

Etude éco-bilan sur l'installation d'un réseau de chaleur alimenté par un mélange de bois provenant d'entreprises de transformation du bois et de travaux d'entretien de forêts

Auteurs

Joëlle Welfring (CRTE)

André Weidenhaupt (CRTE)

Jean Offermann (Agence de l'Énergie)

Corinne Gouy (LTI, CRP Henri Tudor)

Table des matières

PREAMBULE	3
RESUME.....	4
1. INTRODUCTION	6
2. LE POTENTIEL DE DECHETS DE BOIS DANS LA REGION DE PUTSCHEID	7
2.1. LE POTENTIEL DE BOIS DE REBUT	7
2.2. LE POTENTIEL DE BOIS ISSU DE L'ENTRETIEN FORESTIER	7
3. ASPECTS ENERGETIQUES LIES AU LOTISSEMENT DE PUTSCHEID	9
3.1. DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROJET	9
3.2. BESOINS ENERGETIQUES A DES FINS DE CHAUFFAGE	9
3.3. BESOINS ENERGETIQUES A DES FINS DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE	10
3.4. RECOURS A L'ENERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE	11
3.5. BILAN ENERGETIQUE	11
4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	13
4.1. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES A LA CHAUDIERE.....	13
4.1.1. <i>Les caractéristiques du combustible</i>	13
A. Les plaquettes forestières.....	13
B. Le bois de rebut	14
4.1.2. <i>Les émissions atmosphériques générées par la combustion</i>	16
A. Les produits d'une combustion complète	16
B. Les produits d'une combustion incomplète	18
C. Les particules/poussières	19
4.1.3. <i>Les quantités d'émissions produites selon les différents scénarios</i>	20
A. Résultats d'essais	20
B. Discussion	21
C. Conclusion	24
4.2. ECO-BILAN	25
4.2.1. <i>L'analyse du cycle de vie</i>	25
4.2.2. <i>Définition des objectifs, envergure et inventaire du cycle de vie</i>	25
4.2.3. <i>Analyse des impacts et interprétation</i>	26
4.2.4. <i>Conclusion</i>	28
5. ASPECTS LOGISTIQUES.....	29
5.1. INVENTAIRE DES DONNEES	29
5.2. SOLUTIONS ENVISAGEES POUR L'APPROVISIONNEMENT EN BOIS	31
5.2.1. <i>L'approvisionnement en bois de rebut</i>	31
5.2.2. <i>L'approvisionnement en plaquettes forestières</i>	32
5.3. COUTS LIES A LA CHAINE D'APPROVISIONNEMENT EN BOIS	32
5.4. MATRICE RECAPITULATIVE	35
5.5. COMMENTAIRE DE LA MATRICE	36
5.6. CONCLUSION	36
6. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION	37
6.1. LE CHOIX DE LA TECHNIQUE DE COMBUSTION LA MIEUX ADAPTEE.....	37
6.1.1. <i>Conditions générales</i>	37
6.1.2. <i>Scénario 1 : Combustible = 100% plaquettes forestières</i>	38
6.1.3. <i>Scénario 2 : Combustible = mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut</i>	38
6.1.4. <i>Autres techniques</i>	40
6.2. CONCLUSION.....	41
7. BIBLIOGRAPHIE	42

ANNEXE I	44
I.1. LEGISLATION LUXEMBOURGEOISE	44
I.1.1. <i>Autorisation d'exploitation</i>	44
I.1.2. <i>Air</i>	45
I.1.3. <i>Déchets</i>	47
I.1.4. <i>Energie</i>	48
I.2. LEGISLATION EUROPEENNE ET CONVENTIONS INTERNATIONALES	49
I.2.1. <i>Le règlement (CEE) no°259/93 du Conseil du 1^{er} février 1993 concernant le contrôle des transferts de déchets à l'intérieur, à l'entrée et à la sortie de la Communauté européenne</i>	49
I.2.2. <i>La convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance</i>	50
I.2.3. <i>Le Sommet de la Terre à Rio et le protocole de Kyoto</i>	50
I.2.4. <i>Proposition de directive du Conseil sur l'incinération des déchets (98/C 372/07)</i>	50
I.2.5. <i>Décision du Conseil du 18 mai 1998 concernant un programme pluriannuel pour la promotion des sources d'énergie renouvelables dans la Communauté (Altener II) (98/352/CE)</i>	51
ANNEXE II	52
ANNEXE III	53

Préambule

Terminologie

La terminologie utilisée dans le cadre de la présente étude s'oriente selon les termes couramment employés dans les pays germanophones, où la plupart des techniques de combustion ont été développées.[1]

Les '**plaquettes forestières**' («Waldhackschnitzel») sont les fractions de déchets de bois déchiquetés, issus de l'entretien de forêts exploitées selon un rapport soutenu.

Les activités de l'industrie de la transformation du bois génèrent des résidus dont les caractéristiques physico-chimiques sont très diversifiées. Dans le cadre de cette étude, on se réfère à ces sous-produits, en employant le terme de '**bois de rebut**' («Restholz»). On distingue généralement deux types de bois de rebut, suivant leur origine : le bois brut de première transformation, provenant par exemple de scieries, ayant les mêmes caractéristiques que les plaquettes forestières et celui de la seconde transformation, comme les restes de production de l'industrie (ou de l'artisanat) de la transformation du bois telles que les menuiseries ou les charpenteries.

Une troisième fraction de déchets de bois est le '**bois de récupération**' («Alt-und Gebrauchtholz»), désignant le bois en fin de vie, comme des vieux meubles ou des charpentes, issus par exemple de chantiers.

Scénarios considérés

Etant donné que le choix de la source d'énergie et les propriétés du combustible bois déterminent considérablement le déroulement de la combustion ainsi que l'organisation logistique, l'étude se base sur cinq scénarios bien définis :

Scénario	Source d'énergie / Composition du combustible
1a	100% plaquettes forestières
1b	90% plaquettes forestières + 10% panneaux solaires
2a	mélange de bois composé de : 50% plaquettes forestières + 50% bois de rebut de l'industrie du bois
2b	90 % mélange de bois défini sous 2a + 10% panneaux solaires
3	fuel léger

Résumé

Dans le cadre d'une étude réalisée à la demande du Ministère de l'Environnement et de la Chambre des Métiers, les possibilités de valorisation thermique de bois de rebut (déchets ligneux en provenance de l'industrie de la transformation du bois) et de bois issu de l'entretien forestier par un réseau de chaleur ont été évaluées. Les résultats et les conclusions de cette étude comportent trois volets majeurs :

- un volet «aspects énergétiques» couvert par l'Agence de l'Energie S.A. et comportant la détermination des besoins en énergie thermique dans le cas de référence décrit ci-dessous, les caractéristiques énergétiques du combustible bois et en partie les technologies énergétiques s'apprêtant à sa valorisation ;
- un volet «impacts environnementaux» de la valorisation thermique de sous-produits ligneux (des entreprises, des forêts) par un réseau de chaleur. Ce volet implique l'étude des émissions atmosphériques générées par la combustion d'un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut, les possibilités de les réduire, ainsi qu'un éco-bilan selon la norme ISO 14040. Ce volet a été réalisé par le CRTE ;
- un volet «aspects logistiques» ayant pour objectif d'optimiser l'approvisionnement en combustible ligneux du réseau de chaleur, pris en charge par l'équipe «productique» du Laboratoire des Technologies Industrielles (LTI, structure faisant partie du Centre de Recherche Public Henri Tudor) .

Les auteurs de l'étude ont choisi un lotissement projeté par la Commune de Putscheid comme cas de référence car il s'agit d'un projet concret à caractère modèle. Le lotissement, planifié à Putscheid comporte à ce stade au total 17 édifices dont 16 maisons unifamiliales et un immeuble de 6 appartements (22 unités d'habitation). Le projet a été conçu selon les principes du développement durable et présente ainsi un urbanisme cohérent, intégré au paysage naturel, tout ainsi qu'un concept énergétique qui implique des sources d'énergies renouvelables, tels le bois et le soleil (couvrant environ 10% du besoin énergétique total).

D'un point de vue énergétique, le bois de rebut (représentant un potentiel de 2,4 GWh/an dans la région de Putscheid) constitue un combustible tout aussi valable que les déchets résultant de l'entretien forestier (potentiel : 5,2 GWh/an). D'un point de vue environnemental, le bois de rebut provenant des entreprises peut être valorisé dans des chaudières de puissance moyenne garantissant une combustion complète, à condition que ses constituants principaux les mêmes que ceux du bois naturel. Le contenu en azote du bois de rebut que l'on désire valoriser thermiquement par une chaudière de puissance moyenne doit être tel que le combustible (mélange) utilisé permette de respecter la valeur de 500 mg/m³ de NO_x prescrits par la législation luxembourgeoise. Ainsi, si le bois de rebut contient 4% d'azote, le mélange de combustible utilisé doit comporter environ 70% de plaquettes forestières (à 0,1 % d'azote) afin de respecter cette limite.

Au cas où le bois de rebut contiendrait une importante fraction de panneaux de particules, une technique de filtration performante sera indispensable afin d'atteindre la limite de 50 mg/m³ de particules/poussières. Il reste aux acteurs économiques du projet de Putscheid de déterminer qui prendrait en charge les coûts supplémentaires générés par l'installation d'un tel filtre.

Si le bois de rebut est composé de bois massif ou de bois contreplaqué, on peut atteindre les 50 mg/m³ avec un séparateur à cyclone.

Le bois de rebut peut ainsi servir de combustible pour chauffer le réseau de Putscheid, si la qualité des déchets de bois est garantie par le producteur. Toutefois il est recommandé de s'assurer de la qualité du combustible par une analyse chimique périodique d'échantillons.

Bien qu'un mélange de deux fractions différentes de combustible entraîne des investissements supplémentaires aussi bien au niveau organisationnel qu'au niveau technique (silo, analyses, éventuellement filtre), il présente deux avantages. D'une part ce mélange fournit un combustible plus sec que la seule utilisation de plaquettes forestières, garantissant ainsi une combustion plus complète. D'autre part ce mélange présente une plus grande sûreté d'approvisionnement que lors de l'utilisation d'une seule source de combustible. Cependant, afin de garantir la pérennité du combustible bois de bonne qualité, les auteurs de cette étude préconisent la mise en place d'un «comptoir du bois». Cet endroit sera une centrale de collecte et de distribution de déchets de bois, qui aura pour but de garantir la qualité et la quantité requises du combustible bois (plaquettes forestières et bois de rebut). En outre, ce comptoir du bois se chargerait de la fixation des tarifs et garantirait un approvisionnement en conformité avec la législation en matière de déchets.

Sachant que 25% des émissions de CO₂ luxembourgeoises proviennent de la production d'énergie et de chaleur, le combustible bois représente une importante source d'énergie alternative, en vue du potentiel considérable de bois sous forme de sous-produits provenant des activités de l'industrie de bois et de l'entretien des forêts. Ainsi, selon le scénario adopté, le fait d'utiliser du bois (que ce soit du bois de rebut ou des plaquettes forestières), en substitution au fuel léger, pour chauffer un réseau de chaleur tel que celui projeté à Putscheid permet d'éviter l'émission de 170 tonnes de CO₂ par an.

1. Introduction

L'important degré de dépendance énergétique de ressources étrangères (99,17%), ainsi que l'engagement pris par la signature du protocole de Kyoto (29 avril 1998) de réduire les émissions de gaz à effet de serre (équivalents de CO₂) de 28% jusqu'en 2010 par rapport à 1990, obligent le Luxembourg de s'orienter progressivement vers des sources d'énergie locales et neutres en CO₂.

Étant donné que la quasi-totalité de CO₂ émise lors de la combustion de bois correspond à la quantité captée par la plante lors de sa croissance, le bois issu de forêts exploitées selon un rapport soutenu (la consommation de bois ne dépassant pas sa production), peut être considéré comme une source d'énergie neutre du point de vue des émissions de CO₂. Sachant que le Luxembourg est le pays de la communauté européenne avec le taux de boisement le plus élevé, les déchets de bois issus de l'entretien forestier représentent un potentiel énergétique considérable. Par ailleurs, l'industrie de la transformation du bois génère une importante quantité de bois de rebut, qui finit souvent, après des transports longs et onéreux, sur une décharge publique, ou dans un incinérateur, sans qu'il y ait de récupération d'énergie thermique. L'utilisation de l'énergie du bois de rebut d'entreprises locales est énergiquement favorable et augmente d'avantage le potentiel énergétique du bois.

Pour ces raisons, le bois compte certainement parmi les vecteurs énergétiques les plus intéressants pour les années à venir. Ainsi un certain nombre de champs d'application en milieu rural ou à la périphérie des grandes agglomérations sont envisageables, comme la couverture des besoins de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire moyennant un réseau de distribution de chaleur au niveau de nouveaux lotissements, de complexes scolaires et sportifs et au niveau de zones d'activités à caractère thermique (moyenne (90°C) et basse (40°C) température) comprenant p.ex. des blanchisseries, des sites de production alimentaire, car wash pour poids lourds, serres horticoles etc.. D'autres possibilités de valorisation de l'énergie thermique du bois sont le chauffage des ateliers des entreprises de transformation de bois et l'utilisation du bois comme combustible secondaire dans les industries à besoin énergétique élevé comme les cimenteries.

Dans ce contexte, et sur la demande du Ministère de l'Environnement et de la Chambre des Métiers, la présente étude a été réalisée dans le but d'évaluer les possibilités de valorisation thermique de bois de rebut et de bois issu de l'entretien forestier par un réseau de chaleur. Les résultats et les conclusions de l'étude comportent trois volets majeurs :

- un volet « aspects énergétiques » couvert par l'Agence de l'Énergie S.A. et comportant la détermination des besoins en énergie thermique au niveau du cas de référence explicité ci-dessous, les caractéristiques énergétiques du combustible bois et en partie les technologies énergétiques s'apprêtant à sa valorisation ;
- un volet « impacts environnementaux » de la valorisation thermique de sous-produits ligneux (entreprises, forêts) par un réseau de chaleur. Ce volet implique l'étude des émissions atmosphériques générées par la combustion d'un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut, les possibilités de les réduire, ainsi qu'un éco-bilan selon la norme ISO 14040. Ce volet a été réalisé par le CRTE ;
- un volet « aspects logistiques » ayant pour objectif d'optimiser l'approvisionnement en combustible ligneux du réseau de chaleur, pris en charge par l'équipe « productive » du Laboratoire des Technologies Industrielles (LTI, structure faisant partie du Centre de Recherche Public Henri Tudor) .

