



Analyse de systèmes de transformation du bois énergie

Rapport de synthèse

Préparé pour *la Direction générale de l'environnement (DGE),
Direction de l'énergie (DIREN)*

Par: Quantis

Yves Loerincik, Chef de projet

Guillaume Schneider, Analyste

Denis Bochatay, pour le rapport final

11 décembre 2017

Mandataires de l'étude

Quantis : gestion de projet, analyse environnementale, organisation des ateliers

Quantis est un cabinet de conseil leader en analyse du cycle de vie (ACV) spécialisé dans l'accompagnement d'organisations afin de mesurer, comprendre et gérer les impacts environnementaux de leurs produits, services et activités. Quantis est une entreprise internationale qui compte des bureaux aux États-Unis, au Canada, en Suisse et en France et qui emploie près de 60 personnes, parmi lesquelles on retrouve des experts mondialement reconnus en analyse du cycle de vie. Forte de ses relations étroites avec la communauté scientifique et ses collaborations stratégiques de recherche, Quantis a fait ses preuves quant à l'application de ses connaissances et son expertise pour accompagner ses clients à traduire des résultats issus de l'ACV en décisions et plans d'action. Pour plus de renseignements, visitez www.quantis-intl.com.

The Industrial Process and Energy Systems Engineering (IPESE): analyse énergétique, participation aux ateliers

L'IPESE développe des méthodologies génériques pour l'intégration et l'optimisation des systèmes énergétiques complexes et des réseaux de chaleurs, en tenant notamment compte des aspects d'analyse du cycle de vie. L'IPESE mène des études théoriques et expérimentales de systèmes de conversion d'énergie avec un accent sur la cogénération décentralisée (y compris piles à combustible), les pompes à chaleur et les énergies renouvelables (solaire, biomasse).

L'IPESE est actif dans la recherche et l'enseignement de trois secteurs principaux :

L'intégration énergétique et l'analyse des systèmes énergétiques durables

Les pompes à chaleur et les cycles de Rankine

Les moteurs, les piles à combustibles et autres systèmes réactifs

Bureau BVResources : analyse des ressources disponibles, participation aux ateliers

Le bureau BVResources Philippe Raetz est dédié aux solutions et opportunités qui s'offrent aux propriétaires de forêts dans la gestion de leur bien. Spécialisé en gestion patrimoniale et familial des interfaces entre divers aspects tels que la biodiversité, la protection de la nature, la protection contre les dangers naturels, le climat, l'énergie renouvelable ainsi que les impératifs économiques et financiers des entrepreneurs, BVResources offre des conseils indépendants et des services de soutien pour les collectivités et propriétaires forestiers qui souhaitent développer des projets dont la ressource « forêt » constitue un maillon important. Au travers de ses activités de recherche et de formation permanente, BVResources entretient des contacts réguliers avec un réseau d'experts confirmés et de praticiens expérimentés, tous spécialisés dans la gestion des ressources autochtones.

Ce rapport a été préparé par le bureau suisse de Quantis. Toute question relative à ce rapport doit être adressée à Quantis Suisse.

Quantis Suisse

EPFL Innovation Park, Bâtiment D

1015 Lausanne

Suisse

Tel: +41 21 693 91 92

info@quantis-intl.com

www.quantis-intl.com

INFORMATIONS DU PROJET	
Titre du projet	Analyse de systèmes de transformation du bois énergie
Mandant	<i>Direction générale de l'environnement (DGE), Direction de l'énergie (DIREN)</i>
Responsabilité	Les informations et les résultats figurant dans ce rapport ont été calculés sur la base de sources considérées fiables. La mise en œuvre de ces résultats est à l'entière discrétion et de la seule responsabilité du lecteur. Quantis ne peut être tenu responsable de toute perte ou dommage découlant de l'utilisation des informations contenues dans ce document.
Version	Rapport final
Équipe de projet	Yves Loerincik, Chef de projet (yves.loerincik@quantis-intl.com) Guillaume Schneider, Analyste (guillaume.schneider@quantis-intl.com) Vincent Rossi, Contrôle qualité (vincent.rossi@quantis-intl.com) Víctor Codina Gironès, Analyste (victor.codinagirones@epfl.ch) François Maréchal, Expert (francois.marechal@epfl.ch) Philippe Raetz, Analyste et expert (phraetz@bluewin.ch)
Contacts client	François Schaller, Responsable ressources énergétiques, (francois.schaller@vd.ch)
Fichiers associés	Ce rapport est associé aux fichiers électroniques suivants : Fiche_Synthetique_technologie.xls DGE_Systemes_transformation_bois_Presentation_Finale_COMEN .ppt

Liste des abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie
ISO	International organization for standardization
UF	Unité fonctionnelle
DALY	Nombre d'années de vie potentielle perdues (Disablility-ajusted life years)
CCF	Couplage chaleur force
CCGT	Centrale à gaz à cycle combiné (Closed-Cycle Gas Turbine)
SNG	Gaz naturel de synthèse
SG	Gaz de synthèse
ORC	Cycle de rankine organique (Organic rankine cycle)
MJ	Mégajoule
kWh	Kilowatt-heure
GWh	Gigawatt-heure
km	Kilomètre
ha	Hectare
t	Tonne
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
COP	Coefficient de performance
UCTE	Union pour la coordination de la transmission de l'électricité
OFEV	Office fédérale de l'environnement

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	7
1.1	Contexte et objectifs de l'étude.....	7
2	Analyse des technologies.....	9
2.1	Résumé de l'analyse des technologies	9
2.2	Approche méthodologique	11
2.3	Analyse énergétique	12
2.4	Niveau de maturité des différentes technologies	15
2.5	Analyse environnementale	16
2.6	Analyse des coûts.....	19
3	Variantes d'implémentation	22
3.1	Variantes d'implémentation	22
3.2	Atelier et descriptif des scénarios.....	22
4	Conclusions et recommandations	25
4.1	Conclusions sur les technologies étudiées.....	25
4.2	Recommandations pour l'Etat de Vaud	25
	Annexe 1 : Fiches descriptives synthétiques des technologies étudiées	27
	Annexe 2 Analyse énergétique détaillée des technologies.....	28
	Annexe 3 Définition des niveaux TRL	32
	Annexe 4 Méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV).....	35
	Annexe 5 Résultats indicateur Ressource	40
	Annexe 6 Détails résultats indicateur santé humaine	41
	Annexe 7 Tableaux et hypothèses pour l'analyse des coûts	42
	Annexe 8 Mix électrique et mix thermique	48
	Annexe 9 SWOT de l'atelier d'experts	50
	Annexe 10 Stratégie énergétique 2050	52
	Annexe 11 Liste des références.....	53

1 Introduction

Le présent rapport présente une synthèse de l'étude effectuée par le cabinet de conseil Quantis intitulée « Analyse de systèmes de transformation du bois énergie » commanditée par la Direction générale de l'environnement (DGE), Direction de l'énergie (DIREN) du Canton de Vaud.

Le rapport est présenté de manière synthétique et structuré en deux parties : Analyse des technologies et analyse des variantes d'implantation. Un résumé informe le lecteur des principaux enseignements au début de chaque partie. Une liste de recommandations conclut le rapport.

1. Analyse des technologies

Les performances énergétiques et environnementales de quatre technologies ont été évaluées : unité de pelletisation mobile, torréfaction, gazéification/méthanation, gazéification et pyrolyse. Ces technologies font l'objet de projets en cours de développement et sont à des stades de maturité différents. Les informations mises à disposition par les porteurs de projets ont été utilisées dans le cadre de cette étude, complétées lorsque cela s'est avéré nécessaire par des avis d'experts et la littérature à disposition.

2. Analyse des variantes d'implémentation

Quatre scénarios ont été analysés en prenant en compte les paramètres suivants :

- l'optimisation de l'utilisation des ressources à disposition ;
- l'optimisation du bilan énergétique et environnemental global ;
- l'acceptation par la population ;
- la viabilité économique ;

3. Conclusions et recommandations

Les informations générées permettent de proposer des recommandations sur la stratégie à adopter pour le canton de Vaud.

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Avec les défis en matière de politique énergétique cantonale et fédérale, la valorisation de la ressource bois revêt un intérêt stratégique. La gestion durable forestière suisse considère les fonctions sociétales et environnementales de la forêt et du paysage (gisement primaire) sur un même pied d'égalité. Cette exigence justifie un modèle d'analyse qui prenne en compte un périmètre étendu, à savoir les aspects économiques et techniques, environnementaux et sociétaux, et qui les intègre dans un modèle permettant d'analyser les filières dans leur ensemble (des gisements de bois à l'utilisation finale).

L'Etat de Vaud a été sollicité par divers acteurs du marché de l'énergie pour soutenir différents projets de systèmes de transformation du bois. Actuellement, la politique énergétique cantonale soutient le développement des filières d'utilisation de ressources locales en installant des systèmes de chauffages à distance à combustion directe aux endroits les plus adaptés. Les nouveaux projets susmentionnés posent de nouvelles questions et pourraient influencer la stratégie cantonale actuelle.

L'Etat de Vaud a souhaité mener une étude afin d'analyser la viabilité technique et économique et le bilan énergétique et environnemental de nouveaux projets de valorisation de la ressource bois. Il souhaite également assurer la cohérence de la politique cantonale en matière de valorisation du bois.

2 Analyse des technologies

Résumé de l'analyse des technologies

L'analyse a été réalisée sur quatre technologies. Une brève description de celles-ci est présentée ci-dessous :

1) Unité de pelletisation mobile

Cette technologie consiste à installer une chaîne complète de production de pellets sur un train remorque. Cette unité peut ainsi se déplacer avec l'aide d'un camion tracteur afin de granuler in situ la biomasse.

2) Torréfaction

La torréfaction de la ressource bois est un traitement thermo-chimique compris entre 200 et 300°C visant à éliminer l'eau et à modifier une partie de la matière organique de la biomasse pour casser les fibres. Elle permet de densifier le contenu énergétique du bois et de le rendre hydrophobe. Il est prévu d'utiliser le résultat de cette technologie (pellets ou plaquettes torréfiées) pour alimenter les réseaux de chauffage à distance.

3) Pyrolyse

Le procédé de pyrolyse consiste à chauffer des copeaux de bois dans un réacteur sans oxygène entre 400 et 600 degrés. Les matières se séparent alors en trois parts: solide, gazeuse et liquide. Il est prévu dans un premier temps de valoriser le produit finit, la bio-oil, dans des chaudières existantes (valorisation 100% chaleur) et dans un deuxième temps, dans un moteur cogénération permettant de produire de l'électricité et de la chaleur.

4) Gazéification/méthanation

La gazéification du bois est un processus à la frontière entre la pyrolyse et la combustion. Elle permet de convertir des matières carbonées ou organiques en un gaz de synthèse (réaction entre le carbone issu de la biomasse avec le dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau ambiant) souvent appelé «syngas». Ce gaz, après purification, peut-être directement injecté dans le réseau de gaz naturel.

5) Gazéification

La gazéification du bois consiste à transformer la biomasse en gaz de synthèse (SG). Les étapes du processus de gazéification sont les suivantes :

- Séchage du bois
- Décomposition du bois par la chaleur (pyrolyse)
- Transformation du CO₂ et H₂O par réaction chimique pour obtenir du gaz de synthèse

Il sort du réacteur un gaz de synthèse pauvre (PCI d'environ 5 MJ/m³, 6% mol. CH₄) composé d'un mélange de CO, CO₂, H₂, H₂O et CH₄.

Le gaz de synthèse peut être ensuite soit converti en chaleur et en électricité via un moteur à combustion soit brûlé dans une chaudière à gaz pour produire de la chaleur.

Les performances environnementales/énergétiques et économiques¹ ont été évaluées sur toute la chaîne de valeur ; c'est-à-dire depuis l'exploitation de la ressource bois, y compris sa gestion, jusqu'à son utilisation et l'usage qu'elle permet de remplacer en considérant les étapes intermédiaires : les transports, le conditionnement et la transformation de la ressource bois.

Les éléments clés qui ressortent de l'analyse des performances énergétiques et environnementales des technologies sont les suivantes :

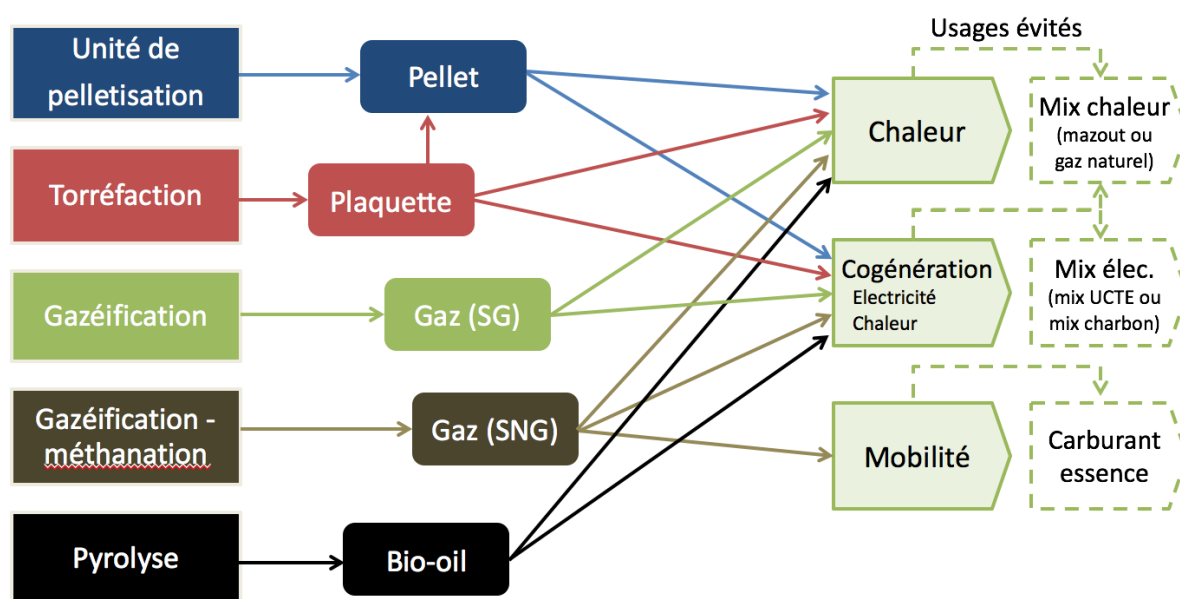
- Il est important de considérer la chaîne complète de conversion jusqu'au service énergétique (usage qu'il est fait de la conversion énergétique). Si la ressource bois est valorisée pour être convertie uniquement en chaleur, les performances des technologies sont proches entre elles.
- Les meilleures performances sont obtenues par les technologies qui valorisent conjointement électricité et chaleur.
- Les systèmes de gazéification (gazéification et gazéification/méthanation) offrent le bilan environnemental le plus intéressant et un maximum de flexibilité (le gaz peut être utilisé pour de nombreuses utilisations différentes). Ce bilan est valable pour autant que le gaz ne soit pas utilisé uniquement comme combustible de chauffage.
- Les procédés de conversion de combustion de la ressource bois (entre autre unité de pelletisation mobile et torréfaction), ont les bilans sur la santé humaine les moins favorables en raison de leurs émissions entre autre en particules fines et oxyde d'azote générées lors de la phase de combustion.
- Toute unité de conversion entraîne des pertes sous forme de chaleur, pour limiter ces pertes il est important de localiser ces unités sur des systèmes permettant de valoriser cette chaleur résiduelle, par exemple, chauffage urbain ou processus industriels à basse température : séchage, nettoyage, bureaux, etc...

