Servicios Energéticos Integrales Ltda.

E4tech

Centre de séchage du bois de chauffage au Chili

Phase 1 – Analyse techno-économique et stratégique

Rapport final

7 février 2010

Version 10-0

Auteurs:
Kathrine Vad – E4tech
François Vuille – E4tech
Ausilio Bauen – E4tech
Miguel Marquéz – SEI

Contact:
François Vuille
E4tech
Avenue Juste-Olivier 2
1006 Lausanne
Suisse

françois.vuille@e4tech.com

Table des matières

1 RESUME 1

2 LE SECHAGE DU BOIS DE CHAUFFAGE – CONTEXTE INTERNATIONAL 4

2.1 POURQUOI SECHER LE BOIS? 4

2.2 COMMENT SECHER LE BOIS? 5

2.2.1 Quelles techniques de séchage existent? 5
2.2.2 Quelle technique de séchage choisir? 7

2.3 ETUDE DE CAS 8

2.3.1 Le séchage du bois de chauffage en France 8
2.3.2 Le séchage du bois de chauffage en Nouvelle-Zélande 10
2.3.3 Le séchage du bois de chauffage aux Etats-Unis 11
2.3.4 Problématique dans les pays en développement 13

2.4 LEÇONS A TIRER POUR LE CHILI 13

2.4.1 L'utilisation du bois pour la production de chaleur 13
2.4.2 Problématique de la pollution aux particules fines 13
2.4.3 Les législations mises en place 14
2.4.4 Le Chili – Problématique et solution unique 14

3 MODELE TECHNO-ECONOMIQUE D'UN CENTRE DE SECHAGE AU CHILI 16

3.1 OBJECTIFS 16

3.2 PARAMETRES D'ENTREE 16

3.3 CALCULS 22

3.3.1 Temps de séchage 22
3.3.2 Dimensionnement des installations 23
3.3.3 Investissements 24
3.3.4 Coûts opérationnels 24
3.3.5 Revenus 25

3.4 RESULTATS 25

4 ANALYSE ECONOMIQUE 26

4.1 SCENARIO CONSIDERE 26

4.2 COUTS DE PRODUCTION 26

4.3 ECONOMIES D'ECHELLE 27

4.4 ANALYSE DE SENSIBILITE 28

4.4.1 Prix du terrain 29
4.4.2 Prix de l'électricité 29
4.4.3 Réduction du temps de séchage 30
4.4.4 Scénario optimiste pour le séchage forcé à toiture opaque 31

5 ANALYSE FINANCIERE 33

5.1 TAUX DE RENTABILITE INTERNE 33

5.2 PLUS-VALUE DU CENTRE DE SECHAGE 34

6 UNITE PILOTE 36

6.1 OBJECTIFS DE L'UNITE PILOTE 36

6.2 REGION RETENUE 36

6.3 SITE RETENU 37

6.4 TECHNOLOGIE RETENUE – TOITURE OPAQUE 37

6.5 DIMENSIONNEMENT 38

6.6 RENTABILITE DE L'UNITE PILOTE 40

6.7 BUSINESS PLAN 40

6.8 INGENIERIE DE DETAIL 40

7 MODELE D'AFFAIRES 41

7.1 OBJECTIFS DU MODELE D'AFFAIRES 41

7.2 MODELE DE PROPRIETE 41

7.3 PRINCIPES DU MODELE D'AFFAIRES 44

7.3.1 Approvisionnement en bois humide 44
7.3.2 Distribution du bois sec 44

7.4 SUBSIDES 45

7.4.1 Pourquoi subsidier? 45
7.4.2 Comment subsidier? 46

7.4.3 Combien subsidier? 46

8 POTENTIEL D'EVOLUTION DES CENTRES DE SECHAGE 48

8.1 TECHNOLOGIE TOITURE NOIRE AVEC CONVECTION NATURELLE 48

8.2 FABRICATION DE PELLETS 48

8.3 SERVICE ADDITIONNELS 48

9 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CENTRES DE SECHAGE 49

9.1 IMPACT SUR LA DURABILITE DE L'EXPLOITATION FORESTIERE 49

9.2 IMPACT SUR LE NIVEAU DE POLLUTION AUX PARTICULES FINES 49

9.3 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'UNITE PILOTE 49

10 IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE DES CENTRES DE SECHAGE 50

10.1 IMPACT SUR LES ACTEURS DE L'INDUSTRIE DU BOIS 50

10.2 IMPACT SOCIETAL 50

10.3 INDEPENDANCE ENERGETIQUE 50

11 GESTION DES RISQUES 51

12 REFERENCES 54

Liste des figures

Figure 1. Pouvoir calorifique inferieur (PCI) du bois en fonction de son taux d'humidite. 4

Figure 2. Evolution du pouvoir evaporatoire de l'air en fonction de sa temperature (Prefecture de la region Midi-Pyrenees, 2006). 5

Figure 3. Le sechage de bois a l'air libre (USDA, 1999). 7

Figure 4. Le sechage du bois sous abri (USDA, 1999). 7

Figure 5. Le sechage naturel force du bois avec ventilateurs (USDA, 1999). 7

Figure 6. Principe general du capteur solaire par toiture opaque 7

Figure 7. Un exemple de serre sechoir. 7

Figure 8. Repartition des especes forestieres françaises. 8

Figure 9. Vue d'ensemble des parametres du modele qui ne sont pas influences par la technologie de sechage retenue. 17

Figure 10. Vue d'ensemble des parametres qui varient en fonction de la technique de sechage choisie (premiere partie). 18

Figure 11. Vue d'ensemble des parametres qui varient selon la technologie de sechage (deuxieme partie). 19

Figure 12. Vue d'ensemble du modele de dimensionnement des infrastructures du centre de sechage. 20

Figure 13. Vue d'ensemble de la partie financiere du modele techno-economique. 21

Figure 14. Cout de production de 1kWh de bois sec par technologie de sechage et par poste de depense pour un centre de sechage d'une capacite annuelle de production de bois sec d'environ 10'000 steres (=1 MW_{TH}) 27

Figure 15. Cout de production de bois sec en fonction de la capacite de production annuelle du centre de sechage et de la technologie consideree. 28

Figure 16. Evolution du cout de production de bois sec en fonction du prix du terrain. 29

Figure 17. Evolution du cout de production de bois sec en fonction du prix de l'electricite. 30

Figure 18. Evolution du cout de production de bois sec en fonction de la reduction du temps de sechage obtenue par le sechage force (compare au temps de sechage naturel). 31

Figure 19. Cout de production de 1kWh de bois sec par technologie de sechage et par poste de depense pour un centre de sechage d'une capacite annuelle de production de bois sec d'environ 10'000 steres (=1 MW_{TH}) 31

Figure 20. Taux de rentabilite interne des centres de sechage par technologie de sechage et capacite de production. 34

Figure 21. Comparaison entre les prix de vente du bois sec et humide sur le marche chilien et le prix de revient du bois sec produit par le centre de sechage a sechage naturel abrite 35

Figure 22. Region prevue pour l'implantation de l'unite pilote. 37

Liste des tableaux

TABLEAU 1. RESUME DE LA CONSOMMATION BIOMASSIQUE ACTUELLE ET DU POTENTIEL DE PRODUCTION FUTURE AUX ETATS-UNIS (US DOE ET USDA, 2005). 12

TABLEAU 2. RECAPITULATIF DES EQUIPEMENTS NECESSAIRES POUR LE SECHAGE DU BOIS PAR TECHNOLOGIE DE SECHAGE POUR UNE PRODUCTION ANNUELLE DE 10'000 STERES (=1 MW_{TH}). 24

TABLEAU 3. VALEURS RETENUES POUR LES PARAMETRES TECHNIQUES DANS LE SCENARIO DE BASE. 26

TABLEAU 4. VALEURS RETENUES POUR LES PARAMETRES ECONOMIQUES ET FINANCIERS DANS LE SCENARIO DE BASE. 26

TABLEAU 5. PLAN DE FINANCEMENT POUR L'ENSEMBLE DU PROJET REPIC DE REALISATION D'UNE UNITE PILOTE DE SECHAGE DU BOIS DE CHAUFFAGE AU CHILI. 39

TABLEAU 6. TAILLE DES PRINCIPALES INSTALLATIONS DE L'UNITE PILOTE DE SECHAGE DU BOIS. 39

TABLEAU 7. PRINCIPAUX POSTES D'INVESTISSEMENT 40

TABLEAU 8. COMPARAISON DES MODELES DE PROPRIETE POSSIBLE POUR LES CENTRES DE SECHAGES. 42

TABLEAU 9. COMPARAISON DES FORMES DE SOUTIEN ETATIQUE POUR LE CENTRE DE SECHAGE 46

TABLEAU 10. IDENTIFICATION DES VULNERABILITES DU PROJET ET DES MESURES DE MITIGATION. 51

Acronymes utilisés dans ce rapport

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AMPASEL	Association de Mesure de la Pollution Atmosphérique de Saint-Etienne et du département de la Loire
ARPE	Agence Régionale Pour l'Environnement
CO	Monoxyde de carbone
COV	Composés organiques volatiles
CTBA	Centre technique du bois et de l'ameublement
IFN	Inventaire Forestier National
Mtep	Million de tonnes d'équivalent pétrole
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PM_{10}	Particules fines d'un diamètre inférieur ou égal à 10 µm
PRELUDDE	Programme REgional de LUtte contre l'effet de serre et pour le Développement DurablE
TRI	taux de rentabilité interne
USDA	United States Department of Agriculture (Ministère US de l'Agriculture)
US DOE	United States Department of Energy (Ministère US de l'Energie)
US EPA	United States Environmental Protection Agency (agence américaine de protection de l'environnement)

1 Résumé

Contexte. Aujourd'hui la biomasse couvre environ 10% (50 EJ) de notre mix énergétique primaire, dont près de 80% (39 EJ) est du bois brûlé pour la production de chaleur. Une part importante de ce bois est brûlé humide dans des poêles de faible efficacité énergétique, engendrant des problèmes graves de pollution aux particules fines. Le Chili souffre de manière particulièrement marquée de cette problématique.

Législation. Le marché du bois de bûche étant informel dans la plupart des pays, peu de mesures législatives efficaces permettent d'assurer un séchage du bois avant combustion. Par conséquent, la plupart des politiques en vigueur visent en priorité à améliorer l'efficacité énergétique des installations de combustion, et à informer les consommateurs des avantages économiques, énergétiques et de santé publique de la combustion du bois sec. Dans le contexte de pollution aux PM10 particulièrement grave dans le sud du Chili, le développement de politiques publiques innovantes permettant d'augmenter de manière significative la part de bois sec sur le marché permettrait de réduire considérablement le coût social lié à la pollution aux particules fines. Il s'agit de trouver des mesures efficientes qui permettent de contourner la contrainte lié à la nature informelle du marché du bois de chauffe.

Objectifs. Cette étude vise principalement à étudier les conditions de viabilité technique et économique de centre de séchage du bois au Chili, et à effectuer des choix techniques et de dimensionnement en vue de la réalisation d'une unité pilote dans la région d'Osorno. En outre, l'étude vise également à discuter les mérites, les risques et les barrières des différents modèles d'affaires qui pourraient être implémentés, ainsi qu'à discuter de la pertinence d'un soutien publique aux centres de séchage. Finalement, l'étude a également pour objectif d'étudier les risques (techniques, économique, environnementaux, politiques) liés d'une part à la réalisation de l'unité pilote et d'autre au déploiement à plus large échelles de centres de séchage au Chili.

Technologies étudiées. 4 options techniques de séchage du bois humide ont été étudiées et leur performances techno-économiques comparées:

- séchage naturel abrité;
- séchage naturel forcé avec air ambiant pulsé;
- séchage naturel forcé avec chauffage d'appoint par panneaux solaires (solar loop);
- séchage naturel forcé avec chauffage d'appoint par toiture opaque (solar black roof).

Analyse économique. L'analyse a permis de conclure que:

- Le séchage naturel et la technologie *solar black roof* ont des coûts de production comparables, et nettement inférieurs à ceux des technologies *solar loop* et *air ambiant pulsé*.
- La taille optimale des centres de séchage se situent entre 1 et 2 MWth (capacité de 10'000-20'000 stères par années), permettant à la fois de bénéficier d'importantes économies d'échelle sans augmenter les coûts d'approvisionnement en bois humide.
- Les résultats sont très peu sensibles aux paramètres économiques à forte variabilité potentielle tels que prix du terrain, prix de l'électricité ou temps de séchage.
- Les centres de séchage permettent de produire du bois sec en dessous des prix du marché du bois humide. En outre, sous certaines conditions, les coûts de production du bois sec peut même être inférieur au prix d'achat du bois humide, si considéré par unité de contenu

énergétique. Il est donc possible de vendre du kWh de bois sec moins cher que le prix d'achat du kWh du bois humide tout en restant économiquement viable. Un paradoxe apparent qui démontre la plus-value extraordinaire que les centres de séchage peuvent apporter.

Analyse financière. Toutes les technologies de séchage sont rentables à partir de taille d'unité de 0.2-0.3 MW (2'000-3'000 stère/ans). Cependant, les retours sur investissement sont attractifs pour des tailles d'unité en dessus dès 0.5 MW, sauf pour l'approche solar loop dont les taux internes de rentabilité (TIR) restent faibles dans la gamme de taille réaliste (0.5-3mW). A titre d'exemple, une unité de 1MW (10'000 stères) dans le contexte d'Osorno offre des TIR de 12% (solar loop), 26% (air pulsé), 27% (black roof) et 42% (séchage naturel).

Unité pilote. La technique de séchage black roof a été retenue pour l'unité pilote. Cette option peut s'avérer compétitive avec le séchage naturel sous certaines conditions, tout en offrant un temps de séchage significativement plus court et un pouvoir calorifique du bois sec plus élevé (le séchage forcé permettant d'atteindre un taux d'humidité du bois sec 5-10% inférieur à celui obtenu par séchage naturel). En outre, cette option est innovante, techniquement simple et pourra aisément évoluer vers une solution 100% carbone-neutre (avec appoint photovoltaïque ou convection naturelle). Si l'unité pilote confirme les résultats de l'analyse techno-économique, elle permettrait de positionner le Chili en tant que pionnier dans le déploiement de cette technologie.

Modèle d'affaires. Le modèle d'affaire le plus pertinent est celui qui optimise les objectifs climatiques, économiques, et d'efficacité énergétique, tout en maximisant le taux de pénétration des centres de séchage. Différents modèles d'affaires et modèles de propriété ont été comparés et leur potentiel à atteindre les objectifs évalués.

Le modèle de propriété privé semble être le plus intéressant, pour autant qu'une forme de subside (subvention au capital) sous condition puisse être établit qui permettent d'instaurer certaines règles concernant la gestion opérationnelle, notamment en ce qui concerne le contrôle des type de bois entrant et le taux d'humidité résiduelle du bois sec produit. Ce modèle présente l'avantage de garantir un taux de déploiement très rapide des centres de séchage tout en offrant des conditions de marché particulièrement favorables permettant de rendre le séchage naturellement incitatif pour les producteurs.

Le modèle de coopérative de producteurs est également intéressant car il offre une plus-value économique aux communautés rurales. Par contre, ce modèle est difficile à initier par des instruments politiques et dépend plutôt de la volonté des producteurs.

Impact environnemental. Si correctement optimisés, les centres de séchages ne présentent pas d'impacts négatifs, tout en apportent trois plus-values environnementales très importantes:

- Réduction d'un facteur 2 à 4 de la pollution aux particules fines PM10 grâce à une transition de la combustion du bois humide vers du bois sec.
- Réduction du volume total de bois brûlés (grâce à une augmentation de l'efficacité énergétique) permettant de réduire de quelque 30% le volume de bois extrait des forêts
- Formalisation partielle du marché offrant un potentiel de contrôle par l'état du respect des autorisation des volumes et des types de bois extraits des forêts, ce qui n'est pas possible dans l'état actuel de marché informel.

Impact socio-économique. Les centres de séchage apportent deux bénéfices sociaux majeurs liés à la réduction des émissions de particules fine PM10:

- Réduction des maladies pulmonaires;
- Réduction de la facture de santé pour le secteur privé (correspondant à US$40 millions pour la ville d'Osorno qui compte quelque 400'000 habitants).

En outre, la réduction massive du volume de bois consommé grâce à une transition vers du bois sec permet d'économiser la ressource forestière, augmentant ainsi l'indépendance énergétique du pays.

Gestion des risques. L'analyse de risque indique que le projet de réalisation d'une unité pilote d'une part ne comporte pas de risques majeurs, et d'autre part que les risques identifiés bénéficient de mesure de mitigation permettant de limiter leur impact éventuel.

2 Le séchage du bois de chauffage – contexte international

2.1 Pourquoi sécher le bois?

Le séchage du bois a de nombreux avantages qui dépendent de son utilisation finale. Dans le cas de bois de construction, le séchage du bois permet de renforcer la dureté du bois et de diminuer la dégradation du bois due aux moisissures (USDA, 1999).

Dans le cas du bois de chauffage, le séchage réduit la densité du bois, et donc le coût de son transport. Par ailleurs, le séchage augmente le pouvoir calorifique du bois, et donc la quantité de chaleur utile qui peut être tirée de sa combustion. Comme le montre la Figure 1, le séchage du bois d'un taux d'humidité de 60% à un taux de 20% permet de gagner quelques 2'000 kWh_{th} par tonne de bois.

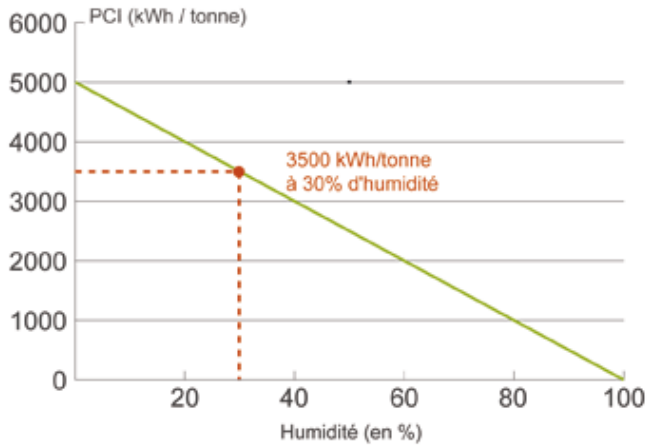

Figure 1. Pouvoir calorifique inférieur (PCI) du bois en fonction de son taux d'humidité[1].