Les auteurs de cette étude ont choisi un lotissement projeté par la Commune de Putscheid comme cas de référence car il s'agit d'un projet concret à caractère modèle. Le lotissement, planifié à Putscheid comporte à ce stade au total 17 édifices dont 16 maisons unifamiliales et un immeuble à 6 appartements (22 unités d'habitation). Le projet a été conçu selon les principes du développement durable et présente ainsi un urbanisme cohérent, intégré au paysage naturel, tout comme un concept énergétique impliquant des sources d'énergies renouvelables, tels que le bois et le soleil (couvrant environ 10% du besoin énergétique total).

2. Le potentiel de déchets de bois dans la région de Putscheid

Etant donné que le but de cette étude est d'évaluer les possibilités de valoriser aussi bien le bois de rebut provenant de l'industrie de la transformation de bois que les déchets de bois résultants de l'entretien forestier, une estimation du potentiel de bois de ces deux sources a été faite à l'intérieur d'un périmètre d'entre 15 et 20 km autour de la commune de Putscheid. Un transport routier au-delà de cette distance engendrerait des frais trop élevés.

2.1. Le potentiel de bois de rebut

Le potentiel de bois en provenance des entreprises a été estimé à partir des quantités de déchets de bois indiquées par les entreprises pour lesquelles ces dernières n'avaient pas encore trouvé de voie d'utilisation. Selon les affirmations des entreprises, ces déchets sont dépourvus de revêtements au PVC et de produits de conservation halogénés. Les scieries n'ont pas été prises en compte dans cette évaluation, étant donné que ces entreprises vendent leurs déchets. Des analyses quant à la composition chimique exacte des déchets n'ont pas été faites, mais seraient recommandés avant leur valorisation thermique, afin de prévenir d'éventuels impacts environnementaux néfastes.

Types d'entreprises	Types de déchets de bois (t/an)		
	contreplaqué	panneaux de particules	bois massif
menuiseries et charpenteries	8	11	99
autres	170	140	50
Quantité totale (t/an)	178	151	144

Le total de 473 tonnes de bois de rebut par an à une humidité de 10% est assimilable à un potentiel de 2,4 GWh/an, soit d'environ l'équivalent énergétique de 240.000 litres de fuel léger par an.

2.2. Le potentiel de bois issu de l'entretien forestier

L'entretien forestier, comme les activités de coupes d'éclaircie, d'amélioration ou les coupes sanitaires génère régulièrement un certain volume de bois qui n'est pas utilisable pour les industries du papier ou des matériaux de bois. Le potentiel théorique représenté par cette fraction de la production de la forêt luxembourgeoise a été estimé selon les données concernant l'entretien forestier obtenues par les services régionaux de l'Administration des Eaux et Forêts. Etant donné que la commune de Putscheid se trouve à limite Nord du cantonnement de Diekirch, les forêts avoisinantes, appartenant au cantonnement de Wiltz ont également été prises en compte. Selon ces estimations, l'entretien des forêts du cantonnement Diekirch se trouvant à l'intérieur d'un périmètre d'entre 15 et 20 km autour de la commune de Putscheid peuvent générer un potentiel de 3,2 GWh/an et celles du cantonnement de Wiltz peuvent fournir 2 GWh/an. Les estimations ont été faites sans avoir fait une distinction entre les forêts soumises et les forêts privées. Selon le cantonnement, plus de la moitié des forêts prises en compte peuvent être des forêts privées. Les forêts privées sont souvent formées de petites parcelles dispersées, ce qui rend un suivi des données sur leur productivité et leur entretien très difficile. Toutefois, sachant que la majorité de la surface du taillis de chêne (90%) se trouve en

main privée et que plus de 70% des peuplements se trouvent dans l'Oesling, ces forêts représentent une source énergétique importante.

Du potentiel total de 5,2 GWh/an que représentent les forêts dans la région de Putscheid, devrait également être soustrait le potentiel des déchets ligneux provenant de parties qui sont difficilement accessibles à cause de l'absence de chemins de forêts ou à cause des pentes raides (>40 % de pente) sur lesquelles se trouvent certaines forêts.

Les incertitudes liées à l'estimation exacte du potentiel en déchets de bois indiquent un besoin en informations actuelles et détaillées sur les quantités et les qualités de bois recueilli aussi bien dans les forêts que dans les entreprises de la transformation du bois au Luxembourg.

Le total du potentiel en bois de rebut et en déchets de bois résultants de l'entretien forestier est de 7,6 GWh/an ce qui représente environ l'équivalent énergétique de 760.000 litres de fuel léger par an. Cette quantité permettrait d'alimenter environ 11 réseaux de chaleur du même ordre de grandeur que celui de Putscheid, ce qui conduirait à une économie en CO₂ de plus de 1900 tonnes par an, si le fuel léger est substitué par le bois.

[2]

3. Aspects énergétiques liés au lotissement de Putscheid

3.1. Description succincte du projet

A l'heure actuelle, il est prévu de construire dans le lotissement projeté au sud-ouest de la localité de Putscheid en tout 17 édifices dont 16 maisons unifamiliales et un immeuble à 6 appartements. On comptera donc en tout 22 ménages (mars 2000). Il est actuellement en discussion de prévoir une chaufferie centrale sous forme d'un bâtiment isolé.

Pour la réalisation du présent projet, l'Administration Communale de Putscheid se propose d'adopter une approche innovative respectant les principes suivants :

- Conception architecturale globale
- Conception énergétique globale
- Plan vert global basé sur la biodiversité locale
- Commercialisation coordonnée

Les piliers du concept énergétique sont :

- L'architecture solaire
- L'isolation thermique poussée
- Le système de chauffage centralisé moyennant un réseau de distribution de chaleur
- Le recours au combustible renouvelable : le bois
- La valorisation de l'énergie solaire thermique

Note : Il faut souligner qu'à l'instant de la détermination du besoin énergétique (mars 2000), les plans de construction n'existent pas encore. Les auteurs se basent sur des tailles standards de maisons unifamiliales conformes aux normes d'isolation en vigueur.

Il est prévu cependant d'assurer une consultation énergétique à l'adresse des futurs maîtres des ouvrages et maîtres des œuvres visant à réaliser une meilleure qualité d'isolation que celle prévue par la loi.

3.2. Besoins énergétiques à des fins de chauffage

Les besoins énergétiques à des fins de chauffage comportent :

- Les déperditions conductives et convectives à travers l'enveloppe de la construction
- Les pertes liées à l'échange d'air
- Les gains en énergie (soleil passif, charges internes (occupants, appareils domestiques))
- Captage d'énergie par l'eau froide sanitaire

En se basant sur des valeurs de bonne pratique au niveau de la taille des constructions, de la disposition des parties translucides et de la situation climatique du site, une simulation du besoin en énergie a été réalisée pour les besoins de chauffage à l'aide du logiciel EVEBI pour les **maisons unifamiliales**. Le résultat s'élève à 133 kWh/m²a soit l'équivalent de 13,3 litres de fuel léger par m² de surface chauffée et par an.

Pour la **résidence**, le résultat s'élève à 112 kWh/m²a soit l'équivalent de 11,2 litres de fuel léger par m² de surface chauffée et par an.

[3], [4], [5]

3.3. Besoins énergétiques à des fins de production d'eau chaude sanitaire

Le calcul des besoins d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire tient compte des particularités suivantes :

- Puisqu'il s'agira principalement de jeunes ménages, une moyenne de 3,5 personnes par ménage avec une consommation journalière de 40 litres d'eau chaude a été adoptée.
- Il est recommandé de raccorder les lave-vaisselle à l'eau chaude ce qui présente un avantage au niveau du bilan écologique et financier par rapport au chauffage électrique d'eau pour cette application.
- Sur base du même raisonnement, le raccordement à l'eau chaude des machines à laver aptes à ce mode d'utilisation ou moyennant un mitigeur externe est préconisé par les auteurs de la présente étude.

[4], [6]

Résultats :

- Eau chaude sanitaire :
22 ménages
3,5 personnes par ménage
40 litres par personne et jour
Total(1): 3080 litres par jour
- Lave-vaisselle :
22 appareils
3 lavages par semaine
15 litres par lavage
75% taux de participation
Total(2): 105 litres par jour
- Lave-linge :
22 appareils
3 lavages par semaine
60 litres par lavage
75% taux de participation
Total(3): 423 litres par jour

Total (1) + (2) + (3) : 3 608 litres par jour

Ceci correspond à un besoin d'énergie de 218 kWh/jour (pour une température de 60°C).

3.4. Recours à l'énergie solaire pour la production d'eau chaude

Sur base des conclusions des réunions de travail, il fut retenu d'envisager une couverture de l'ordre de 65% des besoins en eau chaude par l'énergie solaire. Ceci est faisable moyennant une surface de panneaux solaires de 115 m² orientée plein sud et inclinée de 20° (inclinaison donnée par l'architecte).

Le type de collecteur choisi est le collecteur vitré plat à recouvrement sélectif et présentant un rendement optique de 82 %. Ce collecteur présente un bon rapport rendement/prix pour ce type d'application et a une espérance de vie de 20 ans.

L'installation solaire alimentera de façon centralisée le réseau de distribution de chaleur qui est exploité dans ce cas en mode d'été c-à-d abaissé en température (60°C).

Ce niveau de température permettra aux consommateurs, moyennant des réservoirs tampons correctement dimensionnés et gérés, de recevoir l'eau chaude à une température de l'ordre de 45°C à 50°C.

Nous tenons à souligner que l'eau chaude sanitaire sera produite de façon décentralisée pour des raisons d'hygiène et que le réseau en cycle fermé ne fournit que l'énergie utilisée à cette fin.

La simulation dynamique à pas semi-horaires de l'apport en énergie thermique en provenance de l'installation solaire fut effectuée à l'aide du logiciel GETSOLAR.

Résultats :

Energie solaire irradiée:	130.406 kWh/a
Energie solaire captée :	51.486 kWh/a

Substitution d'énergie primaire (bois en l'occurrence) :	68.648 kWh/a
(soit l'équivalent de 6.865 litres de fuel léger par an)	

[7], [8]

3.5. Bilan énergétique

Surface chauffée (maisons unifamiliales) :	2 560 m ²
Surface chauffée (résidence) :	700 m ²
Surface chauffée totale :	3 260 m ²

Besoin en énergie / chauffage / maisons unifamiliales :	341 995 kWh/a
Besoin en énergie / chauffage / résidence :	78 114 kWh/a
Besoin en énergie / eau chaude / 22 ménages :	79 571 kWh/a
Besoin total en énergie finale :	499 680 kWh/a

Besoin en énergie primaire compte tenu du rendement de chaudière et des pertes du réseau : 633 344 kWh/a.

Répartition suivant sources :

Filière bois : 564 696 kWh/a

Installation solaire : 68 648 kWh/a

Besoin annuel en bois :

2/3 du bois en provenance d'espèces résineuses

1/3 du bois en provenance d'espèces feuillues

Taux d'humidité : 25%

Pouvoir calorifique (i) : 3,98 kWh/kg

Besoin annuel en bois : 141,8 tonnes

(soit l'équivalent de 63.334 litres de fuel léger par an)

L'optimum écologique global au niveau d'un tel projet est atteint en limitant les besoins sur base des principes de la construction à basse consommation d'énergie et de l'utilisation rationnelle de l'énergie, en recourant à l'énergie solaire et en couvrant le découvert moyennant un combustible renouvelable converti à haut rendement.

Les auteurs ont dressé au chapitre 4.2 l'éco-bilan détaillé relatif au présent cas de référence.

4. Impacts environnementaux

Le chapitre « impacts environnementaux » comprend deux sous-chapitres, dont le premier se voue à l'identification des impacts environnementaux liés à la chaudière et le deuxième évalue l'ensemble des avantages et désavantages environnementaux liés à l'utilisation d'énergies renouvelables (bois, soleil) par un réseau de chaleur.

4.1. Impacts environnementaux liés à la chaudière

La combustion de bois comparée à celle du fuel léger permet de réduire les émissions de CO_2 , de SO_2 , de métaux lourds et d'hydrocarbures volatiles, mais peut mener à des émissions accrues de CO , de NO_x et de poussières, dans certaines conditions. D'une manière générale, les deux paramètres principaux influant majoritairement sur la formation des émissions atmosphériques sont les caractéristiques du combustible bois et les propriétés de la chaudière utilisée. Ainsi, ce sous-chapitre se scinde en trois parties principales dont la première caractérise les différents types de bois pris en compte dans cette étude, la deuxième partie décrit la formation et les effets des émissions atmosphériques généralement produites par la combustion de bois et la troisième partie essaye de prévoir les quantités d'émissions générées selon le scénario adopté (voir « Préambule »), en se basant sur des essais qui ont été effectués dans des conditions bien définies.

4.1.1. Les caractéristiques du combustible

A. Les plaquettes forestières

Idéalement les plaquettes forestières sont constituées de parties ligneuses d'arbres ou d'arbustes sans les écorces. Les composants majeurs du bois sont les constituants des parois cellulaires. Entre 70% et 75% de la masse sèche du bois sont généralement constitués de polysaccharides: cellulose (Fig. 4.1.a.) et hémicelluloses, le reste forme la lignine (Fig. 4.1.b.) qui représente 30% de la masse chez les résineux et 25% chez les feuillus.

La cellulose est une molécule linéaire issue de la polymérisation du glucose et représente le plus important élément structural de la paroi cellulaire.

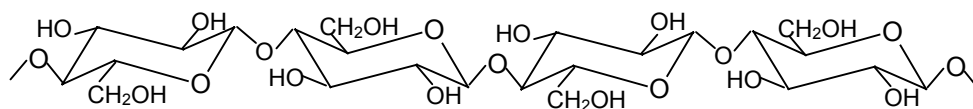


Fig. 4.1.a. :Segment de structure de la cellulose

Les hémicelluloses sont des molécules plus courtes et leur teneur varie selon le type de bois.

La lignine est une substance aromatique qui lie les chaînes polysaccharidiques en formant des complexes rigides, qui confèrent au bois sa dureté et permettant le port dressé des plantes.

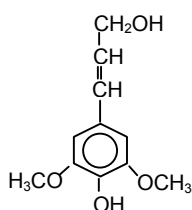


Fig. 4.1.b. : Élément structurel du complexe de lignine : l'alcool sinapylique

B. Le bois de rebut

- Les types de bois de rebut :

L'industrie de la transformation de bois génère traditionnellement les types de déchets ligneux suivants (avec une humidité environnant normalement les 12%) :

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
bois, panneaux de particules bois peint, laqué ou contreplaqué	Bois et produits de bois traités à l'aide de composés halogénés	Bois et produits de bois traités à l'aide de produits de conservation

Les sous-produits appartenant aux groupes 2 et 3 sont évidemment exclus pour toute valorisation thermique par des chaudières à bois de puissance moyenne.