¹ Le projet de gazéification n'a pas fait l'objet d'une analyse économique

2.2 Approche méthodologique

Les cinq technologies ainsi que les filières de conversion d'énergie étudiées sont illustrées à la Figure 15. Il est à relever que d'autres technologies et d'autres filières existent mais celles-ci ne font pas parties du cadre de cette étude².

Chaque technologie permet de fournir de l'énergie qui sert pour un usage bien défini (chaleur, électricité ou mobilité). Ainsi, l'énergie produite à partir de la ressource bois permettra de substituer une énergie produite par une ressource alternative.



→ Comparaison avec installation conventionnelle de plaquettes

Figure 1 Filières de valorisation de la ressource bois étudiées

Pour évaluer les performances environnementales des technologies, nous avons combiné premièrement les rendements énergétiques des processus de conversion d'énergie et deuxièmement le bilan environnemental global en utilisant l'approche de l'analyse du cycle de vie. Cette deuxième approche est indispensable pour avoir une analyse globale de la performance environnementale. Par exemple, un système A avec un rendement de conversion d'énergie de 90% peut être moins intéressant d'un point de vue environnemental qu'un système B avec un rendement de conversion d'énergie de 80%. En effet, si le système A nécessite en amont de sa phase de

² Les systèmes de conversion par fermentation n'ont pas été étudiés (par exemple fabrication de bioéthanol à partir de ressource bois). On peut considérer 3.5 kg de bois anhydres/kg bioéthanol 2G en moyenne. Pour produire 250 millions de litres de bioéthanol (seuil approximatif de rentabilité), il faut compter 700'000 t anhydres de bois. Ce qui représente un gisement de bois beaucoup plus important que ce que peut offrir le canton de Vaud (Le stock potentiellement exploitable annuellement sur le canton de Vaud est d'environ 550'000 t anhydres (Cf. section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

transformation des transports plus conséquents ou des intrants plus importants que le système B alors ses performances globales en considérant tout son cycle de vie sont réduites.

La section 2.3 présente les résultats de l'analyse des performances énergétiques des quatre technologies.

La section 2.5 présente les performances environnementales de chaque technologie en utilisant la méthodologie de l'analyse du cycle de vie.

2.3 Analyse énergétique

Les performances énergétiques (rendements) des technologies à l'étude ont été modélisées en considérant des scénarios potentiels de conversion énergétique de la ressource bois. Le Tableau 1 présente ces scénarios. La Figure 2 indique pour chaque scénario les performances énergétiques considérées pour l'évaluation environnementale. Les performances énergétiques détaillées ainsi que le potentiel maximum de chaleur utile³ des scénarios sont présentés à l'Annexe 2.

Dans le but d'avoir une référence de base, les technologies ont été comparées à une installation conventionnelle de plaquettes (scénario 0a) et 0b)).

Tous les rendements des technologies ont été calculés à partir des hypothèses suivantes :

- Taux d'humidité de la matière entrante : 30%
- Pouvoir calorifique inférieur de la biomasse entrante : 3'339 kWh/tonne
- La matière première entrante est considérée comme identique pour toutes les technologies⁴

En fonction des scénarios, les technologies permettent de convertir le bois en une énergie finale qui est soit de la chaleur, soit de l'électricité et de la chaleur ou encore de l'énergie mécanique dans le cas du *scénario 3c) Mobilité*.

³ Le potentiel maximum de chaleur utile indique la quantité de chaleur qui peut être produite au total en considérant une utilisation de l'énergie électrique par une pompe à chaleur.

⁴ Toutes les technologies ne permettent pas d'assimiler les mêmes ressources bois. Celles-ci sont identifiées dans les fiches techniques à l'annexe 1.

Tableau 1 Présentation des scénarios étudiés

<i>Scénario / Technologie</i>	<i>Produit valorisé</i>	<i>Utilisation</i>
4c) Pyrolyse	Bio-oil	Moteur cogénération
4b) Pyrolyse ** ⁵		Chaudière et chaudière à condensation
4a) Pyrolyse * ⁶		Chaudière et chaudière à condensation
5a) Gazéification	Gaz de synthèse (SG)	Moteur combustion et chaudière à condensation
3c) Gazéification & méthanation	Gaz naturel de synthèse (SNG)	Mobilité (voiture à gaz ou électrique)
3b) Gazéification & méthanation		Centrale à gaz à cycle combiné (CCGT)
3a) Gazéification & méthanation		Chaudière à condensation
2b) Torréfaction	Plaquette / pellet	Chaudière cogénération - cycle ORC
2a) Torréfaction		Chaudière à bois
1b) Unité pelletisation mobile	Pellet	Chaudière cogénération - cycle ORC
1a) Unité pelletisation mobile		Chaudière à bois
0b) Plaquettes	Plaquette	Chaudière cogénération - cycle ORC
0a) Plaquettes		Chaudière à bois

⁵ ** **Avec** valorisation de la chaleur résiduelle de l'unité de transformation.

⁶ * **Sans** valorisation de la chaleur résiduelle de l'unité de transformation.

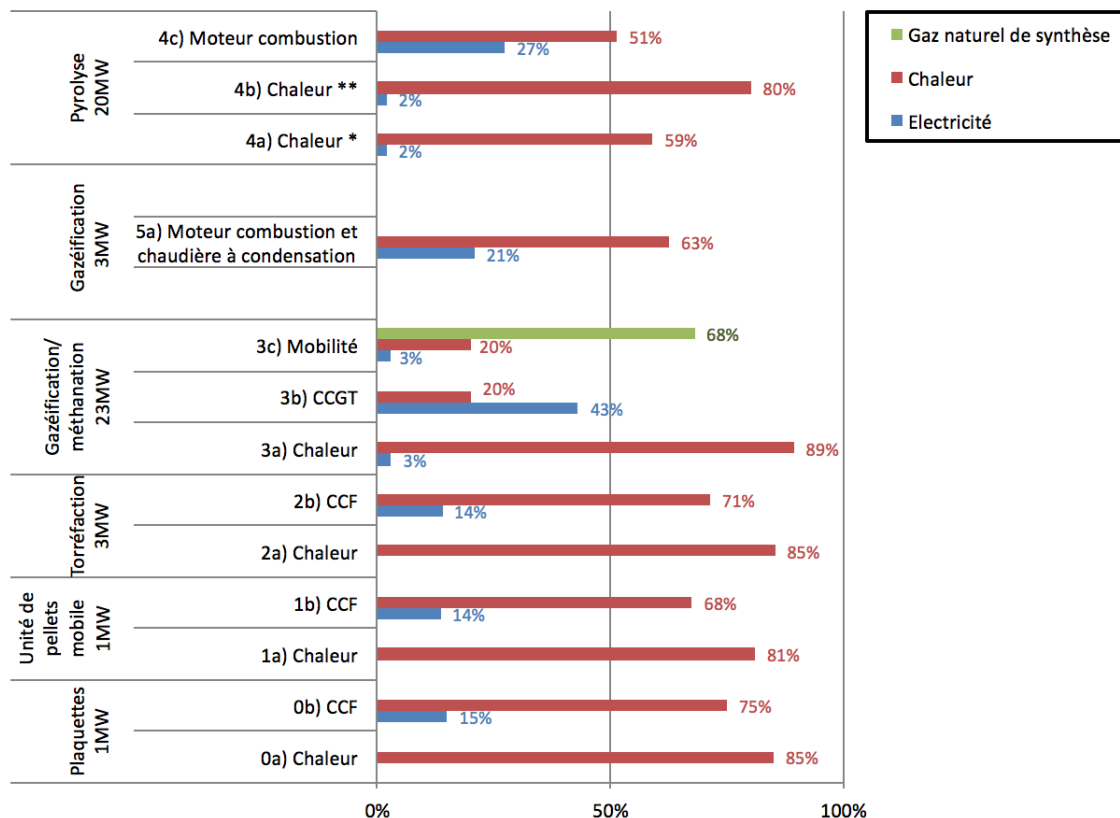


Figure 2 Performances énergétiques finale des technologies et des scénarios étudiés – CCF = Couplage Chaleur Force ; CCGT= Centrale à gaz à cycle combiné (Closed-Cycle Gas Turbine).

Evaluation de système de production d'électricité

Dans le cas de systèmes de combustion directe du bois, d'autres systèmes que l'ORC existe pour produire conjointement chaleur et électricité.

Une chaudière à bois traditionnelle équipée d'un générateur permet de produire de l'électricité en plus de la chaleur. Pour entraîner le générateur, la turbine à vapeur offre aujourd'hui des performances intéressantes même pour les petites installations.

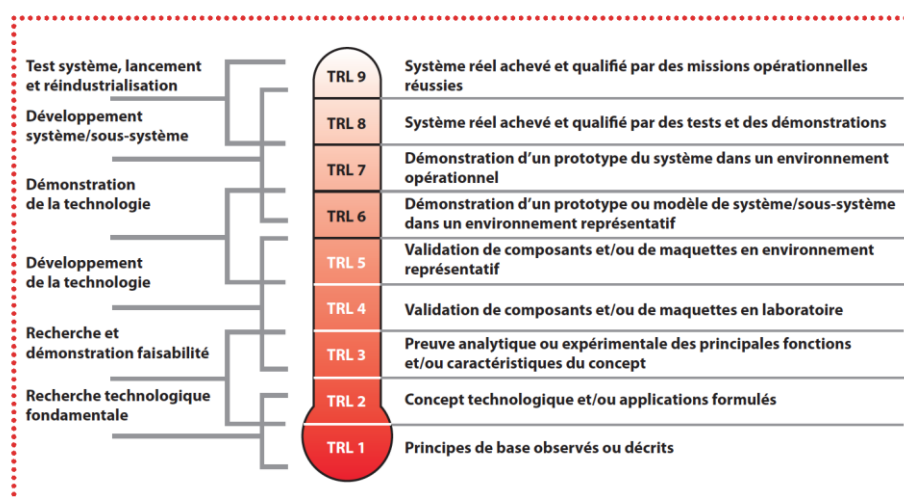
En raison de leur complexité et des coûts opérateurs associés, des installations type ORC sont surtout intéressantes dans le cadre d'installations de grande taille délivrant une puissance thermique supérieure à 1 MW. Il n'est pas rare qu'avec des plages de puissance aussi élevées, la valorisation de chaleur résiduelle ne soit pas assurée pendant toute l'année. L'évaluation des performances d'un système de cogénération à partir de la turbine à vapeur s'est basée sur les caractéristiques techniques du projet FW Düdingen, projet qui s'inscrit dans la politique énergétique 2050.

Tableau 2 Rendements considérés pour les systèmes cogénération étudiés

Installations	Plage de fonctionnement	Rendements	Source
Turbine à vapeur	300 kW	15% élec. 62% therm.	Schmid Energy Solutions
ORC	1 MW	15% élec. 75% therm.	Jugement d'experts et consensus de la branche

2.4 Niveau de maturité des différentes technologies

Nous tenons à mettre en garde le lecteur sur les modèles théoriques développés. Compte tenu de la nature des projets, les modèles de performances énergétiques et environnementales des différents systèmes étudiés sont basés sur des modèles théoriques. Le niveau TRL (en anglais Technology Readiness Level) permet de définir le niveau de maturité de ces technologies. D'abord utilisé par les agences gouvernementales américaines, le niveau TRL s'est depuis largement diffusé et a été adopté par de nombreux organismes, entreprises ou institutions publiques dans le monde.

**Figure 3 Niveau TRL, technologies clé, 2015**

Les systèmes de transformation du bois étudié n'ont pas tous les mêmes niveaux de maturité et, de ce fait, comportent un niveau de risque lié à la technologie plus ou moins élevé. Alors qu'un système de chaudière à bois conventionnelle est éprouvé et opérationnel (niveau TRL 9), la gazéification/méthanation n'est encore qu'au stade de démonstration/prototype dans un environnement opérationnel (niveau TRL 7). Le **Figure 4** identifie le niveau TRL pour chaque système de transformation du bois énergie étudié.

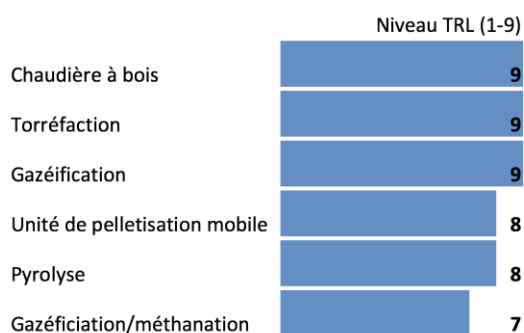


Figure 4 Niveau TRL définit selon les jugements d'experts de la branche

2.5 Analyse environnementale

La méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été utilisée pour réaliser le bilan environnemental des différents scénarios. Un descriptif de cette méthodologie et des indicateurs retenus sont présentés à l'Annexe 4. Pour chaque scénario, nous avons considéré les impacts depuis l'exploitation de la ressource bois, y compris sa gestion, les transports, le conditionnement, la transformation et son utilisation. La qualité et la quantité d'énergie qu'elle permet de remplacer a également été intégrée dans l'analyse.

Toutes les ressources (par exemple les besoins énergétique, l'énergie grise des matériaux, etc.) ainsi que les polluants (émissions directes dans l'eau, l'air et le sol) ont été considérés et évalués. L'ensemble des sources d'impacts (périmètre étudié) sont schématisées à la Figure 5.

Les hypothèses générales de substitution pour les scénarios de référence sont les suivantes :

- 1 kWh d'électricité produit par les systèmes de transformation du bois permet de substituer⁷ 1 kWh d'électricité d'origine européenne
- 1 MJ de chaleur produit par les systèmes de transformation bois permet de remplacer 1 MJ de mazout
- 1 km parcouru par un véhicule au gaz ou à l'électricité permet de substituer 1 km parcouru par un véhicule à essence

Pour chaque scénario, un écart-type des résultats est présenté. Il résulte du choix des mix électriques (mix UCTE ou charbon) et de chaleur (gaz naturel ou mazout) ou encore du mode de mobilité (gaz naturel ou électricité) substitués. Des explications quant au choix du mix de substitution, sont fournies à l'Annexe 8.