Enfin, plus un bois est sec, meilleure est sa combustion et moins elle émet de polluants tels que particules fines (en particulier les particules très fines de diamètre inférieur à 1 µm), oxydes d'azote, monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatiles (COV), etc. La combustion de bois humide augmente d'un facteur 2 à 4 les émissions de polluants par rapport à celles du bois sec (AMPASEL et al., 2007).

A part le taux d'humidité, le taux d'émission de ces polluants dépend aussi de paramètres tels que:

- les caractéristiques du combustible (essence, taux de cendres, taux d'humidité, etc.);
- la nature du foyer (géométrie, distribution d'air, tirage, etc.);
- la qualité de fonctionnement (temps de séjour, excès d'air, charge de bois, etc.);
- les paramètres liés à l'installation.

Afin de réduire les émissions, il faut donc viser à avoir:

- une oxydation la plus complète possible à l'intérieur de la chambre de combustion;
- une température de combustion suffisamment élevée;
- un bon mélange air-combustible.

[1] Mission Régionale Bois Energie: http://www.ofme.org/bois-energie/combustible.php.

2.2 Comment sécher le bois?

2.2.1 Quelles techniques de séchage existent?

De nombreuses techniques sont utilisées aujourd'hui pour le séchage du bois. Dans tous les cas, l'idée est de permettre à l'eau contenue dans le bois d'être transférée à la surface puis évacuée par l'air ambiant qui se chargera en humidité. Deux paramètres principaux influencent de manière significative le temps de séchage:

- Une ventilation continue de l'air rend le séchage plus rapide car l'air saturé en vapeur d'eau est remplacé par de l'air non-saturé.
- Le chauffage de l'air ambiant augmente également la vitesse de séchage car l'air chaud a une capacité de stockage de la vapeur d'eau plus élevée à saturation que l'air froid et permet donc un pouvoir évaporatoire plus élevé (voir Figure 2).

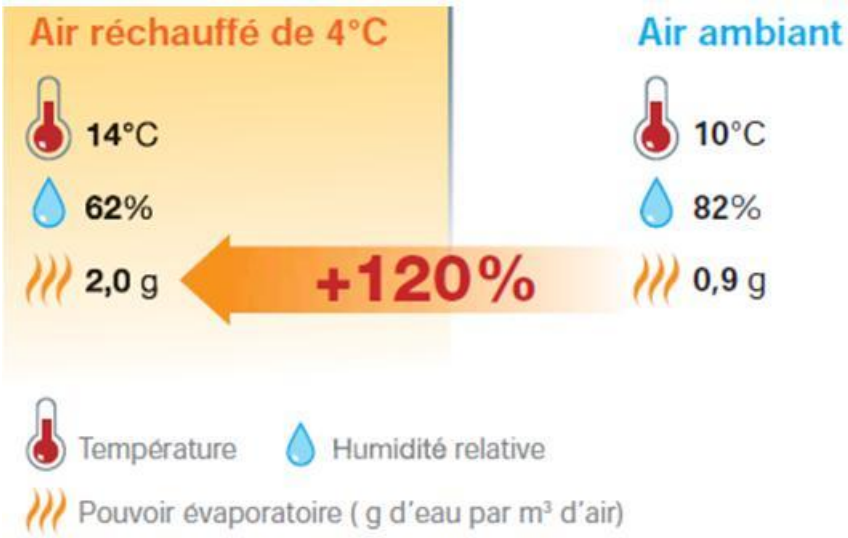

Figure 2. Evolution du pouvoir évaporatoire de l'air en fonction de sa température (Préfecture de la région Midi-Pyrénées, 2006).

Les principales techniques de séchage existantes sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Séchage naturel à l'air libre. Le séchage naturel à l'air libre est la technique traditionnelle de séchage du bois. Le bois est empilé à l'extérieur, sans protection contre les intempéries. La circulation naturelle de l'air atmosphérique permet le séchage du bois (voir Figure 3). Cette technique correspond au temps de séchage le plus long, entre 6 et 24 mois. Le temps réel de séchage dépend de nombreux paramètres tels que (liste non-exhaustive, pour plus de détail voir Section 3):

- climat local: le bois sèche moins vide dans des climats humides;
- type de bois séché: les bois durs sont en général moins perméables que les bois tendres (à cause de leur structure plus dense et plus complexe) et ils sèchent donc moins vite;
- la coupe: plus le rapport de surface extérieur du bois à sécher à son volume est grand, plus de séchage sera rapide.

Gutiérrez et al. (2009) évalue le temps de séchage du chêne à entre 6 et 8 mois dans la région d'Osorno, Chili. Le taux d'humidité du bois sec se situe entre 20 et 25% (USDA, 1999).

Séchage naturel abrité. Cette technique de séchage est la même que le séchage naturel à l'air libre sauf que le bois est abrité sous un toit le protégeant des intempéries tout en permettant une bonne aération naturelle (en général il s'agit d'un hangar sans murs, voir Figure 4). Le séchage abrité permet de mieux contrôler le séchage lors de longues périodes de pluies notamment, et donc de stabiliser le temps de séchage.

Séchage naturel forcé avec air pulsé. Dans cette approche, le bois est stocké dans un hangar fermé sur 3 côtés. La paroi opposée au côté ouvert contient des ventilateurs (voir Figure 5) dont l'air pulsé permet de réduire le temps de séchage de 15 à 30% en fonction de la puissance des ventilateurs et des conditions climatiques prédominantes (notamment vent, température moyenne, etc.) (CTBA, 2005; Gutiérrez et al., 2009).

Séchage naturel forcé avec appoint solaire thermique. Le principe de cette technique de séchage est d'utiliser la chaleur du soleil pour chauffer l'air qui sera ensuite circulé dans le hangar de séchage (fermé sur ses 4 côtés) puis extrait par des bouches d'aération. Plusieurs approches existent en fonction de la technologie de conversion de l'énergie solaire:

- **Capteur thermique par toiture opaque**. Dans cette approche, la toiture du hangar de séchage constitue le capteur. Elle est composée d'une double paroi avec une lame d'air interstitielle. La paroi extérieure est opaque et de couleur sombre pour absorber le rayonnement solaire. La paroi intérieur, souvent isolée et étanchéifiée pour limiter les pertes d'énergie, sert à canaliser l'air entre l'aspiration et la sortie du capteur (voir Figure 6). Une telle installation est souvent complétée par un chauffage d'appoint au fuel ou par pompe à chaleur pour permettre le séchage du bois pendant les périodes peu ensoleillées[2] (CTBA, 2005).
- **Panneaux solaires thermiques**. Dans ce cas, des panneaux solaires thermiques sont placés sur une partie du toit et permettent le réchauffement d'eau par le soleil. Par échangeur de chaleur, l'air du hangar est chauffé et ventilé dans le hangar.
- **Serres séchoirs.** Dans ce cas le séchoir n'est plus un hangar mais une serre (bâtiment en verre avec une structure en métal), servant à la fois de bâtiment de séchage, abritant les produits en cours de séchage, et de capteur solaire (voir Figure 7). Ce principe de séchoir est particulièrement développé par les allemands, avec différents séchoirs installés en particulier dans les pays chauds pour des produits tels que fruits, sciures de bois, etc.

La réduction du temps de séchage dépend particulièrement de la hausse de la température à l'intérieur du bâtiment et donc de l'ensoleillement. Par exemple, dans la région d'Osorno au Chili, on estime qu'une hausse de 4°C de l'air intérieur par rapport à l'air extérieur peut réduire le temps de séchage de 17%.

Séchage forcé à haute température. Cette technique consiste à placer le bois dans une chambre close et à y contrôler la température de l'air, le taux d'humidité et sa circulation afin de sécher le bois jusqu'à un taux d'humidité voulu. Ce taux d'humidité peut-être très bas, par exemple autour de 10% (USDA, 1999). Cette technique est principalement utilisée dans l'industrie du bois de construction, où le taux d'humidité après séchage doit être très bas.

[2] Pour ce projet, un chauffage d'appoint n'est pas envisagé, pour plusieurs raisons. D'abord, l'utilisation de ressources fossiles est exclue pour des raisons de durabilité. Ensuite, le coût d'investissement est trop élevé pour une installation de séchage au Chili. Pour plus d'information, voir Section 3.

Figure 3. Le séchage de bois à l'air libre (USDA, 1999).

Figure 4. Le séchage du bois sous abri (USDA, 1999).

Figure 5. Le séchage naturel forcé du bois avec ventilateurs (USDA, 1999).

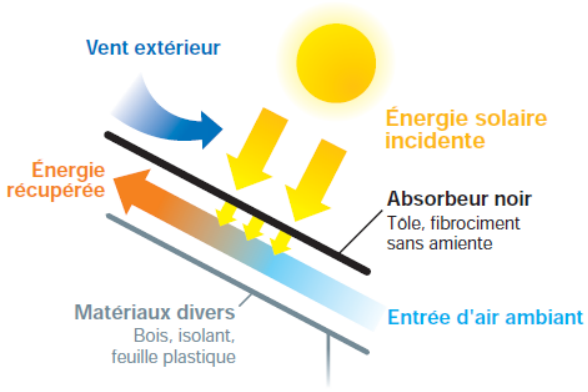

Figure 6. Principe général du capteur solaire par toiture opaque.

Figure 7. Un exemple de serre séchoir[3].

2.2.2 Quelle technique de séchage choisir?

Les différentes techniques de séchage se différencient par leur temps de séchage respectif, et influencent donc directement la productivité. Le choix de la technique de séchage dépendra d'un certain nombre de paramètres et contraintes, dont notamment:

- **Contrainte sur le taux d'humidité atteignable.** Le séchage naturel ou naturel forcé permet de sécher les bois jusqu'à un taux d'humidité de 20% environ. Si des taux d'humidité inférieurs

[3] Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH: http://www.thermo-system.com/en/home/.

sont exigés (pour des raisons environnementales, de santé publique, etc.), un séchage forcé sera nécessaire.

- **Contraintes logistiques**. La disponibilité du terrain, la possibilité d'un raccordement au circuit électrique ou la proximité d'industrie produisant de la chaleur inutilisée sont des critères importants pour la sélection d'une technique de séchage.
- **Contraintes économiques**. Le séchage forcé du bois nécessite un investissement plus important que le séchage naturel et induira aussi des coûts opérationnels supérieurs. Par contre, un séchage naturel immobilise le bois pendant plus de temps que le séchage forcé, et est donc lié à un coût de stockage plus important. Une optimisation en fonction de la taille de l'exploitation et des prix d'achat et de revente du bois est souvent nécessaire pour définir la technique la plus adaptée.

2.3 Etude de cas

Dans cette section, nous étudions le cas de trois pays où l'utilisation du bois pour le chauffage présente des similitudes avec la situation chilienne. Ces pays sont la France, la Nouvelle-Zélande et les Etats-Unis. Ils ont été choisis car le marché du bois y est en grande partie informel et des mesures y ont été prises pour limiter la pollution aux particules fines. Nous analysons également brièvement le contexte des pays en développement qui souffrent également fortement de cette problématique.

2.3.1 Le séchage du bois de chauffage en France

2.3.1.1 Ressources disponibles et utilisation pour le chauffage

La France est un grand pays forestier: 28% du territoire métropolitain est couvert par la forêt, soit plus de 16 millions d'hectares. Cette surface a été multipliée par deux en 150 ans et l'exploitation des forêts françaises est partielle au regard de sa croissance biologique et de ses disponibilités de récolte.

De part sa diversité climatique, géologique et topographique, la France a des forêts très diversifiées. Le chêne représente un quart du volume total sur pied, ensuite viennent le hêtre (11%), le pin maritime (9%), le sapin pectiné (8%) et l'épinette de Norvège (8%).

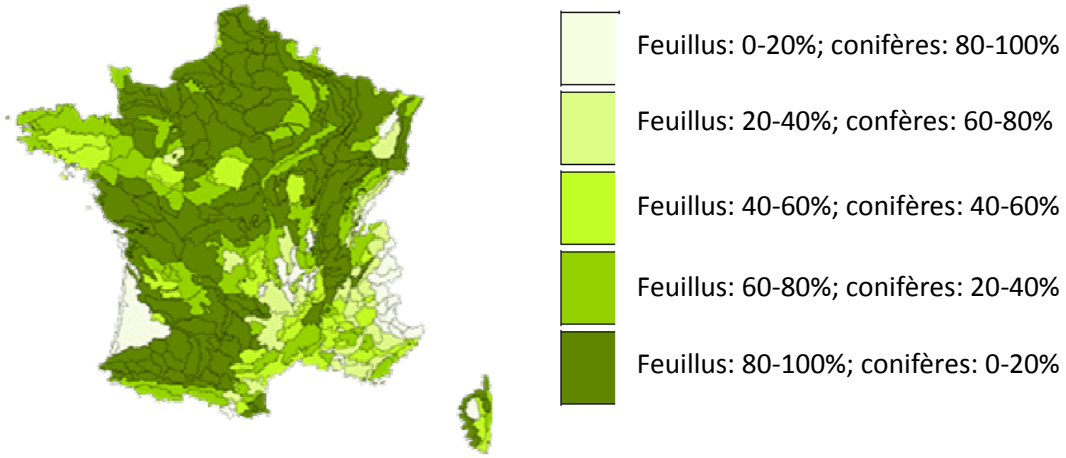

Figure 8. Répartition des espèces forestières françaises[4].

[4] Inventaire Forestier National (IFN): www.ifn.fr.

Avec 9.4 Mtep, la France est le premier pays consommateur de bois-énergie en Europe en valeur absolue, et le 6ème en termes de consommation par habitant (0.15 tep/hab.). La France doit sa place de premier consommateur essentiellement grâce au chauffage domestique, qui représente une consommation finale annuelle de 6.5 Mtep. Le bois-énergie représente environ 5% de la consommation nationale d'énergie primaire (ADEME, 2009).

La quasi-totalité du bois-énergie consommé en France est aujourd'hui commercialisé sous forme de bûche, tandis que les plaquettes forestières ou les granulés (pellets) de bois sont encore peu développés[5].

2.3.1.2 Chaîne d'approvisionnement

Les forêts françaises sont privées à 71%, le reste appartenant à l'Etat ou à d'autres organismes publics. L'exploitation des forêts privées est soir réalisée par les particuliers soit déléguée à des professionnels (intermédiaires privés, coopératives) (ADEME, 2007). La commercialisation du bois en bûche emprunte souvent des circuits de proximité qui ne font pas l'objet d'une facturation comptable et donc d'une saisie fiscale (marché informel). On considère que 50% du bois de feu est autoconsommé par des familles rurales et 40% fait l'objet de transactions de proximité (économie grise). Ainsi, seulement 10% du bois bûche consommé en France serait commercialisé par des professionnels déclarés pour cette activité[5].

Le séchage du bois se fait principalement en forêt (séchage naturel non abrité). Parmi les professionnels de la branche, seuls 3% utilisent des séchoirs.

Les principales raisons invoquées pour le séchage du bois sont un meilleur pouvoir calorifique et donc une meilleure combustion du bois. Les professionnels voient par contre aussi beaucoup d'inconvénients au séchage, tels que le montant élevé des investissements et des coûts de fonctionnement, l'accroissement du stock et donc la place nécessaire pour celui-ci.

Du fait du marché principalement informel, il est très difficile de savoir si le bois commercialisé est réellement sec. Ceci n'est d'ailleurs souvent pas le cas, engendrant un problème de pollution (voir ci-dessous). En outre, ce marché est également très difficile à légiférer.

2.3.1.3 Contexte politique

La France a l'objectif d'augmenter la consommation d'énergies renouvelables de 20 Mtep à l'horizon 2020. En conséquence, le soutien à l'utilisation du bois-énergie est aujourd'hui très fort dans l'habitat individuel. L'évaluation des impacts sur l'environnement de l'ensemble des activités liées au chauffage au bois domestique (extraction du combustible, distribution, utilisation finale chez l'usager) indique que le chauffage du bois (bûche) émet 40 kg de CO_2 par MWh de chaleur utile, soit 12 fois moins que le fioul et 6 fois moins que le gaz.

Cependant, il est reconnu que le développement du bois-énergie doit être conjoint à l'amélioration de la qualité de l'air. Le bois énergie contribue pour une très faible part aux émissions nationales de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote (2% environ) et à hauteur de 10% environ aux émissions de dioxines et de poussières fines. Par contre, le bois énergie participe de manière significative aux émissions nationales de composés organiques volatils non méthaniques (22%), de monoxyde de

[5] Bioénergie international: www.bioenergie-promotion.fr.

carbone (31%) et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (77%); ces niveaux d'émissions proviennent à 95% du secteur domestique qui se caractérise par un important parc d'appareils anciens (vieux de 5 ans et plus) peu performants et par l'utilisation trop importante de combustible de mauvaise qualité (trop humide notamment) (ADEME, 2009).

Afin de diminuer ces émissions polluantes, différentes législations ont été mises en place qui visent plusieurs objectifs spécifiques:

- Un crédit d'impôt est disponible incitant à l'installation d'appareils de chauffage à bois neufs à haute efficacité (jusqu'à 95% de rendement).
- Des chartes de qualité ont été définies pour le combustible bois (par exemple, NF Bois de chauffage) ainsi que des labels attestant de la bonne qualité du bois (provenance, taux d'humidité, etc.).
- Depuis 2004, une campagne de sensibilisation sur le thème de la maîtrise de l'énergie et du développement des énergies renouvelables existe et informe notamment le grand public sur le chauffage au bois[6].

2.3.2 Le séchage du bois de chauffage en Nouvelle-Zélande

2.3.2.1 Ressources disponibles et utilisation pour le chauffage

30% de la surface totale de la Nouvelle-Zélande est couverte de forêts, soit une surface d'environ 8 million d'hectares. 78% de cette surface est constituée de forêts natives, les 22% restants étant dédiés aux plantations forestières commerciales. Les forêts natives sont peu exploitées, car soumises à des règles strictes de durabilité. La grande majorité du bois néozélandais provient donc de plantations (New Zealand Forest Owners Association Inc et al., 2007).