Les pouvoirs calorifiques du bois à l'état naturel et celui de panneaux de particules ou de bois contreplaqué se valent.

- Les panneaux de particules :

Les panneaux de particules sont constitués de particules de bois, de liants et de quantités moindres d'additifs (accélérateur de solidification, agent d'hydrophobie). La composition relative est normalement la suivante :

Composant	% de quantité
Particules de bois	85 - 95
Liant	5 - 12
Additifs	0,5 - 1,5

Selon le type de liant, on distingue normalement parmi les panneaux de particules suivants :

- les panneaux liés par une résine de phénolformaldéhyde (panneaux PF) (Fig. 4.1.c.) ;
- les panneaux liés par une résine de formaldéhyde et d'urée (panneaux UF) ;
- les panneaux liés par une résine de formaldéhyde, d'urée et de mélamine (panneaux MUF) ;
- les panneaux liés par du phénylméthyl-diisocyanate (panneaux PMDI) ;

L'application de ces types de liants dépend de l'usage auquel les panneaux seront destinés, ainsi les panneaux liés par une résine phénolique se prêtent mieux à un usage dans le domaine de la construction à cause de leur résistance à l'humidité, alors que les panneaux utilisés pour la fabrication de meubles sont souvent liés par des résines à l'urée.

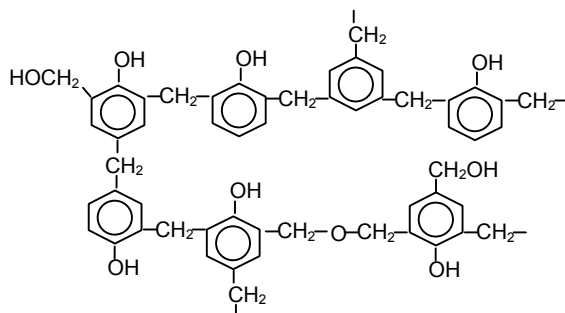


Fig. 4.1.c. : Structure d'une résine phénolformaldéhydrique

- La composition élémentaire de bois à l'état naturel et de panneaux de particules (masse sèche) :

Matière	Composition élémentaire en % de masse sèche					
	C	H	O	N	Cl	cendres
Bois à l'état naturel (sans écorce)	49,5	6,3	44,2	0,2	<0,001	0,5
panneaux PF	49	6	44	0,5	<0,01	0,5
panneaux UF	49	6	43	3	0,2	>1
panneaux MUF	49	5,5	43	4	0,2	1
panneaux PMDI	49	6	44	1	<0,01	0,5

L'analyse élémentaire montre que les panneaux de particules contiennent une quantité plus importante d'azote que le bois à l'état naturel, dû aux liants. Le bois à l'état naturel, ainsi que les panneaux de particules ne contiennent normalement du chlore qu'à l'état de trace. Seule exception constituent les panneaux UF et MUF aux liants desquels on ajoutait du chlorure d'ammonium jusqu'au début des années 1990, afin d'accélérer la solidification. Ces analyses ont été faites en 1991, ce qui explique les valeurs plus élevées en chlore. Les panneaux de particules ont une teneur en cendres plus élevée que le bois naturel, dû au contenu en minéraux des liants. [9], [10]

- Le bois contreplaqué :

Selon l'usage le bois contreplaqué est soit formé de plusieurs plaques de bois collées les unes aux autres par une résine, soit de baguettes alignées parallèlement et couvertes des deux côtes par une plaque de bois.

La fabrication de bois contreplaqué se base généralement sur les mêmes types de produits que celle de panneaux de particules. Les quantités de liants varient selon l'usage. Ainsi, pour le contreplaqué utilisé pour le coffrage la proportion de la résine peut représenter jusqu'à 4% du poids alors que du bois contreplaqué utilisé pour la fabrication d'emballages en contient entre 0,2 et 2 %, selon le type de liant.

4.1.2. Les émissions atmosphériques générées par la combustion

Par son état solide et par sa composition hétérogène, le bois est un combustible dont le comportement de combustion est généralement mal contrôlable et rend souvent sa combustion incomplète. La combustion de bois mène ainsi à deux groupes de produits: les produits générés par une combustion complète (p.ex. eau, dioxyde carbone oxydes d'azote,...) et les produits d'une combustion incomplète (monoxyde de carbone, hydrocarbures,...). Les particules/poussières seront traités séparément en raison de leur composition mixte de produits de combustion complète et de produits de combustion incomplète.

A. Les produits d'une combustion complète

CO₂

Tout comme l'eau, le CO₂ est un produit primaire d'une combustion complète. Le CO₂ est un gaz auquel a été attribué 49% de l'effet de serre produit par les activités humaines en 1990. L'avantage du combustible bois est que la quantité de CO₂ émise lors de la combustion correspond à celle captée par la plante lors de sa croissance et à la même quantité qui se libérerait par la décomposition naturelle. Ceci fait du bois une source d'énergie neutre du point de vue des émissions de CO₂ et une possibilité intéressante pour réduire l'effet de serre.

Le bois étant une source d'énergie renouvelable, une utilisation accrue de ce dernier permet de suivre le Plan National pour un Développement Durable ainsi que les engagements pris par le Luxembourg en signant le protocole de Kyoto (voir sous Annexe I).

NO_x

Le bois à l'état naturel contient une certaine quantité d'azote qui peut se dégager sous forme de NO_x pendant sa combustion.

Lors d'une combustion, les oxydes d'azote se forment normalement selon trois mécanismes :

- La voie de formation *thermique* : L'azote (N₂) contenu dans l'air ambiant (à raison de 78,08 % vol.) se transforme en oxyde d'azote (NO) à proximité des flammes, sous l'effet de la température (> 1300°C) et de l'oxygène.
- La voie de formation *spontanée* : ce mécanisme se déroule dans les flammes en présence de radicaux d'hydrocarbures.

Ces deux premières voies sont d'une moindre importance pour la combustion de bois, vu les températures plus basses de cette dernière (700 – 1300°C).

- La troisième et la voie la plus importante est la formation d'oxydes d'azote à partir de l'azote contenu dans le *combustible*. Le bois naturel contient de l'azote sous forme d'amines et de protéines, qui, en présence d'oxygène forment des oxydes d'azote au moment de la combustion. Comparé au bois naturel, les panneaux de particules libèrent généralement une émission accrue (2-3 fois plus élevée) de NO_x lors de leur combustion ; ceci étant dû aux colles et aux résines riches en azote utilisées au moment de leur manufacture.

Les NO_x sont à l'origine de l'acidification et des précurseurs d'ozone troposphérique, irritant et responsable de problèmes respiratoires, surtout pendant l'été dans les milieux urbains (trafic automobile, etc.). Cependant il faut remarquer que les émissions supplémentaires, dues à l'utilisation du bois de chauffage ont surtout lieu en hiver, lorsque le danger de formation d'ozone n'est pas très grand. Par le projet de protocole de Göteborg (novembre 1999) (à la

Convention de 1979 sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance) relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, le Luxembourg s'est engagé à réduire ses émissions d'oxydes d'azote de 52% jusqu'en 2010 par rapport au seuil de l'année 1990.

Il y a un certain nombre de mesures primaires pour éviter la formation de NO_x lors de la combustion de bois et secondaires (p.ex. catalyseurs) qui évitent les NO_x formés d'être émis dans l'atmosphère. Parmi les mesures primaires, on compte par exemple l'approvisionnement séparé de l'air de combustion en air primaire (pauvre en oxygène, introduit près de l'entrée du combustible) et en air secondaire (riche en oxygène et mélangé aux gaz de combustion). Une combustion complète ainsi qu'une postcombustion efficace permettent également de réduire les émissions d'oxydes d'azote (voir chapitre 6 «Recommandations et conclusion». [11])

HCl

Le bois non-traité ne contient du chlore qu'à l'état de trace, alors que les panneaux de particules (liants) en contenaient des quantités significatives jusqu'en 1990. Ceci était dû aux additifs (accélérateurs de solidification) utilisés lors de leur production, depuis l'industrie des matériaux de bois n'utilise plus que des systèmes de solidification sans chlore. De nombreuses études ont montré que des émissions de HCl sont surtout élevées lorsque le combustible contient des résidus de PVC, qui se dégage presque entièrement sous forme de HCl au moment d'une combustion.

Les émissions de HCl aux propriétés acides très importantes ont outre des impacts environnementaux un effet corrosif sur certaines parties de l'installation (échangeur de chaleur p.ex.).

Cendres

Cette catégorie comprend les produits incombustibles (surtout minéraux) de la combustion dont une partie reste dans le foyer de combustion et une autre est émise avec les gaz de combustion, formant ainsi une partie des particules.

B. Les produits d'une combustion incomplète

Hydrocarbures

Ces produits sont les principaux responsables d'odeurs créées par la combustion de bois et peuvent avoir des propriétés mutagènes ou cancérigènes. Il s'agit de produits intermédiaires (aliphatiques ou aromatiques) issus d'une décomposition partielle du bois naturel par la chaleur. Un exemple seraient les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui s'adsorbent souvent à des particules de suie.

Les émissions d'hydrocarbures augmentent proportionnellement avec une diminution de la puissance des installations.

Comparé à l'utilisation de fuel léger comme combustible, la combustion du bois émet quatre fois moins d'hydrocarbures.

CO

Le monoxyde de carbone est également un produit de décomposition thermique intermédiaire et connu pour ses effets toxiques sur les hommes et les animaux. Il est souvent utilisé comme indicateur de mauvaises conditions de combustion dans une installation qui sont normalement également à l'origine de la formation d'hydrocarbures.

Dioxines

Le bois à l'état naturel contient toujours des quantités minimales de chlore, ce qui constitue non seulement une origine potentielle pour la formation de chlorure d'hydrogène (HCl) mais aussi de certains types de dioxines au moment de sa combustion. Les trois origines principales de l'émission atmosphérique de dioxines lors de la combustion de bois sont les suivantes :

- Les dioxines peuvent être introduites directement dans la chambre de combustion lors de l'utilisation de bois contaminé comme combustible.
- La présence de précurseurs ou de «prédioxines» (certains additifs de colle, PVC, PCB, etc.) dans la zone de combustion peut être une autre origine.

Ces deux origines peuvent être limitées par des bonnes conditions de combustion, notamment des températures au-delà de 800°C en présence d'oxygène dans la zone de combustion.

- La troisième voie de formation de dioxines est la synthèse de novo, qui se déroule dans les zones de la chaudière où règne une température entre 200°C et 450°C, en présence d'hydrocarbures résiduels (suie, poussières), d'oxygène et de catalyseurs (p.ex.: cuivre) dans les poussières. La synthèse de novo est la source de dioxines la plus importante dans de bonnes conditions de combustion de bois et elle peut être réduite par un entretien régulier de l'installation (p.ex.: dépoussiérage régulier de l'échangeur de chaleur).

Etant donné que la teneur en oxygène de l'atmosphère environnante est un paramètre, qui peut augmenter la formation des dioxines par la synthèse de novo, l'humidité du combustible peut également favoriser la formation de dioxines. Ceci étant d'une part dû à la formation accrue de particules lors de la combustion et d'autre part à l'apport supplémentaire d'oxygène lié à l'eau. Cependant, de nombreuses études ont montré que la formation de dioxines dépend d'avantage des conditions de l'incinération que du contenu en chlore du combustible utilisé. Une autre étude[4] menée en Allemagne a pu montrer que des installations de faible puissance opérées à une charge partielle émettent moins de dioxines qu'à une charge normale (optimale). Ceci

s'explique par une baisse de température générale et donc à une diminution de la synthèse de novo.

C. Les particules/poussières

Ce groupe de polluants contient des produits d'une combustion complète (cendres) tout comme des produits d'une combustion incomplète.

La masse totale de particules générées par une combustion de bois est un mélange de trois composantes :

- les particules incomplètement brûlées (suie, goudron,...) ;
- les particules de cendres, emportées par le courant de gaz de combustion ;
- les sels ou oxydes métalliques évaporés au niveau du foyer, puis condensés dans des zones plus froides de la chaudière ;

Selon le combustible, la chaudière et la gestion de l'installation, certaines de ces trois origines peuvent prédominer. Le rapport entre la composition du combustible et les émissions de particules est moins net que celui entre le contenu en azote du bois et les émissions d'oxydes d'azote produites par la combustion de bois, ce qui rend difficile, voire impossible de prévoir les émissions de poussière.

Cependant, il y a des possibilités de réduire à un maximum certaines sources :

- Au niveau du *combustible*, la combustion incomplète peut être contrôlée par un degré d'humidité adapté ; la formation de cendres volantes est influencée par la teneur en cendres du bois ; la taille du combustible doit être adaptée à la chaudière ; la composition du combustible doit être constante.
- Au niveau de la *chaudière* des aspects techniques comme les systèmes d'approvisionnement en air, en combustible, ou simplement la puissance influencent la formation de particules.

D'une manière générale les panneaux de particules tendent à libérer plus de poussières lors de leur combustion étant donné qu'ils contiennent plus de particules fines que le bois massif ou contreplaqué.

Des efforts se font actuellement dans le domaine de la recherche et du développement afin d'améliorer les techniques de combustion de bois au niveau de ces émissions.

[12], [13]

4.1.3. Les quantités d'émissions produites selon les différents scénarios

D'une manière générale, le bois de rebut et les plaquettes forestières génèrent les mêmes types d'émissions, seules les proportions varient. Etant données les difficultés de prévoir les taux d'émission de certains polluants et le fait que des essais pratiques avec différentes compositions de combustibles auraient dépassé le cadre de cette étude, il est préférable de se baser sur des mesures d'émissions atmosphériques qui ont été faites dans des conditions bien définies.

