

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Chimique

Projet de Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème

Evaluation d'une filière bois énergie en Algérie adossée à une gestion durable de la forêt

Elaboré par :

Ait Abdelmalek Yahia

Soutenu devant le jury suivant :

Président :	A. SELATNIA	Professeur, ENP
Examineurs :	F. MOHELLEBI	M.C.A, ENP
	O. ZANNDUCHE	C.R, INRF
Rapporteurs:	T. AHMED ZAID	Professeur, ENP
	S. HADDOUM	M.A.A., ENP

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger.

2014

Remerciements

Je remercie vivement mes promoteurs, Mr T. AHMED-ZAID et Mme S. HADDOUM, pour leur compréhension, et l'aide qu'ils m'ont apportée, et leurs conseils instructifs durant l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier le Professeur A. SELATNIA pour avoir accepté de présider le jury.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à Mme F. MOHELLEBI, Mme et Mr O. ZANDOUCHE pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrai exprimer mon profond respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Résumé

Le bois est le premier matériau combustible dont l'homme s'est servi. Aujourd'hui plus que jamais le bois est une source d'énergie importante en quantité, et intéressante autant environnementalement qu'économiquement. Lorsque l'on parle de valorisation énergétique du bois, on pense directement à la production de chaleur. Mais il est possible, en dehors de la valorisation matière bien entendu, d'utiliser le bois pour produire par exemple de l'électricité ou bien produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Notre contribution dans le cadre de ce travail porte sur la valorisation du bois tant que combustible pour alimenter une centrale de production de 5MW d'électricité en Algérie, mettant à profit les possibilités du logiciel RETScreen® pour en évaluer la viabilité sur le plan technique et économique.

Mots clés : énergie renouvelables, biomasse, bois énergie, turbine vapeur, RETScreen®.

Abstract

Wood is the first fuel material which man has used. Today more than ever the wood is an important source of energy in quantity, and interesting as environmentally and economically. When we talk about energy use of wood, it is believed to directly heat production. But it is possible, apart from material recovery course of using wood for example to produce electricity or simultaneous production of heat and electricity. Our contribution in the context of this work concerns the use of wood as fuel for entrant a Center-producing 5MW of electricity in Algeria, taking advantage of opportunities RETScreen® to assess the viability of the technical and economic.

Key words: Renewable energy, biomass, wood energy, steam turbine, RETScreen®.

ملخص

الخشب هو المادة الأولى القابلة للاحتراق التي استخدمت من قبل الرجل. واليوم يعتبر الخشب مصدرا هاما للطاقة في الكمية، ومثير للاهتمام في كلا الجانبين البيئي و الاقتصادي . فعندما نتكلم عن تامين الطاقة الخشبية، يعتقد مباشرة من هذه الاخيرة إنتاج الحرارة . لكن من الممكن، وبغض النظر عن التامين بطبيعة الحال، استخدام الخشب في إنتاج الكهرباء على سبيل المثال، أو في إنتاج متزامن للحرارة والكهرباء. مساهمتنا في سياق هذا العمل يركز على تامين الخشب كوقود في مركز ينتج 5م.واط من الكهرباء في الجزائر و الاستفادة من الفرص والامكانيات التي يمنحها برنامج ريتسكرين لتقييم جدوى الجانب التقني والاقتصادي

الكلمات الرئيسية: الطاقة المتجددة، والكتلة الحيوية، والطاقة الخشبية، التوربينات البخارية،

Sommaire

Introduction.....	1
--------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur le bois-énergie

I. Présentation du Bois Energie	2
II. Caractéristiques physico-chimique du bois.....	3
II.1. Composition chimique.....	4
II.2. Humidité.....	5
II.3. Taux de cendre.....	6
II.4. Pouvoirs calorifiques.....	6
II.4.1. Définition.....	6
II.4.2. Détermination et ordre de grandeur.....	7
II.4.3. Influence de l'humidité sur le PCI.....	8
II.4.4. Comparaison avec les combustibles fossiles.....	9
III. Mobilisation et préparation du bois.....	9
IV. Valorisation énergétique du bois.....	10
IV.1. La Pyrolyse.....	11
IV.2. La Combustion.....	11
IV.3. La gazéification.....	12
V. Avantages du bois.....	14
IV. Conclusion.....	15

Chapitre II : Conditions générales de mise en œuvre d'une filière Bois-Energie

I. Disponibilité des ressources en bois.....	16
I.1. Les ressources en biomasse forestière.....	16
I.1.1. Description de la forêt Algérienne.....	16