Les plantations forestières sont constituées à 89% de pin de Monterey (Pinus Radiata) et à 6% de sapin de Douglas. Le reste de la surface est plantée d'espèces d'eucalyptus, de cyprès, etc.

La consommation de bois pour l'énergie s'élevait à 43.2 PJ en 2009, dont 33.6 PJ en utilisation directe pour production de chaleur dans l'industrie, 6.0 PJ pour la production de chaleur dans le secteur résidentiel, et 3.6 PJ pour la cogénération (Ministry of Economic Development, 2010).

2.3.2.2 Chaîne d'approvisionnement

La majorité des plantations néozélandaises (70%) appartient à des entreprises privées ou à des particuliers. Les entreprises privées assurent l'exploitation de leurs plantations et la vente du bois, soit sous forme de troncs pour l'exportation, soit pour la production locale de papier ou de bois de construction. Cette industrie utilise ses propres résidus pour produire la chaleur nécessaire au séchage du bois et ainsi diminuer sa facture énergétique.

Le bois de bûche utilisé pour le chauffage résidentiel représente une petite partie du marché du bois néo-zélandais. Il provient en général de l'exploitation de plantations appartenant à des particuliers. Son marché est donc informel et peu de statistiques sont disponibles pour l'analyse.

[6] Economies d'énergie – Faisons vite ça chauffe: www.faisonsvite.fr.

2.3.2.3 Contexte politique

L'émission de particules fines et leur impact néfaste sur la santé ont poussé la Nouvelle-Zélande à adopter un nouveau standard national de taux de PM_{10} dans l'air en 2005. Le taux moyen sur 24 heures ne doit pas dépassé 50 $\mu g/m^3$, avec un seul excès autorisé par an. Plusieurs localités sont depuis considérées comme saturées en PM_{10}, comme par exemple Rotorua, une ville de 56'000 habitants de l'île Nord de la Nouvelle-Zélande (Jonsson et Nielsen, 2005), ou Auckland, la plus grande ville de l'île du Nord avec 1,4 million d'habitants (Auckland Regional Council, 2007a).

Le chauffage au bois est considéré comme un des principaux émetteurs de particules fines en zone urbaine. Mais la quantité émise par le chauffage au bois dépend de la qualité du combustible, son taux d'humidité, l'appareil de chauffage utilisé et la gestion de la combustion. Des réglementations nationales et régionales agissent sur plusieurs paramètres afin de diminuer les émissions de particules fines. Par exemple:

- Une réglementation nationale définit un maximum d'émissions de particules fines de tout appareil utilisé pour la combustion du bois et impose une efficacité thermique minimum de 65% (Ministry for the Environment, 2004).
- Dans la région d'Auckland, une réglementation régionale requiert qu'aucune nuisance ne soit faite au voisin due à l'émission de fumée (et donc de polluants), odeur, etc. (Auckland Regional Council, 2007a).
- Le type de combustible est également réglementé: il est interdit de brûler les déchets domestiques et les bois traités (Auckland Regional Council, 2007a), mais il n'existe pas de régulation du taux d'humidité du bois de chauffage car le marché est informel et donc difficile à réguler. Toutefois, des directives régionales informent les particuliers sur les bonnes pratiques pour choisir le combustible, par exemple utiliser du bois sec, conserver le bois au sec, etc. (Auckland Regional Council, 2007b).

2.3.3 Le séchage du bois de chauffage aux Etats-Unis

2.3.3.1 Ressources disponibles et utilisation pour le chauffage

Environ un tiers de la surface totale des Etats-Unis est couvert de forêts, soit 3 million km^2, qui présente un potentiel durable de quelque 51 million de tonnes de bois de chauffage par an. Deux tiers de ce potentiel (35 million de tonnes de bois de chauffage) est actuellement extrait des forêts américaines par an, ce qui couvre la demande en bois de chauffage pour le secteur résidentiel et commercial et la production d'électricité (US DOE et USDA, 2005). D'autres sources existent et pourraient se développer de façon importante dans le futur, notamment l'utilisation de certains résidus encore peu valorisés à ce jour tels que résidus de bois de construction (voir Tableau 1 ci-dessous).

Tableau 1. Résumé de la consommation biomassique actuelle et du potentiel de production future aux Etats-Unis (US DOE et USDA, 2005).

Type de biomasse	Consommation actuelle [million tonnes / an]	Potentiel [million tonnes /an]
Produits forestiers industriels		
Résidus de bois	44	68
Liqueur de pâte à papier	52	74
Résidus de bois urbain	8	47
Bois bûche	35	51
Biocarburants	18	
Bioproduits	6	
Résidus de l'exploitation forestière	-	47
Produits issus de l'éclaircissage	-	60
Autres résidus	-	17
Total	**163**	**364**

2.3.3.2 Chaîne d'approvisionnement

Les forêts américaines sont majoritairement privées: 58% appartiennent à des particuliers, 13% à l'industrie forestière et 29% sont publiques (US DOE et USDA, 2005).

Il y a peu d'informations statistiques disponibles sur l'approvisionnement en bois de chauffage en Amérique du Nord, car ce marché est largement informel et non-régulée. La plus grande partie des américains qui se chauffent au bois coupent leur propre bois ou s'approvisionnent chez un exploitant local[7].

2.3.3.3 Contexte politique

L'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air est reconnu comme un problème aux Etats-Unis, autant en zone urbaine qu'en zone rurale. Le contrôle de la qualité de l'air, et les mesures à prendre pour l'améliorer, se font au niveau des gouvernements locaux. Il n'existe pas de mesures au niveau fédéral, mais une série de recommandations et de conseils a néanmoins été publiée par l'agence américaine de protection de l'environnement (United States Environmental Protection Agency, US EPA). Les mesures conseillées visent différents objectifs (US EPA, 2009):

- l'éducation du grand public pour la combustion d'un bois sec ou de pellets, avec des messages précis quant à la réduction possible des coûts pour les utilisateurs (car moins de bois devra être brûlé pour la même quantité de chaleur), l'amélioration de la sûreté du foyer[8] et les bénéfices pour la santé grâce à la diminution des émissions de polluants.

[7] http://www.green3dhome.com/EnergySources/Wood.aspx

[8] La combustion de bois humide provoque des dépôts de goudron dans les cheminées qui peuvent s'enflammer.

[9] Organisation Mondiale de la Santé: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/fr/index.html

- l'encouragement à changer d'appareil de combustion/chauffage pour des appareils à haute efficacité énergétique certifiés par le US EPA (rétrofit).

2.3.4 Problématique dans les pays en développement

Dans beaucoup de pays en développement, la biomasse est la source d'énergie primaire la plus importante, car souvent gratuite. En moyenne, la biomasse représente 35% du mix énergétique des pays en développement (contre 4% dans les pays industrialisés), avec des pics à 90% pour certains pays subsahariens (Best et Christensen, 2003) et à plus de 95% au Népal (IEA 2009).

Le bois est en général brûlé dans des cuisinières ou réchauds à bois à pauvre efficacité énergétique. En 2005, quelques 570 million de cuisinières/réchauds à bois étaient utilisés dans le monde (AIE, 2009). Dans beaucoup de cas, ces réchauds ne sont pas reliés à une cheminée.

La mauvaise combustion du bois combinée à une pauvre aération conduit à un problème de pollution à l'air intérieur des maisons avec des risques importants pour la santé des habitants. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que la pollution de l'air à l'intérieur des habitations figure au 8ème rang des causes de mortalité et est responsable de 1.6 million de décès par an, imputables à la pneumonie, aux maladies chroniques des voies respiratoires et au cancer du poumon[9].

Les mesures prises pour réduire la pollution de l'air à l'intérieur des habitations et les effets sur la santé qui lui sont associés vont du changement de source d'énergie en faveur des énergies fossiles telles que le gaz ou kérosène jusqu'à l'amélioration des réchauds ou des hottes qui éliminent les polluants nuisibles pour la santé vers l'extérieur, sans oublier l'évolution des comportements[9].

2.4 Leçons à tirer pour le Chili

2.4.1 L'utilisation du bois pour la production de chaleur

En 2006, 39 EJ de bois était brûlé pour la production de chaleur dans des poêles traditionnels sur une quantité de biomasse primaire de 50 EJ (AIE, 2009). La majeure partie de ces 39 EJ sont utilisé dans les pays en développement où le bois est une source d'énergie bon marché (voire souvent gratuite) ce qui le rend compétitif avec les autres sources d'énergies, notamment fossiles, malgré la pauvre efficacité énergétique des poêles.

Par ailleurs, traditionnellement peu utilisé dans les pays développés à cause de sa mauvaise image, l'utilisation du bois pour le chauffage résidentiel et la production de chaleur industrielle se développe aujourd'hui grâce à sa neutralité d'un point de vue émission de gaz à effet de serre et à l'avènement de la technologie à granulés (pellets) qui offre une solution propre, pratique (automatisée) et efficace. Malgré le développement exponentiel des combustibles granulés (pellets) et plaquettes, la bûche reste néanmoins le produit bois le plus utilisé pour le chauffage dans les pays développés.

2.4.2 Problématique de la pollution aux particules fines

Une mauvaise combustion du bois est associée à l'émission des nombreuses substances nocives pour la santé, dont les particules fines. Le Chili n'est de loin pas le seul pays à souffrir de la problématique de la pollution liée à une mauvaise combustion du bois. Dans nombre de pays en développement, la

[9] Organisation Mondiale de la Santé: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/fr/index.html

pollution aux particules fines est particulièrement grave à l'intérieur des habitations dues à des poêles de mauvaise qualité et à une mauvaise aération, entraînant de graves problèmes de santé publique.

Cette problématique n'est cependant pas l'apanage des pays en développement, mais pose des soucis sérieux à de nombreux pays industrialisés. Par exemple, dans des pays comme la France, où le bois est peu utilisé en ville, la pollution aux particules fines se fait surtout ressentir dans les zones rurales. Dans des pays comme la Nouvelle-Zélande, où l'utilisation du bois de chauffage est plus répandue en ville, le problème devient critique en zones urbaines. Ces problèmes de pollutions ont tendance à augmenter à cause du nombre croissant d'habitations qui se chauffent au bois. Les causes ne sont pas différentes de celles des pays en développement: combustion de bois humide dans des équipements à faible efficacité thermique et souvent mal utilisés.

2.4.3 Les législations mises en place

Dans les pays en développement, les politiques mises en place visent au remplacement des appareils désuets par des appareils plus récents et à l'installation d'aérations appropriées. Il est intéressant de constater que ce rétrofit est souvent accompagné de mesure incitant à la substitution de la biomasse par des combustibles fossiles (notamment LPG), dont la combustion est, en soi, plus propre que celle du bois. Dans ces contextes, la problématique de santé publique prime en effet sur celle du climat.

Dans les pays développés, les politiques visent trois objectifs distincts:

- En vue d'assurer que les appareils vendus soient de haute qualité, un système de certification est souvent mis en place, avec comme critères un taux d'émission de polluants maximum et une efficacité thermique minimum.
- Afin d'accélérer le remplacement du parc d'appareil de chauffage souvent vieillissant, des incitations financières existent souvent pour l'achat de nouveaux équipements de chauffage au bois.

Le marché du bois de bûche étant informel dans la plupart des pays, peu de mesures législatives efficaces permettent d'assurer que le bois est séché avant combustion. Pour cette raison, la quasi-totalité des mesures prises visent à améliorer le "demand side" (combustion). Les efforts politiques sur le "supply side" (fourniture de bois) se limitent à éduquer le grand public à la problématique de la combustion de bois humide au travers de campagne de communication. Il s'agit de faire comprendre que la combustion d'un bois sec est à la fois avantageuse d'un point de vue économique, énergétique, sécuritaire et de santé.

2.4.4 Le Chili – Problématique et solution unique

Le Chili n'est pas seul: de nombreux pays en développement, émergents et industrialisés, souffrent d'une problématique de pollution aux particules fines similaire à celle du Chili. Ceci étant, il y a deux points qui font du Chili un cas relativement unique:

- La faible autonomie financière des producteurs de bois engendre un marché du bois en flux tendu, rendant ainsi inéluctable la problématique de la combustion du bois vert.
- la forte concentration de chauffage au bois en milieu urbain rend la problématique de pollution particulièrement critique.

Dans ce contexte, le Chili devra probablement prendre des mesures qui vont au-delà de celles prises dans d'autres pays souffrant d'une problématique similaire. En ce sens, le Chili devra faire preuve

d'innovation afin de lutter contre le mal à la racine, en prenant notamment des mesures incitatives fortes autant sur le "demand side" (combustion propre) que sur le "supply side" (fourniture de bois sec).

Dans ce contexte, le soutien à l'implémentation de centres de séchage pourrait représenter une opportunité d'intervention particulièrement efficiente. Si la plus-value économique de tels centres peut être démontrée, alors ils représenteront une incitation naturelle au séchage (loi du marché) et deviendront un point de passage naturel sur la chaîne d'approvisionnement du bois. En outre, ces centres de séchage pourraient offrir un point de contrôle privilégié sur le marché informel du bois de chauffage. Ils donneraient des informations importantes sur les volumes extraits, permettant de contrôler la durabilité de l'exploitation et, le cas échéant, de déterminer le besoin de mesures d'accompagnement complémentaires.

L'objet de la présente étude est précisément de démontrer sous quelles conditions et dans quelles circonstances les centre de séchages peuvent s'avérer économiquement viable, offrant une solution win-win-win (économique, environnementale, durabilité de la ressource) à la problématique de la pollution aux particules fines.

3 Modèle techno-économique d'un centre de séchage au Chili

3.1 Objectifs

Dans un marché hautement informel, le succès économique de l'implémentation de centres de séchage dans la chaîne d'approvisionnement du bois de chauffe dépendra de leur capacité à offrir des conditions de prix attractives aux acteurs de la chaîne.

L'analyse économique doit permettre de montrer:

- sous quelles conditions (technologique, économique, financière, logistique, etc.) les centres de séchages peuvent être intrinsèquement compétitif dans les conditions de marché existantes;
- quelle forme de soutien étatique (législation, subsides) permettrait de combler un éventuel déficit de compétitivité ou d'acceptation de ces centres de séchage.

L'objectif de l'analyse techno-économique est également de comparer les performances, ainsi que les avantages et inconvénients respectifs, des 4 options techniques de séchage suivantes (voir section 2.2.1 pour un descriptif de ces technologies):

- séchage naturel abrité;
- séchage naturel forcé avec air pulsé;
- séchage naturel forcé avec appoint thermique par panneaux solaires (solar loop);
- séchage naturel forcé avec appoint thermique par toiture opaque (solar black roof).

3.2 Paramètres d'entrée

Le modèle paramétrique, qui est construit dans l'environnement Microsoft Excel, calcule le coût de production du bois sec et le taux de rentabilité financier en fonction des différents paramètres du centre de séchage, en particulier:

- paramètres technologiques (type d'équipements technologiques, consommation énergétique, etc.);
- paramètres produits (type de bois, taille, taux d'humidité en entrée et en sortie, etc.);
- paramètres économiques (prix d'achat et de vente du bois, subsides éventuels, salaires moyens, assurances et entretien, etc.);
- paramètres financiers (part de dettes et de fonds propres, taux d'actualisation, taux d'inflation);
- paramètre logistiques (capacité de production, capacité de stockage, logistique d'approvisionnement et de distribution, etc.);
- paramètres climatiques (température et taux relatif d'humidité de l'air moyens à Osorno, heures d'ensoleillement, puissance incidente solaire).

Ces paramètres ont été groupés selon qu'ils changent en fonction de la technologie de séchage choisi. Les figures ci-dessous montrent les quatre parties majeures du modèle, avec comme exemple le séchage naturel abrité.

Plant size

Effective plant capacity	1	MW wood at 22% humidity / yr

Financing

Inflation	2.0%	Ref: Central Bank of Chile. Prognosis 2010
Discount rate	10%	

Feedstock parameters

Type of wood	Moisture content (raw) [%]	Moisture content (dried) [%]	Energy content (raw) [MWh/m³]	Energy content (dry) [MWh/m³]	Raw feedstock cost [CHF/st]	Comment	Raw feedstock cost LOW [CLP/st]	[CHF/st]	Raw feedstock cost MEDIUM [CHF/st]	Raw feedstock cost HIGH [CLP/st]	[CHF/st]
Ulmo	50%	22%	0.85	1.42	17	Specific tree from C	8000	16	17	9000	18
Luma	50%	22%	1.15	1.95	17	Called Luma as well	8000	16	17	9000	18
Roble	50%	22%	0.70	1.15	17	Oak	8000	16	17	9000	18
Coihue	50%	22%	0.77	1.26	17	Coigüe	8000	16	17	9000	18
Trevo	50%	22%	1.00	1.67	17	Trevo or Tayu	8000	16	17	9000	18
Aromo	50%	22%	0.81	1.37	17	Acacia	8000	16	17	9000	18
Canelo	50%	22%	0.64	1.07	17	*Drimys winteri*	8000	16	17	9000	18
Eucaliptus	50%	22%	0.81	1.37	20		9000	18	20	11000	22
Pino	50%	22%			20		9000	18	20	11000	22

Feedstock transportation

Parameter	Unit	Value	Comment
Distance	[km]	10	Marqués, 2010
Average cost	[CHF / km]	1.5	Estimate
Load	[st / truck trip]	15	Industry data

Energy price

Energy type	[CLP / kWh]	Price [CHF / kWh]	Reference
Electricity	70.00	0.14	Ref: SEI, 2010.

Dry wood sales price

Product	Type of customers	Price [CHF/st]	Price LOW [CLP/st]	Price HIGH [CLP/st]	Comment
Dry wood	Institutional	57.71	28000	30000	
Dry wood	Private	56.72	25000	32000	

Ratio of wood sold to institutional		0.67
Final average price		57.38

Price of wood container

Amount of wood container t	Price	Unit	Comment
<100	67.2295	CHF / container	http://www.kruizinga.fr/caisse+palette/?gclid=CL-vgsKGgqYCFZQQfAodDID5gw
100<-<1000	40.3377	CHF / container	Industry data
>1000	26.8918	CHF / container	Industry data

Figure 9. Vue d'ensemble des paramètres du modèle qui ne sont pas influencés par la technologie de séchage retenue.