A. Résultats d'essais

L'Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) de l'université de Stuttgart, a mené une étude sur l'incinération de déchets de bois dans une installation pilote de 175 kW. Etant donné que cette installation comporte la plupart des éléments techniques requis pour une combustion efficace de bois, les résultats se laissent (à quelques exceptions près) extrapoler sur l'installation qui servira au chauffage du réseau à Putscheid.[14]

- Données sur l'installation:

puissance nominale:	175 kW
technique de combustion:	foyer volcan (alimentation par le bas)
alimentation en combustible:	automatique
degré d'utilisation de la chaleur:	85%
filtre:	séparateur à cyclone
système de contrôle:	sonde Lambda et éléments thermiques
année de construction:	1995

- Données sur le combustible :

Lors de ces essais, plusieurs groupes de combustible ont été utilisés. La subdivision en groupes a été faite selon des critères visuels. Les trois groupes les plus significatifs pour notre cas sont les suivants:

- bois à l'état naturel (degré d'humidité : 37%)
- un mélange de bois de récupération (déchets de bois ou de produits de bois en fin de vie) et de panneaux de particules (degré d'humidité : 20%)
- des panneaux de particules revêtus (exempts de produits de conservation et de composés halogénés) (degré d'humidité : 22%)

Une analyse élémentaire du combustible a été faite, afin de bien le caractériser :

Combustible	Composition élémentaire en % de masse sèche			
	C	H	N	Cl
Bois à l'état naturel	49,1	5,2	0,07	<0,1
Bois de récupération et panneaux de particules	50,4	6,7	0,66	<0,1
panneaux de particules revêtus	48,0	5,5	4,02	<0,1

Les résultats de l'analyse montrent que le triage des différents types de bois a été réussi.

- Résultats des mesures:

Les mesures ont été effectuées dans les fumées derrière le séparateur à cyclone. Les émissions moyennes mesurées dans les fumées (référence : 11% O₂) :

	CxHy (mg C/m ³)	CO (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	PCDD (ng I-TEQ/m ³)	particules/ poussière (mg/m ³)	puissance
valeurs limites*	50	250	500	0,1	150 50	<3 MW ≥3 MW
bois à l'état naturel	-	53	147	1,47	25	173 kW
bois de récupération et panneaux de particules	<1	63	420	0,37	95	161 kW
panneaux de particules revêtus	<1	44	927	0,95	94	145 kW

*Circulaire ministérielle du 27 mai 1994 portant application de la meilleure technologie disponible par la détermination de seuils recommandés pour les rejets dans l'air en provenance des établissements industriels et artisanaux, annexe II, point 95

B. Discussion

CxHy et CO

Les valeurs obtenues pour les émissions d'hydrocarbures témoignent de bonnes conditions de combustion pour chacun des groupes de combustible.

Application au réseau de chaleur de Putscheid :

Les émissions de CxHy et de CO ne posent pas d'inconvénient pour la valorisation thermique de bois provenant d'entreprises de transformation du bois ou de travaux d'entretien de forêts par un réseau de chaleur, pourvu que l'installation soit adaptée au combustible.

NO_x

Les essais ont montré que l'utilisation d'un combustible constitué uniquement de panneaux de particules mène à un dépassement du seuil prescrit pour les oxydes d'azote. Bien que localement des températures de 1200°C aient été atteintes, la part des oxydes d'azotes thermiques dans le total reste négligeable. La cause principale des émissions de NO_x est l'importante teneur en azote du combustible, qui, dans le cas de panneaux de particules revêtus de mélamine, pourrait en partie être lié au revêtement. Une autre raison pour ces émissions importantes de NO_x est l'inefficacité des mesures primaires de réduction d'oxydes d'azote utilisées dans cette installation.

Les résultats obtenus par ces essais et les affirmations trouvées dans la littérature permettent de suggérer la relation suivante entre l'azote contenue dans le combustible et les émissions de NO_x produits par sa combustion :

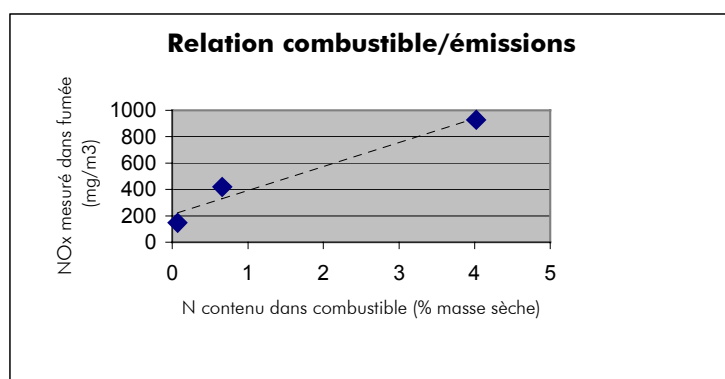


Fig. 4.1.d. : La relation entre les NO_x émis et le contenu en azote du combustible

Application au réseau de chaleur de Putscheid :

Scénario 1 : Combustible = 100% plaquettes forestières

Etant donné que les plaquettes forestières peuvent être assimilées au bois à l'état naturel, le respect de la valeur limite de 500 mg/m³ pourra être garantie lors de la combustion dans une chaudière appropriée.

Scénario 2 : Combustible = mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut

La relation entre la teneur en azote du combustible et la formation d'oxydes d'azote par la combustion permet d'affirmer qu'avec un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut, – même si celui-ci est constitué de 100% de panneaux de particules ou de contreplaqué – des valeurs autour de 500 mg/m³ de NO_x pourront être atteintes.

Les résultats obtenus avec le mélange de bois de récupération et de panneaux de particules, ainsi que les confirmations d'experts de la combustion de bois (Prof. Dr. Rainer Marutzky, Wilhelm Klauditz Institut für Holzforschung ; Dipl.-Ing. U. Zuberbühler, IVD), soutiennent l'affirmation précédente : si les panneaux de particules représentent seulement une fraction du combustible utilisé, les valeurs en oxydes d'azote mesurées lors de la combustion se trouvent en dessous des 500 mg/m³ prescrits par la législation luxembourgeoise. D'autant plus que tous les panneaux de particules et tous les types de bois contreplaqué ne contiennent pas 4% d'azote.

Un avantage d'un tel mélange serait par ailleurs que le degré d'humidité plus élevé des plaquettes forestières mènerait à une légère baisse des températures dans le foyer ce qui empêche encore d'avantage la voie de formation thermique d'oxydes d'azote.

Toutefois, afin de garantir le respect de cette valeur limite, il est recommandé de veiller à ce que l'installation comporte une séparation efficace de l'approvisionnement en air primaire et en air secondaire par une zone de réduction suffisamment longue (3 secondes), une technique couramment utilisée par certains constructeurs.

D'autres mesures primaires utilisées couramment dans des installations de combustion pour combustibles fossiles comme une séparation supplémentaire de l'approvisionnement en air tertiaire ou la séparation de l'approvisionnement du combustible représentent des possibilités intéressantes de réduction de NO_x , mais ne sont pas encore réalisées par les constructeurs.

Dioxines

Les émissions de dioxines semblent dépasser les valeurs limites prescrites par la législation luxembourgeoise quelque soit l'assortiment de combustible utilisé.

Ces émissions élevées pourraient s'expliquer dans ce cas par l'humidité du combustible (37%), ainsi que par l'effet «mémoire» de la chaudière, qui semble avoir été contaminé avec des dioxines avant les essais. [15]

A ces résultats peuvent être opposés les valeurs d'émissions de dioxines (0,013 Eq. Tox. en ng/m^3) mesurées sur la chaudière du réseau de chaleur au bois à Enscherange.

Application au réseau de chaleur de Putscheid :

Le fait de mélanger du bois de rebut sec avec les plaquettes forestières permet d'obtenir un mélange de plus faible humidité, ce qui mènera à des émissions de dioxines plus basses.

Particules/Poussières

La combustion de panneaux de particules revêtus menait à une concentration de $94 \text{ mg}/\text{m}^3$ de particules dans la fumée, ce qui est pratiquement quatre fois la valeur obtenue avec le bois à l'état naturel. Ceci s'explique par le contenu plus important en particules fines des panneaux. Ces fines particules sont dégagées par la combustion (surtout si elle est incomplète) et ensuite entraînées par les gaz de combustion. Les panneaux de particules contiennent également plus de cendres que le bois naturel, ce qui contribue également à une émission accrue de poussières.

Application au réseau de chaleur de Putscheid :

Scénario 1 : Combustible = 100% plaquettes forestières

Si le contenu en particules fines (sciure) et en poussières du combustible est négligeable, des valeurs d'émissions de particules/poussières en dessous de $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ peuvent être obtenues à l'aide d'un séparateur à cyclone. Cependant peu de constructeurs de chaudière le garantissent sans filtre supplémentaire (filtre à manches, électrofiltre, etc.). Par ailleurs, ces filtres feront doubler le prix d'une installation de chauffage de puissance moyenne.

Scénario 2 : mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut

La valeur limite de $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ ne constitue aucun obstacle pour la valorisation thermique d'un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut (quelles que soient les proportions) dans une chaudière adaptée et pourvue d'un séparateur à cyclone, alors que le strict respect de $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ de particules/poussières ne pourra être garanti qu'à l'aide d'un filtre plus performant.

Si le bois de rebut est uniquement constitué de bois contreplaqué les émissions de poussières produites lors de la combustion se rapprocheront de celles obtenues avec les plaquettes forestières, en effet, le placage contient beaucoup moins de particules fines que les panneaux de particules.

C. Conclusion

D'un point de vue énergétique, les déchets ligneux en provenance de l'industrie de la transformation du bois constituent un combustible aussi valable que les déchets résultant de l'entretien forestier. D'un point de vue environnemental, le bois de rebut provenant des entreprises peut être valorisé dans des chaudières de puissance moyenne garantissant une combustion complète, seulement s'il contient les mêmes constituants principaux que le bois naturel. En pratique, ceci peut être garanti si l'on exclut les déchets de bois traités à l'aide de produits de conservation du bois (composés halogénés, mercure, sels d'arsenic, créosote, etc.), ainsi que ceux qui comportent un revêtement au PVC. D'autres déchets de bois qui représentent de sérieux risques d'émissions sont ceux qui ont été peints à l'aide de peintures à pigments blancs contenant des métaux lourds comme le plomb ou le zinc, étant donné que ces métaux s'évaporent à des températures entre 800°C et 1200°C et dont la combustion requiert un traitement des émissions intense. Étant donné que ces peintures ne sont plus utilisées aujourd'hui, seul du bois de récupération pourrait en contenir. Le contenu en azote du bois de rebut que l'on désire valoriser thermiquement par une chaudière de puissance moyenne représente un autre facteur limitant. Le combustible (mélange) utilisé doit pouvoir garantir le respect des 500 mg/m³ de NO_x prescrits par la législation luxembourgeoise. Ainsi, si le bois de rebut contient 4% d'azote, le mélange de combustible utilisé devra comporter environ 70% de plaquettes forestières (à 0,1 % d'azote) afin de respecter cette limite.

Lors des essais menés par l'IVD décrits plus haut, plusieurs groupes de combustible ont été utilisés. Le triage a été fait selon des critères visuels et l'analyse élémentaire faite sur les différents groupes a pu montrer qu'il est possible de différencier les déchets susceptibles de servir de combustible dans une chaudière de puissance moyenne et ceux qui doivent être éliminés autrement (p.ex. dans un incinérateur). Le bois de rebut peut ainsi servir de combustible pour chauffer le réseau de Putscheid, si la qualité des déchets de bois est garantie par le producteur. Toutefois il est recommandé de s'assurer de la qualité du combustible par une analyse chimique périodique d'échantillons.

Au cas où le bois de rebut contiendrait une importante fraction de panneaux de particules une technique de filtration performante sera indispensable afin d'atteindre la limite de 50 mg/m³ de particules/poussières. Il reste aux acteurs économiques du projet de Putscheid de déterminer qui prendrait en charge les coûts supplémentaires générés par l'installation d'un tel filtre.

Si le bois de rebut est composé de bois massif ou de bois contreplaqué, on peut atteindre les 50 mg/m³ avec un séparateur à cyclone.

Pour avoir plus de détails sur les techniques de combustion et de filtration, prière de voir le chapitre 6 : « Recommandations et Conclusion ».

Les avantages de l'utilisation d'un mélange de combustibles sont d'une part l'obtention d'un combustible plus sec que la seule utilisation de plaquettes forestières, garantissant une combustion plus complète et d'autre part une plus grande sûreté d'approvisionnement que lors de l'utilisation d'une seule source de combustible.

4.2. Eco-bilan

4.2.1. L'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (LCA, Life Cycle Assessment) est le terme technique qui est utilisé pour désigner une méthode d'analyse systématique, du berceau à la tombe, des impacts environnementaux de la fabrication et de l'utilisation de produits ou de services. Dans l'usage courant, le concept de LCA est semblable à celui d'éco-bilan de produit, utilisé depuis Suite à un séminaire international tenu au Portugal en avril 1993, la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) a publié un document de référence pour la pratique des LCA, sous la forme d'un code de bonne conduite intitulé Guidelines for life-cycle assessment : a code of practice [16]. Ce document a servi de base aux efforts de l'organisation mondiale de standardisation (ISO) dans le but de formaliser et d'harmoniser la méthodologie des analyses de cycles de vie. Ainsi la norme ISO 14040 définit la structure inhérente à toutes les LCA, à savoir les étapes suivantes :

ISO 14041	définition des objectifs et envergure, inventaire du cycle de vie
ISO/DIS 14042	évaluation des impacts environnementaux
ISO 14043	interprétation

Afin de simplifier l'approche un groupe de travail de la SETAC a établi des critères de simplification de la procédure qui ont été publiés sous forme d'un rapport final [17]. Dans le cadre de la présente étude concernant les impacts environnementaux de différents scénarios d'utiliser du bois dans un réseau de chaleur dans la région Nord du Grand-Duché de Luxembourg, une analyse de cycle de vie comparative a été établie en appliquant les simplifications de la méthodologie des éco-bilans telles que décrites dans le rapport SETAC susmentionné.

4.2.2. Définition des objectifs, envergure et inventaire du cycle de vie

L'unité fonctionnelle est de 1.82 TJ d'énergie calorifique fournie par le réseau de chaleur sous forme d'eau chaude ou de chauffage domestique. Cette énergie représente l'énergie calorifique annuelle nécessaire pour alimenter le réseau de chaleur de la nouvelle zone résidentielle planifiée à Putscheid.

Afin de montrer les avantages et les désavantages environnementaux en terme d'éco-bilan de l'approvisionnement en énergie calorifique par des sources d'énergies renouvelables, les données ont été comparées à celles d'un réseau de chaleur approvisionné par du fuel léger. Ainsi les cinq scénarios de l'approvisionnement en énergie suivants ont été analysés en détail :

scénario	description
1a	100% plaquettes forestières
1b	90% plaquettes forestières + 10% panneaux solaires
2a	mélange de bois composé de : 50% plaquettes forestières 50% bois de rebut de l'industrie du bois
2b	90 % mélange de bois défini sous 2a 10% panneaux solaires
3	fuel léger

Les inventaires du cycle de vie ont été établis en incluant les données d'un rapport de l'Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) de l'université de Stuttgart [14] dans les inventaires écologiques des systèmes d'énergie établis par l'Office fédéral de l'énergie de la Suisse [18]. L'utilisation de ces données de base se justifie par le fait que ces données sont considérées comme les inventaires de cycles de vie les plus détaillés dans le domaine des systèmes énergétiques. Les auteurs de la présente étude ont distingué les émissions liées directement au réseau de chauffage et celles liées à la chaîne d'approvisionnement.