I.1.2. Superficie forestière et répartition.....	17
I.1.2.1. Superficie.....	17
I.1.2.2. Localisation et répartition.....	18
I.1.3. Production et consommation du bois en Algérie.....	21
I.1.3.1. Catégories d'usage potentiel du bois.....	21
I.1.3.2. Production de bois.....	22
I.1.3.3. Consommation du bois.....	24
I.2. Culture des taillis à courte ou à très courte rotation.....	25
I.2.1. Définition.....	25
I.2.2. Phase initiale.....	25
I.2.3. Gestion des plantations.....	28
I.2.4. Récolte et stockage de la biomasse issue des cultures TCR ou TtCR.....	30
II. Proximité des ressources en bois.....	32
III. Bois énergie et durabilité des forêts.....	32
III.1. La Gestion Durable des forêts.....	32
III.2. Les visions de la forêt et de sa gestion.....	33
III.2.1. L'approche fonctionnaliste : les fonctions de la forêt.....	33
III.2.2. L'approche économique.....	34
III.3. Concept de gestion durable des forêts	34
IV. Conclusion.....	37

Chapitre III : Le bois-énergie pour la production d'électricité

I. Production d'électricité et la cogénération par combustion-vapeur	38
I.1. Les turbines à vapeur.....	38
I.1.1. Les turbines vapeur à condensation.....	39
I.1.2. Les turbines vapeur à contre-pression.....	39
I.2. Cycles de production d'électricité à vapeur.....	40
I.2.1. Cycle de HIRN (ou de RANKINE) avec surchauffe.....	40
I.2.2. Description du cycle de Hirn.....	41
I.3. La Cogénération/ Cycle combiné.....	44

II. Projet de Production d'énergie propre à partir de la biomasse forestière en Algérie.....	45
II.1. Estimation des ressources en bois et détermination du gisement mobilisable pour la production de 5 MW d'électricité.....	45
II.1.1. Caractéristiques thermodynamique de chaque point du cycle.....	45
II.1.2. Chaleur utile à la production de la vapeur.....	47
II.1.3. Chaleur fournie par le combustible bois.....	48
II.1.4. Quantité de combustible (bois) nécessaire à la production de 5MW d'électricité	48
II.2. Analyse financière du projet de production d'énergie propre en Algérie par l'outil RETScreen®.....	50
II.2.1. Présentation du Logiciel RETScreen® International.....	51
II.2.2. Modèle RETScreen® pour la production d'électricité - Turbine à vapeur.....	52
II.2.3. Feuille démarrer.....	53
II.2.4. Charge et Conception du réseau.....	55
II.2.5. Les différentes feuilles de calcul.....	56
II.2.5.1. Modèle énergétique.....	56
II.2.5.2. Analyse des coûts.....	58
II.2.5.3. Analyse des réductions d'émissions de GES.....	59
II.2.5.4. Analyse financière.....	60
II.3. Conclusion.....	63

Conclusion

Conclusion générale.....	64
---------------------------------	-----------

Références

Références.....	65
------------------------	-----------

Liste des figures

Figure 1 : Taux d'humidité en fonction des caractéristiques du bois [5].....	6
Figure 2 : Plage de variation du pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre selon les essences en KWh/t.....	7
Figure 3 : Evolution du PCI sur brut en fonction du pourcentage d'humidité sur brut [4].....	9
Figure 4 : Filières de la valorisation énergétique du bois.....	13
Figure 5 : Répartition de la couverture forestière en Algérie (2007) [10].....	19
Figure 6 : Répartition des forêts par fonction en 2010.....	20
Figure 7 : Catégories d'usage potentiel du bois.....	22
Figure 8 : Consommation en bois de chauffage en Algérie.....	24
Figure 9 : Développement des boutures peu après l'implantation.....	28
Figure 10 : Plantation des boutures en lignes doubles.....	29
Figure 11 : Plantation des boutures en lignes simples.....	30
Figure 12 : Schéma général de la démarche de la gestion forestière [17].....	35
Figure 13 : Les forêts du monde couvertes par les processus intergouvernementaux de définition des critères et indicateurs de gestion durable [17].....	36
Figure 14 : Schéma général d'une installation de production d'électricité avec une turbine vapeur à condensation.....	39
Figure 15 : Schéma général d'une installation de cogénération avec une turbine vapeur à contre pression.....	40
Figure 16 : Schéma représentant la production d'électricité, cas d'un cycle de Hirn.....	41
Figure 17 : Cycle de Hirn idéal avec surchauffe.....	42
Figure 18 : Cycle de Hirn non idéal avec surchauffe.....	43
Figure 19 : Schéma représentant la cogénération, cas d'un cycle combiné.....	45
Figure 20 : Changements d'états de l'eau.....	47
Figure 21 : Présentation de RETScreen® International.....	51
Figure 22 : Information sur le projet de production d'électricité.....	53
Figure 23 : Conditions de références et données climatique du site du projet.....	54
Figure 24 : Caractéristiques de la charge du cas de référence.....	55
Figure 25 : Profil de la charge moyenne du cas de référence.....	56
Figure 26 : Système de production d'électricité du cas proposé.....	57
Figure 27 : Sommaire du cas proposé.....	57