⁷ Une unité d'énergie (électricité ou chaleur) fournie par la ressource bois permet de remplacer une unité d'énergie fournie par un combustible fossile

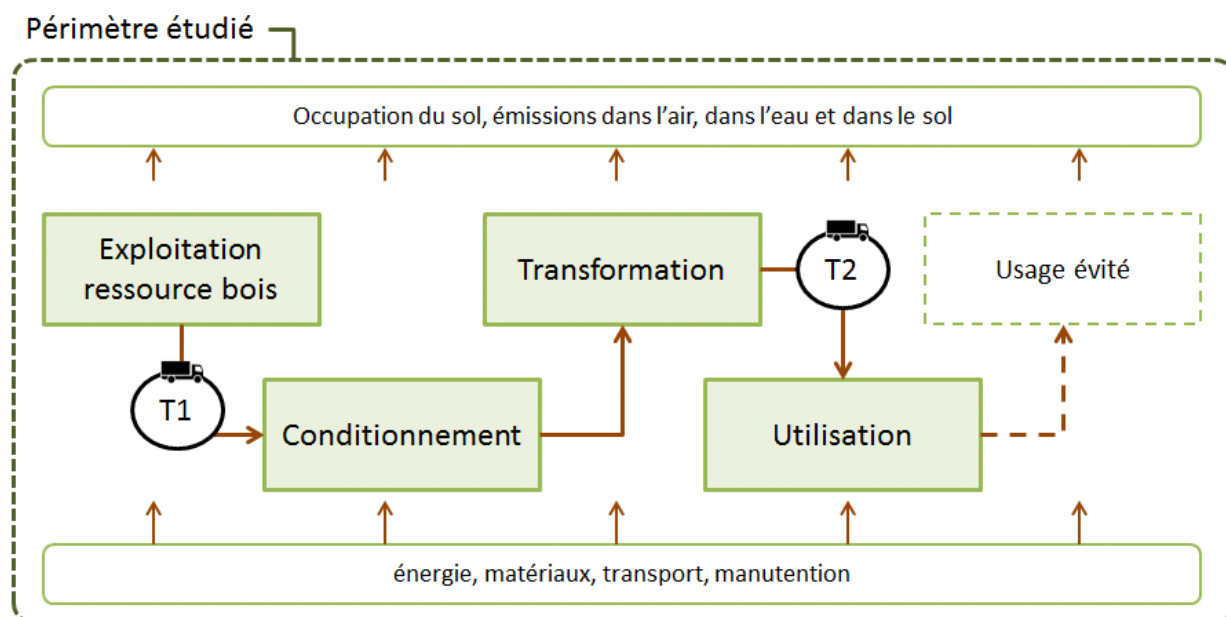


Figure 5 Périmètre étudié pour évaluer les impacts potentiels sur l'environnement des technologies et scénarios étudiés

Les scénarios étudiés sont évalués sur la base de leur **fonction** : « *valoriser énergétiquement la ressource bois* ».

La référence (unité fonctionnelle) par rapport à laquelle sont rapportés et quantifiés les impacts environnementaux est :

« valoriser une tonne de bois énergie »

Les résultats sont présentés pour deux indicateurs :

- changements climatiques [kg CO₂-éq.]
- santé humaine [DALY]

Les impacts générés, c'est-à-dire l'exploitation de la ressource bois, les transports, le conditionnement, la transformation et l'utilisation sont présentés en positifs (« malus » pour l'environnement). Les impacts évités, c'est-à-dire la substitution de l'énergie fossile, sont présentés en négatif (« bonus » pour l'environnement). La résultante (malus + bonus) des scénarios de référence est schématisée par un losange (◇). Plus la résultante est « négative » plus le scénario est performant d'un point de vue environnemental.

Les Figure 6 et Figure 7 présentent les résultats de l'empreinte environnementale des scénarios étudiés.

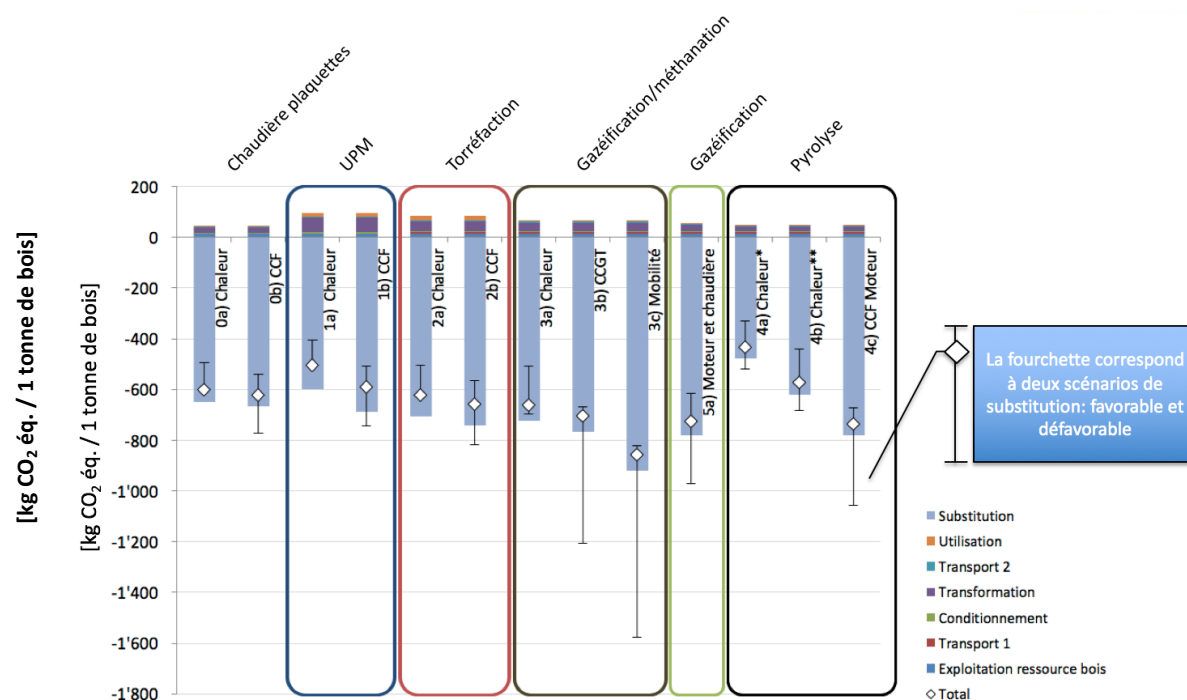


Figure 6 Empreinte environnementale : impacts générés & évités sur les changements climatiques – 4a) Chaleur* : sans valorisation de la chaleur résiduelle lors du processus de pyrolyse ; 4b) Chaleur** : avec valorisation 100% de la chaleur résiduelle

Commentaires sur l'indicateur changements climatiques :

- Pour toutes les technologies, les impacts générés sont beaucoup moins importants que les impacts évités. En d'autres termes, les technologies retenues ont toutes des performances environnementales meilleures que les technologies qu'elles substituent.
- Les meilleures performances sont obtenues par les scénarios 0b), 3b), 3c) et 4c)
- Pour la majorité des technologies étudiées (unité de pelletisation mobile, torréfaction et gazéification), les impacts les plus importants proviennent de la transformation de la ressource bois avant son utilisation.
- Indépendamment de la technologie et de manière générale, une conversion énergétique du bois avec une technologie efficace de cogénération, c'est-à-dire avec une valorisation électrique et chaleur, est à privilégier par rapport à une chaudière efficace (valorisation 100% thermique)

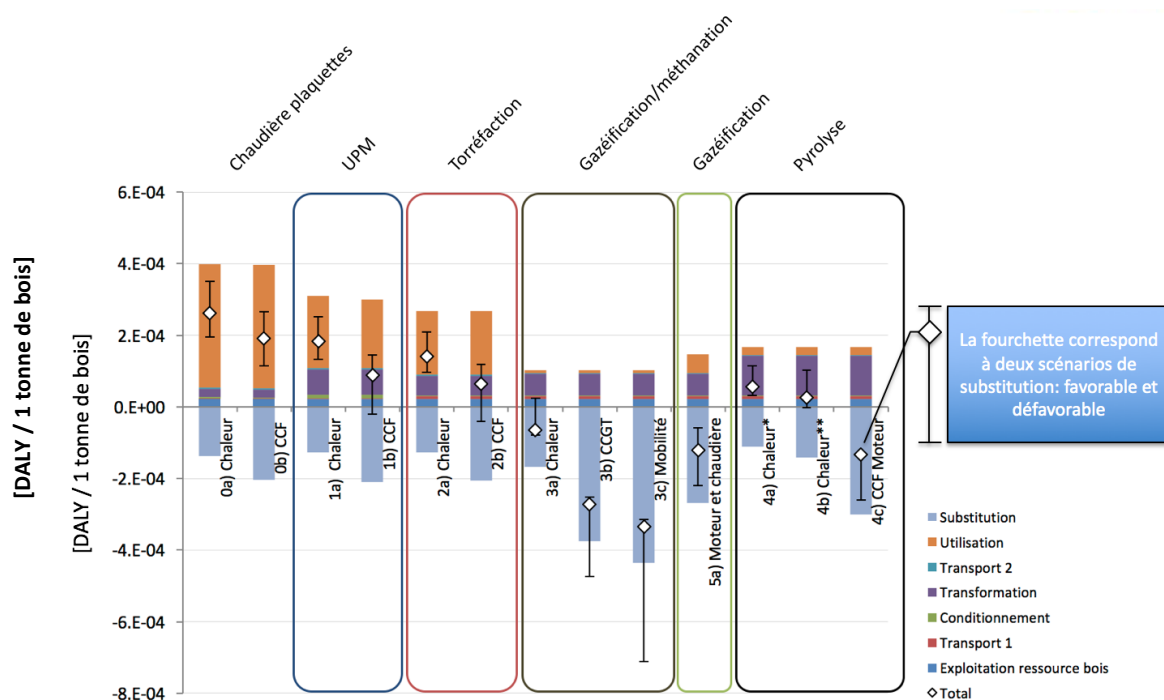


Figure 7 Empreinte environnementale : impacts générés et évités des technologies étudiées sur la santé humaine

Commentaires sur l'indicateur santé humaine

- Les impacts générés peuvent être plus importants que les impacts évités. Par exemple, les énergies fossiles substituées pour les technologies de combustion de la ressource bois (unité de pelletisation mobile et torréfaction) génèrent moins d'impacts indépendamment de l'incertitude liée au mix de substitution.
- Pour les technologies d'unité de pelletisation et de torréfaction, les impacts proviennent principalement (env. 70%) des émissions directes lors de la phase de combustion (particules, NOx, CO). Une analyse plus détaillée des émissions directes est disponible à l'Annexe6 .
- Les scénarios favorables (selon la fourchette de variabilité) pour les technologies de chaudières à plaquettes, d'unité de pelletisation mobile et de torréfaction prennent en considération un rabattement de moitié des particules grâce à une technologie de filtres efficaces (électrofiltres) en plus du mix énergétique de substitution.
- Les meilleures performances environnementales sont obtenues par les scénarios 3b), 3c), 4c).
- Comme pour l'indicateur changements climatiques, une conversion énergétique du bois avec une technologie efficace de cogénération est à privilégier par rapport à une chaudière efficace (valorisation 100% thermique).

2.6 Analyse des coûts

Le coût de revient (administratif, distribution, amortissement, exploitation, transport et exploitation forestière) et la comparaison avec le prix du marché de l'énergie produite par les technologies sont

présentés aux Figure 8 et Figure 9. L'ensemble des postes des coûts de revient pour la gazéification et la pyrolyse rapporté au kWh d'énergie finale produit [cts/kWh] est symbolisé par un losange (◊). Le rond orange (●) correspond au kWh d'énergie finale sur le marché. Ces deux symboles se rapportent à l'échelle de droite. Le revenu et le coût de revient annuel sont présentés en histogramme et se rapportent à l'échelle de gauche [CHF/an].

L'Annexe7 présente pour chaque technologie les tableaux et hypothèses retenues pour l'évaluation des coûts de revient.

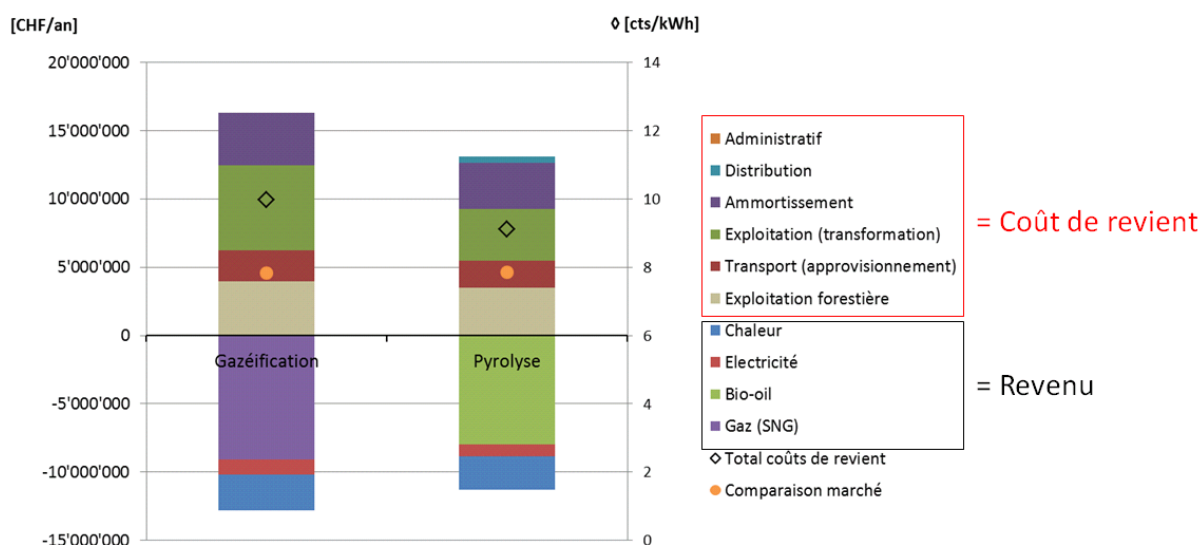


Figure 8 Coûts de revient et comparaison avec le marché des technologies de gazéification et de pyrolyse en [CHF/an] et [cts/kWh]

- Les coûts annuels pour la gazéification dépassent les 15 millions⁸. Les coûts annuels pour la pyrolyse dépassent les 10 millions.
- Les trois principaux postes de coûts sont l'exploitation forestière (récolte du bois), l'exploitation de l'usine de transformation ainsi que l'amortissement du coût des installations.
- Le coût de production, pour les deux technologies, est supérieur aux coûts du marché d'un vecteur énergétique fossile de substitution⁹ (gaz naturel fossile)

⁸ L'analyse des coûts pour la technologie de gazéification est basée sur un modèle théorique d'analyse de coût. L'expérience montre que ces valeurs sont souvent sous-estimées.

⁹ En comparaison au prix de production et d'importation du gaz naturel fossile : 7.4 cts/kWh.

Le prix du gaz à la consommation (incluant la taxe CO₂) est d'environ 10 cts/kWh pour un bâtiment Type IV (immeuble locatif avec une consommation supérieure à 100'000 kWh).

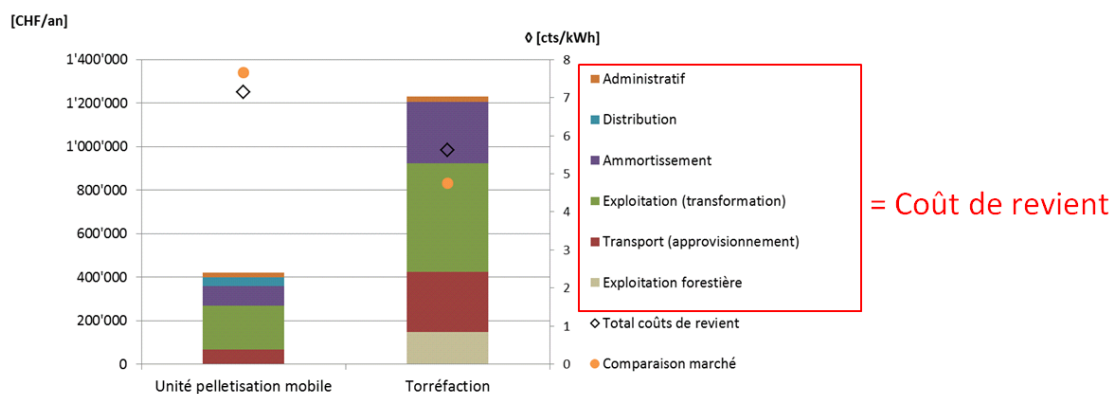


Figure 9 Coûts de revient et comparaison avec le marché des technologies d'unité de pelletisation et de torréfaction en [CHF/an] et [cts/kWh]

- Pour ces deux technologies, les coûts d'exploitation forestière (récolte de la matière première) sont bas étant donné la catégorie de ressource bois valorisée (rémanents de coupe, déchets ligneux communaux et bois de prairie).
- Le principal poste de coûts est l'exploitation de l'unité et, plus spécifiquement, les charges salariales et les frais de fonctionnement (fuel pour l'unité mobile de pelletisation et électricité pour le torréfacteur).
- Ces technologies sont très sensibles à la disponibilité des ressources. Le prix considéré dans les scénarios est particulièrement bas, ce qui est justifié actuellement car les ressources en question ne sont pour le moment pas ou peu valorisées.
- Le coût du pellet obtenu grâce à l'unité de pelletisation mobile est en ligne avec le prix du marché.
- Le coût du produit torréfié (sans distribution) est proche de celui du marché, mais légèrement supérieur.