4.2.3. Analyse des impacts et interprétation

L'analyse du cycle de vie a été établie en se limitant aux émissions atmosphériques suivantes : composés organiques volatils (COV, C_xH_y), monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂)¹, oxydes d'azote sous forme de NO₂ (NO_x), dioxines en équivalents-toxiques (PCDD), particules et dioxyde de soufre (SO₂).

Scénario / source d'énergie			C _x H _y (kg/a)	CO (kg/a)	CO ₂ (t/a)	NO _x (kg/a)	PCDD (µg/a)	Particules (kg/a)	SO ₂ (kg/a)
1a	plaquettes forestières	chaudière + réseau	18	482	9	314	952	112	61
		chaîne d'approvisionnement	32	12	1	7	64	6	6
		total	50	494	10	321	1016	118	67
1b	90% plaquettes forestières 10% panneaux solaires	chaudière + réseau	16	435	9	282	853	101	57
		chaîne d'approvisionnement	31	18	11	8	57	7	12
		total	47	453	20	290	910	108	69
2a	mélange de bois 50% plaquettes forestières 50% bois de rebut	chaudière + réseau	18	482	9	476	719	154	61
		chaîne d'approvisionnement	32	18	1	7	64	6	6
		total	50	500	10	483	783	160	67
2b	90 % mélange de bois 10% panneaux solaires	chaudière + réseau	16	435	9	427	644	138	57
		chaîne d'approvisionnement	31	23	11	8	58	8	22
		total	47	458	20	435	702	146	79
3	fuel léger	chaudière + réseau	4	47	179	164	3	12	238
		chaîne d'approvisionnement	425	16	10	37	1	11	56
		total	429	63	189	201	4	23	294

L'analyse du cycle de vie montre clairement que les scénarios se basant sur les énergies renouvelables présentent des avantages par rapport au scénario de référence se basant sur le fuel léger au niveau des émissions de composés organiques volatils (COV, C_xH_y), surtout en ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement.

L'avantage concernant les impacts environnementaux est évident en terme d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂). Les émissions en dioxyde de carbone sont plus élevées pour les scénarios incluant les panneaux solaires ce qui s'explique par l'importance de la chaîne d'approvisionnement (entre autres la fabrication des panneaux) par rapport à leur apport en énergie calorifique (10 % de l'énergie totale fournie par le réseau).

Les désavantages environnementaux de l'approvisionnement en énergie calorifique par les énergies renouvelables se manifestent par rapport aux émissions en monoxyde de carbone (CO), en oxydes d'azote sous forme de NO₂ (NO_x), en dioxines et en particules. Si les panneaux solaires ne se justifient pas par rapport à leur contribution à l'effet de serre en terme d'émissions en dioxydes de carbone, ils permettent de faire baisser les émissions atmosphériques en CO, NO_x, PCDD et particules.

¹ les émissions de CO₂ générées par la combustion de bois sont considérées comme nulles

Ainsi le scénario 1b (90% de plaquettes forestières + 10 % panneaux solaires) permet de n'augmenter les émissions annuelles de NO_x que de 45% par rapport au scénario basé sur le fuel léger et les panneaux solaires ne font augmenter les mêmes émissions que de 67% si l'on utilise un mélange de bois.

Même si la partie la plus importante des émissions en monoxyde de carbone est générée par le réseau de chaleur lui-même, il faut tenir en compte que les émissions de CO ne constituent pas vraiment un problème environnemental dans la région prévue pour l'installation du réseau de chaleur.

Restent les émissions en dioxines et particules qui constituent les grands désavantages de l'approvisionnement en chaleur par le bois. Cependant il faut noter que l'exposition moyenne en dioxines n'est que de 82 ng d'équivalents toxiques par heure pour le pire scénario (1a) ce qui mène à des concentrations non critiques en ce qui concerne l'exposition des habitants d'une telle cité.

Il en est de même en ce qui concerne les émissions en particules. Les émissions en particules restent supérieures pour la combustion de bois de rebut par rapport à la combustion de plaquettes forestières.

La figure 4.2. résume les émissions totales des différents polluants pour les 5 scénarios discutés dans le cadre de l'analyse éco-bilan.

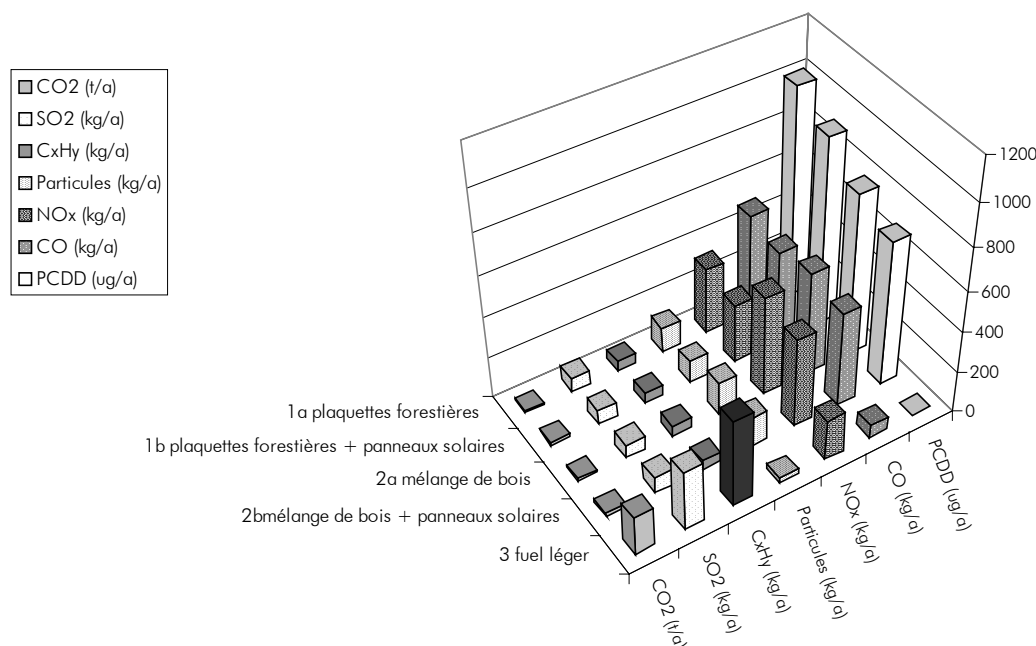


figure 4.2. résultats de l'analyse de cycle de vie, total des émissions atmosphériques pour les scénarios considérés.

Il est évident qu'une addition des différentes émissions en « écopoints » n'est possible qu'après une phase de pondération/évaluation préalable. Une telle pondération/évaluation n'est pas conforme à la norme ISO 14042. Pour cette raison, les auteurs ont renoncé à une telle procédure.

4.2.4. Conclusion

Les émissions de CO₂, de COV et de SO₂ se montrent en faveur de l'utilisation des énergies renouvelables, alors que les émissions de NO_x défavorisent le bois comme source énergétique d'une manière générale. Les émissions de NO_x entraînent deux problèmes majeurs : l'acidification et la création d'ozone photochimique, sous l'effet des rayons UV, surtout en été. Pour cette raison la combinaison de l'utilisation de l'énergie solaire en été avec le chauffage au bois en hiver se montre favorable du point de vue environnemental.

Les impacts environnementaux relatifs aux poussières et aux dioxines se manifestent surtout au niveau local. Ainsi, l'optimisation d'une technique de combustion adaptée et l'application d'un filtre approprié permettra de faire face à ce problème.

5. Aspects logistiques

Cette partie se voue à l'organisation logistique de l'approvisionnement du réseau de chaleur par un mélange de bois provenant d'entreprises de transformation du bois et de travaux d'entretien des forêts. Dans cette mesure, elle traite l'ensemble des étapes du réseau, qui doit s'organiser autour de la commune de Putscheid, depuis la collecte de matières premières jusqu'à leur utilisation dans la chaudière.

Ainsi, cette partie comprend la proposition et l'étude de plusieurs scénarios définis dans le préambule, selon les sources d'énergie utilisées. Les différents types de données sont listés de manière exhaustive sous forme de tableaux afin d'avoir une vue générale de la situation.

En fonction de la capacité de certaines entreprises à fournir du bois de rebut, des cycles ont été imaginés et schématisés (pour les schémas, voir sous Annexe III).

Suivant cette logique, une matrice récapitule les données principales et permet diverses comparaisons en vue de l'optimisation des flux.

5.1. Inventaire des données

Besoin total en chaleur à l'année	633 344kwh/an [19]
Conversion de ce besoin en tonnes de bois par an	159 131 soit 159,200 t/an
Une partie de ce besoin peut être assuré par de l'énergie solaire durant certains mois de l'année.	68 648kWh/an
Besoin de chaleur à fournir par le bois à l'année dans le cadre où on utilise l'énergie solaire.	$633\ 344 - 68\ 648 = 564\ 696$ kWh/an
Conversion du résultat ci dessus en tonnes par an.	141 883 soit 141,9t/an

Plaquettes forestières (taux d'humidité : 25%)	
Moyenne pondérée de la masse volumique de 1 m ³ de résineux. [20]	$(216+199)/2 = 207.5\text{kg/ m}^3$ <i>216=masse volumique des résineux à un taux de 30% d'humidité.</i> <i>199=masse volumique des résineux à un taux de 20% d'humidité.</i>
Moyenne pondérée de la masse volumique de 1 m ³ de feuillus. [20]	$(278+301)/2 = 289.5\text{kg/ m}^3$ <i>301=masse volumique des feuillus à un taux de 30% d'humidité.</i> <i>278=masse volumique des feuillus à un taux de 20% d'humidité.</i>
Hypothèse : L'utilisation du bois brut correspond à une proportion de 2/3 de résineux et de 1/3 de feuillus. Poids de cette proportion.	$(2/3 \times 207.5) + (1/3 \times 289.5) = 234.83\text{kg/m}^3$
Volume total de bois brut nécessaire par an.	Scénario 1a : $159\ 131/234.83 = 677.64$ soit 677 m ³ /an
	Scénario 1b : $141\ 883/234.83 = 604.194$ soit 604 m ³ /an
Bois de rebut (taux d'humidité :10%)	
Le besoin en chaleur est couvert par l'utilisation d'un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut à valeur égale (mélange à 50/50). Hypothèse : Le bois de rebut est également constitué de 1/3 de feuillus et de 2/3 de résineux.	
Masse volumique de bois de rebut.	$(1/3 \times 435) + (2/3 \times 312) = 353\text{kg/m}^3$ <i>435=masse volumique des feuillus à un taux de 10% d'humidité.</i> <i>312=masse volumique des résineux à un taux de 10% d'humidité.</i>
Donc en m ³	<u>1er cas</u> : sans utilisation d'énergie solaire $(159\ 131/2) / 353 = 225.39$ soit 225 m ³ /an
	<u>2ème cas</u> : en utilisant l'énergie solaire. $(141\ 883/2) / 353 = 200.96$ soit 201 m ³ /an
Besoin en tonnes de plaquettes forestières par année dans le cadre du mélange 50% de plaquettes forestières et 50% de bois de rebut.	Scénario 2a : $677/2 = 338.5$ m ³ /an
	Scénario 2b : $604.194/2 = 302$ m ³
Besoin en tonnes de bois de rebut pour l'année.	Scénario 2a : $159.131/2 = 79.565\text{t/an}$, soit 80 tonnes par an.
	Scénario 2b : $141.883/2 = 70.941\text{t/an}$, soit 71 tonnes par an.

5.2. Solutions envisagées pour l'approvisionnement en bois

5.2.1. L'approvisionnement en bois de rebut

Les entreprises, fournissant potentiellement le bois de rebut et prises en compte dans cette partie ont été choisies selon un certain nombre de critères (proximité, qualité des déchets de bois, etc.) parmi les entreprises de transformation de bois se trouvant à l'intérieur d'un périmètre d'entre 15 et 20 km autour de la commune de Putscheid. Les solutions d'approvisionnement en bois de rebut envisagées se basent sur les quantités de déchets de bois indiquées par les entreprises pour lesquelles ces dernières n'avaient pas encore trouvé de voie d'utilisation. Selon les affirmations des entreprises, ces déchets sont dépourvus de revêtements au PVC et de produits de conservation halogénés. La liste complète de ces entreprises pourra être consultée au CRTE.

Solutions imaginées pour l'approvisionnement en bois de rebut	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le besoin en plaquettes en utilisant l'énergie solaire est de : 71t/an. ▪ Le besoin en plaquettes sans utilisation d'énergie solaire est de : 80t/an. 	
Solution n°1 : Entreprise A	Cette entreprise est située dans un rayon de 15km autour de Putscheid.
	Elle produit à l'année des déchets de type : <ul style="list-style-type: none"> - 100 tonnes de contre plaqué. - 50 tonnes de massif.
Solution n°2 : Entreprise B Entreprise C	Ces deux entreprises sont situées dans un rayon de 15km de Putscheid. Elles produisent à l'année des déchets de type : <ul style="list-style-type: none"> - 34 tonnes de massif (entreprise B) - 70 tonnes de contre plaqué (entreprise C)
Selon ces données, l'ensemble des besoins en bois de rebut pourra être couvert par la production de ces différentes entreprises.	

Afin d'éloigner le bruit fait par la déchiqueteuse aussi bien du lotissement que des entreprises, et pour minimiser le nombre de transports entre les entreprises et le silo, les auteurs suggèrent dans un premier temps de déchiqueter aussi bien le bois de rebut que le bois provenant de forêts près de l'entrepôt. Cette solution arrangerait également les entreprises dans la mesure où celles-ci préfèrent se débarrasser de leurs déchets en une fois. En outre, les détails organisationnels concernant l'étape de transport du bois de rebut depuis les entreprises vers l'entrepôt ainsi que les coûts liés à cette étape restent encore à définir.

5.2.2. L'approvisionnement en plaquettes forestières

Le bois provenant de l'entretien des forêts se trouvant à l'intérieur d'un périmètre de 15 à 20 km autour de la commune de Putscheid est transporté vers l'entrepôt et décheté sur place.

Les plaquettes doivent être stockées dans l'entrepôt jusqu'à ce qu'elles atteignent un degré d'humidité en dessous de 30%.