Figure 28 : Stratégie d'exploitation du système de production d'électricité.....	58
Figure 29 : Analyse des coûts du projet de production d'électricité.....	58
Figure 30 : Emission de GES du réseau électrique de référence.....	59
Figure 31 : Sommaire des réductions d'émissions de GES.....	60
Figure 32 : Paramètres financiers du cas proposé.....	60
Figure 33 : Sommaire des coûts, économies et revenus du projet.....	61
Figure 34 : Indicateurs clés (sorties) de la viabilité financière pour le cas où le prix de l'électricité exportée est de 200 \$ /MWh.....	62
Figure 35 : Diagramme des flux monétaires cumulatifs avec un prix de l'électricité exportée de 200\$ /MWh.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition élémentaire sur bois sec de quelques essences, exprimée en % massique [4].....	4
Tableau 2 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre feuillus [6].....	8
Tableau 3 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre résineux [6].....	8
Tableau 4 : Comparaison des PCI caractérisant différents combustibles [4].....	9
Tableau 5 : Répartition de la surface forestière en Algérie [9].....	17
Tableau 6 : Répartition des forêts selon la catégorie en 2010 [9].....	18
Tableau 7 : Répartition des forêts par fonction [9].....	20
Tableau 8 : Principales essences forestière et leurs superficies (ha) [9].....	21
Tableau 9 : Volume du bois prélevé des forêts.....	23
Tableau 10 : Caractéristiques et conditions favorables pour une croissance et un rendement optimaux [15].....	26
Tableau 11 : Caractéristiques spécifiques des plantations en TCR/TtCR [15].....	27
Tableau 12 : Masse volumique moyenne de quelques essences, en kg/m ³	50

Chapitre I : Généralités sur le Bois Energie

Introduction :

L'énergie est indispensable au développement économique. Les civilisations modernes se sont développées depuis environ deux siècles grâce aux combustibles fossiles qui ont permis de disposer de sources d'énergie concentrées. Ils couvrent environ 80% des besoins énergétiques mondiaux mais sont en quantité finie. De plus, l'utilisation des combustibles fossiles rejette du gaz carbonique dans l'atmosphère et ceci conduit à une augmentation de l'effet de serre.

Selon l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), la demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue sur les 40 dernières années, passant de près de 5000 Mtep en 1970 à 12 000 Mtep en 2010. Elle a été multipliée par plus de 2,4 en 40 ans, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2,24 %. Cette tendance, si elle devait se prolonger sur les 40 prochaines années, conduirait à plus que doubler la demande énergétique mondiale à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 2010 [1].

Le défi énergétique auquel l'humanité est confrontée aujourd'hui dans le domaine énergétique est de réduire les émissions de CO₂ et, progressivement, de substituer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie n'émettant pas de CO₂. Pour répondre à ce défi, il faut faire des économies d'énergie, utiliser des dispositifs plus efficaces et utiliser à grande échelle des sources d'énergies renouvelables.

Par rapport aux énergies fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium, les énergies renouvelables sont liées en principe à des sources inépuisables comme le soleil, le vent, la marée, l'énergie hydraulique, la géothermie, la biomasse, les déchets. Leur exploitation est accompagnée d'une émission minimale de déchets et de polluants contrairement au cas des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables peuvent être réparties en cinq grandes familles selon l'origine de la source, à savoir :

- ✓ l'énergie solaire ;
- ✓ l'énergie éolienne ;
- ✓ l'énergie hydraulique ;
- ✓ l'énergie géothermique ;
- ✓ la biomasse, comprenant l'incinération des déchets.

La biomasse se détache des autres énergies renouvelables pour plusieurs raisons. En effet, celle-ci est moins limitée par des contraintes liées à l'environnement que les autres énergies vertes et elle possède surtout une disponibilité très importante. On peut citer pour illustrer cette ressource le chiffre du potentiel annuel mondial en déchets de bois et en déchets agricoles, qui représente 680 Mtep. Ainsi, La plus grande fraction des énergies vertes revient de loin à la biomasse. On peut même la mettre au rang des plus grandes énergies primaires consommées dans le monde puisqu'elle représente 13 % des 7000 Mtep consommées mondialement, derrière les 80 % consommé par des combustibles fossiles [2].

Au sens large, la « biomasse » désigne l'ensemble de la matière vivante. Mais en tant que combustible et pour répondre aux critères de notre société, la définition utilisée de la biomasse est « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de ses industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. En bref, elle représente les produits d'origine végétale non contaminés.

Dans le fonctionnement de la biomasse, il est nécessaire de rappeler un grand avantage, celui de posséder un bilan carbone nul. En effet, lors de son cycle de vie, la matière organique aura stockée une quantité de CO₂ sous l'effet de l'énergie solaire. C'est cette même quantité qui sera rejetée par la suite lors de sa transformation en chaleur, électricité ou carburant. Elle peut schématiquement se décomposer en trois grandes catégories qui sont le bois, le biogaz et les biocarburants.

Pour le bois, il est très important au préalable de réaliser une bonne gestion et entretien de la forêt ; ceci dans l'intérêt de maintenir des équilibres hydrologiques et climatiques, réduire les incendies, améliorer le cadre de vie et les paysages et enfin et surtout, éviter l'emploi sauvage du bois entraînant de lourds problèmes de déforestation. Les trois moyens de valoriser cette énergie sont la pyrolyse, la combustion et la gazéification. Ces transformations permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du charbon, de l'huile ou bien encore de l'éthanol.