Commentaire :

Aucune compensation ou rétribution pour la production du gaz naturel de synthèse (gazéification méthanation) ou de bio-oil (pyrolyse) fabriqué à partir de ressource renouvelable n'a été considéré. La taxe sur le CO₂ prélevée depuis le 1^{er} janvier 2008 sur les combustibles fossiles n'a pas été intégrée dans le prix de comparaison avec le marché¹⁰.

Le coût d'exploitation de la ressource bois est un paramètre clé qui peut fortement influencer la viabilité ou non d'une installation. Ce prix dépend de différents paramètres comme par exemple le type de catégories de ressource bois mais également le prix des combustibles fossiles.

¹⁰ En 2014, le montant de la taxe a été porté de CHF 36.- à CHF 60.- par tonne de CO₂. Le montant de cette taxe est augmenté si les émissions de CO₂ liées aux combustibles, une fois corrigées des variations climatiques, dépassent les seuils fixés.

3 Variantes d'implémentation

Variantes d'implémentation

Un comité d'experts a participé à l'évaluation et à la critique de variantes d'implantations de technologies de la valorisation de la ressource bois. Cet atelier a fait ressortir les éléments suivants :

Au niveau de la planification énergétique

- Favoriser les technologies qui produisent de l'énergie électrique : plus en ligne avec la stratégie énergétique 2050 de la confédération (voir Annexe10).
- Localiser les installations de transformation de manière planifiée dans le but de permettre une valorisation optimisée de la chaleur résiduelle ou excédentaire (par exemple processus industriels à basses températures).

Au niveau de la disponibilité de la ressource bois

- Potentiel d'exploiter « facilement » 100'000 m³ supplémentaire (environ 50'000 tonnes anhydres) de bois de forêt à des coups similaires à ceux pratiqués actuellement.
- La mise en place de grosses installations de valorisation de la ressource bois mobilisent des quantités importantes de bois sur toute leur durée de vie (environ vingt ans) au détriment d'autres installations → le bois qui serait utilisé suite à la mise en place d'une nouvelle unité risquerait d'empêcher l'émergence d'autres unités ou technologies de valorisation du bois. De ce fait, il y a lieu de privilégier celles avec les meilleures performances.

Au niveau des projets évalués

- Favoriser la mise en place d'une installation de gazéification avec valorisation du gaz de synthèse dans la mobilité et / ou dans une valorisation électrique (du point de vue purement énergétique, le scénario idéal est le scénario 3b) en combinaison avec un circuit court bois thermique.
- Trouver des solutions pour aller dans le sens de « petites » installations de gazéification/méthanation → faciliter l'acceptation sociale.

3.2 Atelier et descriptif des scénarios

Différents scénarios ont été analysés en prenant en compte les paramètres suivants :

- optimisation de l'utilisation des ressources à disposition ;
- optimisation du bilan énergétique et environnemental global ;
- acceptation par la population ;
- viabilité économique ;

Les scénarios ont été discutés avec un comité d'expert qui a pu commenter, critiquer les scénarios décrits au Tableau 3.

Tableau 3 Présentation des scénarios

Scénario 1 «Statut quo»	Valorisation du volume d'exploitation forestière et des sous-produits similaire à celui d'aujourd'hui toutes catégories de bois confondues. Evolution des installations de chauffage (plaquettes et pellets) selon estimation du rapport « Développement du bois énergie - Installations de chauffage ¹¹ » → 100 nouvelles installations par an, puissance moyenne par installation 100 kW.
Scénario 2 «plaquettes-pellets»	Valorisation de la majorité de la ressource bois énergie pour un usage chaleur et électricité avec des installations plaquettes et pellets «conventionnels» (<i>scénario 2a</i>) ou torréfiés (<i>scénario 2b</i>) (90% de petites installations < 70 kW) et 10% de grandes installations > 400 kW.
Scénario 3 «Gazéification-pyrolyse»	Mise en place de grosses installations de valorisation du bois (une installation de pyrolyse 65'000 m ³ de bois et une installation de gazéification env. 50'000 m ³ en plus du parc d'installations actuel (bûches, pellets, plaquettes). Scénario 3a : Valorisation maximum chaleur Scénario 3b : Valorisation selon potentiel maximum
Scénario 4 «usage optimisé max»	Valorisation de la majorité de la ressource bois énergie avec pour but de maximiser la production d'électricité et d'énergie mécanique pour la mobilité.

Les experts qui ont participé à l'atelier sont listés dans le Tableau 4. Les scénarios ont, dans un deuxième temps, été challengés par l'ensemble des membres du groupe de travail de la Direction Général de l'Environnement. Le résultat de l'atelier d'experts a permis d'une part de faire évoluer les scénarios proposés et d'autre part d'analyser les forces et faiblesse et les opportunités et menaces des différents scénarios. Les résultats détaillés de cet atelier sont disponibles à l'Annexe 9.

¹¹ Rapport d'étude Bonnard et Gardel, 2013

Tableau 4 Liste des experts et participants à l'atelier d'experts

Experts et participants, <i>partenaires projet</i>	
Yves Loerincik	Quantis
Arnaud Dauriat	Quantis
Guillaume Schneider	Quantis
François Maréchal	Industrial Process and Energy Systems Engineering (IPESE) -EPFL
Víctor Codina Gironès	Industrial Process and Energy Systems Engineering (IPESE) -EPFL
Philippe Raetz	Bureau indépendant Bvressources
Experts, <i>invités</i>	
Bernard Thierry	Centre de recherches énergétiques et municipales (CREM)
Martin Kumar Patel	Chaire d'efficacité énergétique Université de Genève
Experts et participants, <i>mandataires</i>	
François Schaller	DIREN (ressources énergétiques)
Dominique Reymond	DIREN (directeur-adjoint à la direction de l'énergie)
Clive Müller	DIREN (air, climat et risques technologiques)
Jean-François Metraux	DIREN (secteur forêts)
Etienne Ruegg	DIREN (secteur déchets)

Sur la base des informations qui ont été générées dans le cadre du projet, des scénarios établis et des avis d'experts, les recommandations sur les scénarios à privilégier et sur la stratégie à mettre en place sont présentées à la section 4.

4 Conclusions et recommandations

4.1 Conclusions sur les technologies étudiées

Unité de pelletisation mobile

Le principal intérêt de l'unité de pelletisation mobile est de pouvoir exploiter des ressources qui ne le sont pas actuellement (comme par exemple les rémanents de coupe ou le bois de prairie) mais également d'autres matières comme les résidus viticoles ou agricoles. Le business plan tend à montrer que la mise en place d'une installation est rentable.

Torréfaction

Le principal intérêt de la torréfaction est de pouvoir faciliter le stockage et le transport d'un combustible de qualité. Le besoin pour une solution de stockage ou de transport sur une distance importante reste à démontrer.

Gazéification et gazéification/méthanation

La gazéification offre le bilan environnemental le plus intéressant et un maximum de flexibilité (le gaz peut être utilisé pour de nombreuses utilisations différentes). Ce bilan est valable pour autant que le gaz ne soit pas utilisé uniquement pour le chauffage. La faisabilité, notamment économique, du projet/technologie reste à démontrer.

Pyrolyse

Tout comme la torréfaction, la pyrolyse permet de faciliter le stockage du combustible. Elle ne trouve un intérêt énergétique qu'en cas de cogénération performante. La valorisation de la bio-oil pour alimenter uniquement un réseau de chaleur à distance est peu attrayante du point de vue environnemental et nécessiterait un développement de chauffage urbain à basses températures. La faisabilité, notamment économique, du projet/technologie reste à démontrer.

4.2 Recommandations pour l'Etat de Vaud

Au regard des trois phases de ce projet, les recommandations pour l'Etat de Vaud peuvent être synthétisées ainsi :

A1. Promouvoir la production d'électricité

Encourager des systèmes de valorisation énergétique performants qui produisent à la fois de **l'énergie électrique et de la chaleur** et non uniquement de la chaleur (intérêt économique et environnemental).

Investir dans des **chaudières à bois** (combustible type pellets / plaquettes) d'une taille supérieure à 1MW avec un **couplage chaleur force** (par exemple cycle ORC, turbine à vapeur) intégrant un **traitement efficace des fumées** notamment en terme de particules fines et d'oxyde d'azote.

A2. Promouvoir les systèmes de distribution de chaleur à basses températures

L'avantage de systèmes de réseaux de distribution à basses températures est **d'utiliser des technologies plus efficaces comme les pompes à chaleur ou les chaudières à condensation**. Celles-ci sont capables de fournir de la chaleur uniquement à basse température.

A3. Encourager la valorisation de la chaleur résiduelle de conversion par intégration dans les chauffages urbains ou dans les parcs industriels

Toutes les technologies de conversion entraînent des pertes sous forme de chaleur. Pour limiter ces pertes, il est nécessaire d'intégrer ces unités sur des systèmes permettant de **valoriser cette chaleur résiduelle**, soit dans des procédés industriels, réseaux de chauffage à distance ou en produisant de l'électricité. Il existe sur le marché des produits qui permettent de **valoriser les rejets thermiques « perdus »** et de les **transformer en énergie électrique**. L'électricité peut ainsi soit être consommée sur le site industriel ou soit injectée dans le réseau électrique.

B. Etudier la faisabilité de la gazéification

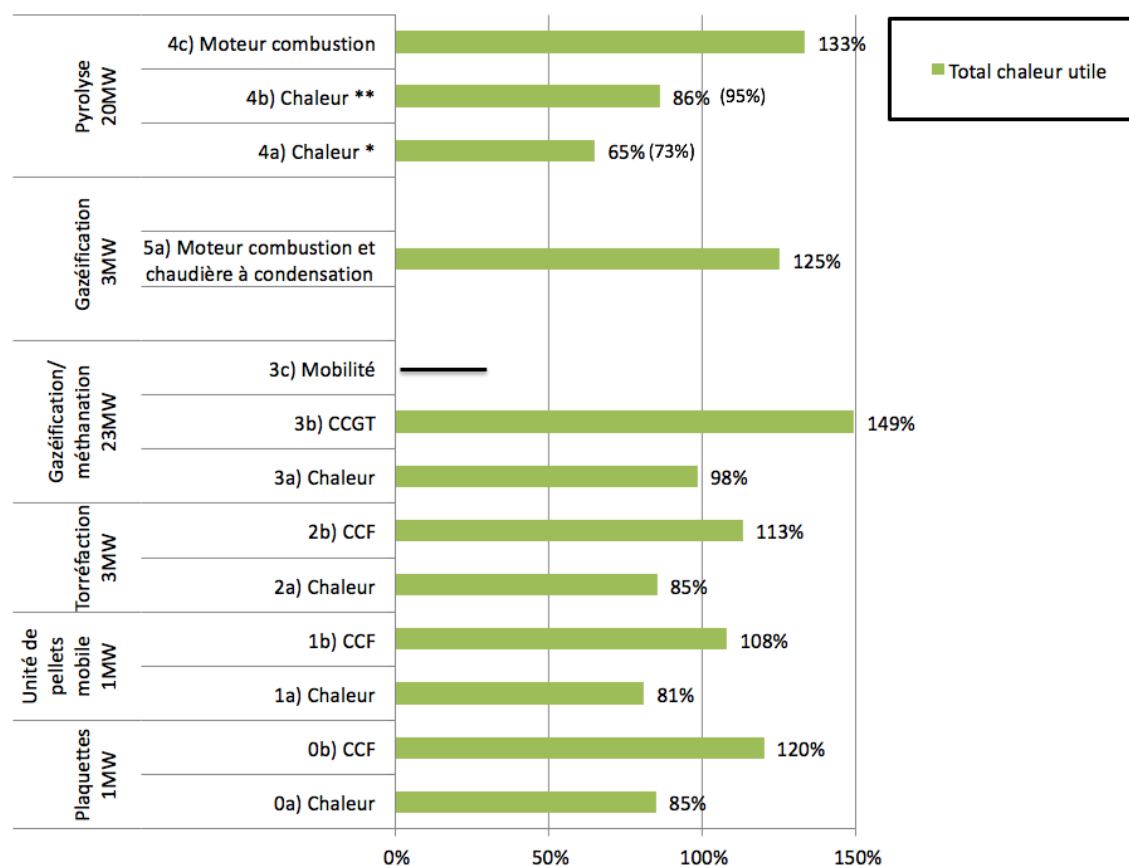
La technologie de gazéification du bois a été démontrée et des projets sont en voies de commercialisation. Il y aurait lieu de **favoriser un projet pilote de gazéification - méthanation** du bois et production de gaz naturel de synthèse (technologie avec le plus de potentiel). La technologie existe (niveau TRL¹² entre 7 et 8 évalué sur une échelle de 9), il faut l'adapter au contexte de la Suisse. Dans un premier temps, il s'agirait de **mener une étude de faisabilité** et dans un deuxième temps de **développer un pilote**. Nous tenons à insister sur le fait qu'il ne s'agit pas d'un développement de type académique, mais bien d'une étude de faisabilité d'implémentation.

¹² L'échelle TRL (en anglais Technology Readiness Level) définit le niveau de maturité technologique. Il s'agit d'un système de mesure employé par de nombreuses agences et compagnies mondiales afin d'évaluer le niveau de maturité d'une technologie.

Annexe 1 : Fiches descriptives synthétiques des technologies étudiées

Fiche_Synthetique_technologie.xls

Annexe 2 Analyse énergétique détaillée des technologies

Figure 10 Performances énergétiques des technologies et scénarios *total chaleur utile***Remarque :**

Le potentiel maximum de chaleur utile indique la quantité de chaleur qui peut être produite au total en considérant une utilisation de l'énergie électrique par une pompe à chaleur. La pompe à chaleur libère sous forme de chaleur le triple (COP^{13}) de l'énergie fournie en électricité.