Le fait que l'étape de déchetage des deux fractions de bois a lieu au même endroit présente l'avantage d'avoir besoin d'une seule déchiqueteuse sous condition que celle-ci garantit l'obtention de plaquettes de bonne taille quelque soit le bois utilisé.

Les deux schémas correspondant aux solutions envisagées pour l'approvisionnement en bois se trouvent en annexe III.

5.3. Coûts liés à la chaîne d'approvisionnement en bois

Coûts liés au bois brut (non décheté) transporté de la forêt vers l'entrepôt	
Coûts annuels du bois brut (sans déchetage). [19]	Scénario 1a : 155 285 Luf
	Scénario 1b : 138 540 Luf
Coûts annuels du bois brut (sans déchetage) dans le cadre du mélange 50/50. [19]	Scénario 2a : 77 642 Luf
	Scénario 2b : 69 270 Luf
Coûts de transport	62 Luf / m ³
Coûts de transport liés au volume de plaquettes forestières nécessaire à l'année dans le cadre où il n'y a pas de mélange avec le bois de rebut.	Scénario 1a : $677 \text{ m}^3 \times 62 \text{ Luf} = 41\,354 \text{ Luf/an}$
	Scénario 1b : $604 \text{ m}^3 \times 62 \text{ Luf} = 37\,448 \text{ Luf/an}$
Coûts de transport liés au volume de plaquettes forestières nécessaire à l'année dans le cadre où il y a mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut à 50/50.	Scénario 2a : $338.5 \text{ m}^3 \times 62 \text{ Luf} = 20\,987 \text{ Luf/an}$
	Scénario 2b : $302 \text{ m}^3 \times 62 \text{ Luf} = 18\,724 \text{ Luf/an}$

Coûts liés à l'utilisation de la déchiqueteuse

Le coût de l'utilisation de la déchiqueteuse par m³ est estimé à 123 Luf. [19]

Coûts de déchiquetage dans le cadre de la seule utilisation de plaquettes forestières	Scénario 1a : $677 \times 123 = 82\,041$ Luf/an
	Scénario 1b : $604 \times 123 = 74\,292$ Luf/an
Coûts de déchiquetage des déchets de bois de l'entretien forestier en plaquettes dans le cas du mélange bois/plaquettes à 50/50.	Scénario 2a : $338.5 \times 123 = 41\,635$ Luf/an
	Scénario 2b : $302 \times 123 = 37\,146$ Luf/an
Coûts dans le cadre où le bois de rebut subit une étape dans la déchiqueteuse (mélange bois 50%, plaquettes 50%).	Scénario 2a : $225 \times 123 = 39\,600$ Luf/an
	Scénario 2b : $201 \times 123 = 35\,376$ Luf/an

Coûts liés à l'entreposage

Le coût d'entreposage est estimé à 140 Luf/ Fm (Fm = m³ de bois plein) (voir matrice ci-dessous).

Coûts liés au nombre de voyages de l'entrepôt au silo		
Capacité de la remorque.	20 m ³	
Nombre de voyages	Mélange 50/50	Bois brut
	scénario 2a : $(338.5 \text{ m}^3 + 225 \text{ m}^3) / 20 = 28.175$ soit 29 voyages.	scénario 1a : $677 \text{ m}^3 / 20 = 33.85$ soit 34 voyages
	scénario 2b : $(302 \text{ m}^3 + 201 \text{ m}^3) / 20 = 25.15$ soit 26 voyages.	scénario 1b : $604 \text{ m}^3 / 20 = 30.2$ soit 31 voyages.
Coût d'un aller-retour depuis l'entrepôt au silo de la commune de Putscheid.*	Mélange 50/50	Bois brut
	scénario 2a : 29 voyages x 1200 Luf = 34 800 Luf	scénario 1a : 34 voyages x 1200 Luf = 40 800 Luf
	scénario 2b : 26 voyages x 1200 Luf = 31 200 Luf	scénario 1b : 31 voyages x 1200 Luf = 37 200 Luf

* La distance de l'entrepôt au silo a été fixée hypothétiquement à 10 km. En partant de l'hypothèse qu'un tracteur roule à 20 km/h sur une distance de 10 km, il lui faudra environ 30 mn pour effectuer cette distance.

Le coût de location comprenant le tracteur, la remorque et le coût de la personne qui conduit le chargement revient à 1200 Luf par heure.

Donc un aller-retour est évalué à une heure et donc à 1200 Luf.

5.4. Matrice récapitulative

Scénarios	Bois utilisé	Volume de bois nécessaire à l'année (m ³)	Coûts d'exploitation forestière (Luf)	Coûts de transport forêt-entrepôt (Luf)	Coûts déchiqueteuse (Luf)	Coûts d'entreposage (Luf)	nombre de voyages	Coûts de transport entrepôt-silo (Luf)	Coûts de chargement (Luf)	Coût total (Luf)
1a	plaquettes forestières	677	155285	41354	82041	38427	34	40800	X	357907
1b	plaquettes forestières	604	138540	37448	74292	34798	31	37200	X	322278
2a	plaquettes forestières	338,5	77642	20987	41635	19502	29	34800	X	250241 + X
	bois de rebut	225	X	X	37146	18529				
2b	plaquettes forestières	302	69270	18724	39600	17399	26	31200	X	228121 + X
	bois de rebut	201	X	X	35376	16552				

5.5. Commentaire de la matrice

D'après ce qui a été vu précédemment, seules certaines localités ont été sélectionnées et leurs flux étudiés, et il n'en reste pas moins d'autres possibilités qui pourront se vérifier lorsque certains critères seront fixés.

Il est à noter qu'à l'intérieur de la matrice persistent des inconnues. Celles-ci correspondent dans un premier temps au coût du transport des entreprises à l'entrepôt, et dans un deuxième temps au coût de chargement.

A première vue, le fait d'utiliser un mélange de bois de rebut et de plaquettes forestières paraît être la solution la moins chère, cependant il faut noter que les coûts de transport du bois de rebut des entreprises vers l'entrepôt n'ont pas encore été fixés. Il s'agit de savoir à qui revient le coût de transport du bois de rebut : à l'entreprise qui s'en sépare ou à la commune de Putscheid.

En ce qui concerne le deuxième cas, il s'agit des étapes de chargement et de déchargement de la matière.

5.6. Conclusion

Au travers de cette étude, nous avons pu voir comment organiser en quelques schémas les flux logistiques tant au niveau de l'approvisionnement, qu'au niveau financier. Une étude plus complète pourra s'effectuer lorsque le lieu d'entreposage ainsi que les entreprises et les forêts fournissant le bois auront été déterminées.

Les quantités de bois de rebut nécessaires pour le chauffage du réseau à Putscheid avec un mélange de bois de rebut et de plaquettes forestières, et le nombre d'entreprises susceptibles de les fournir, permettent de faire le choix du (ou des) fournisseur(-s) de combustible selon de critères de qualité plus sévères. Afin de garantir la pérennité du combustible bois de bonne qualité, les auteurs de cette étude préconisent la mise en place d'un «comptoir du bois», un endroit central de collecte et de distribution de déchets de bois, qui aura pour but de garantir la qualité et la quantité requises du combustible bois (plaquettes forestières et bois de rebut). En outre, ce comptoir du bois se chargerait de la fixation des tarifs et assurerait la conformité de cette chaîne d'approvisionnement avec la législation en matière de déchets (voir sous Annexe I).

6. Recommandations et conclusion

6.1. Le choix de la technique de combustion la mieux adaptée

6.1.1. Conditions générales

Afin d'assurer une combustion aussi complète que possible et dans le souci de réduire au maximum la formation de polluants atmosphériques, une installation de chauffage au bois efficace et propre doit comporter ou garantir :

- Un approvisionnement automatique en combustible garantissant un apport bien dosé et réglé par exemple par rapport à la pression ou à la température mesurée dans la zone de combustion;
- Un contrôle de l'approvisionnement en air ou en combustible par une régulation électronique comme le système de contrôle CO/Lambda, prenant en compte aussi bien l'excès d'air que la concentration de CO dans la fumée;
- Une combustion étagée ou une séparation efficace de l'approvisionnement de l'air en air primaire et en air secondaire
- Une zone de combustion bien isolée, car un refroidissement local des murs peut provoquer une combustion incomplète ;
- Une zone de combustion suffisamment grande permettant un temps de séjour suffisamment long (au moins 2-3 secondes) du mélange de gaz dans le foyer de combustion ainsi que dans la zone de postcombustion;
- Des éléments structuraux garantissant un bon mélange des gaz de combustion et de l'air ;
- Une température de combustion suffisamment élevée d'au moins 800-850°C mais ne dépassant pas les 1000°C ;
- Un échangeur de chaleur bien adapté favorisant une utilisation maximale de l'énergie de combustion (degré d'utilisation minimal : 75%) ;
- Un dépoussiéreur/séparateur (filtre cyclone ou multicyclone) permettant d'éliminer les plus grosses particules (poussière) ainsi que d'éventuelles étincelles ;

[13]

6.1.2. Scénario 1 : Combustible = 100% plaquettes forestières

La technique de combustion :

Si le degré d'humidité des plaquettes se situe en dessous de 30% la technique de combustion à foyer volcan (alimentation par le bas) est bien adaptée. Ces systèmes sont compacts et leur maintenance est relativement simple. Une alternative au foyer volcan serait la combustion par rotation proposée par certains producteurs.

Dans le cas où les plaquettes forestières seraient plus humides (degré d'humidité >30%), une technique de combustion comme le foyer à grille mobile, qui permettrait un séchage du combustible plus efficace avant la combustion, serait mieux adaptée. Une autre possibilité seraient les systèmes à deux chambres de combustion («Vorofenfeuerung») qui présentent l'avantage de permettre une séparation physique des étapes de la combustion et de ce fait une combustion plus complète, surtout pour du combustible humide.

6.1.3. Scénario 2 : Combustible = mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut

Le mélange du combustible :

Puisqu'une composition constante du combustible est une des conditions importantes pour une combustion complète, le bon mélange des plaquettes forestières et du bois de rebut devra être assuré, surtout si les plaquettes forestières comportent une humidité au-delà de 30%.

Ce mélange se fait de préférence immédiatement avant l'introduction dans la chaudière. Le combustible serait stocké dans un silo pourvu d'une cloison, pour séparer les deux fractions. Afin d'obtenir un bon mélange, plusieurs systèmes sont envisageables. Une possibilité serait d'extraire le combustible de chaque compartiment à l'aide d'extracteurs à échelles, qui le pousseraient sur une vis ou une chaîne, située au milieu du silo, au niveau de la cloison. Cette vis ou chaîne le transporterait jusqu'au système d'alimentation de la chaudière et le dosage pourrait être réglé par la fréquence des extracteurs individuels. Pour un mélange encore plus réussi, un réservoir mélangeur supplémentaire en aval du système d'extraction peut être installé.

La technique de combustion :

Dans le cas d'un mélange de combustibles, un système comportant une grille de combustion serait préférable car la combustion de la fraction du bois de rebut pourrait mener à la création d'une quantité plus importante de cendres.

Réduction des émissions :

Etant donné que les différences majeures entre les émissions produites par la combustion de bois de rebut (surtout s'il contient une importante fraction de panneaux de particules) et de plaquettes forestières se situent au niveau des oxydes d'azote et les particules, la partie suivante va se concentrer sur les possibilités de les réduire.

NO_x :

Des mesures secondaires comme une réduction non catalytique par la méthode SNCR (selective noncatalytic reduction) qui fait usage d'ammoniaque ou d'urée, ou bien une réduction catalytique (SCR), sont très efficaces mais entraîneraient dans le cas du réseau de chaleur de Putscheid un entretien et des coûts hors proportions. Cependant, une mesure primaire comme la séparation de l'approvisionnement de l'air en air primaire et en air secondaire par une zone de réduction assez longue (3 secondes de temps de séjour pour les gaz de combustion) peut réduire les émissions de NO_x jusqu'à 75% sans faire usage de filtres ou d'additifs. Une autre mesure primaire est la recirculation de la fumée, diminuant les émissions de NO_x par un retour des fumées, en baissant la température et la teneur en oxygène des gaz. Cette technique peut être efficace, surtout si elle est combinée avec une séparation de l'approvisionnement de l'air et un mélange efficace des gaz de combustion et de l'air.

Au niveau du combustible, il faut surtout veiller à une bonne répartition de ce dernier à l'intérieur du foyer et à garder la teneur en eau du combustible assez faible.

Les émissions de poussières:

Si le bois de rebut est composé uniquement ou majoritairement de panneaux de particules, une mesure secondaire comme un électrofiltre va être indispensable si l'on vise des valeurs d'émission de particules en dessous de 50 mg/m^3 .

Les électrofiltres permettent d'obtenir des valeurs entre 20 et 50 mg/m^3 de poussière. Cependant, le désavantage lié à ces dispositifs est le risque de feux et d'explosions de filtres, liés à une accumulation de particules incomplètement brûlées à la surface du filtre. La température à laquelle un électrofiltre est opéré devrait rester en dessous de 200°C , afin d'éviter la synthèse de novo de dioxines.

Les séparateurs filtrants comme les filtres à manches sont également très efficaces et offrent en plus la possibilité d'une meilleure filtration des émissions gazeuses par une addition combinée de chaux et de charbon actif, seulement, ils risquent de prendre feu plus facilement que les électrofiltres. Des séparateurs filtrants en laine de métal (Metallvlies) ou en céramique peuvent être une alternative. Les séparateurs filtrants peuvent mener à des émissions de poussière de 10 à 50 mg/m^3 , ils sont généralement moins chers que les électrofiltres, mais demandent un entretien plus rigoureux et un remplacement régulier (tous les 3 à 5 ans, selon le cas).

De nouvelles techniques de séparation de poussières/particules sont entrain d'être développées par certains fournisseurs. Ces techniques sont comparables à des séparateurs cyclones à rotation plus performants, mais moins chers que des électrofiltres.

Si le bois de rebut est composé de bois massif ou de bois contreplaqué, on peut atteindre les 50 mg/m^3 avec un séparateur à cyclone.

[21], [22]

6.1.4. Autres techniques

Outre les techniques recommandées plus haut pour le lotissement de Putscheid, les auteurs de cette étude proposent encore d'autres possibilités de valorisation énergétique de déchets de bois.