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire consiste à simuler une filière de bois énergie à partir d'une plantation à courte rotation destinée à produire de l'électricité dans une centrale à turbine à vapeur. L'objectif est de vérifier la viabilité technique et financière d'un tel projet, en considérant un certain nombre d'hypothèses. Le logiciel RetScreen©, outil d'aide à la décision dans le domaine des énergies renouvelables sera utilisé pour faire cette étude.

Dans la section suivante, nous présentons la filière bois énergie qui consiste essentiellement en la valorisation du bois comme combustible.

I- Présentation du Bois Energie :

La bioénergie est l'énergie libérée de la matière première récemment vivante ou de la biomasse lorsqu'elle est utilisée comme combustible [3].

Le bois énergie est un type de bioénergie, Il s'agit essentiellement de l'utilisation du bois en tant que combustible.

Le bois-énergie constitue une ressource énergétique renouvelable, susceptible de répondre aux enjeux actuels de raréfaction des énergies fossiles et aux volontés de limitation des émissions de particules participant à l'augmentation de l'effet de serre.

L'utilisation du bois comme source d'énergie passe par trois étapes :

- ✓ La collecte du bois : Le bois provient de plusieurs sources ;
- ✓ Préparation, transformation et conditionnement du bois ;

✓ Valorisation énergétique.

Le bois-énergie a longtemps été considéré comme la source unique de chaleur pour le chauffage et la cuisson des aliments de l'Homme. Avec l'avènement du charbon puis du pétrole, il a été par la suite principalement dédié à des usages d'agrément et d'appoint dans les sociétés industrialisées. Cependant, depuis au moins une décennie, le bois-énergie fait l'objet d'un regain d'intérêt pour plusieurs raisons :

- La première raison est d'ordre économique : le bois-énergie reste bon marché par rapport aux énergies d'origine fossile (charbon, gaz et fioul) et son prix n'est pas soumis aux fluctuations des monnaies ni à celles du prix du pétrole (du moins, dans la majorité des pays développés). Cet intérêt économique est renforcé par la hausse inéluctable et persistante du prix du pétrole dont l'utilisation sera de plus en plus réservée à ses usages spécifiques (carburants et pétrochimie).
- La deuxième raison est d'ordre écologique : en tant que biomasse, c'est une source d'énergie renouvelable, utilisable aussi bien pour la production de chaleur que de l'électricité, ou les deux à la fois, dans le cas de la cogénération. En effet, Le bois est un combustible très utilisé (environ 9,8 Mtep en France) et c'est le principal combustible renouvelable qui évite l'effet de serre contrairement aux combustibles fossiles, gaz ou fioul.
- Il a par ailleurs un intérêt social. Comme ressource locale, il favorise le développement d'activités créatrices d'emplois en zone rurale.
- Par ailleurs, il présente l'avantage de couvrir plusieurs secteurs d'utilisation : le secteur domestique où son utilisation évolue du chauffage d'agrément et d'appoint au chauffage de base, le secteur industriel (principalement les entreprises de la filière bois qui valorisent sous forme de chaleur et d'électricité les coproduits obtenus), le secteur collectif/tertiaire assurant le chauffage collectif (bâtiments, résidences), avec ou sans réseau de chaleur et enfin, de façon plus restreinte, le secteur agricole qui utilise le bois énergie pour le chauffage de serres maraîchères et horticoles.

II- Caractéristiques physico-chimique du bois :

Le bois présente des caractéristiques physico-chimiques qu'il est utile de connaître pour optimiser ses performances sur le plan énergétique et réduire l'impact de sa combustion sur le plan environnemental. Dans la section suivante, nous parlerons des caractéristiques suivantes :

- La composition chimique ;
- L'humidité ;
- Les pouvoirs calorifiques ;
- Le taux de cendres.

II-1- Composition chimique :

Le bois est constitué de matières organiques, principalement sous forme de cellulose (environ 50%), de lignine (20 à 30%) et d'hémicellulose (15 à 25%) ainsi que d'éléments minéraux en très faible quantité (<1%) . [4]

Quatre éléments contribuent principalement à sa composition chimique : le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, et l'azote, dans des proportions beaucoup plus faibles. La proportion de chaque élément varie légèrement selon l'essence du bois. A titre d'exemple, le tableau 1 rappelle la composition élémentaire de quelques essences :

Tableau 1 : Composition élémentaire sur bois sec de quelques essences, exprimée en % massique [4]

	C%	H%	O%	N%
Hêtre	49,7	6,1	43,8	0,1
Sapin	49,0	6,0	44,9	0,1
Chêne	49,5	5,4	44,7	0,3
Peuplier	49,9	6,1	43,6	0,3
Erable	49,5	6,0	44,3	0,1

En première approximation, on admet que la composition élémentaire moyenne du bois sec est la suivante : 50 % de carbone, 44% d'oxygène et 6% d'hydrogène. Bien qu'elle contribue à l'émission d'oxydes d'azote lors de la combustion du bois, la présence de l'azote (sous forme de protéines et amines) est négligée sur le plan énergétique.