Production capacity

Type	Value	Unit	Comment
Hours per year	8760	hours	
Utilisation rate	1		Plant is oversized in sizing calc to allow for incomplete filling of the shed
Annual production	8'760	MWh_{LHV} wood at 22% humidity	

Drying and storage times

Parameter	Time [month]	Time [year]	Comment
Mean drying time	7.5	0.63	drying time for oak in Osorno region. Reference: Universidad de Chile, 2009. *Modelos de Negocios para el Acopio y Secado de Leña - Informe Final, parte 2*
Storage time for dry wood	1	0.08	Estimate

Capital costs

2500

Investment	Cost [CHF]	Pre-scaled data			Value of parameters for considered capacity			Scaling factor	Comments
		Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit		
Plot of land	18'976	Cost of land	4.98	CHF / m²	Size of field	3'814.20	m²	n/a	La viabilisation du terrain correspond à 1.3 fois la surface couverte (ADEME et CTBA, 2005). Coût du terrain de Miguel
Civil engineering	17'699	Total cost for a field of 300 m²	2'985.00	CHF / m²	Size of field	3'814.20	m²	0.7	SEI, 2010
Drying shed (infrastructure)	88'376	300 m² shed	17'910.00	CHF	Size of drying shed	2'934.00	m²	0.7	SEI, 2010
Storage shed	14'643	300 m² shed	17'910.00	CHF	Size of storage shed	225.00	m²	0.7	SEI, 2010
Crane	10'000								From proposal
Forklift	10'000								http://www.forkliftwarehouse.co.uk/index_3.php?f
Truck	100'000								Estimate
Wood containers	132'738	Price of wood containers	26.89	CHF / casier	Number of	4'936.00	containers	n/a	http://www.kruizinga.fr/caisse+palette/?gclid=CL-vg
Pallets	24'680	Price of pallets	10.00	CHF / pallette	Number of pallets	2'468.00	Pallets	n/a	
Fence	7'115	180 m of fence	3'980.00	CHF	Circomference of field	412.74	m	0.7	SEI, 2010
Office in situ	3'980							n/a	SEI, 2010
Guard ward	995							n/a	SEI, 2010
Pre-studies	26'000							n/a	From proposal
Spare parts	0							n/a	
Staff prior to operational start-up	12'935							n/a	Administrator salary for 1 year, ref: SEI, 2010
Total investment cost	**468'136**								

Feedstock type, volume and cost

Feedstock type	Share (per energy [%]	Energy content (dry) feedstock [MWh/yr]	Energy content (raw) feedstock [MWh/yr]	Annual volume feedstock		Feedstock cost	Total annual feedstock cost	Comment
				[m³/yr]	[st/yr]	[CHF/st]	[CHF]	
Ulmo	**51%**	4'468	2'673	3'149	5'524	17	93'440	
Luma	**27%**	2'365	1'394	1'211	2'124	17	35'923	
Roble	**10%**	876	531	761	1'335	17	22'578	
Coihue	**12%**	1'051	642	837	1'468	17	24'836	
Total	**100%**	**8'760**	**5'240**	**5'957**	**10'451**		**176'777**	

Figure 10. Vue d'ensemble des paramètres qui varient en fonction de la technique de séchage choisie (première partie).

Operating costs

Designation	Value	Unit	Annual cost [CHF/yr]	Comment
Insurance (plant and stock)	4.0%	% of infrastructure and stock	14'413	ADEME et CTBA (2005)
Plant maintenance	1.5%	% of technical investment	3'527	The cost of maintenance is function of plant capacity
Offices			3'582	SEI, 2010
Staff - administrator			12'935	SEI, 2010
Staff - operator (2 persons)			19'403	SEI, 2010
Staff - guard			7'114	SEI, 2010
Staff - truck driver			9'701	SEI, 2010
Distribution costs			10'451	
Feedstock			176'777	
Total annual operation costs (OPEX)			**257'903**	

Financing

Investment type	Share [%]	Amount [CHF]	Interest rate [%]	Repayment horizon / plant	Comment
Equity	100%	468'136			In order to simplify interpretation of results, only a 100% equity financial model will be considered.
Debt	0%	0	8%	20	Reference for interest rate: Central Bank of Chile (to be confirmed)
Total	**100%**	**468'136**			

Revenues

Revenue source	Sales price [CHF/st]	Share of product sold [%]	Product sales [st/yr]	Sales revenues [CHF/yr]	Comment
Dry wood	57.38	100%	10'451	599'655	
Turnover				**599'655**	

Figure 11. Vue d'ensemble des paramètres qui varient selon la technologie de séchage (deuxième partie).

Size of drying shed

Stacking dimensions	Dimension [m]	Comments
Stacking height under drying shed	4	3 m de hauteur dans l'étude de l'ADEME.
Stacking width under drying shed	15	
Utilization factor	80%	Accounts for incomplete filling of shed
Stacking breadth under drying shed	137	

Drying area	Dimension [m^2]	Comments
Effective drying area	2'055	
Ratio of alleys to drying area	40%	Etude ADEME: la surface nécassaire aux manutentions est évaluée à environ 40% de la surface dédiée au séchage.
Reqd alley area	822	
Total surface [m2]	**2'877**	

Total surface of drying shed	
Length scale factor	1.18
Width [m]	18
Breadth [m]	163
Total surface [m^2]	**2'934**

Size of storage shed

Stacking dimensions	Dimension [m]	Comments
Stacking height under storage shed	4	
Stacking width under storage shed	15	
Stacking breadth under storage shed	15	Storage area calculated assuming up to 1 month's production is stored

Total surface of storage shed	
Width [m]	15
Breadth [m]	15
Total surface [m^2]	**225**

Figure 12. Vue d'ensemble du modèle de dimensionnement des infrastructures du centre de séchage.

Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Sales [CHF/year]																		
Dry wood		224'871	611'648	623'881	636'359	649'086	662'068	675'309	688'815	702'592	716'644	730'976	745'596	760'508	775'718	791'232	807'057	823'198
Total revenues		**224'871**	**611'648**	**623'881**	**636'359**	**649'086**	**662'068**	**675'309**	**688'815**	**702'592**	**716'644**	**730'976**	**745'596**	**760'508**	**775'718**	**791'232**	**807'057**	**823'198**
Operating expenses [CHF/year]																		
Insurance (plant and stock)		14'413	14'701	14'995	15'295	15'601	15'913	16'231	16'556	16'887	17'225	17'569	17'921	18'279	18'645	19'018	19'398	19'786
Plant maintenance		3'527	3'597	3'669	3'742	3'817	3'894	3'972	4'051	4'132	4'215	4'299	4'385	4'473	4'562	4'653	4'746	4'841
Office rental		3'582	3'654	3'727	3'801	3'877	3'955	4'034	4'115	4'197	4'281	4'366	4'454	4'543	4'634	4'726	4'821	4'917
Staff		49'153	50'136	51'139	52'162	53'205	54'269	55'354	56'461	57'591	58'742	59'917	61'116	62'338	63'585	64'856	66'153	67'477
Energy		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transportation cost		10'451	10'660	10'873	11'091	11'312	11'539	11'769	12'005	12'245	12'490	12'740	12'994	13'254	13'519	13'790	14'066	14'347
Feedstock		176'777	180'313	183'919	187'597	191'349	195'176	199'080	203'061	207'122	211'265	215'490	219'800	224'196	228'680	233'253	237'919	242'677
Interest on debt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciation		21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460	21'460
Total operating expenses		**279'363**	**284'521**	**289'782**	**295'148**	**300'622**	**306'205**	**311'900**	**317'709**	**323'634**	**329'677**	**335'842**	**342'129**	**348'543**	**355'084**	**361'757**	**368'563**	**375'505**
EBIT [CHF]		**-54'492**	**327'128**	**334'099**	**341'211**	**348'464**	**355'863**	**363'409**	**371'106**	**378'958**	**386'966**	**395'135**	**403'466**	**411'965**	**420'633**	**429'475**	**438'494**	**447'693**
Repayment of debt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciation		-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460	-21'460
Cashflow [CHF]		**-33'032**	**348'588**	**355'559**	**362'671**	**369'924**	**377'323**	**384'869**	**392'566**	**400'418**	**408'426**	**416'595**	**424'927**	**433'425**	**442'094**	**450'935**	**459'954**	**469'153**
Discounted cashflows [CHF]	-468'136	-30'029	288'089	267'137	247'709	229'694	212'989	197'499	183'135	169'816	157'466	146'014	135'395	125'548	116'417	107'950	100'099	92'819
Discounted cashflows without wood sales revenues [CHF]	-468'136	-234'457	-217'405	-201'594	-186'933	-173'338	-160'731	-149'042	-138'202	-128'151	-118'831	-110'189	-102'175	-94'744	-87'854	-81'464	-75'540	-70'046
Discounted dry wood produced [kWh]		2'986'364	7'239'669	6'581'518	5'983'198	5'439'271	4'944'792	4'495'265	4'086'605	3'715'095	3'377'359	3'070'327	2'791'206	2'537'460	2'306'782	2'097'074	1'906'431	1'733'119
Discounted dry wood produced [st]		3'563	8'637	7'852	7'138	6'489	5'899	5'363	4'875	4'432	4'029	3'663	3'330	3'027	2'752	2'502	2'274	2'068

Economic analysis		
Plant NPV (at given dry wood sales price)	**2.52**	**mCHF**
Plant IRR (at given dry wood sales price)	**36%**	
Specific capital cost	**0.47**	**mCHF/MW$_{dry\ wood}$**
Levelized dry wood production cost	**4.281**	**c/kWh**
Levelized dry wood production cost	**35.9**	**CHF/st**

Note: in the model, the IRR only applicable if the share of equity is 100%

Figure 13. Vue d'ensemble de la partie financière du modèle techno-économique.

3.3 Calculs

3.3.1 Temps de séchage

A capacité de production donnée, le temps de séchage influence la taille de l'installation: plus le temps de séchage est court, plus le volume du centre de séchage est petit.

Le temps de séchage dépend d'un nombre important de paramètres, dont (USDA, 1999):

- température ambiante: plus l'air est chaud et plus la capacité évaporatoire de l'air est élevée (voir section 2.2.1);
- taux d'humidité de l'air: plus le taux d'humidité ambiant est élevé, plus la capacité évaporatoire est faible;
- taux d'humidité du bois à l'entrée ainsi que le taux d'humidité à atteindre en sortie: plus la différence entre le taux d'humidité à l'entrée et à la sortie est élevé et plus le temps de séchage sera long;
- flux d'air par ventilation naturelle ou forcée: plus le flux d'air est élevé, plus le temps de séchage est court, car l'air gorgé d'humidité est remplacé par un air plus sec et donc plus apte à évacuer l'humidité en surface du bois;
- l'empilage du bois: plus l'empilage est aéré, plus l'air peut circuler entre les bûches, plus le temps de séchage est court;
- l'agencement des piles de bois sur le site de séchage: les piles situées vers l'extérieur reçoivent plus d'air sec que les piles à l'intérieur du site, et sèchent donc en général plus vite;
- Le type de bois: certains bois sèchent plus vite que d'autre, dû à une perméabilité naturelle et à une densité plus ou moins élevée;
- diamètre de la bûche: plus leur diamètre est élevé, plus elles sèchent lentement car l'humidité contenue au cœur de la bûche doit diffuser jusqu'à la surface avant d'être évaporée.

Une modélisation approximative du temps de séchage peut se faire grâce à la formule mathématique suivante (Simpson et Tschernitz, 1977):

$$t = \frac{-L^n}{a + bp_{sat}(T)} \ln\left(\frac{\mathrm{M} - \mathrm{M_e}}{\mathrm{M_0} - \mathrm{M_e}}\right)$$

avec:
- t est le temps de séchage;
- L est la dimension du bois;
- a, b et n sont des constantes spécifiques au type de bois;
- p_{sat} est la pression de vapeur saturante de l'eau à la température T;
- M est le taux d'humidité final du bois;
- M_0 est le taux d'humidité initial du bois;
- M_e est le taux d'humidité à l'équilibre (qui dépend de la température et du taux d'humidité de l'air au lieu géographique du séchage).

Pour Osorno au Chili, cette formule donne un temps de séchage naturel de 7.5 mois pour du chêne coupé en bûches de 10 cm de diamètre. Cette estimation correspond à des tests menés au Chili sur du chêne qui ont donné un temps de séchage de 6 à 8 mois (Gutiérrez et al., 2009).

Pour l'estimation du temps de séchage forcé, deux approches ont été utilisées:

- Pour le séchage forcé avec air pulsé, la littérature cite une réduction du temps de séchage de 15% à 30% pour une puissance de ventilation installée de 750 W par 25 m^3 de bois humide (CTBA, 2005; Gutiérrez et al., 2009). Pour la région d'Osorno qui souffre d'un taux d'humidité ambiant très élevé (82% en moyenne) et d'une température moyenne basse (10°C), la réduction du temps de séchage calculée est de 15%.
- Pour le séchage forcé avec apport solaire thermique, l'augmentation de la température de l'air à l'intérieur du hangar de séchage a été estimée sur la base de l'énergie solaire incidente à Osorno et de l'efficacité du capteur.
    - Pour le hangar avec panneaux solaires thermiques, une augmentation moyenne de 4°C a été utilisée dans le modèle[10], ce qui mène à une réduction du temps de séchage de l'ordre de 17%.
    - Pour le hangar avec toiture opaque, une augmentation moyenne de 2°C a été utilisée, ce qui mène à une réduction du temps de séchage de l'ordre de 10%.

Compte tenu du nombre important de paramètres qui influencent le temps de séchage, ce dernier est hautement incertain, et fera donc l'objet d'une analyse de sensibilité (voir Section 4.4).

3.3.2 Dimensionnement des installations

Le modèle est construit sur la base d'une capacité de production annuelle de bois sec donnée. La taille du hangar de séchage est déduite de la capacité de production et du temps de séchage calculé.

En outre, les hypothèses suivantes ont été considérées:

- Facteur d'utilisation de 80% du hangar
- Surface nécessaire aux manutentions égale à 40% de la surface de stockage (CTBA, 2005).
- Volume de stockage du bois sec correspondant à 1 mois de production (flux semi-tendu).

Le dimensionnement des équipements nécessaires au séchage forcé à été basée sur les études suivantes: CTBA, 2005; USDA, 1999; Préfecture de la Région Midi-Pyrénées et al., 2006.

Le tableau ci-dessous résume le dimensionnement de la plupart des équipements pour le séchage du bois pour une unité produisant annuellement environ 10'000 stères (=1 MW_{th}).

[10] L'augmentation de température a été estimée en prenant en compte la puissance de l'ensoleillement à Osorno (relativement faible en moyenne), l'efficacité des panneaux solaires thermiques, le dimensionnement des échangeurs de chaleur, et l'équilibre thermique entre le liquide de transfert de chaleur (eau) et l'écoulement d'air (avec une ventilation d'une puissance installée de 3.75 kW).

Tableau 2. Récapitulatif des équipements nécessaires pour le séchage du bois par technologie de séchage pour une production annuelle de 10'000 stères (=1 MW_{th}).

	Séchage naturel abrité	**Séchage forcé avec air pulsé**	**Séchage forcé avec appoint solaire thermique par panneaux solaires**	**Séchage forcé avec appoint solaire thermique par toiture opaque**
Hangar de séchage – hauteur	4 m	4 m	4 m	4 m
Hangar de séchage – surface au sol	2'934 m^2	2'484 m^2	2'430 m^2	2'583 m^2
Hangar de stockage – hauteur	4 m	4 m	4 m	4 m
Hangar de stockage – surface au sol	225 m^2	225 m^2	225 m^2	225 m^2
Nombre de ventilateurs à 750W	n/a	127	5	5
Surface de capteurs solaires	n/a	n/a	500 m^2	2'500 m^2

3.3.3 Investissements

Les investissements considérés dans le modèle incluent:

- les coûts liés à l'achat et à la mise aux normes du terrain;
- les coûts de génie civil et d'infrastructure du hangar de séchage et de stockage;
- les coûts d'équipement lié aux options de séchage forcé (capteur solaire, ventilateurs, échangeur de chaleurs, etc.);
- Les frais de machines: camion, grue, chariot élévateur;
- Autres: barrière délimitant le terrain, bureaux, etc.

3.3.4 Coûts opérationnels

Les coûts opérationnels incluent:

- le coût d'achat de la biomasse (bois humide): ce prix est basé sur des données de marché collectées sur le terrain à Osorno (Marquéz, 2010);
- le coût de distribution du bois sec;
- les coûts d'entretien des équipements du centre de séchage, basés sur des pourcentages classiques des coûts d'investissements;
- la location de bureau au centre ville d'Osorno pour l'administrateur du centre de séchage, basé sur les prix du marché;
- les charges salariales (5 personnes seront employés par le centre de séchage: un administrateur, deux techniciens-opérateurs, un gardien de nuit et un chauffeur de camion, basé sur les prix du marché;
- les dépenses énergétiques (majoritairement la consommation électrique des ventilateurs), basé sur un prix du marché de CLP 70 / kWh (= CHF 0.14 / kWh);

- le coût des assurances qui couvrent à la fois l'investissement technique ainsi que le stock, basé sur les prix du marché.

3.3.5 Revenus

Les revenus du centre de séchage correspondent à la vente de bois sec. Le prix du bois au Chili varie à la fois en fonction du taux d'humidité lors de la vente mais aussi du client: les clients institutionnels paient en moyenne légèrement plus cher que les clients privés (Marqués, 2010).

Dans un premier temps, le centre de séchage ciblera les clients institutionnels qui comprennent déjà l'intérêt de brûler du bois sec et qui sont soumis à une nouvelle loi chilienne qui les oblige à brûler du bois avec un taux d'humidité inférieur à 25%.

Dans un deuxième, le bois sera vendu en ville aux ménages particuliers qui le souhaitent, car ceux-ci seront aussi soumis à la loi sur le taux d'humidité du bois.