Les valeurs pour les scénarios 4a) Chaleur * et 4b) Chaleur **, sont expliqués à la Figure 15

¹³ Une pompe à chaleur avec un COP de 3 fournit 3 unités de chaleur pour chaque unité d'énergie consommée (exemple, 1 kWh consommé produit 3 kWh d'énergie thermique)

Analyse énergétique – Performances énergétiques d'unité mobile de pelletisation

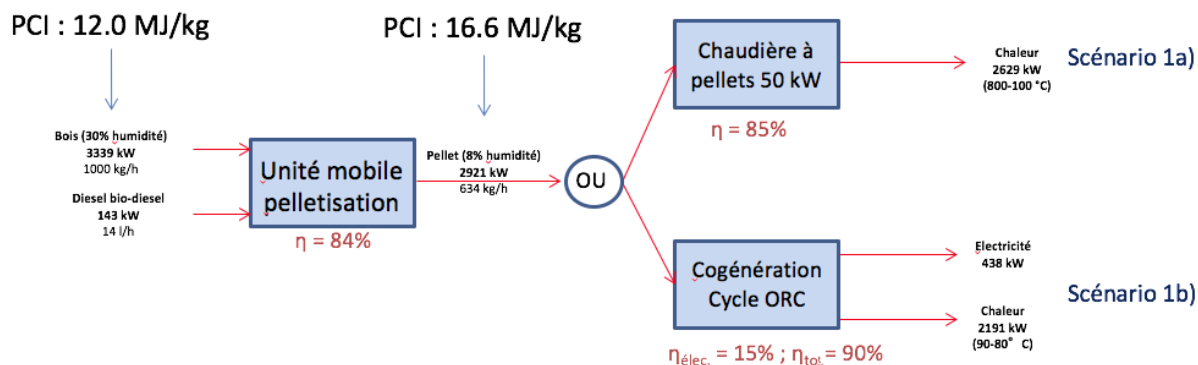


Figure 11 Performances énergétiques d'unité de pelletisation mobile

Analyse énergétique – Performances énergétiques torréfaction

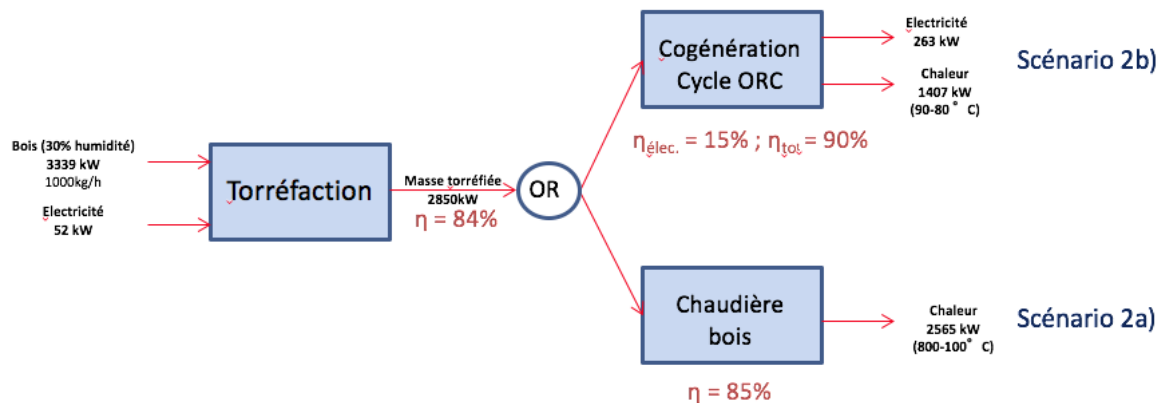


Figure 12 Performances énergétiques du système de torréfaction

Remarque :

Par rapport à l'unité de pelletisation mobile, une augmentation de 2% du rendement de la chaudière (scénario 2a) est considérée pour les raisons suivantes :

- augmentation de la densité énergétique du combustible
- meilleure homogénéité du combustible qui permet un réglage plus précis de la chaudière (alimentation, air comburant)

Analyse énergétique – Performances énergétiques gazéification-méthanation

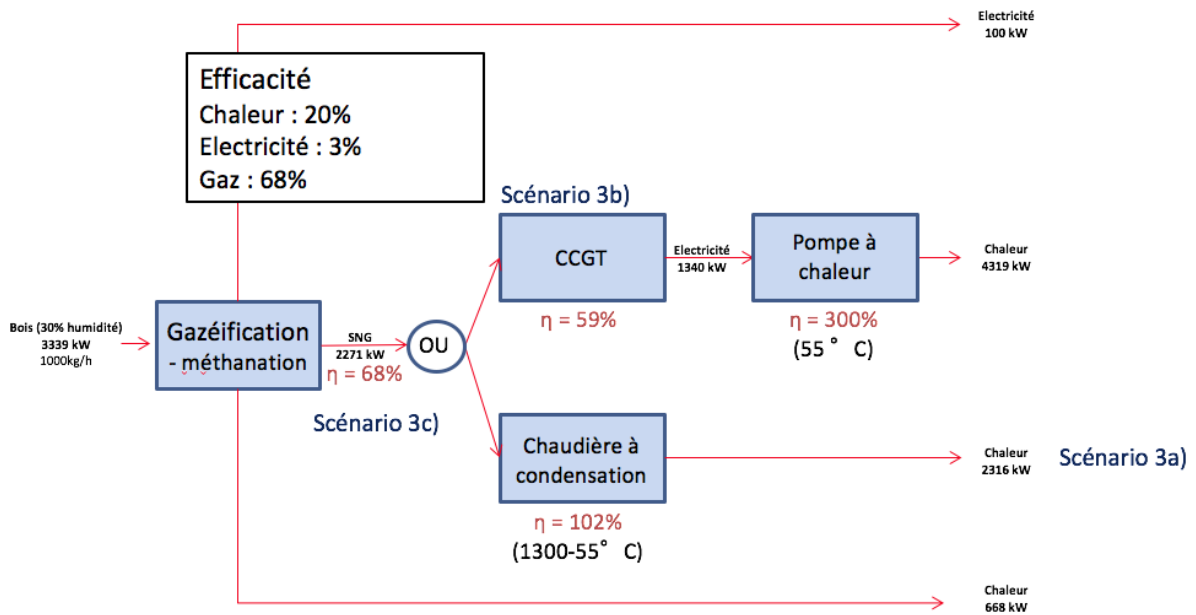


Figure 13 Performances énergétiques d'unité de la gazéification/méthanation

Remarque :

Le scénario 3c) *Mobilité* considère une valorisation énergétique dans un véhicule privé roulant soit au gaz avec une consommation de 5 kg/100 km (moins bonnes performances environnementales) soit à l'électricité 16 kWh/100 km (meilleures performances environnementales)

Analyse énergétique – Performances énergétiques gazéification

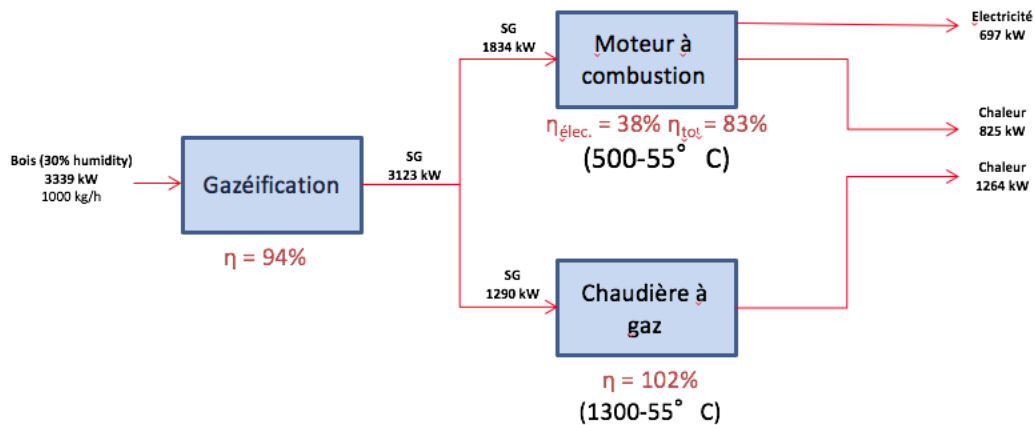


Figure 14 Performances énergétiques d'unité de la gazéification

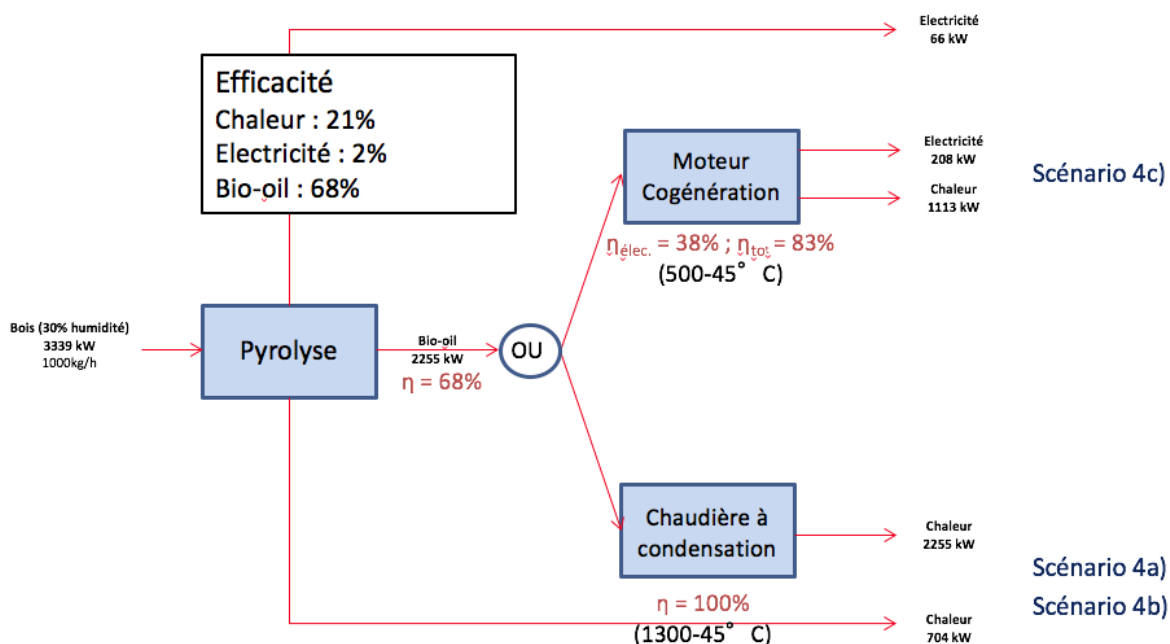
Analyse énergétique – Performances énergétiques *pyrolyse*

Figure 15 Performances énergétiques de la pyrolyse

Remarque :

Le scénario 4a) considère les performances sans valorisation de la chaleur résiduelle.

Le scénario 4b) considère les performances avec valorisation de la chaleur résiduelle.

Pour ces deux scénarios (4a et 4b), les résultats sont présentés pour un cas défavorable (rendement selon chaudière à Pierre de Plan(*)) et favorable (chaudière à condensation (**)). Ces paramètres intègrent la fourchette de variabilité des Figure 6 et Figure 7.

Annexe 3 Définition des niveaux TRL

Niveau TRL	1
Définition	Principes de base observés et décrits.
Description	Plus bas niveau de maturité technologique. La recherche scientifique commence à être traduite en une recherche et développement (R&D) appliquée. Les exemples peuvent inclure des études papier portant sur les propriétés de base d'une technologie.
Justification	Publications de travaux de recherche identifiant les principes de base de la technologie. Références relatives à ces travaux (qui, où et quand ?).

Niveau TRL	2
Définition	Concept technologique et/ou application formulés.
Description	L'invention commence. Les principes de base ayant été observés, des applications peuvent être envisagées. Elles sont spéculatives et il n'existe pas de preuve ou d'analyse détaillée pour étayer les hypothèses. Les exemples sont limités à des études analytiques.
Justification	Publications ou autres références qui esquissent l'application considérée et fournissent une analyse appuyant le concept.

Niveau TRL	3
Définition	Preuve analytique ou expérimentale des principales fonctions et/ou caractéristiques du concept.
Description	Une R&D active est initiée. Elle comprend des études analytiques, et des études en laboratoire destinées à valider physiquement les prédictions analytiques faites pour les différents éléments de la technologie. Les exemples impliquent des composants non encore intégrés ou représentatifs.
Justification	Résultats de mesures en laboratoire portant sur les paramètres essentiels des sous-systèmes critiques et comparaison de ces résultats aux prédictions analytiques. Références relatives à la réalisation de ces tests et de ces comparaisons, (qui, où et quand ?).

Niveau TRL	4
Définition	Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire.
Description	Des composants technologiques de base sont intégrés de façon à vérifier leur aptitude à fonctionner ensemble. La représentativité est relativement faible si l'on se réfère au système final. Les exemples incluent l'intégration en laboratoire d'éléments ad hoc.
Justification	Concepts envisagés du système et résultats d'essais de maquettes de laboratoire. Références relatives à la réalisation des travaux (qui, où et quand ?). Estimation des différences entre la maquette du matériel, les résultats des essais et les objectifs du système envisagé.

Niveau TRL	5
Définition	Validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif
Description	La représentativité de la maquette technologique augmente significativement. Les composants technologiques de base sont intégrés à des éléments supports raisonnablement réalistes, de façon à être testés en environnement simulé. Les exemples incluent l'intégration hautement représentative de composants en laboratoire.
Justification	Résultats d'essais d'une maquette de laboratoire du système, intégrée à des éléments supports, dans un environnement opérationnel simulé. Écarts entre environnement représentatif et environnement opérationnel visé. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. La maquette du système a-t-elle été raffinée pour mieux correspondre aux objectifs du système envisagé ?

Niveau TRL	6
Définition	Démonstration d'un prototype ou d'un modèle de système/sous-système dans un environnement représentatif.
Description	Un modèle représentatif ou un système prototype, allant bien au-delà de celui du TRL 5, est testé dans un environnement représentatif. Cela représente une étape majeure dans la démonstration de la maturité d'une technologie. Les exemples incluent les essais d'un prototype dans un environnement de laboratoire reproduisant fidèlement des conditions réelles ou les essais dans un environnement opérationnel simulé.
Justification	Résultats d'essais en laboratoire d'un système prototype très proche de la configuration désirée en termes de performance, masse et volume. Écarts entre l'environnement d'essai et l'environnement opérationnel. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.

Niveau TRL	7
Définition	Démonstration d'un prototype du système dans un environnement opérationnel.
Description	Prototype conforme au système opérationnel, ou très proche. Ce TRL représente un saut important par rapport au TRL 6, exigeant la démonstration d'un prototype du système réel dans son environnement opérationnel (par exemple dans un avion, dans un véhicule, dans l'espace). À titre d'exemple, on peut citer le test d'un prototype dans un avion banc d'essai.
Justification	Résultats d'essais d'un système prototype en environnement opérationnel. Identifications des entités ayant réalisé les essais. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.

Niveau TRL	8
Définition	Système réel achevé et qualifié par des tests et des démonstrations
Description	La preuve est faite que la technologie fonctionne dans sa forme finale, et dans les conditions d'emploi prévues. Dans la plupart des cas, ce niveau de TRL marque la fin du développement du système réel. Les exemples incluent les tests et évaluations du système dans le système d'armes auquel il est destiné, afin de déterminer s'il satisfait aux spécifications.
Justification	Résultats d'essai du système dans sa configuration finale confronté à des conditions d'environnement couvrant l'ensemble du domaine d'utilisation. Évaluation de ses capacités à satisfaire les exigences opérationnelles. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de finaliser la conception.

Niveau TRL	9
Définition	Système réel qualifié par des missions opérationnelles réussies.
Description	Application réelle de la technologie sous sa forme finale et dans des conditions de missions telles que celles rencontrées lors des tests et évaluations opérationnels. Les exemples incluent l'utilisation du système dans des conditions de mission opérationnelle.
Justification	Rapports de tests et d'évaluations opérationnels.