Par ailleurs, le bois peut également contenir des composés soufrés (0,02%) et du chlore en quantités extrêmement faibles (0,001 à 0,003%). Des traces d'éléments métalliques tels que le cuivre, le manganèse et le zinc sont également signalées à des teneurs inférieures à 100 ppm. Dans les cendres obtenues après combustion, se retrouvent les éléments métalliques initialement présents dans le bois, essentiellement sous forme d'oxydes à caractère basique, et de sels.

En tant que biomasse constituée de trois éléments chimiques principaux, le bois peut être représenté par une formule brute fictive du type $C_xH_yO_z$. Les indices molaires x , y et z affectant chaque élément peuvent être calculés à partir des pourcentages massiques correspondants, à condition toutefois de connaître la masse molaire moyenne M_{bois} :

$$x = (C\% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 12)$$

$$y = (H\% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 1)$$

$$z = (O\% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 16)$$

De fait, l'évaluation de la masse molaire moyenne du bois suppose de connaître, aussi précisément que possible, sa composition chimique sous forme moléculaire, à savoir la nature et les proportions relatives de tous ses constituants chimiques. Comme pour la plupart des combustibles solides ou liquides d'origine naturelle, cette grandeur est difficilement accessible expérimentalement, les équations définissant les caractéristiques de combustion de ces combustibles, à partir de la réaction de combustion, sont finalement exprimées en fonction des pourcentages massiques des éléments chimiques qui les constituent.

II-2- Humidité :

Comme tout combustible solide, le bois contient plus ou moins d'eau. Le taux d'humidité dépend de plusieurs facteurs, tels que les conditions et la durée de son stockage, la partie de l'arbre collectée, sa granulométrie, etc. L'eau contenue dans le bois peut être classée en trois catégories :

- l'eau libre, présente dans le bois vert, qui s'élimine sans retrait du bois ;
- l'eau liée, piégée dans la structure du bois, qui provoque lors de son évaporation un retrait ;
- l'eau de constitution qui entre dans la composition chimique du bois et qui ne peut être libérée que par combustion.

Le taux d'humidité du bois, symbolisé dans la littérature par H%, est défini sur brut par le rapport suivant :

$$H\% = \frac{(\text{masse du bois humide} - \text{masse du bois anhydre}) \times 100}{\text{masse du bois humide}} \quad [5]$$

Le taux d'humidité sur brut peut varier de 10% à 60% environ (Figure 1) :

60% au maximum pour le bois vert sur pied, de 10% à 20% pour le bois séché à l'air (pendant au moins 1 à 2 ans), 10% et moins pour le bois séché artificiellement sous flux d'air chaud (pendant 1 à 3 semaines).

En général, quelle que soit l'essence du bois, la teneur en eau des bois « secs à l'air » se stabilise vers des valeurs de 15 % à 20%, correspondant à l'humidité minimale ambiante. Le bois brûle d'autant mieux qu'il est sec.

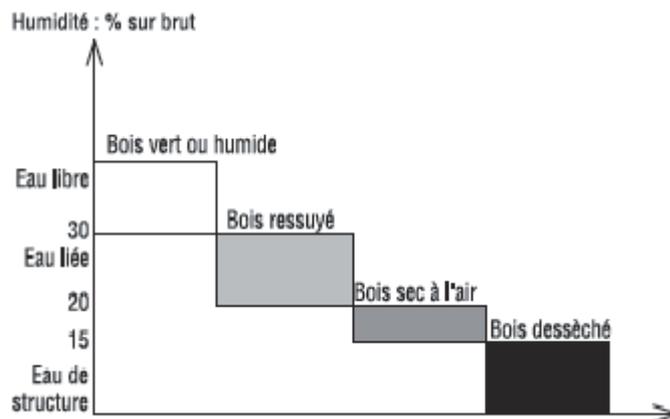


Figure 1 : Taux d'humidité en fonction des caractéristiques du bois [5]

Le taux d'humidité du bois influence considérablement la qualité de la combustion du bois. Pour brûler, la matière organique doit libérer dans une première phase, toute l'eau libre ou liée présente dans sa structure. La vaporisation de l'eau est un processus fortement endothermique, c'est-à-dire un processus qui a besoin d'absorber une partie de la chaleur dégagée par la combustion pour s'effectuer. En maintenant la température à des niveaux relativement bas, la vaporisation de l'eau non seulement ralentit mais dégrade la qualité de la combustion, et favorise ainsi l'émission d'imbrûlés au cours de cette phase.