- Pour des installations de réseaux de chaleur utilisant des plaquettes forestières d'un degré d'humidité élevé, la technique de condensation des fumées peut être intéressante. L'utilisation de cette technique permet l'obtention d'un degré d'utilisation plus élevé du combustible (une augmentation de plus de 25% par rapport à une installation normale) et un lavage des fumées (réduction des émissions de poussières et de NO_x), mais elle présuppose la présence d'utilisateurs de basses températures (p.ex.: entreprises horticoles, systèmes hypocaustes) et le traitement des boues de condensation.
- Une autre filière technique prometteuse en cette matière est celle basée sur le cycle Rankine organique fermé (ORC) appliquée aux USA, Finlande, Suède, Danemark et l'Autriche. Cette technologie peut être exploitée en mode de cogénération (chaleur et électricité).
- La gazéification du bois en combinaison avec des turbines représente une solution susceptible de trouver des applications au niveau des puissances élevées.

6.2. Conclusion

Les signataires de la convention de Rio (mai 1992), y compris le Luxembourg, se sont engagés à mettre en œuvre l'Agenda 21, reprenant l'ensemble des actions à entreprendre par la Communauté internationale dans tous les domaines liés au développement durable. Ainsi, l'exploitation accrue de ressources naturelles renouvelables (tel le bois) fait partie des impératifs du Plan National pour un Développement Durable. Ce dernier prévoit par ailleurs de : « ... promouvoir l'exploitation et la création de sources d'énergie renouvelables... et de doubler la part du bois dans la consommation finale d'énergie (0,5% -> 1%) d'ici 2010 ».

Sachant qu'en plus 25% des émissions de CO₂ luxembourgeoises proviennent de la production d'énergie et de chaleur, le combustible bois se présente comme une source d'énergie alternative importante, surtout en vue du potentiel considérable de bois sous forme de sous-produits provenant des activités de l'industrie de bois et de l'entretien des forêts. Par ailleurs, selon le scénario adopté, le fait d'utiliser du bois (que ce soit du bois de rebut ou des plaquettes forestières) pour chauffer un réseau de chaleur comme celui projeté à Putscheid permet d'éviter l'émission de 170 tonnes de CO₂ par an, si le fuel léger est substitué par du bois.

Bien qu'un mélange de deux fractions différentes de combustible entraîne des investissements supplémentaires aussi bien au niveau organisationnel qu'au niveau technique, il présente en tant que combustible renouvelable indigène, l'avantage d'une plus grande sécurité d'approvisionnement pour les utilisateurs.

Cependant, afin d'assurer à long terme la même garantie qualitative et la même facilité d'approvisionnement en bois combustible qu'offrent les sources énergétiques fossiles, les auteurs de cette étude recommandent la mise en place d'un «comptoir du bois», un endroit central de gestion de l'offre et la demande (collecte, de contrôle et distribution) de déchets de bois. Toutefois le recours au vecteur énergétique bois doit être organisé de façon telle qu'une exploitation excessive de nos forêts à des fins énergétiques soit évitée.

Puisque d'une manière générale l'utilisation du bois comme source d'énergie est liée à des coûts élevés, le maintien des aides financières est nécessaire à la promotion de cette technologie et à la garantie de sa compétitivité avec les combustibles fossiles non renouvelables.

7. Bibliographie

1. Prof. Dr. Rainer Marutzky, *Qualitätsanforderungen und Entsorgungswege für Rest- und Gebrauchthölzer*, 1996, WKI, Braunschweig.
2. Ministère de l'Environnement, *L'état de l'environnement 1993*, 1994.
3. Othmar Humm, *Niedrigenergiehäuser*, ed. Ökobuchverlag, 1997.
4. Sprenger Recknagel, Schramek, *Taschenbuch für Heizung und Klima Technik*, ed. Oldenbourg Verlag, 2000.
5. Prof. Dr. Friedrich Reinmuth, *Energieeinsparung in der Gebäudetechnik*, Kamprath Reihe, ed. Vogel Verlag, 1994.
6. Ruedi Spalinger, *Strom Rationell nutzen*, ed. Ravel Programm VDF Verlag der Fachvereine Zürich, 1992.
7. Peter Braun Armin Marko, *Thermische Solarenergie Nutzung in Gebäuden*, ed. Springer Verlag Fraunhoferinstitut ISE, 1997.
8. John A. Duffie, William A. Beckmann, *Solar Engineering of Thermal Processes*, ed. John Wiley & Sons inc., 1991.
9. Rainer Marutzky, *Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten*, WKI-Bericht Nr.26, ed. Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung, 1991.
10. Rainer Marutzky, Klaus Seeger, *Energie aus Holz und anderer Biomasse Grundlagen, Technik, Entsorgung, Recht*, 1999: DRW Verlag.
11. Dipl.-Chem.-Ing. Roland Keller, *Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten*, 1994, VDI Verlag.
12. Baumbach, et al., *Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen*, Umweltforschung in Baden-Württemberg, ed. Ecomed, 1997.
13. André Weidenhaupt, Joëlle Welfring, *La valorisation thermique des résidus ligneux de l'industrie de la transformation du bois*, 1999, CRTE.
14. G. Baumbach U. Zuberbühler, *Emissionsarme Verbrennung von problematischen gewerblichen und industriellen Rest- und Abfallhölzern in Pilotanlagen unter 1MW Feuerungsleistung*, 1997, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Abteilung Reinhaltung der Luft.
15. Dr. Michael Strecker, *Dioxinmissionen von Holzfeuerungsanlagen*, 1994, Wilhelm-Klauditz-Institut, Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig.
16. SETAC, *Guidelines for Life-Cycle Assessment : a code of practice*, 1993, SETAC, Boca-Raton, FL.
17. Angeline de Beaufort-Langeveld Kim Christiansen, Nico van den Berg, Ruth Haydock, Marten ten Houten, Shpresa Kotaji, Ellen Oerlemans, Wulf-Peter Schmidt, André Weidenhaupt, and Peter R. White, *Simplifying LCA - Just a Cut?*, 1997, SETAC-Europe, Brussels.
18. R. Frischknecht et al., *Ökoinventare von Energiesystemen*, 1996, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
19. Agence de l'Energie S.A., *Konzept einer zentralen Holzheizung/Neue Wohnsiedlung Putscheid*, 1999.

20. Wilfried Schneider, Dipl.-Ing. Friedhelm Peters, *Holz als Energierohstoff Möglichkeiten der industriellen und kommunalen Wärmeversorgung*, 1988, Centrale Marketing Gesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft, AK Holz.
21. Rainer Marutzky, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen*, Umwelt, ed. VDI Verlag, 1997.
22. Blatt 4 VDI-Richtlinie 3462, *Emissionsminderung, Holzbearbeitung und -verarbeitung - Verbrennen von Holz und Holzwerkstoffen ohne Holzschutzmittel*, 1999.

Annexe I

Analyse de la situation réglementaire

I.1. Législation luxembourgeoise

I.1.1. Autorisation d'exploitation

Loi du 10 juin 1999 relative aux établissements classés (Commodo Incommodo)

Selon cette loi, tous les établissements industriels, artisanaux et commerciaux qui peuvent présenter un danger pour l'homme ou la nature doivent disposer d'une autorisation. Ces établissements sont divisés en quatre classes et deux sous-classes par le **règlement grand-ducal du 16 juillet 1999 portant nomenclature et classification des établissements classés**. Ces classes déterminent qui pourra donner cette autorisation. Le cas des installations de chauffage au bois de rebut pourrait être assimilé à la désignation de «production d'énergie thermique» du règlement :

- 1) Selon ce règlement les installations de **production d'énergie thermique** sont subdivisées en :
 - a) Chaufferies destinées à la production d'eau chaude avec une puissance thermique totale installée supérieure à 3000 kW, qui font partie de la classe 1.
 - b) Chaufferies destinées à la production de vapeur ou au chauffage de fluides calorifères autres que l'eau
 - ba) d'une puissance thermique inférieure à 1000 kW appartenant à la classe 3
 - bb) d'une puissance thermique supérieure à 1000 kW appartenant à la classe 1
- 2) La **distribution d'énergie thermique** sous forme de conduites destinées au transport de vapeur, d'eau surchauffée ou de fluides calorifères fait partie de la classe 1.

Le réseau de chaleur alimenté par un mélange de bois provenant d'entreprises de transformation du bois et de travaux d'entretien de forêts fera partie de la classe 1 en raison de la distribution d'énergie thermique et devra donc disposer d'une autorisation d'exploitation délivrée par le Ministre de l'Environnement et par le Ministre du Travail.

Les conditions fixées par cette autorisation pourraient entre autres contenir des valeurs limites d'émissions atmosphériques basées sur la «circulaire ministérielle du 27 mai 1994 portant application de la meilleure technologie disponible par la détermination de seuils recommandés pour les rejets dans l'air en provenance des établissements industriels et artisanaux».

I.1.2 Air

La Loi du **21 juin 1976 relative à la lutte contre la pollution de l'atmosphère** prévoit une série de règlements grand-ducaux, fixant les mesures à prendre en vue de surveiller, prévenir, réduire ou supprimer la pollution de l'atmosphère.

La **Circulaire ministérielle du 27 mai 1994 portant application de la meilleure technologie disponible par la détermination de seuils recommandés pour les rejets dans l'air en provenance des établissements industriels et artisanaux** sert de base pour la fixation des normes dans les autorisations d'exploitation.

Elle s'applique aux établissements de classe I et à certains établissements de classe 3. Selon le combustible utilisé, cette circulaire distingue entre les installations de combustion et les installations d'incinération. Actuellement, il existe un « projet de règlement grand-ducal concernant les meilleures techniques disponibles en relation avec la prévention et la réduction de la pollution atmosphérique en provenance des établissements industriels et artisanaux » qui reprend les valeurs recommandées par la circulaire.

Le chiffre 1 de l'annexe II de cette circulaire s'applique aux installations de **combustion** alimentées exclusivement à l'aide des combustibles ligneux suivants :

- bois débité, non traité et sous écorce, sous forme de bois de quartier ou de copeaux grossiers, ainsi que menu bois, ramilles et cônes ;
- bois non débité et non traité, sous forme de copeaux ;
- sciure de bois, poussières fines ou écorce ;
- bois peint, laqué ou contre-plaqué y compris leurs déchets, pour tant que ces bois ne sont traités à l'aide de produits de conservation et pour autant que les contre-plaqués ne contiennent de composés halogénés ;
- bois contre-plaqué, panneaux en fibres de bois, panneaux d'aggloméré ou tout autre bois collé, ainsi que leurs déchets, pour autant que ces bois ne sont pas traités, peints ou imprégnés à l'aide de produits de conservation du bois et pour autant que les contre-plaqués ne contiennent de composés halogénés

Les valeurs limites d'émission pour les installations de **combustion** (sous chiffre 1) alimentées au bois sont fixées comme suit (*) :

Emissions	Seuil (mg/m ³)
Particules solides	50
Monoxyde de carbone	250
Monoxydes et dioxydes d'azote	500
COV (carbone total)	50
Ammoniaque et composés organiques volatils de l'ammonium	30

* Les seuils recommandés se réfèrent à une teneur en oxygène dans les effluents de 11%

Le champ d'application de ce chiffre ne s'applique cependant pas aux installations d'incinération de déchets.

D'après le chiffre 8 de l'annexe II de cette même circulaire concernant **l'incinération de déchets solides**, à l'exception des déchets ménagers, il est interdit d'incinérer des déchets solides comme les déchets de bois dans des installations d'une puissance calorifique inférieure à 350 kW. La température des gaz produits lors de l'incinération doit être au moins de 850°C pendant un laps de temps minimal de 2 secondes et la teneur en oxygène doit être de 6%. Pour l'incinération des déchets solides le circulaire prévoit des valeurs limites d'émission pour un certain nombre de substances, notamment pour les poussières, le seuil est fixé à 20 mg/m³(à une teneur en oxygène dans les effluents de 11%).

Sous le chiffre 9 de l'annexe II de cette circulaire sont énumérées les valeurs limites d'émission pour **l'incinération du bois dans les menuiseries** (*) :

Installation	Emissions	Seuil (mg/m ³)
	Poussières	150
>3 MW	Poussières	50
>1 MW	Monoxyde de carbone	250
>1 MW	Oxydes d'azote	500
>1 MW	COV	50

* Les seuils recommandés se réfèrent à une teneur en oxygène dans les effluents de 11%

Une **distance minimale** par rapport à une zone d'habitation existante ou prévue dans le cadre du plan d'aménagement communal doit être de 100 m. Si cette distance n'est pas respectée pour des installations existantes, des mesures supplémentaires, à fixer dans le cadre de l'autorisation d'exploitation, sont à remettre en œuvre pour réduire les nuisances possibles pour le voisinage.

En pratique, on considère principalement la distance entre la cheminée de l'installation et le terrain à bâtir potentiel le plus proche faisant partie d'une zone d'habitation.

Conclusion :

Le réseau de Putscheid sera chauffé par une installation combustion à l'aide des combustibles énumérés sous le chiffre 1 de l'annexe II de cette circulaire. Toutefois, la puissance de cette chaudière sera de 255 kW et non de 3 MW, ce qui est la catégorie d'installations qui était initialement visée par ce chiffre.

I.1.3. Déchets

Dans le cas où de bois de rebut des entreprises de la transformation de bois servira de combustible dans une chaudière à bois, la législation concernant les déchets sera également d'application.

1) **Loi du 17 juin 1994 relative à la prévention et à la gestion des déchets**

D'après l'article 10 de cette loi, sont soumis à l'**autorisation** du Ministre de l'Environnement:

- les établissements ou entreprises qui assurent à titre *professionnel ou commercial* le ramassage et le transport des déchets;
- les établissements ou entreprises qui veillent à l'élimination ou à la valorisation des déchets pour le compte de tiers ou tout particulièrement les négociants ou courtiers;
- l'implantation ou l'exploitation d'une installation servant à l'utilisation principale comme combustible du déchet.

Exception :

Les entreprises qui valorisent sur les lieux de production les produits de leur propre activité qui ne peuvent pas être mis en vente peuvent être dispensées d'une autorisation. Cette dispense ne sera pas valable pour les établissements ou entreprises éliminant ou valorisant le déchet de tiers.