Annexe 4 Méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode scientifique permettant l'évaluation des impacts environnementaux potentiels de produits, de procédés, de services ou d'entreprises sur l'ensemble de leur cycle de vie (extraction des matières premières, production, transports, utilisation, fin de vie). Cette approche bénéficie du soutien du Programme des Nations Unies pour la Protection de l'Environnement (PNUE) et repose sur une méthodologie encadrée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), en particulier les normes ISO 14040 (2006) (conditions et guidances) et ISO 14044 (2006) (principes et structure).

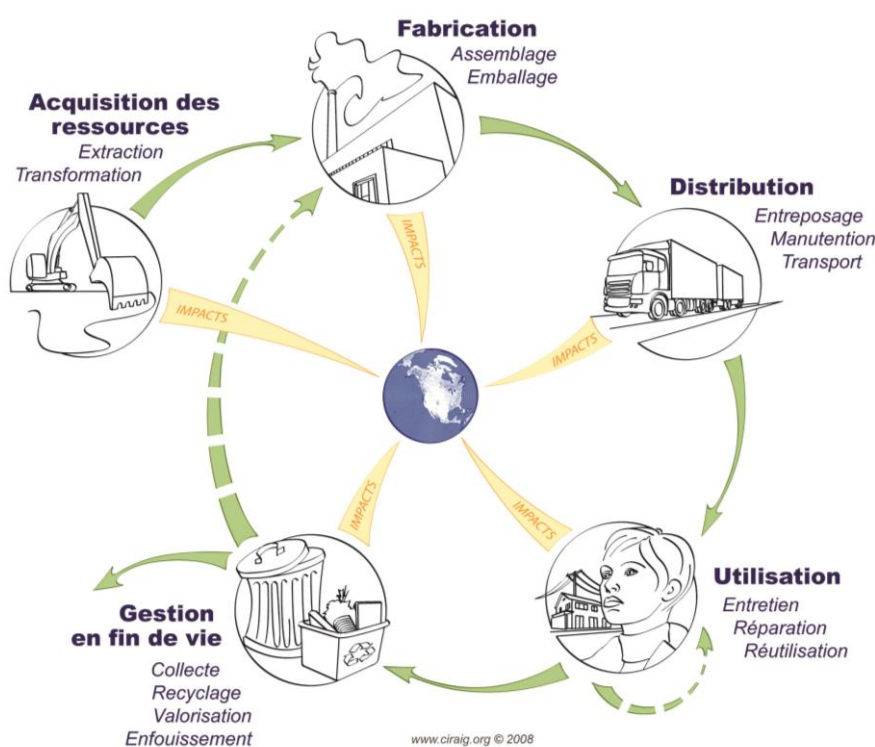


Figure 1 : Étapes du cycle de vie d'un produit.

L'ACV aide à identifier les opportunités pour améliorer les performances environnementales des produits, services ou entreprises à différentes étapes de leur cycle de vie, informer les décideurs industriels, les organisations gouvernementales ou non gouvernementales (par exemple pour la planification stratégique, pour déterminer des priorités ou pour optimiser le design des produits), permettre la sélection des indicateurs de performance environnementale pertinents, l'incorporation de techniques de mesure, et le marketing (par exemple pour la mise en place de schéma d'écolabel, faire ou produire une déclaration environnementale). La méthodologie de l'ACV est donc particulièrement adéquate pour étudier les produits et les services de façon holistique. Elle permet d'identifier les priorités d'action et d'éviter un déplacement des impacts lors de l'introduction d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technologie.

L'ACV se déroule en quatre phases :

- 1) la définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- 2) l'analyse de l'inventaire ;
- 3) l'évaluation des impacts ;
- 4) l'interprétation.

Les principaux aspects méthodologiques de chacune de ces phases sont décrits ci-dessous.

Définition des objectifs et du champ de l'étude

La première phase de l'ACV, appelée définition des objectifs et du champ de l'étude, présente la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cette fin. Le système de produits, défini par l'ISO comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions, y est décrit et détaillé.

Dans ce sens, l'objet d'une ACV est caractérisé par ses fonctions et non seulement en termes de ses produits finaux. Ceci permet la comparaison de produits qui n'ont pas la même performance fonctionnelle par unité de produit (p. ex. une tasse de polystyrène à usage unique et une tasse en céramique qui est réutilisée plusieurs fois), puisque la quantification de la performance fonctionnelle, au moyen de l'unité fonctionnelle, fournit une référence à partir de laquelle sont mathématiquement normalisés les entrants et les sortants des systèmes comparés (p. ex. boire deux tasses de café par jour durant un an). La spécification de l'unité fonctionnelle est le point de départ de la définition des frontières du système puisqu'elle indique quels sont les processus élémentaires qui doivent être inclus pour remplir cette fonction.

La nature des données utilisées et les principales hypothèses sont également décrites dans cette première phase de l'ACV.

Analyse de l'inventaire

La seconde phase de l'ACV, appelée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV), est la quantification des flux élémentaires impliqués durant le cycle de vie complet des produits, services, procédés ou entreprises évalués, c'est-à-dire de l'ensemble des extractions de ressources de la biosphère et des émissions dans l'air, l'eau et le sol.

Pour ce faire, une collecte de données primaires (spécifiques au cas à l'étude) et secondaires (issues de publications ou de banques de données reconnues) est nécessaire. Les données sont rapportées à l'unité fonctionnelle, puis compilées au sein d'un logiciel spécialisé. Le logiciel employé dans le cadre de cette étude est Quantis SUITE 2.0.

Évaluation des impacts

La troisième phase de l'ACV consiste en l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV). Elle a pour but de traduire les flux élémentaires quantifiés dans l'inventaire du cycle de vie dans différentes catégories d'impact sur l'environnement et la santé humaine, selon des modèles de devenir, d'exposition et de toxicité des polluants, ou de raréfaction des ressources. C'est ainsi qu'à chaque substance de l'inventaire est associé un facteur de caractérisation spécifique, permettant de calculer son score d'impact. La somme des scores d'impact des différentes substances détermine l'impact total du système (produit, procédé ou service) pour un indicateur donné. Dans un second temps, ces catégories d'impact sont regroupées au sein d'un nombre réduit d'indicateurs de dommages environnementaux, ce qui facilite la communication des résultats et la prise de décision.

Dans le cadre de cette étude, la méthode EICV employée est la méthode européenne internationalement reconnue et revue par les pairs IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al. 2003; Humbert et al. 2012). Celle-ci propose une approche orientée à la fois vers les impacts intermédiaires et les dommages permettant d'associer tous les résultats de l'ICV à seize catégories intermédiaires et à quatre indicateurs de dommage. La Figure 2 montre la structure globale d'IMPACT 2002+, faisant le lien entre l'ICV et les différents indicateurs. Une flèche pleine symbolise une relation connue et modélisée quantitativement basée sur les sciences naturelles. Les relations entre les catégories intermédiaires et de dommages qui sont suspectées, mais pas modélisées de manière quantitative sont indiquées par des flèches en traitsillés.

Interprétation

L'interprétation, quatrième phase de l'ACV, a pour objectif d'analyser les résultats, d'établir des conclusions, d'expliquer les limites et de fournir des recommandations en se basant sur les résultats des phases précédentes de l'étude. L'interprétation doit respecter les exigences décrites dans la définition des objectifs et du champ de l'étude et tenir compte des contraintes relatives aux hypothèses posées, ainsi qu'à l'incertitude des données employées et du modèle d'évaluation des impacts.

Références

Humbert S, De Schryver A, Margni M and Jolliet O (2012). "IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version Q2.2 (version adapted by Quantis)". Quantis, Lausanne, Switzerland. Available at: <http://www.quantis-intl.com/impact2002>

IPCC (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change's Fourth Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/>.

ISO 14040 (2006). Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

ISO 14044 (2006). Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003). "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology". International Journal of Life Cycle Assessment 8, 6: 324-330.

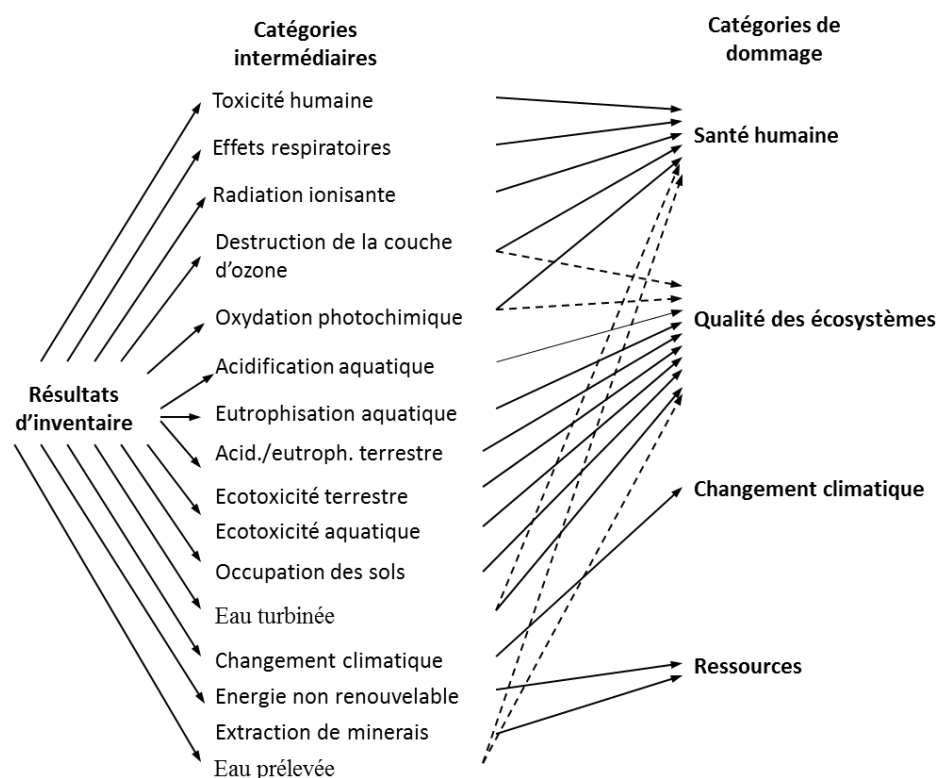


Figure 2 : Schéma global de la méthode IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al. 2003 ; Humbert et al. 2012).

Changements climatiques (kg CO₂-eq) (CC)

Cet indicateur est calculé sur la base du potentiel de réchauffement global (GWP) sur 100 ans de divers gaz à effet de serre tel que prescrit par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007). Les substances connues pour contribuer au réchauffement planétaire sont ajustées selon leur GWP, exprimé en kilogrammes de dioxyde de carbone (CO₂) équivalents. Parce que l'absorption et l'émission de CO₂ à partir de sources biologiques peut souvent conduire à des interprétations erronées des résultats, il n'est pas rare d'exclure ce CO₂ biogénique lors de l'évaluation des GWP. Conformément à la recommandation du Publicly Available Standard

(PAS) 2050 pour le calcul de l'empreinte carbone, l'absorption et l'émission de CO₂ biogénique ne sont pas comptabilisées. Afin de tenir compte de l'effet de sa dégradation en CO₂, le GWP du méthane (CH₄) d'origine fossile est fixé à 27.75 kg CO₂-eq/kgCH₄, et celui du méthane d'origines biogénique ou non spécifiée est fixé à 25 kg CO₂-eq/kgCH₄.

Santé humaine (DALY)

Cette catégorie prend en compte les substances qui affectent les êtres humains de par leurs effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) ou respiratoires, ou qui induisent une augmentation des radiations UV par la destruction de la couche d'ozone. L'évaluation de l'impact global sur la santé humaine est réalisée suivant l'indicateur de dommages « *Human health* » de la méthode IMPACT 2002+, dans lequel la mortalité et la morbidité induites sont combinées dans un score exprimé en DALY (*Disablility-adjusted Life Years*).

Ressources (MJ) (R)

Cet indicateur traduit l'utilisation de ressources non renouvelables, énergétiques ou matérielles. Plus d'importance peut être accordée à certains matériaux en fonction de leur abondance et de leur difficulté d'acquisition. L'évaluation de l'impact global sur l'épuisement des ressources est réalisée suivant l'indicateur de dommages « *Resources* » de la méthode IMPACT 2002+, qui combine l'utilisation d'énergie primaire de sources non renouvelables et l'extraction de minerai. L'utilisation d'énergie primaire non renouvelable inclut la consommation de ressources fossiles et nucléaires, mais exclut les sources d'énergie renouvelables à toutes les étapes du cycle de vie. L'utilisation d'énergies non renouvelables pour la production d'énergie renouvelable est cependant prise en compte. L'extraction de minerai est une estimation de la quantité additionnelle d'énergie qui serait nécessaire pour en extraire une quantité donnée supplémentaire, du fait d'une accessibilité rendue plus difficile (basé sur la méthode Eco-indicateur 99). Cet indicateur est exprimé en mégajoules (MJ).

Annexe 5 Résultats indicateur Ressource



Annexe 6 Détails résultats indicateur santé humaine

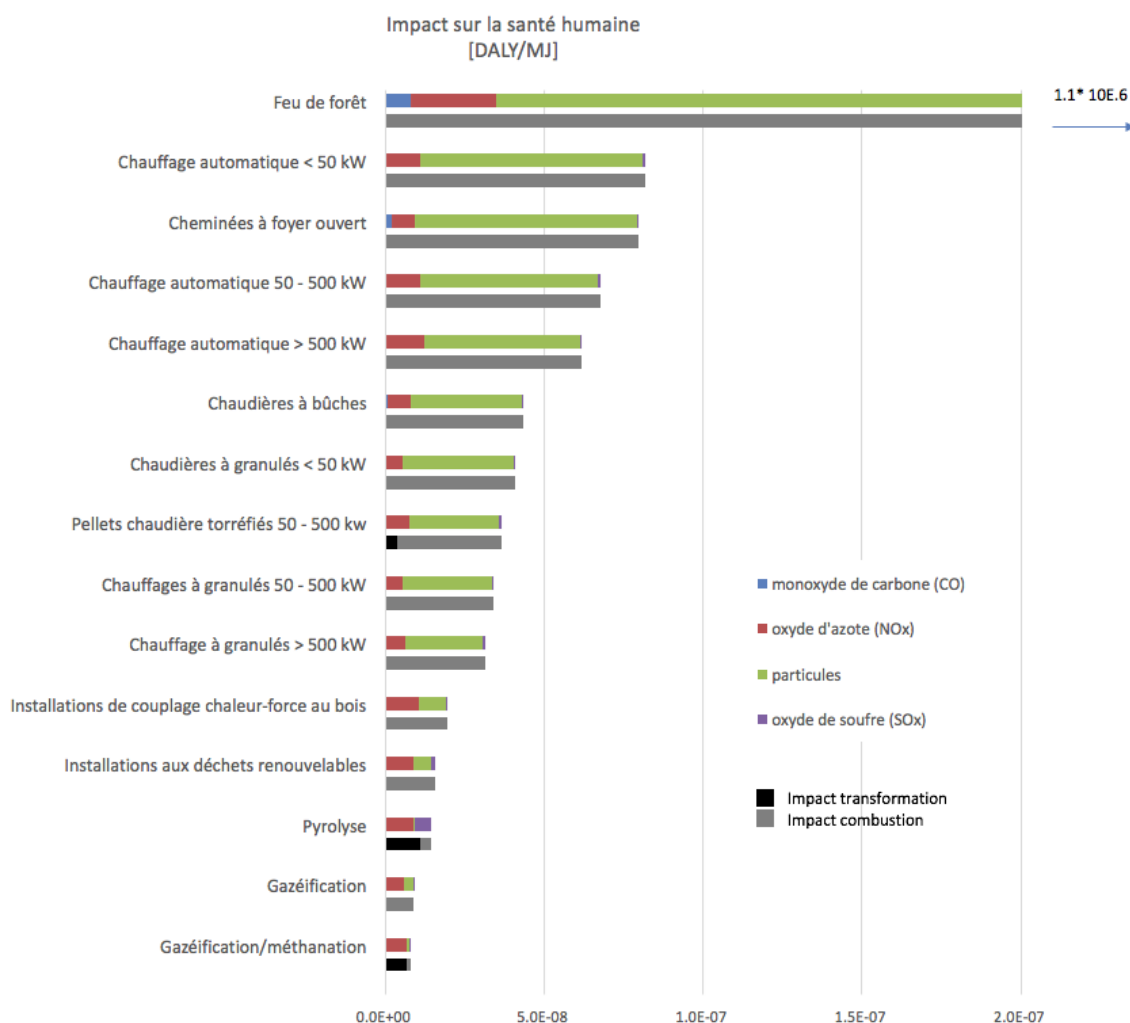


Figure 16 Impacts sur la santé humaine lors de la phase de combustion *émissions directes dans l'air*