II-3- Taux de cendre :

Les cendres résultent de l'oxydation des éléments minéraux contenus initialement dans le bois. Théoriquement, le bois ne contient que 0,3% à 0,8% de minéraux. [5]

Les cendres peuvent jouer un rôle néfaste au niveau de l'installation de combustion si elles conduisent à la formation de mâchefers, susceptibles d'obstruer les grilles, ou si elles posent des problèmes de corrosion. Aux parties minérales, caractérisant intrinsèquement le bois, peuvent éventuellement s'ajouter des éléments minéraux, souillant le bois lui-même (terre, cailloux, peintures par exemple).

II-4- Pouvoirs calorifiques :

II-4-1- Définitions :

Par définition, le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur libérée par la combustion complète de ce combustible, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température. [5]

La valeur du pouvoir calorifique est en général rapportée aux conditions normales, à savoir à 273 K (soit 0°C) et sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire 1 atm. (soit 101325 Pa = 1,013 bar).

Pour un combustible solide, la chaleur dégagée par la réaction de combustion est exprimée en kilojoules par kg (kJ/kg) de combustible, ou éventuellement en kilowattheure par tonne (kWh/t), dans le cas où l'on souhaite comparer entre elles différentes sources d'énergie (bois, combustibles fossiles, électricité) pour un même service rendu.

On définit deux grands types de pouvoirs calorifiques :

- le pouvoir calorifique inférieur (PCI) lorsque toute l'eau est évacuée à l'état vapeur dans les fumées, comme c'est généralement le cas du bois utilisé comme source d'énergie ;
- le pouvoir calorifique supérieur (PCS) lorsque l'eau est condensée pour récupérer sa chaleur latente de condensation.

Sur le plan pratique, seul le pouvoir calorifique inférieur présente un intérêt pour l'utilisateur du bois-énergie, et la connaissance du PCI suppose celle du PCS, car c'est le pouvoir calorifique supérieur qui est déterminé expérimentalement pour tous les combustibles.

II-4-2- Détermination et ordre de grandeur :

Pour les combustibles solides (ou liquides), la détermination du PCS s'effectue à volume constant, en utilisant le dioxygène comme comburant, et une bombe calorimétrique dans laquelle l'eau libérée par la combustion, est condensée. Concernant le bois, cette détermination est réalisée sur bois « sec ».

De nombreuses valeurs de PCI, caractérisant le contenu énergétique de différentes essences de bois, sont publiées dans la littérature. Ces valeurs sont classées selon deux familles d'essence qui sont : les feuillus (chêne, hêtre, frêne, bouleau, etc.) et les résineux (pin maritime, sapin, épicéa, mélèze, etc.).

L'examen de leurs valeurs montre que les feuillus présentent un PCI moyen sur sec (c'est-à-dire que le bois est anhydre) de 5100 kWh/ kg alors que les résineux ont un PCI moyen sur sec légèrement supérieur, égal à 5300 kWh/t. La variation du PCI du bois anhydre selon les essences (en kWh/t) est donnée à la figure 2 et aux tableaux 2 et 3.

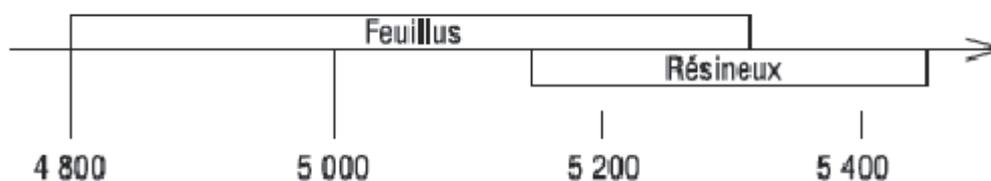


Figure 2 : Plage de variation du pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre selon les essences en kWh/t [6]

Tableau 2 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre feuillus [6]

Arbre	PCI moyen (kWh/t)
Feuillus	
Chêne	5040
Hêtre	5140
Châtaignier	5190
Charme	4970
Frêne	5090
Bouleau	5020
Acacia	5270
Aulne	4910
Peuplier	4890
Orme	5170

Tableau 3 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre résineux [6]

Arbre	PCI moyen (kWh/t)
Résineux	
Pin maritime	5350
Sapin	5320
Epicéa	5260
Pin sylvestre	5350
Douglas	5290
Mélèze	5400

II-4-3- Influence de l'humidité sur le PCI :

La quantité de chaleur réellement délivrée par la combustion du bois brut, appelé PCI sur brut (PCI brut), dépend fortement de l'humidité contenue dans le bois utilisé. L'équation reliant ces deux grandeurs est donnée par l'expression suivante :

$$PCI_{\text{brut}} = [PCI_{\text{anhydre}} \times (100 - H\%) / 100] - [Q_{\text{évap}} \times (H\% / 100)] \quad (\text{en kWh/t}) \quad [3].$$

$Q_{\text{évap}}$ représente la chaleur de vaporisation de l'eau à 0°C (2500 kJ/g d'eau soit 6,944 kWh/t).