3.4 Résultats

En sortie, le modèle fournit les résultats économiques suivants:

- Coût de production du bois sec (par stère et par kWh)
- Cash flow actualisé
- Coût spécifique du capital (par MW_{th} installé)
- Valeur actuelle nette (VAN) du centre de séchage
- Taux interne de rentabilité (TIR) pour un financement à 100% en fonds propres

Le modèle étant complètement paramétrique, il permet de déterminer les conditions de viabilité économique du centre de séchage, et de procéder à des analyses de sensibilité sur l'entier des paramètres d'entrées.

4 Analyse économique

L'objectif de l'analyse techno-économique et de déterminer les conditions de viabilité économique des différentes options techniques de séchage retenues.

4.1 Scénario considéré

Un scénario réaliste a été considéré sur la base des valeurs technique et économique décrite dans les tableaux ci-dessous. Une étude de sensibilité sera ensuite conduite autour des paramètres les plus influents.

Tableau 3. Valeurs retenues pour les paramètres techniques dans le scénario de base.

Paramètre technique	Valeur	Unité
Capacité annuelle de production	1	MW
	10'451	stères de bois sec
Temps de séchage naturel abrité	7.5	mois
Temps de séchage forcé avec air pulsé	6.4	mois
Temps de séchage forcé avec appoint solaire thermique à panneaux solaires	6.2	mois
Temps de séchage forcé avec appoint solaire thermique à toiture opaque	6.8	mois
Temps de stockage maximum du bois sec	1	mois

Tableau 4. Valeurs retenues pour les paramètres économiques et financiers dans le scénario de base.

Paramètres économiques et financiers	Valeur	Unité
Inflation	2.0%	
Taux d'escompte	10%	
Prix du bois indigène humide	8'000-9'000	CLP/st
Prix du bois exotique humide	9'000-11'000	CLP/st
Prix de vente du bois sec aux institutions locales	28'000-30'000	CLP/st
Prix de vente du bois sec aux ménagers privés	25'000-32'000	CLP/st
Prix de l'électricité	70.0	CLP/kWh
Coût d'assurance	4%	% des infrastructures et du stock
Coût de maintenance	1.5%	% des infrastructures et des équipements techniques

4.2 Coûts de production

La Figure 14 ci-dessous présente les coûts de production du bois sec par technologie de séchage pour un centre de séchage d'une capacité de production de 10'000 stère par an dans le scénario de base.

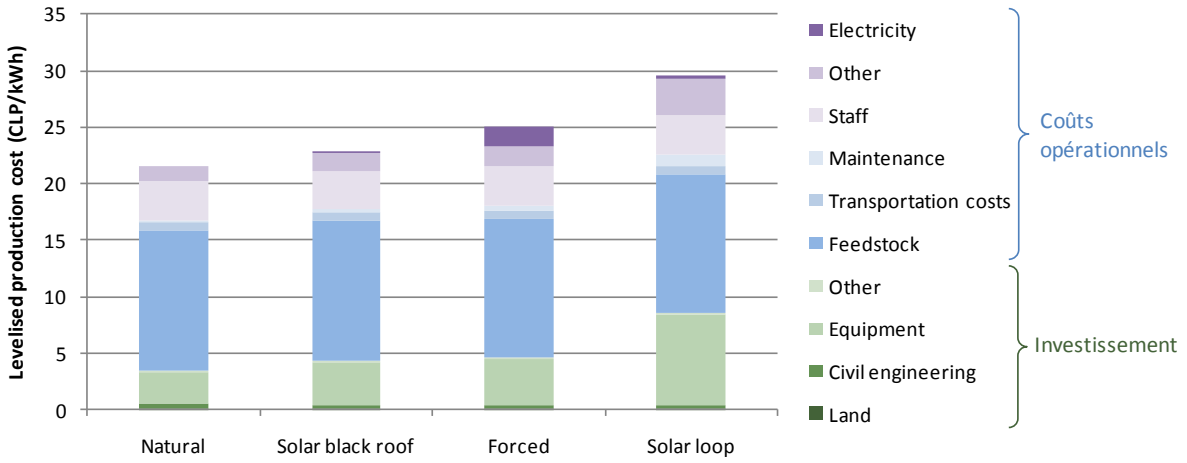

Figure 14. Coût de production de 1kWh de bois sec par technologie de séchage et par poste de dépense pour un centre de séchage d'une capacité annuelle de production de bois sec d'environ 10'000 stères (=1 MW_{th}).

Ces résultats nous permettent de conclure que:

- Quelle que soit la technologie retenue, le coût de production est largement dominé par le coût d'approvisionnement en bois humide, alors que le prix du terrain et son coût de remise aux normes est négligeable.
- Dans le scénario de base et pour une unité de 1 MW (environ 10'000 stères), le séchage naturel abrité est l'option la plus économique.
- De manière générale, bien que les techniques de séchage forcé bénéficient d'un coût de terrain et de génie civil légèrement inférieur, elles sont pénalisées par:
    - Un coût d'infrastructure plus élevé (hangar fermé alors que le séchage naturel se fait dans un hangar sans murs);
    - Un coût d'équipements techniques nettement plus élevé (ventilateurs, capteurs solaires, échangeurs de chaleur, etc.);
    - Un coût d'électricité important (en particulier pour la technique par air froid pulsé).
- Le séchage forcé avec appoint thermique par toiture opaque est la plus économique des techniques de séchage forcé. Sous certaines conditions, elle peut être compétitive avec le séchage naturel, tout en offrant un temps de séchage plus court et un pouvoir calorifique du bois sec plus élevé (le séchage forcé permettant d'atteindre un taux d'humidité du bois sec 5-10% inférieur à celui obtenu par séchage naturel).

4.3 Economies d'échelle

La Figure 15 montre que des économies d'échelle significatives peuvent être réalisées jusqu'à 2-3 MW de capacité annuelle (≅ 20'000 stères/an). Au-delà de cette taille, les économies deviennent nettement moins importantes, et il devient probablement plus intéressant de construire plusieurs centres de séchage plutôt que d'agrandir la taille des installations. Cette délocalisation permettra une répartition géographique en adéquation avec les zones de production et de consommation, minimisant ainsi les transports de bois et les coûts et émissions associés.

En absence de toute forme de subside et aux conditions définies par le scénario de base (voir Tableau 3 et Tableau 4 ci-dessus), le coût de production de bois sec est inférieur au prix du marché à partir

d'une taille de 0.3-0.5 MW (en fonction de la technologie retenue), ce qui définit la taille minimale permettant d'atteindre la viabilité économique.

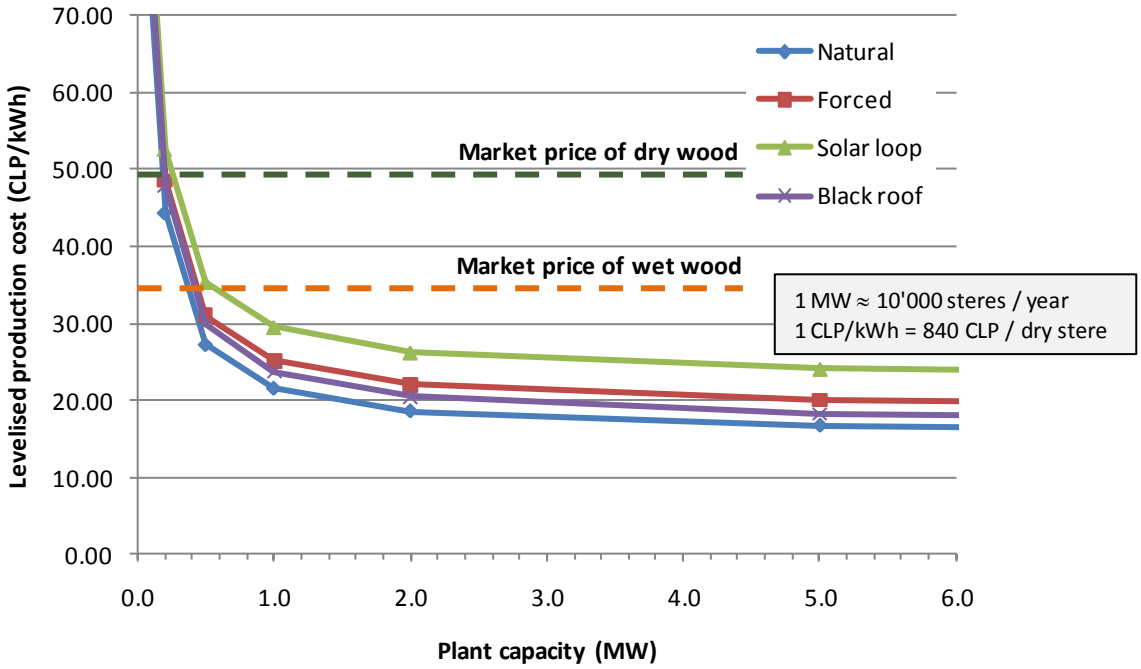

Figure 15. Coût de production de bois sec en fonction de la capacité de production annuelle du centre de séchage et de la technologie considérée.

4.4 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité à été réalisée sur les paramètres les plus influents, d'une part pour assurer la robustesse des résultats décrits ci-dessus, et d'autre part pour déterminer les conditions de viabilité économique d'un tel centre dans d'autres régions du Chili. Cette analyse a notamment pour but de déterminer si les technologies de séchage forcé peuvent s'avérer compétitives sous certaines conditions. Les paramètres variables considérés dans l'analyse de sensibilité sont

- le prix du terrain: Un prix du terrain élevé est en défaveur du séchage naturel qui requiert une surface de séchage plus importante à capacité de production égale;
- le prix de l'électricité; plus le prix de l'électricité est faible, plus le coût de production par séchage forcé est bas. L'impact est particulièrement important sur le séchage par air froid pulsé;
- la réduction du temps de séchage: plus le séchage forcé permet de réduire le temps de séchage par rapport au séchage naturel, plus la productivité augmente, et plus le coût de production associé est faible.

Notons qu'une analyse de sensibilité sur les prix du marché du bois n'a pas été réalisée car:

- La marché adaptera naturellement les prix du marché du bois sec au prix d'achat du bois humide;
- Les prix du marché du bois n'ont aucune influence sur la compétitivité relative des différentes technologies de séchage.

4.4.1 Prix du terrain

Comme le montre la Figure 16 ci-dessous, le coût du terrain n'a quasiment pas d'influence sur le coût de production du bois sec. A surface de terrain égale, la productivité du centre de séchage sera plus importante avec du séchage forcé. Cette productivité légèrement plus élevé ne parvient pas à compenser les investissements et les coûts opérationnels plus élevés du séchage forcé.

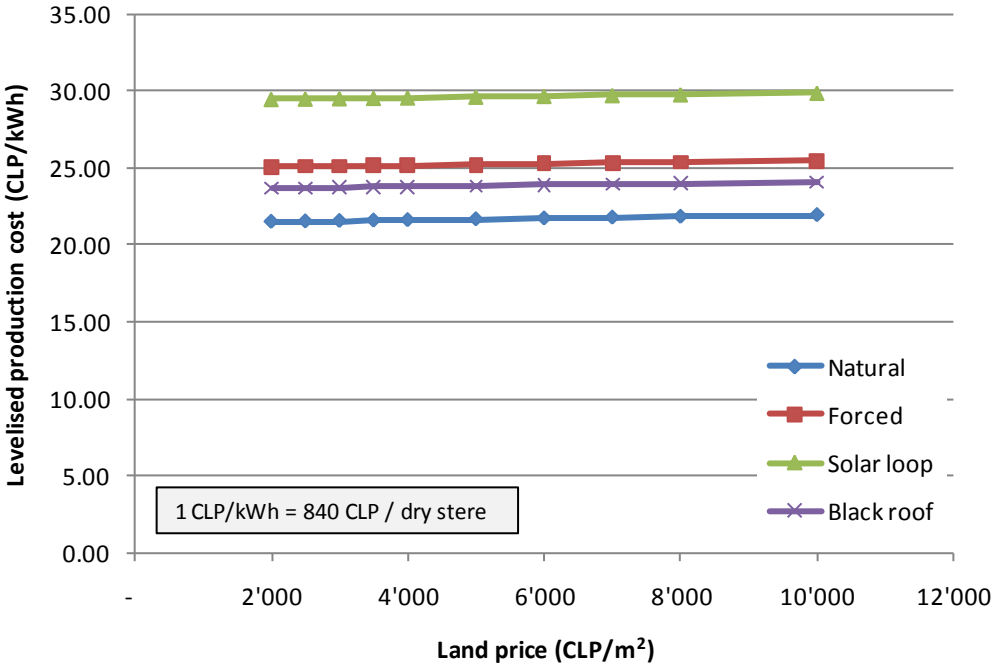

Figure 16. Evolution du coût de production de bois sec en fonction du prix du terrain.

4.4.2 Prix de l'électricité

La Figure 17 ci-dessous montre la compétitivité relatives des différentes techniques de séchage est insensible à une variation du prix de l'électricité. Le prix de l'électricité a fortement augmenté au Chili ces dernières années, et s'établit aujourd'hui à CLP 70 / kWh (CHF 0.14 / kWh) pour un petit client commercial. Ce prix très élevé de l'électricité en rapport du pouvoir d'achat pénalise fortement le séchage forcé, en particulier l'approche par air froid pulsé. Une réduction drastique (et donc parfaitement irréaliste) serait nécessaire pour rendre cette dernière technologie compétitive avec le séchage naturel.

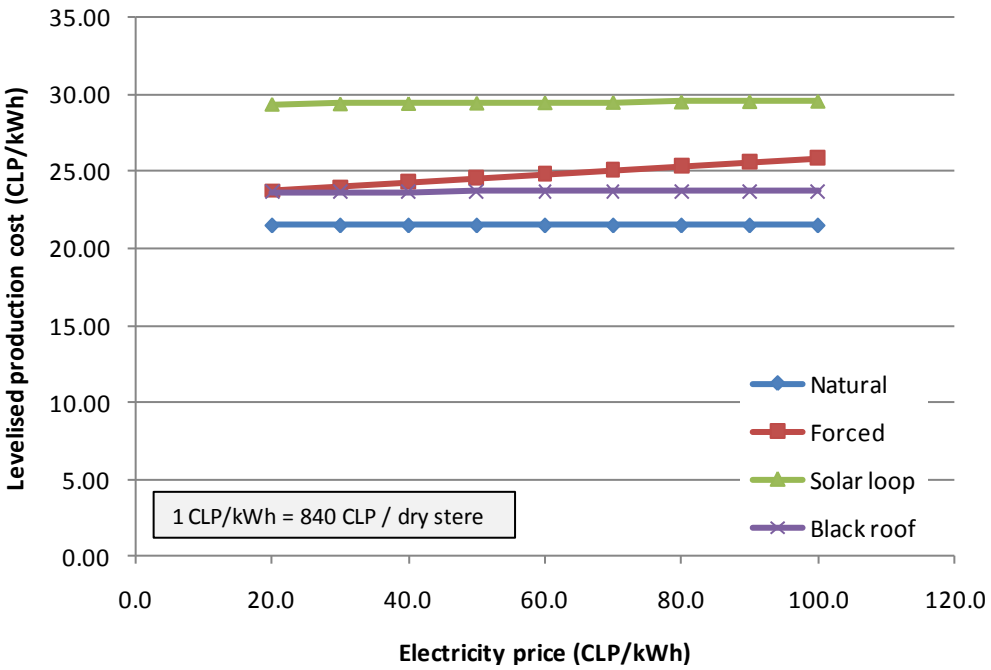

Figure 17. Evolution du coût de production de bois sec en fonction du prix de l'électricité.

4.4.3 Réduction du temps de séchage

La Section 3.3.1 présente les nombreux paramètres qui influencent le temps de séchage nécessaire pour abaisser le taux d'humidité à 25%. Le séchage forcé permet de réduire le temps de séchage par rapport au séchage naturel et par conséquent d'augmenter la productivité du centre de séchage (à taille donnée) ou de réduire la taille réelle de l'installation (à capacité de production donnée).

Dans le scénario de base, nous avons calculé une réduction de temps de séchage par rapport au séchage naturel de respectivement:

- 15% pour le séchage forcé à air froid pulsé;
- 17% pour le séchage forcé avec appoint de chaleur par panneaux solaires thermiques;
- 10% pour le séchage forcé avec appoint de chaleur par toiture opaque.

Compte tenu de la complexité de ces calculs, et de l'importance du temps de séchage sur la productivité, nous avons procédé à une analyse de sensibilité sur la réduction escomptée du temps de séchage. Afin d'assurer la robustesse des résultats, nous avons fait varier cette réduction jusqu'à 50% du temps nécessaire au séchage naturel. La Figure 18 démontre que, sous les hypothèses de scénario de base, même une réduction de 50% du temps de séchage ne permettrait pas au séchage forcé d'être plus économique que le séchage naturel.

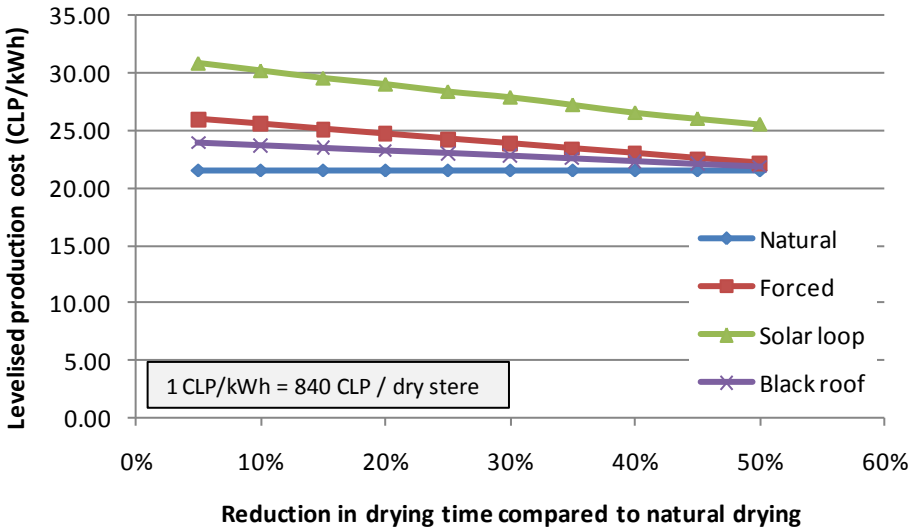

Figure 18. Evolution du coût de production de bois sec en fonction de la réduction du temps de séchage obtenue par le séchage forcé (comparé au temps de séchage naturel).