Tableau 5 Valeur d'émissions directes dans l'air lors de la phase de transformation et combustion

	monoxyde de carbone (CO)		oxyde d'azote (NOx)		particules		oxyde de soufre (SOx)	
	Transformation	Combustion	Transformation	Combustion	Transformation	Combustion	Transformation	Combustion
	[mg/MJ]							
Cheminées à foyer ouvert		3'000.00		80.00		100.00		10.00
Chaudières à bûches		1'250.00		80.00		50.00		10.00
Chauffage automatique < 50 kW		600.00		120.00		100.00		10.00
Chaudières à granulés < 50 kW		200.00		60.00		50.00		10.00
Chauffage automatique 50 - 500 kW		500.00		120.00		80.00		10.00
Chauffages à granulés 50 - 500 kW		150.00		60.00		40.00		10.00
Chauffage automatique > 500 kW		300.00		135.00		70.00		10.00
Chauffage à granulés > 500 kW		150.00		70.00		35.00		10.00
Installations de couplage chaleur-force au bois		100.00		120.00		12.00		10.00
Installations aux déchets renouvelables		100.00		100.00		8.00		20.00
Pellets chaudière torréfiés 50 - 500 kW	2.05	150.00	35.51	48.00	0.34	40.00	6.83	10.00
Gazéification/méthanation	99.65	2.90	60.54	12.90	1.59	0.10	0.12	0.50
Gazéification	0.14	53.00	1.18	67.00	0.01	4.00	0.04	0.50
Pyrolyse	28.70	8.00	62.50	35.00	0.50	0.25	90.00	7.00
Feu de forêt		10'751.69		303.22		1'534.23		N/A

Annexe 7 Tableaux et hypothèses pour l'analyse des coûts

Tableau 6 Hypothèses et données de base analyse des coûts d'une unité de pelletisation mobile

Calculé = Valeur calculée ou donnée porteur de projet	
Formule = Valeur basée sur les valeurs calculées	
Données de base	
PCI Bois entrée	3'339.00 kWh/t @ 30% Hu
Durée de fonctionnement	1'276.00 h/an
Masse de bois en entrée	1'939.89 t @ 30% Hu
Production de pellets total net	1'000.00 kg/h
Production de pellets total net	1'276.00 t/an
PCI pellets unité de pelletisation mobile	16.60 MJ/kg
Energie totale produite	5'883.78 MWh/an
Puissance de l'installation	5.08 MW
Taux d'intérêt	5% %
Durée de vie	12.00 ans
Prix de la matière première entrante	0.00 CHF/t
PCI pellets marché	17.64 MJ/kg
Prix pellets marché	406.70 CHF/tonne (TVA incl.)
Prix pellets marché	8.30 cts/kWh (TVA incl.)
Prix pellets marché	7.65 cts/kWh (Hors TVA)
Prix énergie pellets marché	11.47 cts/kWh (TVA incl.)

Tableau 7 Analyse des coûts d'une unité de pelletisation mobile

Coût d'investissement des installations	800'000.00	CHF
Investissement total des installations	800'000.00	CHF
Coût d'approvisionnement	68'172.00	CHF/an
Coût d'exploitation forestière	0.00	CHF/an
Coût du transport	68'172.00	CHF/an
Coût d'exploitation	289'661.33	CHF/an
Charges salariales	101'875.00	CHF/an
Frais de fonctionnement, entretien	85'526.00	CHF/an
Ammortissement	90'260.33	CHF/an
Assurances, autre	12'000.00	CHF/an
Coût de distribution	41'952.00	CHF/an
Coût du transport	41'952.00	CHF/an
Coût administratif	20'200.00	CHF/an
Frais de fonctionnement (bureaux, matériel, communication, etc.)	20'200.00	CHF/an
Total coûts de revient	419'985.33	CHF/an
Total coûts de revient	329.14	CHF/t pellets
Total coûts de revient	7.14	cts/kWh

Tableau 8 Hypothèses et données de base analyse des coûts d'une unité de torréfaction

Calculé = Valeur calculée ou donnée porteur de projet	
Formule = Valeur basée sur les valeurs calculées	
Données de base	
Capacité nominale	500.00 kg/h
Fonctionnement	7'690.00 h/an
Masse de bois en entrée	1'000.00 kg @ 30% Hu/h
Masse de bois en entrée	7'690.00 t @ 30% Hu/an
Masse totale de bois en entrée	5'383.00 t @ 0% Hu/an
Volume total en entrée	36'853.04 m3/an
PCI bois en entrée	3'339.00 kWh/t @ 30% Hu
Masse de bois en sortie (torréfiée)	496.00 kg/h @ 2.5% Hu
Puissance sortie	2'850.00 kw @ 2.5% Hu
ratio matière sortante/matière entrante	50% %
Production annuelle	3'814.24 t/an
Conversion énergétique	21'916.50 MWh/an
PCI produit torréfié	5.75 kWh/kg
Puissance	3.34 MW
Taux d'intérêt	5% %
Durée de vie	12.00 ans
PCI rémanents de coupe	2.65 kWh/kg @ 45% Hu
Masse entrante rémanents de coupe	3'845.00 t @ 45% Hu/an
Densité rémanents de coupe	0.25 t @ 45% Hu/MAP
Volume entrant rémanents de coupe	15'693.88 m3/an
Prix énergie plaquette marché	11.81 cts/kWh (TVA incl.)
PCI plaquette marché	3.47 kWh/kg

Tableau 9 Analyse des coûts d'une unité de torréfaction

Coût d'investissement des installations	2'500'000.00	CHF
Investissement total des installations	2'500'000.00	CHF
Coût d'approvisionnement	423'809.90	CHF/an
Coût d'exploitation forestière	147'412.14	CHF/an
Coût du transport (forêt --> unité de transformation)	276'397.76	CHF/an
Coût de production	782'063.53	CHF/an
Charges salariales	250'000.00	CHF/an
Frais de fonctionnement, entretien	175'000.00	CHF/an
Ammortissement	282'063.53	CHF/an
Assurances, autre	75'000.00	CHF/an
Coût de distribution	0.00	CHF/an
Coût du transport		CHF/an
Coût administratif	25'000.00	CHF/an
Frais de fonctionnement (bureaux, matériel, communication, etc.)	25'000.00	CHF/an
Total coûts de revient	1'230'873.43	CHF/an
Total coûts de revient	322.70	CHF/t plaquettes
Total coûts de revient	5.62	cts/kWh

Remarque :

Coût de distribution : Production ou vente du produit sur la site de production → pas de transport

Tableau 10 Hypothèses et données de base analyse des coûts d'une unité gazéification/méthanation

Calculé = Valeur calculée ou donnée porteur de projet	
Formule = Valeur basée sur les valeurs calculées	
Données de base	
PCI Bois entrée	3'339.00 kWh/t @ 30% Hu
Efficacité thermique	19.8% %
Efficacité électrique	3.0% %
Efficacité SNG	68.1% %
Valorisation thermique	661.12 kWh/t @ 30% Hu
Valorisation électrique	100.17 kWh/t @ 30% Hu
Valorisation bio-oil	2'274.19 kWh/t @ 30% Hu
Densité du bois	733.00 kg/m3 @ 30% Hu
Gisements convoités	73'580.98 m3/an
Gisements convoités	53'934.86 t @ 30% Hu
Conversion thermique	35'657.52 MWh/an
Conversion électrique	5'402.65 MWh/an
Conversion SNG	122'658.28 MWh/an
Conversion totale énergétique	163'718.45 MWh/an
Nb d'heures de fonctionnement	7'690.00 h/an
Taux d'intérêt	5% %
Durée de vie	15.00 ans
Puissance	23 MW
Données de base revenu	
Prix du gaz sur le marché	7.40 cts/kWh
RPC électricité énergie renouvelable (biomasse)	
Production totale	139'866.00 MWh
Rétribution totale	28'400'000.00 CHF
Prix du marché + fond RPC	20.31 cts/kWh
Prix électricité	
Utilisation du réseau	10.48 cts/kWh
Energie	7.67 cts/kWh
Redevances publiques	2.00 cts/kWh
Taxe d'encouragement	0.60 cts/kWh
Total	20.75 cts/kWh
Prix électricité avec RPC	27.98 cts/kWh

Tableau 11 Analyse des coûts d'une unité gazéification/méthanation

Coût de revient	Scénario min	Scénario max	Scénario moyen	
Coût d'investissement des installations	29'500'000.00	51'400'000.00	40'450'000.00	CHF
Investissement total des installations	29'500'000.00	51'400'000.00	40'450'000.00	CHF
Frais d'ingénierie, génie civil, place de stockage, etc.				
Coût d'approvisionnement	6'254'383.52	6'254'383.52	6'254'383.52	CHF/an
Coût d'exploitation forestière	3'973'373.06	3'973'373.06	3'973'373.06	CHF/an
Coût du transport (forêt --> unité de transformation)	2'281'010.46	2'281'010.46	2'281'010.46	CHF/an
Coût de production	9'022'666.81	11'132'562.90	10'077'614.85	CHF/an
Charges salariales	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Frais de fonctionnement, entretien	6'180'569.32	6'180'569.32	6'180'569.32	CHF/an
Ammortissement	2'842'097.48	4'951'993.58	3'897'045.53	CHF/an
Assurances, autre	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Coût de distribution	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Coût du transport	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Coût administratif	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Frais de fonctionnement (bureaux, matériel, communication, etc.)	0.00	0.00	0.00	CHF/an
Total coûts de revient	15'277'050.33	17'386'946.43	16'331'998.38	CHF/an
Total coûts de revient	93.31	106.20	99.76	CHF/MWh
Total coûts de revient	9.33	10.62	9.98	cts/kWh

Comparaison avec le marché

Revenu net chaleur	2'638'657	CHF/an
Revenu net électricité	1'097'017	CHF/an
Revenu net SNG	9'076'712	CHF/an
Total revenu net	12'812'386	CHF/an
Total revenu net	7.83	cts/kWh

Remarque :

Les charges salariales sont considérées dans les frais de fonctionnement, entretien

Tableau 12 Hypothèses et données de base analyse des coûts d'une unité de pyrolyse

Calculé = Valeur calculée ou donnée	
Formule = Valeur basée sur les valeurs calculées	
Données de base coût de revient	
PCI Bois entrée	3'339.00 kWh/t @ 30% Hu
Efficacité thermique	21.1% %
Efficacité électrique	2.0% %
Efficacité bio-oil	67.5% %
Valorisation thermique	704.27 kWh/t @ 30% Hu
Valorisation électrique	66.32 kWh/t @ 30% Hu
Valorisation bio-oil	2'254.74 kWh/t @ 30% Hu
PCI bio-oil	17.00 MJ/kg
Densité bio-oil	1'175.00 kg/m3
Densité du bois	733.00 kg/m3
Gisements convoités	65'000.00 m3/an
Gisements convoités	47'645.00 t @ 30% Hu
Conversion thermique	33'554.90 MWh/an
Conversion électrique	3'159.62 MWh/an
Conversion bio-oil	107'426.94 MWh/an
Conversion bio-oil	26'730'349.58 l/an
Conversion totale énergétique	144'141.45 MWh/an
Rendement chaudière Pierre-de-Plan	87.5% %
Energie finale produite	126'123.77 MWh/an
Taux d'intérêt	5% %
Durée de vie	15.00 ans
Nb d'heures de fonctionnement	7'690.00 h/an
Puissance	20.69 MW
Données de base revenu	
Prix du gaz sur le marché	7.40 cts/kWh
RPC électricité énergie renouvelable (biomasse)	
Production totale	139'866.00 MWh
Rétribution totale	28'400'000.00 CHF
Rétribution	20.31 cts/kWh
Prix électricité	
Utilisation du réseau	10.48 cts/kWh
Energie	7.67 cts/kWh
Redevances publiques	2.00 cts/kWh
Taxe d'encouragement	0.60 cts/kWh
Total	20.75 cts/kWh
Prix électricité avec RPC	27.98 cts/kWh

Tableau 13 Analyse des coûts d'une unité de pyrolyse

Coût de revient

Coût d'investissement des installations	35'000'000	CHF
Investissement total des installations (unité de production de la bio-c	22'800'000.00	CHF
Frais d'ingénierie, génie civil, place de stockage, bâtiment, etc.	12'200'000.00	
Coût d'approvisionnement	5'500'000.00	CHF/an
Coût d'exploitation forestière	3'500'000.00	CHF/an
Coût du transport (forêt --> unité de transformation)	2'000'000.00	CHF/an
Coût de production	7'121'980.07	CHF/an
Charges salariales, entretien et assurances	2'750'000.00	CHF/an
Frais de fonctionnement, entretien		
Ammortissement	3'371'980.07	CHF/an
Assurances, autre	1'000'000.00	CHF/an
Coût de distribution	500'000.00	CHF/an
Coût du transport de la bio-oil (unité de transformation - Pierre de Pla	500'000.00	CHF/an
Coût administratif	0.00	CHF/an
Frais de fonctionnement (bureaux, matériel, communication, etc.)	0.00	CHF/an
Total coûts de revient	13'121'980	CHF/an
Total coûts de revient	101.15	CHF/MWh
Total coûts de revient	10.12	cts/kWh

Revenu

Revenu net chaleur	2'483'062	CHF/an
Revenu net électricité	883'907	CHF/an
Revenu net bio-oil	7'949'593	CHF/an
Total revenu net	11'316'563	CHF/an
Total revenu net	7.85	cts/kWh

Remarque :

Les frais de fonctionnement sont considérés dans les charges salariales, entretien et assurances