Le premier terme de cette équation corrige le PCI, déterminé sur bois sec, le second terme prend en compte la chaleur utilisée pour vaporiser la masse d'eau contenue dans le bois. La figure 3 montre l'évolution du PCI du bois brut en fonction du taux d'humidité des bois appartenant aux deux familles envisagées (feuillus et résineux). Selon le type d'essence et le taux d'humidité, il est donc possible à partir de ces deux courbes, de déterminer le PCI réel du bois utilisé.

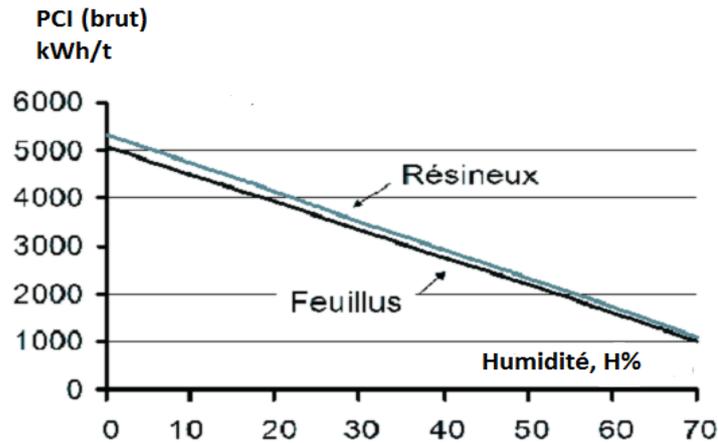


Figure 3 : Evolution du PCI sur brut en fonction du pourcentage d'humidité sur brut [4]

II-4-4- Comparaison avec les combustibles fossiles :

Le bois présente l'avantage d'être non seulement une source d'énergie renouvelable, mais également une source qui peut être facilement mobilisée. Par contre, par rapport aux énergies d'origine fossile telles que le charbon, le fioul ou le gaz naturel, il a l'inconvénient d'avoir un contenu énergétique relativement faible. D'après le tableau 4, on constate qu'un kilogramme de fioul contient environ 2 à 6 fois plus d'énergie qu'une bûche de bois brut.

Tableau 4 : Comparaison des PCI caractérisant différents combustibles [4]

Combustible	PCI (kWh/kg)
bois brut (bûches)	2 – 5
charbon (coke)	8
fioul	12
gaz naturel	17

III- Mobilisation et préparation du bois :

Le bois destiné à la production d'énergie peut avoir plusieurs origines. D'une part, il peut s'agir de bois directement coupé dans des exploitations forestières pour des applications énergétiques. D'autre part, il peut s'agir de sous-produits, aussi appelés "produits connexes" :

- Sous-produits issus de l'exploitation forestière, exploitation dont le produit principal sert à alimenter l'industrie. Il s'agit de sciures, de copeaux, d'écorces, de plaquettes voire de chutes diverses.

- Sous-produits issus de la première transformation du bois, par exemple au sein de scieries du bois.
- Sous-produits issus de la deuxième transformation du bois, notamment dans les menuiseries et les fabriques de panneaux.
- Sous-produits issus de l'entretien des routes, des voies de chemin de fer, des haies ainsi que des arbres isolés.

Une fois collecté, le bois doit subir certaines transformations physiques tel que le broyage et le séchage afin d'être valorisé énergétiquement. En effet, comme pour tous les combustibles solides ou liquides, l'état divisé du bois favorise les échanges de chaleur et de matière, et par conséquent, améliore la qualité de la combustion (meilleur rendement, moins d'émissions d'imbrûlés).

Selon le mode d'utilisation choisi pour sa combustion, le bois peut être brûlé sous forme de bûches, de plaquettes, de granulés (appelés également « pellets ») ou de rebuts :

- **Les bûches** : C'est la forme du bois-énergie historiquement la plus utilisée au niveau domestique, et ceci, depuis la nuit des temps. Pour les appareils de chauffage actuels, l'utilisation des bûches conduit souvent à des performances énergétiques et environnementales inférieures à celles des appareils à plaquettes ou granulés, en raison de leurs taux d'humidité généralement plus élevés, et de leurs dimensions plus importantes. Par contre, elles ont l'avantage de mettre en œuvre moins de manipulations.
- **Les plaquettes forestières ou industrielles** : Il s'agit de bois déchiqueté en morceaux d'environ 3×2×1 cm. Elles sont obtenues par le broyage du bois. Leurs utilisations concernent essentiellement les secteurs collectifs et industriels. Deux types de plaquettes peuvent être distingués :
 - Les plaquettes forestières (ou bocagères), issues de la sylviculture, qui sont obtenues en broyant du bois encore humide puis séchées en tas ;
 - Les plaquettes industrielles, provenant de l'industrie, du bois. Elles sont produites par broyage d'un bois généralement sec, ce qui leur permet d'être utilisées juste après le broyage.
- **Les granulés** : Ce sont de petits cylindres de quelques millimètres, fabriqués industriellement par compression de la sciure de bois obtenue comme sous-produit des autres activités industrielles du bois. Il s'agit d'une forme extrêmement sèche (humidité de l'ordre de 5%), donc caractérisée par un pouvoir calorifique relativement élevé (4500 kWh/t environ). C'est une forme de combustible particulièrement bien adaptée aux petites installations domestiques.