4.4.4 Scénario optimiste pour le séchage forcé à toiture opaque

Les analyses économiques ci-dessus ont montré que le séchage forcé par air pulsé ou avec appoint de solaire thermique par panneaux solaires ne peuvent en aucun cas être compétitif avec le séchage naturel, même en considérant des scénarios optimistes tels que prix bas de l'électricité ou prix élevé du terrain.

Pour le séchage forcé à air pulsé, cela est dû au coût des équipements nécessaires (ventilateurs nombreux et onéreux) et du coût opérationnel de fonctionnement des ventilateurs qui péjorent trop fortement le coût de production pour un gain minimal en productivité/temps de séchage.

Pour le séchage forcé avec panneaux solaires, le coût de l'équipement est beaucoup trop élevé et ne peut être compensé par le gain en productivité/temps de séchage.

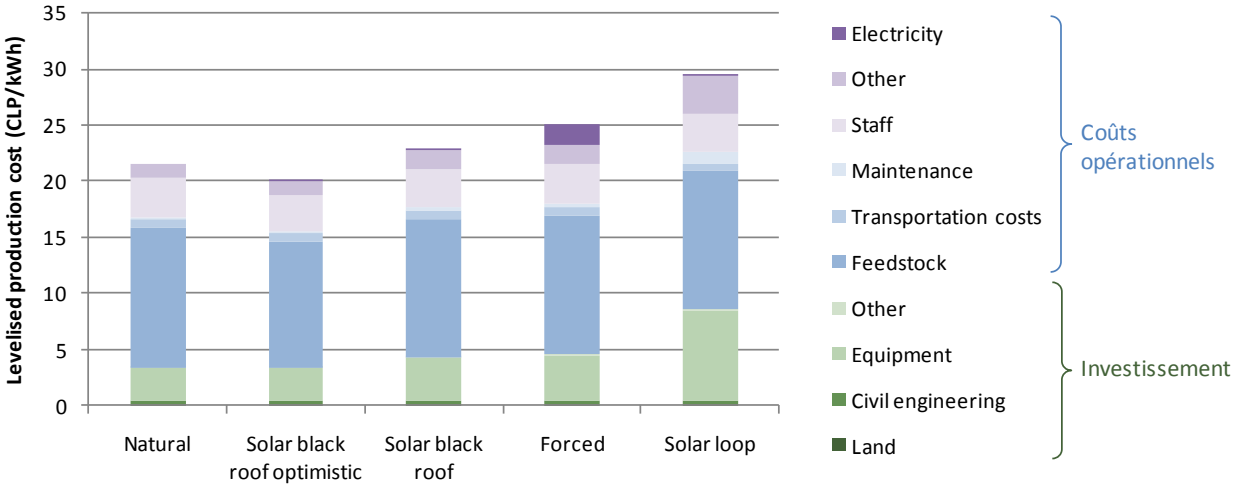

Figure 19. Coût de production de 1kWh de bois sec par technologie de séchage et par poste de dépense pour un centre de séchage d'une capacité annuelle de production de bois sec d'environ 10'000 stères (=1 MW_{th}).

Par contre, le séchage forcé par appoint de solaire thermique avec toiture noire est une option intéressante car elle peut devenir compétitive avec le séchage naturel sous certaines conditions climatiques et économiques favorables. Par exemple, la Figure 19 ci-dessus montre une comparaison dans laquelle l'option "solar black roof optimistic" permet d'avoir un coût de production moins élevé que le séchage naturel abrité. Cette option utilise les hypothèses suivantes:

- un gain en termes de temps de séchage de 30%;
- un coût des infrastructures de séchage légèrement moins élevé que le scénario de base;
- une valorisation du taux d'humidité légèrement inférieur atteint par cette option de séchage (22% au lieu de 25%).

Les techniques de séchage naturel abrité et forcé par appoint de solaire thermique avec toiture opaque reste donc les deux options les plus intéressantes d'un point de vue économique.

5 Analyse financière

5.1 Taux de rentabilité interne

Nous considérons que le prix de vente du bois sec est indépendant de la technologie de séchage choisie. Il est en effet improbable que le taux d'humidité du bois sec légèrement plus faible obtenu par le séchage forcé puisse être valorisé par un prix de vente plus élevé qu'un bois sec obtenu par séchage naturel. Ainsi, à capacité de production égale (1 MW dans le scénario de base), les différentes technologies de séchage auront des revenus égaux.

La Figure 20 montre le taux interne de rentabilité (TIR) du centre de séchage par technologie de séchage et par capacité de production annuelle. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Grâce à des marges bénéficiaires très importantes sur le prix du bois, toutes les technologies de séchage sont rentables dans les conditions de marché existantes et pour des tailles dès 0.2-0.3 MW.
- Des taux de rentabilité attractifs pour l'investisseur privé sont obtenus à partir de capacités de production entre 0.2-0.5 MW en fonction de la technologie de séchage retenue.
- Le séchage naturel offre, sans surprise, le taux de rentabilité le plus attractif grâce à son coût de production le plus faible (voir Figure 14 ci-avant). Ces taux sont même particulièrement exceptionnels. A titre d'exemple, pour une capacité de production capacité de 2 MW, un TIR de 120% peut être attendu.
- La présente analyse se base sur un coût d'achat fixe du bois ("flat supply curve"). Cette hypothèse ne tient pas au-delà d'une certaine taille d'unité de séchage, car les coûts d'approvisionnement auront tendance à augmenter pour tenir compte de coûts de transport moyen plus élevés lié à un rayon d'approvisionnement croissant, ce qui a pour effet d'annihiler les économies d'échelles. Les courbes de rendements devraient ainsi atteindre un pic de rentabilité qui devrait se situer entre 2 et 5 MW en fonction de la région considérée.[11]

[11] L'établissement d'une courbe d'approvisionnement (supply curve) va largement au-delà du présent projet, mais devra être considéré lors d'établissement de plan d'affaires d'unité de séchage spécifiques.

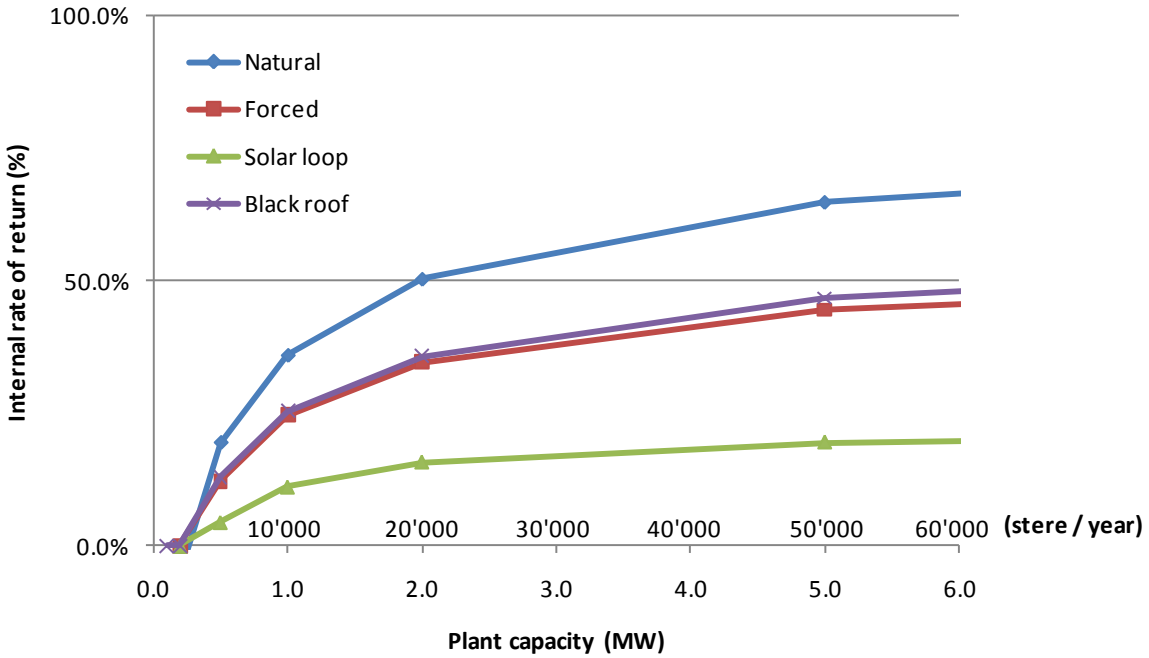

Figure 20. Taux de rentabilité interne des centres de séchage par technologie de séchage et capacité de production.

5.2 Plus-value du centre de séchage

La Figure 21 montre une comparaison de prix du bois sec et humide sur le marché d'Osorno par unité de volume (axe horizontal) et de pouvoir calorifique (axe vertical) pour différentes taille d'unité. Les prix du marché du bois sec et humide, ainsi que le coût de production du bois humide sont également indiqués sur le graphe.

Ce graphe est très instructif et permet de tirer les conclusions importantes suivantes:

- Les centres de séchage peuvent produire du bois sec à des prix inférieur au prix du marché à la fois du bois sec (par unité de volume et d'énergie) à partir de capacité de séchage de 0.2 MW environ.
- A partir de capacité de production de 0.3 MW environ, les économies d'échelle réalisées permettent d'obtenir des coûts de production du bois sec (par kWh et par stère) en dessous du prix du marché du bois humide!
- A partir de capacité de production de 2 MW, les économies d'échelle réalisées sont telles que le coût de production du bois sec est plus bas que le coût de production du bois humide (par unité d'énergie). Cela revient à dire que le centre de séchage est capable de vendre le bois en dessous du prix d'achat, tout en étant économiquement parfaitement rentable. Ce paradoxe apparent vient du fait que les prix du marché du bois de chauffe sont basés sur une unité volumique (prix/stère), alors que la valeur commerciale du bois (ce pour quoi le consommateur paie) est le pouvoir calorifique (prix/kWh).
- Les centres de séchage ont donc la capacité économique de s'insérer dans la chaîne de valeur du bois de chauffe sans perturber ni le fonctionnement, ni les prix du marché.

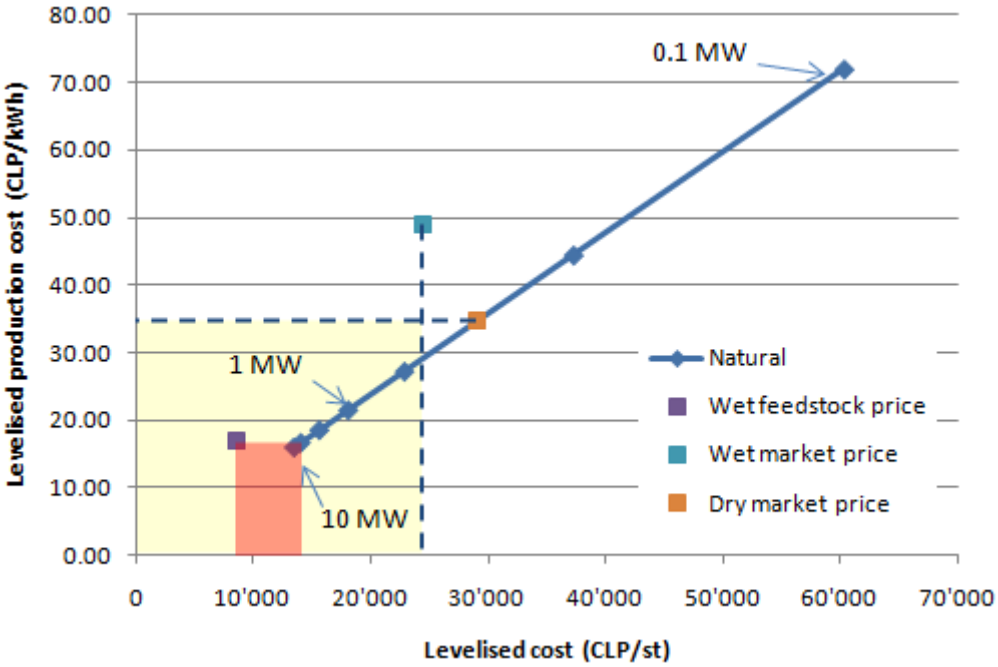

Figure 21. Comparaison entre les prix de vente du bois sec et humide sur le marché chilien et le prix de revient du bois sec produit par le centre de séchage à séchage naturel abrité.

Ces résultats exceptionnels font des unités de séchage des projets gagnant sur tous les tableaux (win puissance 5): ils sont en effet en mesure d'apporter une plus value à la fois :

- Economique: les centres de séchages sont économiquement viables.
- Énergétique: la combustion du bois sec permet d'augmenter de 50% environ l'efficacité énergétique de la filière du bois de chauffe.
- Environnementale: les centre de séchage offre un point de contrôle sur le type et les volumes de bois exploités, permettant de vérifier la durabilité de l'exploitation de la ressource.
- Santé publique: la combustion du bois sec permet de réduire de manière significative les émissions nocives de particules fines.
- Sociale: Compte tenu de la profitabilité élevée des centres de séchage, une redistribution plus équitable des revenues peut être assurées, permettant notamment de payer mieux les producteurs et de proposer du bois sec à un prix plus bas que le bois humide au consommateur final.

6 Unité pilote

6.1 Objectifs de l'unité pilote

La construction de l'une unité pilote de séchage du bois de chauffage au Chili a de multiples objectifs:

1. confirmer la viabilité techno-économique des centres de séchage et de valider certains paramètres incertains (temps de séchage, coût de production, etc.);
2. démontrer la viabilité du modèle d'affaires;
3. valider les conditions économiques et financières sous lesquelles les acteurs existants (producteurs et consommateurs) sont naturellement incités à intégrer le centre de séchage dans la chaîne d'approvisionnement du bois de chauffe;
4. tester le modèle d'approvisionnement et de distribution retenu pour le centre de séchage;
5. évaluer le potentiel de réplication à échelle réelle du centre de séchage dans d'autres régions du Chili ou d'Amérique Latine.

6.2 Région retenue

L'unité pilote sera réalisée dans la région de Los Lagos, près de la ville d'Osorno (voir Figure 22), qui est particulièrement touchée par le problématique de la combustion de bois humide et présente un fort taux de pollution aux particules PM_{10}.

Figure 22. Région prévue pour l'implantation de l'unité pilote.

6.3 Site retenu

Un investisseur privé, la société Constructora MT Ltda, a confirmé qu'il participera aux investissements nécessaires pour la construction de l'unité pilote en mettant à disposition un terrain de 5 ha. Ce terrain est idéalement situé entre les zones de production du bois de chauffe et la ville d'Osorno, minimisant ainsi le transport du bois. La lettre d'engagement de Constructora MT Ltda est disponible en Annexe 1.

Le terrain est idéalement situé car proche des centres de consommation de bois. Il permettra ainsi la distribution de bois sec à la fois aux institutions locales et aux ménages privés.

6.4 Technologie retenue – toiture opaque

L'unité pilote utilisera la technique de séchage forcé avec appoint solaire thermique par toiture opaque. Ce choix se base sur les raisons suivantes:

1. cette technologie est non seulement la plus économique des options de séchage forcé, mais elle est également quasi-compétitive avec le séchage naturel abrité, malgré des hypothèses conservatrices utilisées pour le calcul de la rentabilité (notamment en ce qui concerne le temps de séchage). Nos calculs ont montré que dans des conditions climatiques plus

favorables qu'à Osorno, cette technologie pourrait s'avérer plus économique que le séchage naturel abrité. Elle est donc très intéressante en terme de potentiel de réplication;

2. cette technologie permet de produire du bois avec un taux d'humidité légèrement inférieur à celui du séchage naturel, offrant un meilleur pouvoir calorifique[12].
3. cette technologie utilise que très peu d'électricité et tire parti de l'énergie renouvelable qu'est le solaire; En outre, la consommation électrique est suffisamment faible pour potentiellement être produite par du photovoltaïque;
4. cette technique de séchage permet d'être moins dépendant des conditions climatiques que le séchage naturel abrité, permettant de niveler les variations annuelles du le temps de séchage
5. le temps de séchage du bois est significativement raccourci par rapport au séchage naturel (10-30%), permettant d'apporter plus rapidement du bois sec sur le marché, et ne souffrant pas de l'impossibilité de terminer le séchage à l'orée de la saison pluvieuse (problématique cruciale du séchage naturel).
6. cette technologie bénéficie d'un faible coût spécifique du capital par rapport aux autres techniques de séchage forcé, minimisant ainsi le risque pour les investisseurs;
7. cette technologie est simple, mais néanmoins innovante et astucieuse; Elle permettrait de positionner le Chili en tant que pionnier dans le déploiement de cette technologie;
8. le concept peut évoluer vers l'utilisation de la ventilation naturelle par effet cheminée[13] qui permettrait de se débarrasser totalement des ventilateurs et donc de réduire à zéro la consommation énergétique.

6.5 Dimensionnement

Le budget prévu pour l'achat du terrain et la construction de l'unité pilote (phase 2 du projet) est de CHF 227'000, selon le plan de financement indiqué dans le tableau 5. Ce budget comprend les études techniques et financières nécessaire à la création d'une entreprise, l'établissement de la chaîne d'approvisionnement et de vente, ainsi que la construction et la mise en route de l'unité pilote.

[12] Bien que ce gain en pouvoir calorifique ne puisse difficilement être valorisé commercialement, il représente une plus-value énergétique et environnementale non-négligeable.

[13] En ajoutant une cheminée à la structure du hangar de séchage, on peut créer une différence de densité entre l'air chaud et humide de l'intérieur du hangar et l'air froid et sec de l'extérieur, générant une extraction par ventilation naturelle de l'air humide vers l'extérieur. Cette approche innovante, basée sur le principe de l'effet de cheminée, est utilisée notamment dans le concept de tours solaires.

Tableau 5. Plan de financement pour l'ensemble du projet REPIC de réalisation d'une unité pilote de séchage du bois de chauffage au Chili.

