany; Handbook elaborated in the framework of the BiogasHeat Project; ISBN 978-3-936338-29-4; translated in 9 languages; www.biogasheat.org
- Rutz D., Janssen R., Hofer A., Helm P., Rogat J., Hodes G., Borch K., Mittelbach M., Schober S., Vos J., Frederiks B., Ballesteros M., Manzanares P., St James C., Coelho S.T., Guardabassi P., Aroca G., Riegelhaupt E., Maser O., Junquera M., Nadal G., Bouille D. (2008) Biofuels Assessment on Technical Opportunities and Research Needs for Latin America. - Proceedings of the 16th Union Européenne Biomass Conference and Exhibition; pp. 2661-2669; ISBN 978-88-89407-58-1
- Sailer Baumschulen GmbH (no date) Ratgeber Energiewald. - <http://www.sailer-baumschulen.de/RatgeberEnergiewald.pdf> [accessed: 13.05.2015]
- SLL (no date) Anbauempfehlungen für schnellwachsende Baumarten. – Fachmaterial Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft; http://www.schnepf-pro-lignum.de/uploads/pdf/Anbauempfehlungen_f%C3%BCr_schnellwachsende_Baumarten.pdf [accessed: 09.09.2014]
- Wald21 (2015) <http://www.wald21.com/energiewald/anbaupraxis.html> [accessed: 30.03.2015]
- Wickham J., Rice B., Finnan J., McConnon R. (2010) A review of past and current research on short rotation coppice in Ireland and abroad. - COFORD, National Council for Forest Research and Development; <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/SRC.pdf> [accessed: 21.07.2014]
- Verscheure (1998) Energiegehalt von Hackschnitzeln – Überblick und Anleitung zur Bestimmung. - FVA, <http://192.168.0.121:9091/servlet/com.trend.iwss.user.servlet.sendFile?downloadfile=IRES-648385774-E63F29C8-4677-4647-7> [accessed: 09.09.2014]