Annexe 8 Mix électrique et mix thermique

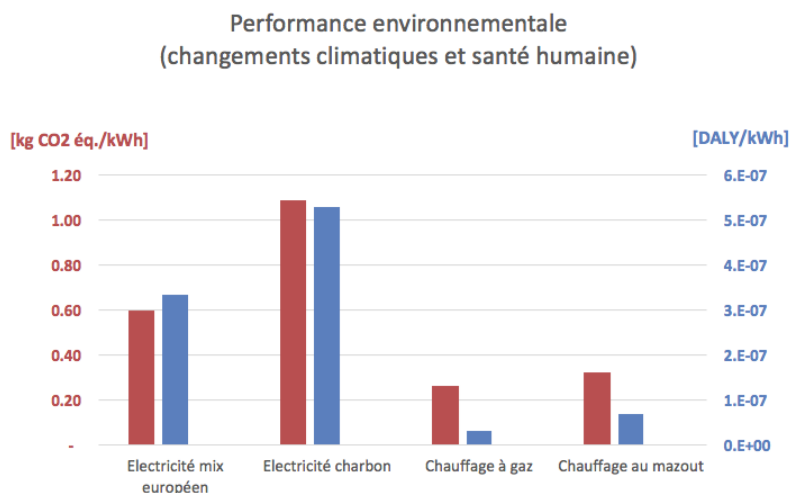


Figure 17 Empreinte environnementale de différents mix électrique et mix chaleur

Commentaire sur le choix du mix électrique

Le mix d'électricité utilisé est, en général, celui de l'union européenne de l'électricité, le European Network of Transmission System Operators for Electricity (e.n.t.s.o.e), union à laquelle la Suisse appartient. La raison en est que le réseau européen est fortement interconnecté et les échanges internationaux constants. La consommation à un endroit donné influence tout le marché européen de l'électricité : par exemple, une variation de consommation en Suisse n'aura pas de conséquence directe sur les producteurs suisses, mais sera absorbée par l'ensemble des producteurs suisses et européens selon des mécanismes de marché. A court terme, ces variations sont en effet principalement absorbées en régulant la puissance des centrales thermiques à gaz et à charbon en Europe afin de s'adapter à la demande, et dans une moindre mesure par les centrales hydrauliques. L'exemple montre que l'utilisation des mix électriques nationaux au sein d'un marché électrique européen interconnecté ne correspond pas à une réalité environnementale et scientifique, mais uniquement politique. En effet, la même activité située dans les villes voisines de Strasbourg et de Karlsruhe, de part et d'autre du Rhin, devrait prendre en compte une fois le mix électrique français (110 g CO₂-eq/kWh) et une fois le mix allemand (720 g CO₂-eq/kWh). Un facteur 7 est introduit alors que la pollution réelle de ces deux activités est identique. C'est la raison pour laquelle le mix européen est utilisé dans cette étude.

Tableau 14 Valeurs d'émission de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie primaire non-renouvelable pour différents mix électriques. Le mix UCTE est utilisé pour cette étude. Les autres mix électriques sont donnés en guise de comparaison.

Mix électrique	g CO ₂ -eq/kWh	MJ/kWh
Mix européen (consommation/production)	597	12
Mix Suisse (production)	30	6
Mix Suisse (consommation)	138	9
Mix français (production)	106	13

Annexe 9 SWOT de l'atelier d'experts

SWOT – scénario 1:

Forces

- Multitude de petites installations, augmentation de l'autonomie énergétique, acceptation sociale, on vient chez les consommateurs
- Filière courte, peu d'intermédiaires, donc intéressant du point de vue économique et de l'acceptation sociale
- Economie grise (activité économique locale décentralisée qui se développe autour du bois de feu, propriétaires privés de forêts qui préparent du bois de feu), en tout cas pour ce qui concerne les plaquettes

Faiblesses

- Problèmes liés à la santé avec des systèmes moins optimisés du point de vue des émissions, des rendements (?)
- Grand nombre d'installations de plus petites tailles qui souffrent de l'économie d'échelle
- Mauvais rendement exergétique, valorisation de la chaleur à basse température
- Acheminement de la ressource et du combustible démultipliés
- Augmentation des nuisances (émissions, odeurs, bruits, camions, etc.) à proximité des populations

Opportunités

- Pendant une durée limitée, on peut laisser le marché se développer: développement du bois énergie et développement de l'exploitation forestière
- Acteur (contracting) qui a une approche plus rationnelle et qui a appris des erreurs du passé (projets de CAD/chaudières à bois au cours des 20-30 dernières années)
- Pas un gros projet à l'échelle d'une installation, pas obligé de garantir un approvisionnement pour amortir un investissement plus conséquent → Risque minimal de ce point de vue

Risques

- Remise en question de la durabilité de la ressource (indigène) ... Rapport BG dit qu'on est déjà presque à l'équilibre/à la limite ... Trouver le bois pour satisfaire la demande des nouvelles installations
- En laissant le marché se développer (développement du bois énergie et développement de l'exploitation forestière), on ne fait que repousser le problème dans le temps
- Réseaux CAD (sur-dimensionnement des réseaux, sous-dimensionnement des chaudières), risque financier (lié à une démarche politique à l'échelle locale)
- Difficulté à long terme d'équilibrer l'offre et la demande (lien avec la variabilité du prix des énergies substituées)

SWOT – scénario 2:

Forces

- Substitution du combustible fossile pour la chaleur
- Faisabilité facile, technologie disponible, coûts modérés
- Flexibilité: Scalable, les systèmes peuvent être petits, adaptabilité (éviter la concurrence avec les matériaux)
- Facilité d'explication et de communication

Faiblesses

- Rendement pas très haut pour ces installations
- Pas une production d'électricité très importante (rendement 15 à 20% ou 40% (optimiste))
- Chaleur utilisée uniquement pour 2'000 à 3'000 heures par année, à moins d'avoir à côté une installation demandeur d'énergie
- Manque d'infrastructure pour le chauffage à distance
- Ne s'inscrit pas dans la volonté de réduction de la politique 2050
- Pas de maximisation de la production d'électricité
- Acceptation sociale à évaluer en ville
- Torréfaction = perte d'énergie et de rendement
- Beaucoup d'émissions en centre ville

Opportunités

- Test d'une nouvelle technologie (ORC) – R&D
- Possibilité de stocker de l'énergie

Risques

- Pour l'ORC = une nouvelle technologie

SWOT – scénario 3:

Forces

- Possibilité de faire de la cogénération – produire de l'électricité au bon moment
- Meilleur efficacité, mais surtout grâce à la gazéification
- Flexibilité sur l'utilisation du produit (en particulier sur le gaz)
- Plus de production d'électricité, plus en ligne avec les scénarios énergie 2050
- Plus de flexibilité sur la localisation, mais pas d'utilisation de la chaleur résiduelle

Faiblesses

- La pyrolyse est une faiblesse et pas tellement de sens – efficacité énergétique est basse – huile de la pyrolyse est instable (post-traitement obligatoire) et pas de mélange avec le mazout et les émissions sont importantes
- Pas économiquement viable
- Grosse difficulté liée à l'acceptation sociale de grosses installations

Opportunités

- Potentiellement, une opportunité de stocker beaucoup d'énergie
- Beaucoup mieux d'avoir qu'une seule installation, à priori gazéification
- Pyrolyse catalytique
- Utilisation de la chaleur résiduelle de la gazéification et de la pyrolyse pour une autre industrie?

Risques

- Il faut une grosse installation pour limiter les risques économiques
- Une ou deux grandes installation = risques d'avoir un investissement non rentable
- Pour la gazéification, il faudrait une taille très élevée pour la rentabilité (20 MW?)
- Pertes d'emplois

SWOT – scénario 4:

Forces

- Utilisation optimale d'un point de vue énergétique
- Meilleur contrôle (petits nombres d'installations gérés par des professionnels)
- Diversification des services proposés (chaleur, carburant/mobilité, électricité)
- Offre une solution par rapport à une application où les alternatives sont limitées (transport/mobilité)
- Optimisation de la valorisation énergétique

Faiblesses

- Acceptation sociale de l'installation (grande taille), aménagement du territoire
- Taille critique du marché par rapport aux technologies envisagées ? Economie d'échelle
- Substitution limitée dans le secteur de la mobilité

Opportunités

- Augmenter l'indépendance énergétique
- Développement économique

Risques

- Risque d'affecter la durabilité de la ressource (appauvrissement des sols)
- Acceptation sociale (d'exploiter plus → « trop de machines en forêt », « vous coupez trop de bois »)
- Prix du bois (concurrence avec les filières traditionnelles bâtiment/mobilier)
- Plus grosses installations, plus grand danger vis-à-vis de la pérennité de la ressource
- Impact sur les installations existantes (concurrence sur la ressource)

Annexe 10 Stratégie énergétique 2050

Tableau 15 Besoin d'énergie finale actuelle (année 2010) et future (année 2050) et potentiel ressource bois du canton de Vaud

	Ressource bois [t anhydre/an]	Energie [GWh/an]
Besoins énergie finale 2010 – Vaud	-	19'400
Besoins énergie finale PPA 2050 – Vaud	-	15'200
Besoins énergie finale NPE 2050 – Vaud	-	10'400
Ressource bois totale disponible – Vaud	550'000	2'900 ¹⁴
Bois énergie actuel total – Vaud	175'000	900 ¹⁵
Bois énergie potentiel total – Vaud	280'000	1'500 ¹⁶

PPA : Poursuite de la politique actuelle

NPE : Nouvelle politique énergétique

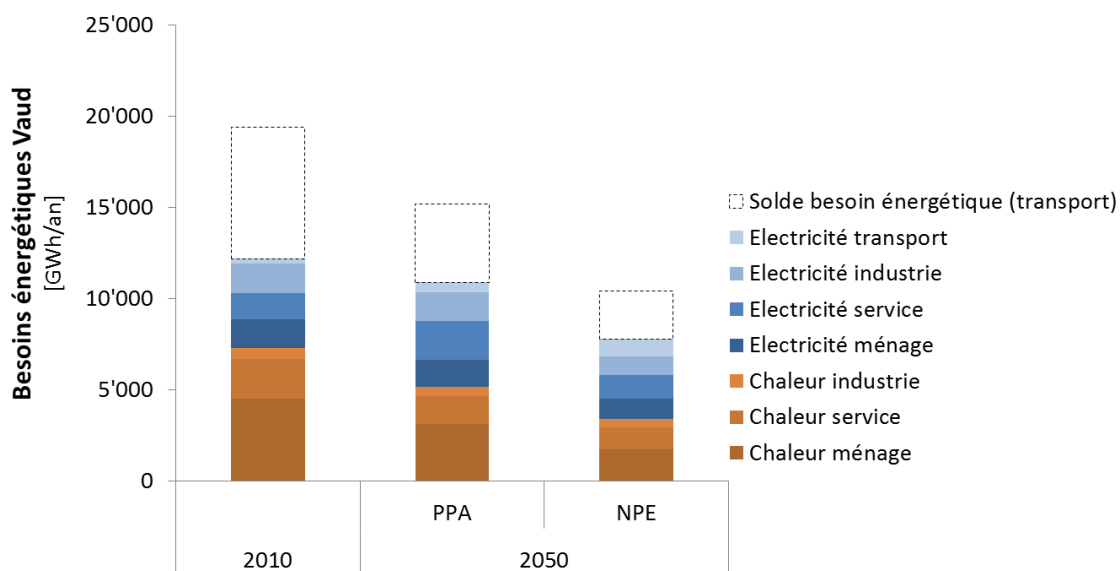


Figure 18 Besoin d'énergie finale actuelle (année 2010) et future (année 2050) du canton de Vaud basé sur la stratégie énergétique 2050 de la Confédération

¹⁴ Contenu énergétique de la ressource biomasse

¹⁵ Contenu énergétique de la ressource biomasse

¹⁶ Contenu énergétique de la ressource biomasse

Annexe 11 Liste des références

1. Références bibliographiques

Domaine	Sujet	Titre	Auteur	Année	Informations collectées	
Technologies	Plaquette	Swiss center for life cycle inventories	Base de données Ecoinvent 2.2	V 2.2	Performances environnementales	
		Développement du bois énergie - Installations de chauffage	Bonnard et Gardel Office fédérale de la statistique	2013 2014	Evolution des installations chauffage à bois Prix plaquettes	
	Unité de pelletisation mobile	Proxipel, business plan (confidentiel)	Richard Pfister		2014	Performances environnementales
		www.prixpellets.ch			2014	Prix du pellet
	Torréfaction	Environmental impacts of torrefied wood pellet production	Miktech		2012	Performances environnementales, émissions directes dans l'air
		Développement et pilote d'un système intégré de torréfaction de biomasse – phase laboratoire	Heig-vd		2013	Performances énergétiques
		Projet C-TOP, rapport technique	Heig-vd		2010	Performances environnementales
		Combined Torrefaction and Densification for Biomass based materials	P. C. A. Bergman et al.		2010	Performances environnementales, broyage
	Gazéification/méthanation	Perspectives de l'utilisation du biogaz distribué dans le réseau de gaz naturel	LENI/EPFL		2011	Performances environnementales
		Thermo-economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass	Martin Gassner, François Maréchal		2009	Analyse des coûts
		Synthetic biofuels http://www.chavalon.ch/	Arnaud Dauriat et al.		2008	Performances environnementales Performances énergétiques CCGT
	Pyrolyse	Rapport de faisabilité : Production et utilisation de la bio-oil	Planair		2013	Performances énergétiques
		Facteurs d'émissions pour chauffage	OFEP		2008	Emissions directes dans l'air
		Life-Cycle Assessment of Pyrolysis Bio-Oil Production	Phillip Steele et al.		2012	Performances environnementales
Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils		Jani Lehto et al.		2013	Performances environnementales	
Général	Statistique globale suisse de l'énergie 2013		OFEN	2013	Prix du marché du gaz	
		Rétribution à prix coûtant du courant injecté : Rapport trimestriel du deuxième trimestre 2014	Fondation RPC	2014	Analyse des coûts	
	Rapport annuel du Surveillant des prix	Droit et politique de la concurrence (RPW/DPC)	2013	Prix du gaz et électricité		
	www.prixgaz.monsieur-prix.ch	Département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche (DEFR)	2014	Prix du gaz		
	Le guide pour l'achat écologique d'une voiture	Association Transports et Environnement	2014	Consommation véhicules gaz		
	Swiss center for life cycle inventories	Base de données Ecoinvent 2.2	V 2.2	Modélisation impacts environnementaux		
	IMPACT 2002+ vQ.2.2	Humbert et al.	2012	Modélisation impacts environnementaux		
	Manuel de planification chauffages au bois	QM	2010	Performances énergétiques		
	Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models	S. K. Akagi et al.	2011	Emissions directes dans l'air		
	Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050	Prognos	2012	Perspectives énergétiques		
Biomass energy center	DEFRA	2011	Densité et PCI ressource bois forêt			
Rapport annuel	cemsuisse	2012	Bois usagé - cimenterie			
Holzenergie-Symposium: Potenzial und Technik zur Holzenergie-Nutzung	Thomas Nussbaumer	2010	Performances environnementales, émissions directes dans l'air			

2. Liste de contacts (hors atelier d'experts / partenaires projet)

Domaine	Sujet	Détail contact
Technologies	Unité de torréfaction mobile	Richard Pfister, Proxipel
	Torréfaction	Jean-Bernard Michel et McCormick Mark, Haute École d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (heig-vd)
	Gazéification/méthanation	-
	Pyrolyse	Nicolas Wälti, Services industriels de Lausanne (SiL) et Adriano Bartolomai, CADQUEST
	Plaquettes / pellets	Richard Golay, Energie-bois Suisse Moritz Dreher, Energie-bois Suisse