Phase du projet	Budget total [CHF]	Financement du projet [CHF]			
		CONAMA	Constructora MT Ltda	Université de Los Lagos	Financement demandé à REPIC
Phase 1 - Etude stratégique	84'000.-	0.-	0.-	20'000.-	64'000.-
Phase 2 – Unité pilote	**261'000.-**	**120'000.-**	**30'000.-**	**30'000.-**	**81'000.-**
Construction de l'unité pilote	*227'000.-*	*120'000.-*	*30'000.-*	*15'000.-*	*62'000.-*
Dissémination	*17'500.-*	*0.-*	*0.-*	*12'000.-*	*5'500.-*
Frais de projet	*16'500.-*	*0.-*	*0.-*	*3'000.-*	*13'500.-*
Total projet (phase 1 + 2)	**345'000.-**	**120'000.-**	**30'000.-**	**50'000.-**	**145'000.-**

Pour un tel capital, l'unité pilote pourra avoir une capacité de production annuelle de 100 kW, ce qui correspond à une production d'approximativement 1'000 stères de bois sec par an. Les tableaux ci-dessous présentent la taille des infrastructures prévues ainsi que les principaux postes d'investissement.

Tableau 6. Taille des principales installations de l'unité pilote de séchage du bois.

Infrastructure	Dimensions	
Hangar de séchage	Hauteur [m]	4
	Longueur [m]	18
	Largeur [m]	15
	Surface au sol [m^2]	273
Hangar de stockage	Hauteur [m]	4
	Longueur [m]	15
	Largeur [m]	2
	Surface au sol [m^2]	30

Tableau 7. Principaux postes d'investissement.

Poste de dépense	Unité	Dépense
Nivellement du terrain	CHF	3'600
Construction du hangar de séchage	CHF	48'200
Isolation et peinture du toit	CHF	8'500
Ventilateurs	CHF	5'000
Equipements de manutention (grue, chariot élévateur, camion)	CHF	40'000
Equipement de stockage	CHF	20'500
Clôture	CHF	2'200
Bureaux in situ	CHF	4'000
Box de gardien	CHF	1'000
Autres dépenses	CHF	37'000

6.6 Rentabilité de l'unité pilote

Un centre de séchage d'une capacité annuelle de 100 kW est sous le seuil de rentabilité calculé dans l'analyse économique. Néanmoins, compte tenu du financement principalement par subside, l'unité pourra néanmoins atteindre la viabilité économique, assurant ainsi sa pérennité.

6.7 Business plan

Le business plan de l'unité pilote sera rédigé dans le cadre de la phase 2 du projet "réalisation de l'unité pilote".

6.8 Ingénierie de détail

Les plans détaillés de l'unité pilote seront dessiné dans le cadre de la phase 2 du projet "réalisation de l'unité pilote".

7 Modèle d’affaires

7.1 Objectifs du modèle d'affaires

Etant donné la nature très informelle du marché du bois de chauffe au Chili, il est très difficile de légiférer pour imposer la phase de séchage du bois. Par conséquent, seul un modèle d'affaire incitatif basé sur les lois du marché permettra un réel déploiement à large échelle des centres de séchage. Dans ce contexte, le modèle d'affaire retenu pour les centres de séchage devra permettre d'atteindre les objectifs suivants:

- optimiser les bénéfices socio-économiques et environnementaux apportés,
- tout en offrant des conditions suffisamment attractives aux acteurs de l'industrie du bois de chauffe pour représenter une incitation naturelle (loi du marché) à intégrer la phase de séchage dans la chaîne de valeur, et permettre ainsi un taux de déploiement élevé des centre de séchage.

7.2 Modèle de propriété

Différents modèle de propriété sont envisageable pour les centres de séchage, chacun présentant des avantages et des inconvénients propres vis-à-vis des objectifs du modèle d'affaire. Une comparaison des principaux modèles de propriétés envisageables est présentée dans le Tableau 8.

Cette analyse tend à montrer que le modèle de propriété privé avec contrôle étatique au travers de subsides pourrait s'avérer la forme la plus prompte à répondre à ces objectifs. La coopérative permet de répondre aux objectifs sociaux, notamment en apportant une plus-value économique aux communautés rurales de producteurs, mais ne permet pas un déploiement rapide des centres de séchages.

Tableau 8. Comparaison des modèles de propriété possible pour les centres de séchages.

Modèle de propriété	Avantages	Risques et barrières	Niveau d'atteinte escompté des objectifs
Privé	• Compatible avec la nature informelle du marché. • Permet de garantir une forme d'optimisation économique.	• La nature informelle du marché et l'absence de régulation pourrait rendre hésitant l'investisseur privé ou engendrer des exigences trop élevées en termes de retour sur investissement. • Faible niveau de contrôle de la durabilité de l'exploitation forestière. • Faible niveau de contrôle de la qualité du bois produit (taux d'humidité du bois sec). • Aucune incitation naturelle à minimiser le taux d'humidité résiduel du bois sec produit. • Peu ou pas de bénéfices socio-économiques pour les communautés rurales.	Permet d'atteindre les objectifs économiques, mais les objectifs sociaux, environnementaux et d'efficacité énergétique ont peu de chance d'être pris en compte dans ce modèle de propriété. ☹
Public	• Permet un déploiement accéléré des centres de séchages. • Permet une vision globale et une optimisation de la distribution géographique et de la taille des centres de séchages. • Clientèle institutionnelle garantie facilitant la rentabilité économique de centres de séchage. • Excellent niveau de contrôle de la durabilité de l'exploitation forestière.	• Risque de faible taux d'adoption par les acteurs de la branche à cause de la nature peu compatible avec le marché informel en vigueur. Difficulté devra probablement être compensée par des conditions économiques particulièrement attractives, réduisant ainsi la rentabilité des centres de séchage. • Ingérence de l'état dans le secteur privé peu compatible avec l'économie de marché en vigueur au Chili. • La gestion réussie de centres de séchage nécessite une connaissance profonde du marché informel du bois et de ses acteurs. L'état n'a pas l'expérience suffisante pour jouer ce rôle.	Permettrait d'optimiser les objectifs à atteindre, mais le modèle sera très difficile à instaurer dans le contexte informel du marché. ☹
Partenariat public-privé	• Permet de rassurer l'investisseur privé, notamment en garantissant des canaux de distribution auprès des clients institutionnels. • Permet une vision globale et une optimisation de la distribution géographique et de la taille des centres de séchages. • Bon niveau de contrôle de la durabilité de l'exploitation forestière.	• Difficile à instaurer en respectant les lois du marché public, engendrant un faible taux de déploiement des centres de séchage. • Risque significatifs d'intérêts divergents, mettant en péril le potentiel de déploiement. • Modèle peu compatible avec nature informelle du marché.	Permet de mitiger certains des désavantages spécifiques des modèles privé ou public mais promet d'être difficile à instaurer notamment au vu du risque élevé de conflit d'intérêt.

			😐
Coopérative	• Permet d'impliquer et de responsabiliser les acteurs de la chaîne de distribution. • Permet une forme d'autocontrôle de la durabilité de l'exploitation forestière • Avantages socio-économiques potentiels pour les communautés rurales (si impliquées). • Présente une garantie de succès grâce à une compréhension profonde du marché du bois par les acteurs impliqués	• Difficile à instaurer (beaucoup d'acteurs à convaincre peu habitués à ce genre de modèle), engendrant un faible taux de déploiement des centres de séchage. • Nécessite une forte volonté d'initiative locale qui n'existe pas à priori dans les communautés concernées. • Risque de modifier fondamentalement la structure de prix du marché, avec impact potentiel sur la compétitivité du bois sec avec la bois humide en terme de $/stère.	Approche très intéressante au niveau des objectifs, mais plus opportuniste que réellement implémentable dans le cadre d'un programme de déploiement. ☺
Privé avec subsides publics	• Compatible avec nature informelle du marché. • Permet un déploiement accéléré des centres de séchages. • Permet une vision globale et une optimisation de la distribution géographique et de la taille des centres de séchages. • Subside permet d'apporter plus-value économique aux communautés rurales. • Permet à l'état d'imposer des règles pour éviter les inconvénients du modèle de propriété privé.	• Coût direct potentiellement élevé pour les finances publiques (mais coût global peut néanmoins s'avérer négatif si les subsides consentis permettent une réduction drastiques des dépenses publiques de santé lié à la pollution aux particules fines). • Engendre une légère distorsion du marché.	Présente les avantages du modèle privé sans en comporter les inconvénients. Probablement le modèle le plus intéressant dans une première phase de déploiement de ces centres de séchage. ☺

7.3 Principes du modèle d'affaires

7.3.1 Approvisionnement en bois humide

Dans la situation de marché actuelle, les producteurs vendent le bois humide car ils n'ont pas la capacité financière à la faire sécher. Par conséquent, le modèle d'affaire devra absolument être au moins aussi attractif que le système actuel pour s'assurer une fourniture suffisante et continue.

Deux modèles d'achat du bois aux producteurs sont envisageables (le bois est considéré comme livré par les producteurs au centre de séchage):

- Les producteurs sont payés à la livraison. Les coûts d'immobilisation du capital investit dans le stock incombe donc au centre de séchage, et correspondent au taux d'intérêt de la dette ou au rendement exigé du capital propre.
- Les producteurs sont payés lorsque le bois aura été séché (8-10 mois plus tard). Les coûts d'immobilisation du capital investit dans le stock incombe donc aux producteurs. Compte tenu que ces derniers ont une capacité financière très faible, un taux d'intérêt important devra être pratiqué pour rendre cette option attractive. Le taux d'intérêt maximal qui pourra être offert au producteur correspond au taux d'intérêt de la dette ou au rendement exigé du capital propre.

Afin d'inciter les producteurs à fournir le centre de séchage plutôt que les intermédiaires du marché, un prix d'achat légèrement plus élevé que celui marché pourra être proposé, en l'échange de contrat d'approvisionnement long terme. En outre, un certain nombre de services additionnels pourraient être offerts aux producteurs tels que prise en charge du bois sur site de production, revente de bois sec à prix avantageux, aiguisage et fourniture de pièce de rechange pour les outils de coupe, formation sur l'exploitation forestière durable, etc. La pertinence et la viabilité économique de ces services additionnels devra être évaluée de cas en cas.

7.3.2 Distribution du bois sec

Il existe deux modèles de distribution du bois sec:

- **Vente du bois sec aux intermédiaires**. Dans ce modèle, le centre de séchage s'immisce simplement dans la chaîne d'approvisionnement existante en assurant le séchage que ni les producteurs ni les intermédiaires n'ont la capacité technique et/ou financière d'assumer. Pour que ce modèle soit attractif pour les intermédiaires (en l'absence de contraintes légales), le centre de séchage devra vendre le bois sec aux intermédiaires à un prix égal au plus à: Prix de vente du bois sec aux institutionnels – (Prix de vente du bois humide aux institutionnels – Coût d'achat du bois humide). Dans les conditions de marché actuelles, ce prix de vente aux intermédiaires serait de l'ordre de CLP 29'000 – (CLP 24'500 – CLP 8'500) = CLP 13'000 (CHF 26), assurant une marge d'environ CLP 16'000 / stère pour les intermédiaires. Des rabais pourraient être accordés en l'échange de contrat de reprise long terme. Le prix minimal auquel le bois sec pourrait être vendu aux intermédiaires dépend de la taille de l'unité pilote et de la technologie de séchage. A 1 MW, ce prix est de CLP 17'600 / stère.
- **Vente de bois sec directement aux consommateurs finaux**. Dans ce modèle, le centre de séchage entre en concurrence avec les intermédiaires pour la distribution, mais bénéficie d'une rentabilité maximale. Le risque principal lié à cette situation est une concurrence non-souhaitable entre bois sec et bois humide, n'incitant pas à la promotion naturelle du bois sec.

Pour s'imposer à large échelle dans ce marché informel guidé par le prix d'achat au stère, les centres de séchage risquent d'être contraints de vendre le bois sec au prix du bois humide. La marge serait alors de l'ordre de CLP 24'500 – CLP 8'500 = CLP 16'000 (livraison comprise). Ce simple calcul indique l'importance du rôle des intermédiaires dans la distribution du bois sec.

- **Modèle intermédiaire**. Le modèle probablement le plus durable est celui de la vente directe aux institutionnels (surtout en cas de participation étatique au modèle de propriété ou sous forme de subside), et de vente aux intermédiaires pour les consommateurs privés (ménages et industrie).

7.4 Subsides

7.4.1 Pourquoi subsidier?

L'analyse économique a montré que les centres de séchage pouvaient être intrinsèquement rentables. Dans une telle situation, un soutien étatique peut paraître difficile à cautionner dans une économie de marché. Néanmoins, un soutien du gouvernement (régional ou national) trouve plusieurs justifications:

- La problématique de la pollution aux particules fines est critique et des solutions urgentes doivent être trouvées. Le subside au centre de séchage est un moyen efficace d'assurer un déploiement rapide des centres de séchage, et donc un accroissement des volumes de bois sec sur le marché.
- Compte tenu de la nature informelle du marché du bois de chauffe, il est très difficile de légiférer pour contraindre les producteurs et distributeurs au séchage du bois. Dans ce contexte, l'approche "carotte" s'avère bien plus efficiente que l'approche "bâton".
- Il est très difficile de contrôler de manière simple qu'un bois est parfaitement sec. Il convient donc de travailler sur une incitation au séchage plutôt que sur la contrainte au séchage. En outre, un subside donne un droit de regard sur le taux de séchage effectivement obtenu dans les centres. Un centre de séchage entièrement privée pourrait facilement vendre du bois comme sec, alors que son séchage aurait été écourté pour augmenter la productivité.
- Toute forme de soutien au centre de séchage donnerait à l'état un certain droit de regard sur la gestion de ces centres. Ceci offrirait un point de contrôle privilégié sur la durabilité qui est faite de la ressource forestière (volume exploité, type de bois extrait, etc.). C'est un point capital qui a été retenu comme très important par le ministère de l'environnement lors de la présentation des résultats.
- En dépit de la forte rentabilité potentielle des centres de séchages, il est peu probable que de tels centres voient le jour en absence de soutien étatique clair. Le risque pour l'investisseur est en effet relativement élevé compte tenu de la nature informelle du marché, et de la compétition directe avec entre le bois sec et le bois humide. Un soutien de l'état permet d'une part de crédibiliser ces projets aux yeux des investisseurs privés, tout en réduisant le risque en offrant un accès privilégiés aux clients institutionnels (bâtiments publics chauffés au bois).
- Le soutien financier qui pourrait être offert au centre de séchage devrait être considéré comme un investissement et non comme un subside. En effet, chaque US$ investit dans un centre de séchage permet de réduire les dépenses liées à la santé publique (voir section 7.4.3).

7.4.2 Comment subsidier?

Les principales barrières au développement des centres de séchage sont:

- la barrière du capital initial;
- le risque de ne pas pouvoir vendre le bois sec à cause de la concurrence du bois humide.

Les deux formes principales de subsides qui permettent de lever ces barrières sont:

- la subvention au capital pour la construction des centres de séchages;
- le tarif de reprise ou contrat de reprise du bois sec.

Les avantages et inconvénients comparés de ces deux formes de soutien sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Comparaison des formes de soutien étatique pour le centre de séchage.

Forme de subsides	**Avantage**	**Inconvénient**
Subvention	• Facile à instaurer • Retour sur investissement facile à calculer	• Effet du subside retardé dans le temps • Relativement coûteux
Tarif de reprise	• Offre un haut niveau de sécurité aux investisseurs • Peu d'impact sur les dépenses publiques	• Difficile à implémenter • Doit être robuste sur une période de longue durée • Adapté pour le marché institutionnel à l'échelle régionale, mais difficilement concevable de l'étendre au marché privé.

7.4.3 Combien subsidier?

Coût sociétal: Le coût sociétal total de la pollution aux particules fines $PM_{2.5}$ à Osorno est estimé à USD 190 million par an, dont 90% (USD 171 millions) de cette pollution est due au chauffage au bois (Figure 23). De ces 171 millions, 60% (103 millions) sont dus à la combustion de bois (le reste est attribué à l'utilisation d'appareils de faible efficacité énergétique et à leur mauvaise utilisation) (CONAMA, 2010).

Coût public: Dans la ville de Temuco, qui souffre du même problème de pollution qu'Osorno, il a été estimé que 24% du coût sociétal total est couvert par le gouvernement sous forme de dépenses de santé publique (Conama 2010), le reste du coût sociétal (76%) étant assumé par le secteur privé. Si l'on considère le même pourcentage pour Osorno, cela correspond à un coût public annuel de US$ 43 millions, dont US$ 25 millions (60%) lié à la combustion du bois (16 millions lié à la combustion du bois humide, et 9 millions lié à celle du bois sec. Voir Figure 23).

Bénéfice sociétal associé à la combustion du bois sec: En considérant que la combustion de bois humide augmente d'un facteur 2 à 4 les émissions polluantes par rapport à du bois sec (AMPASEL et al., 2007), et en faisant l'hypothèse (grossière) que le coût de la pollution est proportionnel au niveau de pollution, on peut conclure que la substitution totale sur le marché du bois humide par du bois sec permettrait d'éviter un coût sociétal d'environ $65 millions par an (Figure 23).

Coût d'une transition vers du bois sec: En 2009, 167'000 stères de bois ont été brûlés dans la ville d'Osorno (Conama 2010). Il est estimé que plus de 90% de ce bois est brûlé humide (réf). Selon notre

modèle, le coût du séchage annuel de ces 167'000 stères en centre de séchage de 1MW serait de US$ 3.3 million[14] (Figure 23).