Dans le cadre d'une demande «commodo» il n'est pas nécessaire de faire en plus la demande d'autorisation requise par la loi relative à la prévention et à la gestion des déchets ; dans ce cas le dossier de demande «commodo» vaut demande d'autorisation en matière de déchets

2) **Le règlement grand-ducal du 16 décembre 1996 concernant le transfert national de déchets**

La division des déchets de l'Administration de l'Environnement doit être informée avant un transfert de déchets figurant sur la liste orange du règlement (CEE) n°259/93 par un système de notification ou d'information préalable. Etant donné que les déchets de bois traités (autres que traités mécaniquement) font partie de cette liste, il faut faire une **notification** à l'Administration de l'Environnement pour le transfert national de ces déchets. Cette notification doit obligatoirement couvrir toutes les étapes intermédiaires éventuelles du transfert, depuis le lieu d'expédition jusqu'à la destination finale et se fait par le remplissage d'un formulaire de notification disponible sur demande à la division des déchets de l'Administration de l'Environnement. Si ce transfert n'est pas fait par le producteur initial de déchets, ce dernier doit faire appel à un collecteur, un négociant ou un courtier de déchets autorisé* qui doivent également faire une notification.

* La liste des collecteurs agréés peut être demandée à la division des déchets de l'Administration de

Au cas où un service de la Commune de Putscheid assurerait le ramassage et le transport du bois de rebut des entreprises de la transformation de bois, ce service devrait faire une *notification* à la division des déchets de l'Administration de l'Environnement pour pouvoir transporter ce bois vers la chaudière. Cependant, les services communaux n'ont pas besoin de disposer d'une *autorisation* pour le transport de déchets, mais seulement pour leur valorisation thermique.

I.1.4. Energie

1) **Loi-cadre du 5.août 1993 concernant l'utilisation rationnelle de l'énergie**

Art. 14 Le recours à l'utilisation des énergies renouvelables ou à la cogénération à des fins de chauffage, de ventilation ou de réfrigération de bâtiments ou pour la production d'eau chaude dans les secteurs domestique, public, et industriel constitue un des moyens en vue d'atteindre les objectifs fixés à l'Art. 2.

Extrait y relatif de cet Art.2. :

- Garantie d'un approvisionnement énergétique suffisant, sûr, diversifié et économiquement suffisant
- Promotion des énergies renouvelables
- Réduction des émissions de CO₂

Sur base de cette loi, une série de règlements grand-ducaux furent pris afin d'arrêter en détail les aspects thématiques visant à atteindre les objectifs fixés.

2) **Règlement grand-ducal du 11 août 1996 concernant un programme d'actions visant à encourager les initiatives et mesures prises par les administrations communales en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie et des énergies nouvelles et renouvelables (Programme d'actions d'Economies d'Energie dans les Communes P.E.E.C)**

Ce programme prévoit e.a. une aide financière pour les frais d'un concept énergétique et les frais de réalisation d'une chaudière au bois automatisée alimentée au bois.

I.2.Législation européenne et conventions internationales

I.2.1. Le règlement (CEE) n°259/93 du Conseil du 1^{er} février 1993 concernant le contrôle des transferts de déchets à l'intérieur, à l'entrée et à la sortie de la Communauté européenne

Selon ce règlement, les déchets sont divisés en trois catégories suivant leur degré de nocivité pour l'environnement :

la **liste verte**, comprenant des déchets qui ne sont pas nocifs, comme les déchets de bois non traités, tels les sciures, les déchets et débris de bois même agglomérés sous forme de bûches, briquettes, boulettes ou sous forme similaires, les déchets figurant sur cette liste et destinés à être valorisés ne doivent pas être notifiés mais seulement déclarés ;

la **liste orange**, qui inclut les déchets présentant un certain risque de nocivité, même après traitement, tels que les déchets de bois traités, qui, s'ils vont être valorisés sont soumis à une notification simplifiée ;

la **liste rouge** comprenant les déchets dangereux ou toxiques qui doivent être notifiés dans tous les cas.

(Au niveau national, ce règlement est pris en compte par le règlement grand-ducal du 16 décembre 1996 relatif à certaines modalités d'application du règlement (CEE) n°259/93 du Conseil du 1^{er} février 1993 concernant le contrôle des transferts de déchets à l'intérieur, à l'entrée et à la sortie de la Communauté européenne.)

Les déchets destinés à être éliminés (et non pas valorisés) requièrent une notification (listes pas prises en compte).

1.2.2. La convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance

Cette convention a été le premier instrument et base légale pour la lutte contre la pollution atmosphérique au niveau régional. Le Luxembourg a signé la convention le 13 novembre 1979 et elle a été transposée dans la législation nationale par un certain nombre de lois, dont la «loi du 18 juin 1981 portant approbation de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, en date à Genève, du 13 novembre 1979 ».

Depuis son entrée en vigueur, la convention a été renforcée par huit protocoles, dont le dernier est le *protocole de Göteborg relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique*.

Ce protocole a pour but de réduire les émissions de soufre, d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils (COV) et d'ammoniac. Le projet de ce protocole a été accepté par l'Organe exécutif le 29 novembre 1999 à Göteborg. Le Luxembourg s'est ainsi engagé à réduire ses émissions de SO₂ de 73%, les émissions de NO_x de 52% et les émissions de COV de 55% par rapport aux seuils respectifs de l'année 1990.

1.2.3. Le Sommet de la Terre à Rio et le protocole de Kyoto

Au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, 150 pays –dont le Luxembourg– se sont engagés de mettre en œuvre l'Agenda 21, reprenant l'ensemble des actions à entreprendre par la Communauté internationale dans tous les domaines liés au développement durable. Ainsi, l'exploitation accrue de ressources naturelles renouvelables (tel le bois) fait partie des impératifs du Plan National pour un Développement Durable. Ce dernier prévoit par ailleurs de : « ... promouvoir l'exploitation et la création de sources d'énergie renouvelables... et de doubler la part du bois dans la consommation finale d'énergie (0,5% -> 1%) d'ici 2010 ».

A Rio, les mêmes nations ont signé la convention cadre des nations unies sur le changement climatique qui les engagerait à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre.

Le 29 avril 1998, lors de la troisième session de la Conférence des Parties de la Convention (CdP3), le Luxembourg a signé le protocole de Kyoto, et s'est ainsi engagé à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (équivalents de CO₂) de 28% jusqu'en 2010 par rapport à 1990.

1.2.4. Proposition de directive du Conseil sur l'incinération des déchets (98/C 372/07)

Selon cette proposition, les résidus de bois non susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds résultant d'un traitement sont exclus du champ d'application de la directive. Ceci permet éventuellement aux entreprises du secteur du bois de valoriser leurs débris de bois plus aisément, étant donné que l'annexe V de cette proposition de directive prescrit des valeurs limites d'émissions difficilement réalisables par la plupart des installations d'incinération. Cependant, cette proposition est actuellement encore en discussion.

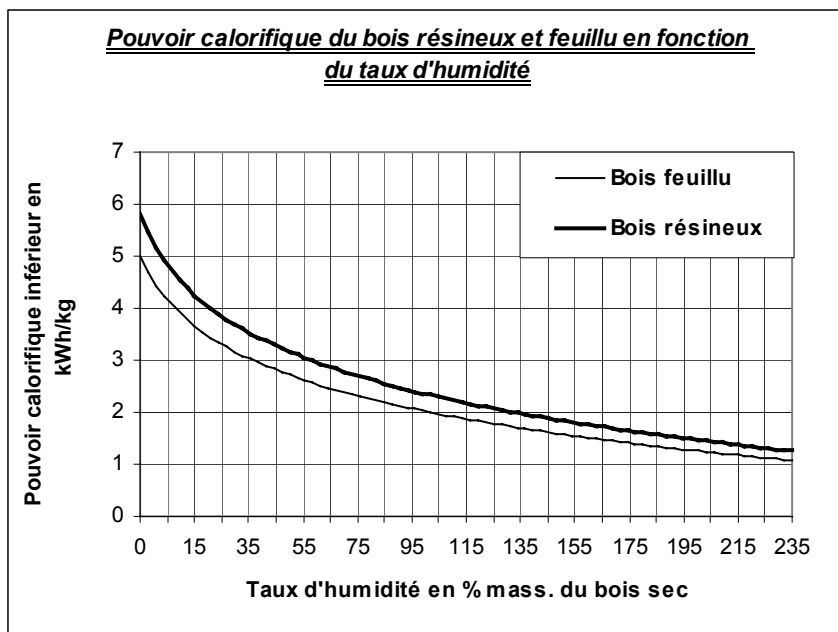
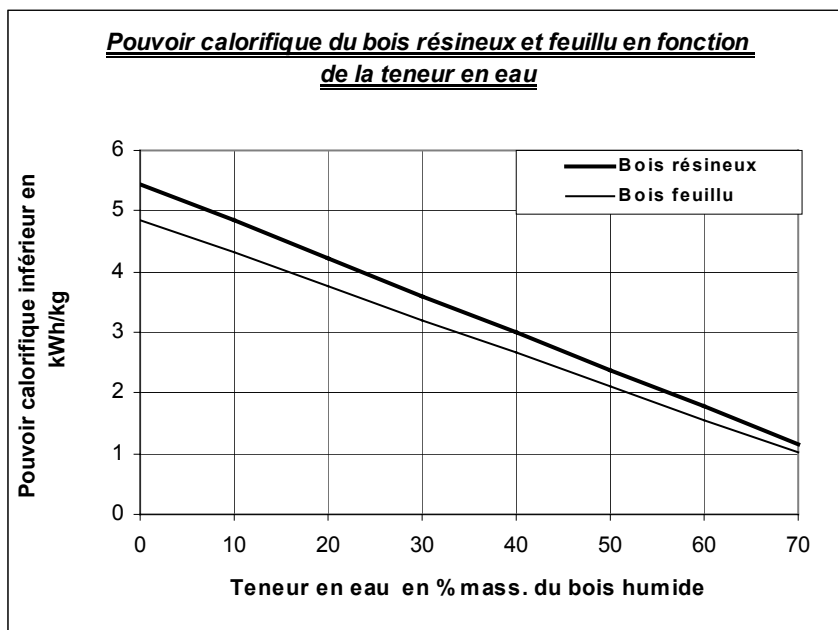
1.2.5. Décision du Conseil du 18 mai 1998 concernant un programme pluriannuel pour la promotion des sources d'énergie renouvelables dans la Communauté (Altener II) (98/352/CE)

Le programme institué par cette décision vise entre autres la création des conditions juridiques, socio-économiques et administratives nécessaires à la mise en œuvre d'un plan d'action communautaire pour les sources d'énergie renouvelables.

[13]

Annexe II

Les tableaux ci-dessous reprennent le pouvoir calorifique inférieur du bois résineux et du bois feuillu en fonction de la teneur en eau (Wassergehalt) et du taux d'humidité (Feuchte).

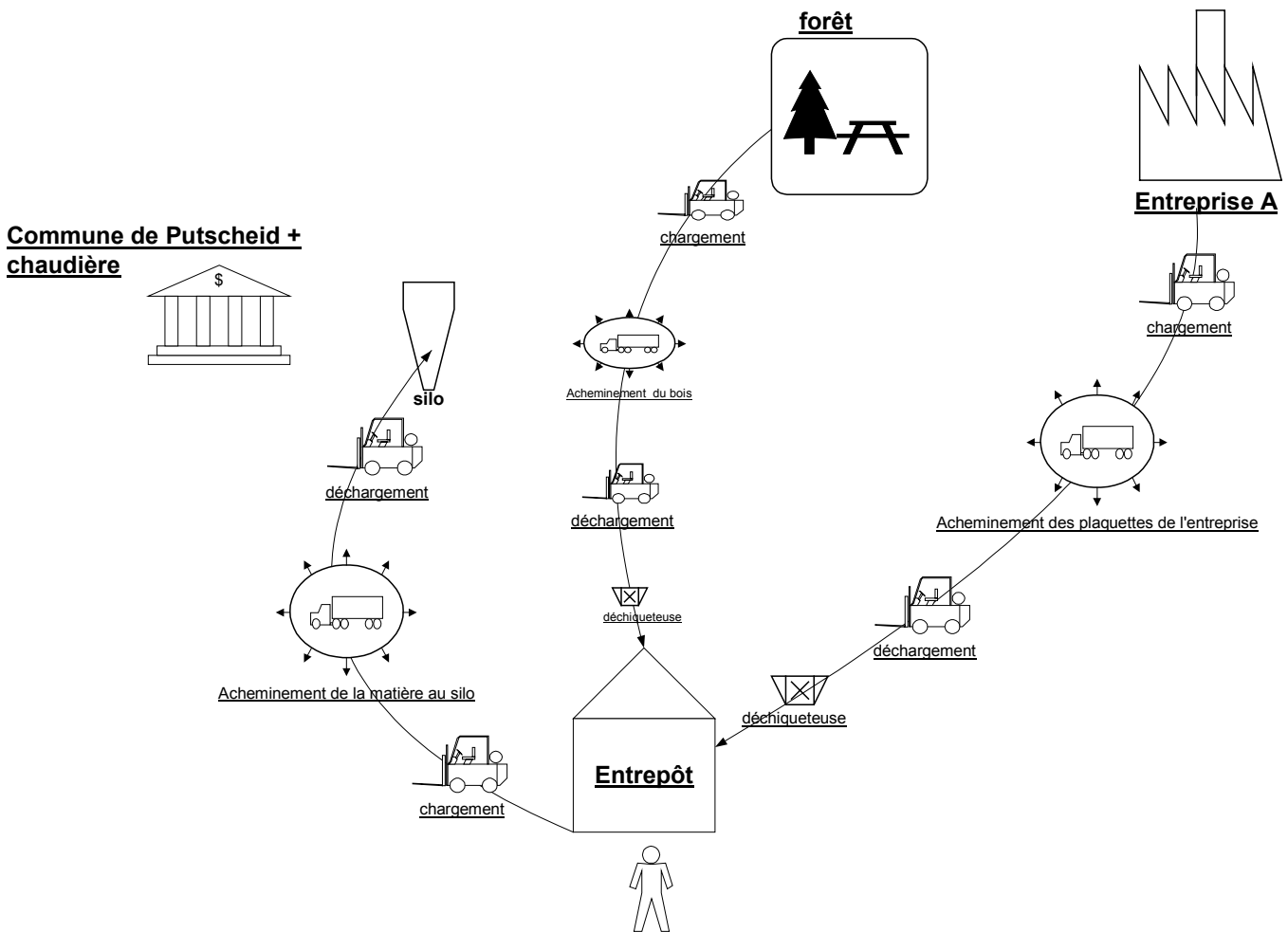


On remarque que le contenu énergétique du bois destiné à la combustion varie fortement avec l'humidité. Ceci souligne l'importance du stockage (séchage) des plaquettes forestières et la nécessité de tenir compte de l'humidité au niveau du prix du bois-énergie.

Annexe III

Les deux schémas suivants correspondent aux solutions envisagées pour l'approvisionnement en bois de la chaudière du lotissement planifié à Putscheid.

Solution n°1



Solution n°2