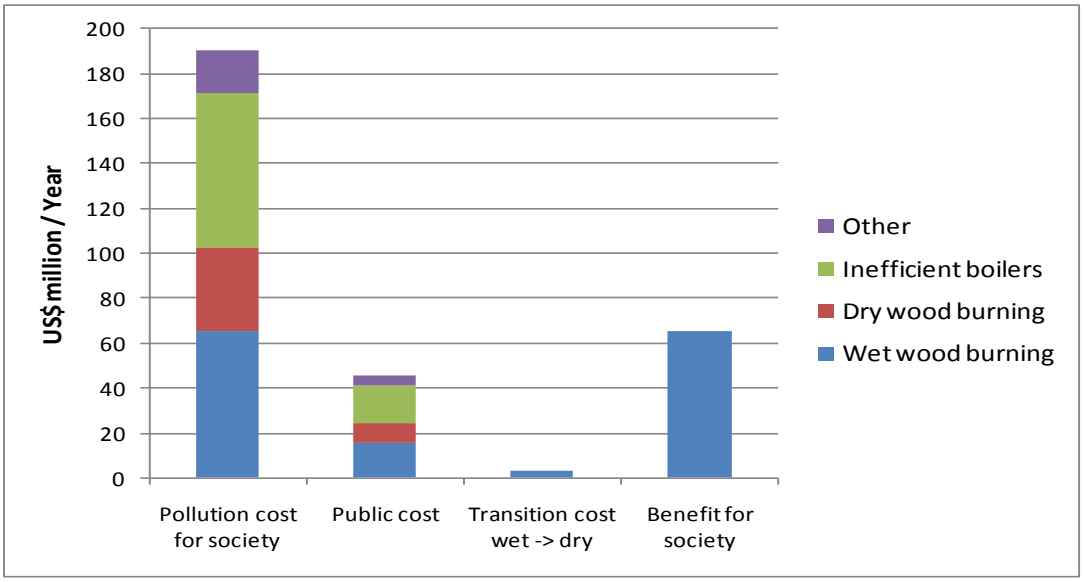

Figure 23. Analyse du coût de la pollution lié à la combustion du bois humide et coût direct d'élimination de cette pollution.

Retour sur investissement. Compte tenu que le subside au séchage permet de réduire des dépenses de santé publique, il peut être considéré comme une forme d'investissement. Ainsi, en supposant que le gouvernement était prêt à subsidier l'entier du coût de séchage du bois, il lui en coûterait US$ 3.3 par année, pour une diminution de dépenses publiques d'environ US$ 16 millions, soit un retour sur investissement de près de 1500%. Et ceci sans compter les bénéfices sociaux-économique induits, à savoir:

- Réduction de dépenses privées de santé;
- Réduction des dépenses privées de combustible bois;
- Amélioration du niveau global de santé publique;
- Augmentation de la sécurité énergétique grâce à une augmentation de l'efficacité énergétique de la chaîne du bois de chauffage.

[14] Calculé comme le coût de production du bois sec moins le coût de production du bois humide, soit US$20/stère.

8 Potentiel d'évolution des centres de séchage

Une étude plus détaillée sera nécessaire le moment venu pour évaluer précisément le potentiel de développement des centres de séchage. Néanmoins, les éléments suivants permettront d'orienter la réflexion future.

8.1 Technologie toiture noire avec convection naturelle

Comme indiqué à la section 6.4, la technologie de toiture noire utilisée pour l'unité pilote pourra rapidement évoluer vers une technologie 100% renouvelable (avec apport d'électricité photovoltaïque), soit vers une solution sans besoin énergétique par convection naturelle induite par effet cheminée. Cela représente des options prometteuses et innovantes pour le séchage artificiel du bois.

8.2 Fabrication de pellets

Le marché du combustible bois au Chili est dominé aujourd'hui par la bûche. Néanmoins, le marché du pellet, bien qu'encore très faible, jouit d'une forte croissance. Or ces pellets sont aujourd'hui transportés sur près de 1000 km depuis le centre vers le sud du Chili, cette dernière région ne possédant pas encore d'infrastructure de production.

Compte tenu que la fabrication du pellet nécessite du bois sec en entrée, les centres de séchage offrent une importante synergie avec des unités de pelletisation. En outre, cette production de pellet locale pourrait relativement facilement suivre l'évolution de la demande, en granulant une part croissante des bûches sèches produites.

8.3 Service additionnels

En instaurant un service de coupe et du bois sur le site des centres de séchage, ces unités de granulations pourraient en outre bénéficier de la sciure produite.

Finalement, la chaleur produite lors de la phase de pelletisation pourrait être récupérée pour le séchage du bois.

Les centres de séchage pourraient en outre offrir un certain nombre de services et d'informations liés à l'exploitation, à la préparation et à l'utilisation du bois de chauffage, et devenir des sortes de centres de compétence en la matière. Ceci répondrait à un besoin avéré.

9 Impact environnemental des centres de séchage

9.1 Impact sur la durabilité de l'exploitation forestière

L'exploitation forestière au Chili est soumise à l'autorisation de la CONAF au travers de permis d'exploitation. Cependant, le marché du bois de chauffage étant très largement informel, le contrôle des volumes effectivement exploités est impossible. Il est en effet très difficile de réguler un marché informel.

Le déploiement des centres de séchages permettrait d'instaurer un point de contrôle des volumes exploités et des types de bois extraits. Cela revient à une forme de formalisation du marché permettant à l'état d'acquérir un certain nombre de données cruciales relatives à l'exploitation forestière, lui permettant d'une part de déceler des abus, et d'autre part d'ajuster la législation en vigueur en toute connaissance de cause.

Cet avantage a été reçu de manière extrêmement favorable par les organismes gouvernementaux qui souffrent actuellement de n'avoir aucun contrôle de la gestion qui est faite de la ressource forestière. Les autorités compétentes sont parfaitement conscientes que cette situation ne peut être réglée à coup de réglementation (politique du bâton) dont l'impact sur le marché informel est faible. Le fait qu'une politique de la carotte (voir section sur les subsides) puisse aider la situation est une approche considérée comme très prometteuse.

Par ailleurs, une transition de la consommation du bois humide vers le bois sec, permettrait de réduire de 30% à 40% la demande de bois annuelle, réduisant ainsi les volumes de bois extrait des forêts.

En résumé, les centres de séchages pourraient offrir des garde-fous efficaces contre le risque de gestion non-durable de la forêt chilienne.

9.2 Impact sur le niveau de pollution aux particules fines

L'un des objectifs des centres de séchages est de lutter contre la pollution aux particules fines, étant donné que la combustion du bois sec génère 2 à 4 fois moins d'émission de PM10 que le bois humide (voir section 7.4.3 pour plus d'information sur le potentiel des centres de séchage à répondre à cette problématique). Il est attendu que les centres apportent une contribution majeure à la réduction de cette pollution dans les zones saturées du sud du Chili.

9.3 Impact environnemental de l'unité pilote

L'unité pilote sera située en zone industrielle, à 3 km de la ville d'Osorno et présente pas de risque particuliers. En ce sens, son impact environnemental direct sera très limité, et une étude d'impact ne sera pas requise.

Par ailleurs, l'unité pilote n'aura aucune incidence sur la distance totale de transport du bois, puisque situé sur la route normale de distribution. La taille des futurs centres de séchages devra être optimisée de manière à réduire globalement l'impact environnemental lié au transport du bois (réduire les distances totales parcourues et favoriser le transport du bois sec plutôt qu'humide).

10 Impact socio-économique des centres de séchage

10.1 Impact sur les acteurs de l'industrie du bois

Impact sur les producteurs. La substitution du bois humide par du bois sec sur le marché devrait réduire la consommation volumique totale de bois de quelque 30-40% avec un impact économique majeur sur les producteurs des communautés rurales. Le modèle de négoce retenu devra permettre de compenser cette perte de gain. Deux solutions sont envisageables (voir section ?? pour plus d'information):

- Les centres de séchage pourraient offrir des prix d'achat aux producteurs plus favorables que les prix du marché (voir section 7.3.1 pour plus d'information).
- En formant de coopérative de producteurs, ces derniers pourraient créer leurs propres centres de séchage, bénéficiant ainsi de la plus-value économique liée à l'étape de séchage.

Il est à noter que ces deux approches sont très incitatives pour les producteurs, engendrant un soutien important de la part des communautés rurales.

Impact sur les revendeurs. L'impact sur les revendeurs dépendra du modèle de distribution-vente retenu par les centres de séchage:

- Si les centres de séchage revendent le bois sec aux intermédiaires, l'impact économique ne sera pas très important. Le prix d'achat lus élevé et le volume de vente plus faible sera compensé par un prix de vente du bois sec plus élevé.
- Si les centres de séchage vendent le bois directement aux consommateurs finaux, ils entreront en concurrence avec les revendeurs. Un risque existe que les revendeurs baisse le prix du marché du bois humide afin de regagner les parts de marché perdues. Une mitigation possible serait que les centres de séchage vendent le bois directement aux institutionnels, mais passent pas les revendeurs pour la clientèle privée.

Impact sur les consommateurs. En substituant du bois humide par du bois sec, au prix du marché actuel chilien, le consommateur réduira de quelque 30-40% sa consommation de bois grâce au gain en pouvoir calorifique, engendrant une réduction de sa facture bois annuelle de 10% à 30% suivant les prix du marché en vigueur.

10.2 Impact sociétal

Les centres de séchage apportent deux bénéfices sociaux majeurs liés à la réduction des émissions de particules fine PM10:

- Réduction des maladies pulmonaires;
- Réduction de la facture de santé pour le secteur privé (correspondant à US$40 millions pour la ville d'Osorno).

10.3 Indépendance énergétique

La réduction massive du volume de bois consommé grâce à une transition vers du bois sec permet d'économiser la ressource forestière, augmentant ainsi l'indépendance énergétique du pays.

11 Gestion des risques

Une identification systématique des risques a été effectuée en détaillant les activités de l'unité pilote dans une approche top-down. L'ensemble de ces vulnérabilités sont présentées dans le Tableau 10 ci-dessous.

Une approche semi-quantitative a été retenue afin de permettre une classification des risques et une identification des vulnérabilités de l'unité pilote. Une échelle de sévérité de 1 à 5 et une échelle de probabilité de 1 à 3 a été retenue pour cette approche. La criticalité a été définie de manière pragmatique comme le produit de la sévérité et de la probabilité d'occurrence, en négligeant les aspects de pondération. Cette approche nous semble suffisante dans le cadre de ce projet.

Tableau 10. Identification des vulnérabilités du projet et des mesures de mitigation.

Description des risques identifiés	Sévérité en cas d'occurrence	Probabilité d'occurrence	Criticalité	Mesures de mitigation prévues
Risques liés à la réalisation de l'unité pilote				
Risque de faillite du partenaire local SEI.	3	1	3	SEI n'est pas actuellement dans une situation difficile, et n'indique aucun signe de faiblesse. Néanmoins, en cas de faillite, les tâches de SEI seraient transférées à l'université de Los Lagos qui serait en charge de trouver un nouveau partenaire pour les tâches qui sortent clairement de son domaine de compétence.
Risque de faillite du partenaire E4tech	2	1	2	E4tech n'est pas actuellement dans une situation difficile, et ne présente aucun signe de faiblesse. En outre, le rôle principal d'E4tech était dans la phase 1. Son rôle dans la phase 2 pourrait être repris par le partenaire chilien SEI.
Risque de non payement d'une partie ou de la totalité de la somme promise par l'un des partenaires financiers chiliens.	5	2	10	Le projet risquerait de prendre un retard important, mais tout serait entrepris pour qu'il ne soit pas abandonné. En cas de versement partiel obtenu, une diminution de la taille de l'unité pilote, ou une réorientation vers une solution technique moins coûteuse serait également envisageable. Par ailleurs, nous contacterions plusieurs investisseurs privés chiliens et/ou ONG locales qui pourraient être intéressés à soutenir ce projet.
Risque de non obtention du soutien financier de REPIC pour la phase 2 du projet.	5	2	10	
Risque de dépassement budgétaire pour un ou plusieurs des postes de dépense.	2	4	8	Un business plan précis sera établi afin de prévoir un budget réaliste. En outre, une gestion budgétaire stricte sera mise en place, basée sur des devis. Néanmoins, si un dépassement de budget significatif est constaté, une réallocation des ressources mises à disposition sera effectuée.

Risque de non obtention des permis et licences pour la construction et/ou l'opération de l'unité pilote.	3	1	3	L'unité pilote se trouve en zone industrielle, et représente une activité sans risque. L'obtention des permis est donc de nature purement administrative. En outre, le gouvernement local soutient le projet. Une autre localisation serait néanmoins trouvée en cas de problème.
Risque de non mise à disposition par Constructora MT Ltda du terrain choisi.	3	0	0	Le terrain a déjà été mis contractuellement à la disposition du projet. Ce risque n'existe donc plus.
Risque de délais importants, notamment lors de la phase de construction de l'unité pilote.	2	3	6	Le projet devra alors être prolongé dans le temps, mais sa réalisation ne sera en aucun cas remise en cause.
Risques liés à l'exploitation de l'unité pilote				
Risque que les contrats de reprise ou d' approvisionnement ne soient pas honorés par les partenaires commerciaux.	3	2	6	La phase opérationnelle ne fait pas partie du projet. Aucune mesure de mitigation n'est prévue au-delà de la mise en exploitation du centre de séchage. Il appartient aux collectivités et gouvernements locaux de poursuivre l'effort entrepris. Ceci étant, les contrats d'approvisionnement et de reprise du bois de l'unité de séchage seront établis de manière aussi légalement contraignante que possible afin d'assurer la pérennité de l'unité.
Risque que le centre de séchage soit mal-géré financièrement.	2	2	4	Un administrateur professionnel sera employé par le centre de séchage afin de s'assurer de la bonne gestion de celui-ci. Lors de l'embauche, le sérieux et le professionnalisme de celui-ci seront vérifiés.
Risque que les stocks du centre de séchage soient mal-gérés.	2	2	4	
Risque de prolongation passagère du temps de séchage à cause de mauvaises conditions climatiques.	1	3	3	La viabilité économique du centre de séchage est robuste face au temps de séchage.
Risque d'augmentation des coûts opérationnels liés par exemple à l'augmentation du prix de l'électricité.	1	4	4	La technologie retenue pour l'unité pilote (toiture noire) ne consomme que très peu d'électricité. La viabilité économique de l'unité ne serait pas affectée par une augmentation même drastique du prix de l'électricité. En outre, la technologie à le potentiel d'évoluer vers une solution 100% renouvelable, la rendant indépendante du prix du marché de l'électricité.

Risque de baisse du prix de vente du bois sec, à cause d'une concurrence accrue avec les autres intermédiaires du marché du bois.	2	2	4	Au vue de la différence entre prix de vente du bois sec et son coût de production, une baisse du prix de vente réduirait la marge possible pour le centre de séchage mais ne remettrait pas en cause sa rentabilité économique. En outre, le marché attend plutôt une hausse du prix du bois dans les années à venir.
Risques environnementaux				
Risque que le centre de séchage entraîne une surexploitation de la ressource biomasse dans la région de Los Lagos, ou vende des bois natifs interdits d'exploitation.	5	1	5	Le centre de séchage n'acceptera que du bois provenant de plantations et/ou exploitations certifiées, i.e. qui doivent avoir un plan durable d'exploitation de la ressource biomasse. Il est donc considéré peu probable que le centre entraîne une surexploitation de la ressource (voir section 9.1 pour plus d'information sur cette question).

12 Références

ADEME (2007) *Possibilities to improve the quality by manufacturing, drying, storage and packing*, rapport du project Quality Wood, auteur: Caroline Rantien

ADEME (2009) *La filière bois-énergie et le chauffage au bois pour les particuliers*, dossier de presse, Février 2009

Agence Internationale de l'Energie (2009) *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*

AMPASEL, ASCOPARG, Atmo DRÔME-ARDÈCHE, COPARLY et SUP'Air (2007) *Combustion du bois et qualité de l'air*

Auckland Regional Council (2007a) *Airfacts 10 – Domestic Fires & Woodburners*

Auckland Regional Council (2007b) *Airfacts 9 – Woodburners & Domestic Fires*

Best, G., Christensen, J. (2003) *Role of biomass in global energy supply*, Chapitre 3 de Risø Energy Report 2

CTBA (2005) *Le séchage du bois de chauffage*, étude financée par l'ADEME

Gutiérrez, M., Villalón, A., Garay, R.M., Gutiérrez, S. (2009) *Modelos de Negocios para el Acopio y Secado de Leña – Informe Final*, Laboratorio de Bioenergía y Biocombustibles, Universidad de Chile

Jonsson, A, Nielsen, P.S. (2005) *Mapping of PM_{10} from domestic heating with firewood in Rotorua, New Zealand*, rapport avec la participation de Scion et de l'Université suédoise des sciences agriculturales

Ministry for the Environment (2004) *Updated Users Guide to Resource Management (National Environmental Standard Relating to Certain Air Pollutants, Dioxins, and Other Toxics) Regulation 2004 (Including Amendments 2005)*, clauses 22-24, préparé par le Ministère néozélandais de l'environnement

Ministry of Economic Development (2010) *New Zealand Energy Data File*

New Zealand Forest Owners Association Inc, Wood Processors Association of NZ and Ministry of Agriculture and Forestry (2007) *New Zealand Forest Industry Facts & Figures 2006/2007*

Préfecture de la Région Midi-Pyrénées, ADEME, Région Midi-Pyrénées, ARPE Midi-Pyrénées (2006) *Le séchage solaire des fourrages – La qualité au service du développement et de l'environnement*, étude menée dans le cadre du Programme REgional de LUtte contre l'effet de serre et pour le Développement DurablE (PRELUDE) 2000-2006

Simpson, W., Tschernitz, J. (1977) *Importance of Thickness Variation in Kiln Drying Red Oak Lumber*

USDA (1999) *Air Drying of Lumber*, rapport du USDA Forest Product Laboratory

US DOE et USDA (2005) *Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*

US EPA (2009) *Strategies for Reducing Residential Wood Smoke*, prepare par le Outreach and Information Division

Annexe 1. Lettre d'engagement de Constructora MT Ltda

Señores REPIC
Secrétariat Plate – forme REPIC
c/o NET Nowak Energy & Technologie SA
Waldweg 8
1717 St Ursen
Suiza

Santiago de Chile, 1° de septiembre, 2010.

Estimados Señores,

Por intermedio de la presente y en mi calidad de representante legal de Constructora MT Ltda. confirmo que participaré en el desarrollo del proyecto "CENTRO DE ACOPIO, SECADO Y CANJE DE LEÑA", aportando el terreno en el cual se emplazará el secador y el centro de acopio de leña en la ciudad de Osorno.

Cordialmente,

Constructora MT Ltda
Rut.: 76.411.870-7

Constructora MT Ltda,
Mario Marin Flores
Gerente