IV-Valorisation énergétique du bois :

Pour valoriser le bois énergétiquement, il existe trois voies dites sèches. Les procédés de voies sèches présentés ci-dessous sont la pyrolyse, la combustion et la gazéification.

IV-1- La Pyrolyse :

✓ Définition :

La pyrolyse du bois est le procédé qui permet la transformation du bois en gaz combustible, produits condensables (eau et goudrons) et du charbon de bois. Elle correspond à la décomposition thermique du bois, sous vide ou en présence de gaz inerte. On peut observer les différentes étapes lors d'un traitement thermique en présence d'un gaz inerte ou à pression réduite. Il existe quatre grandes étapes qui dépendent essentiellement de la température utilisée.

Au départ, pour une température en dessous de 120°C, le bois est séché par l'élimination de l'eau qu'il contient. Pour une température comprise entre 120°C et 250°C, le bois se dégrade et se décompose. On voit alors apparaître la formation d'acides comme les acides formiques ou acétique et la formation d'alcools comme le méthanol.

Dans un troisième temps, pour des températures comprises entre 250°C et 500°C, la cellulose et la lignine se décomposent. Il y a alors formation de produits légers (H₂, CO, CH₄,...) et de produits lourds qu'on appellera goudrons. Au-delà d'une température de 500°C, ces mêmes goudrons se dégraderont et le charbon se formera. On estime la formation d'une masse de 0.3 kg de charbon pour environ 1 kg de bois sec. On peut aussi noter que la pyrolyse est nettement plus rapide sous vide qu'en présence d'un gaz inerte. Les procédés traditionnels de pyrolyse utilisent des températures de 300 à 600 °C et produisent du charbon de bois. Ce charbon de bois est intéressant par sa faible densité et son pouvoir calorifique élevé, mais il ne contient que 30 à 50 % de l'énergie initiale du bois car le reste est perdu dans des produits volatils lors de la carbonisation.

✓ Applications de la pyrolyse :

Pour les basses températures, généralement en dessous de 260°C, on obtiendra du bois torréfié. A haute température avec une montée en chaleur lente, on obtiendra du charbon de bois. Celui-ci pourra être utilisé de plusieurs manières, comme combustible domestique, comme réducteur métallurgique (absence de certaines impuretés métalliques) ou bien encore comme charbon actif.

IV-2- La Combustion :

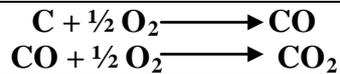
✓ Définition :

La combustion est la manière de valoriser le bois la plus connue et la plus utilisée. Le bois en présence d'oxygène et d'énergie, se combine à l'oxygène dans une réaction chimique générant de la chaleur [7].



Mais cette équation reste purement théorique puisqu'on retrouve toujours dans les fumées de la matière imbrulée, du CO et du NO_x (oxydation de l'azote de l'air ou de l'azote du bois).

On retrouve donc en pratique deux étapes pour la combustion. La première est une pyrolyse du bois donnant des gaz et du charbon. La deuxième phase est la combustion de ces gaz entraînant une flamme ainsi que la combustion du charbon.



On peut signaler aussi qu'en plus des fumées, la combustion entraîne une formation de cendres et de matières imbrulées.

✓ **Applications de la combustion :**

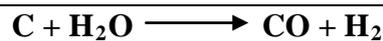
L'utilisation de la combustion est très répandue et son procédé débouche sur un grand nombre d'applications concrètes. Elle peut, entre autre, permettre la production d'eau chaude, la production de vapeur ou bien encore fonctionner dans une chaudière en cogénération.

IV-3- La gazéification :

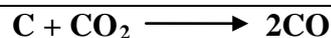
✓ **Définition :**

Pour une définition simple de la gazéification, on peut la traduire par une réaction d'oxydoréduction du bois à haute température favorisée par la présence de vapeur d'eau et / ou de CO₂.

Elle se décompose en deux étapes bien distinctes. La première est là encore une pyrolyse classique. C'est-à-dire un gaz avec un pouvoir calorifique moyen et l'obtention de charbon de bois. Ensuite, il y a une oxydation du carbone par l'eau :



En présence de CO₂, l'équation devient alors :



Le CO₂ peut venir de la pyrolyse en elle-même ou par une oxydation partielle en introduisant un minimum d'oxygène pour brûler les gaz volatils et une partie des goudrons. L'objectif étant, bien sûr, d'obtenir un gaz propre démuné de tous goudrons ou autres matières solides.

✓ **Applications de la gazéification :**

La gazéification peut être utilisée de nombreuses manières. Elle peut produire de la chaleur par l'intermédiaire d'un brûleur et d'une chaudière ou bien encore de l'électricité par l'intermédiaire d'une turbine (on peut aussi rajouter un système de cogénération).

Elle offre aussi de grandes possibilités dans les technologies futures, comme le mélange diesel gaz pour le fonctionnement des moteurs.

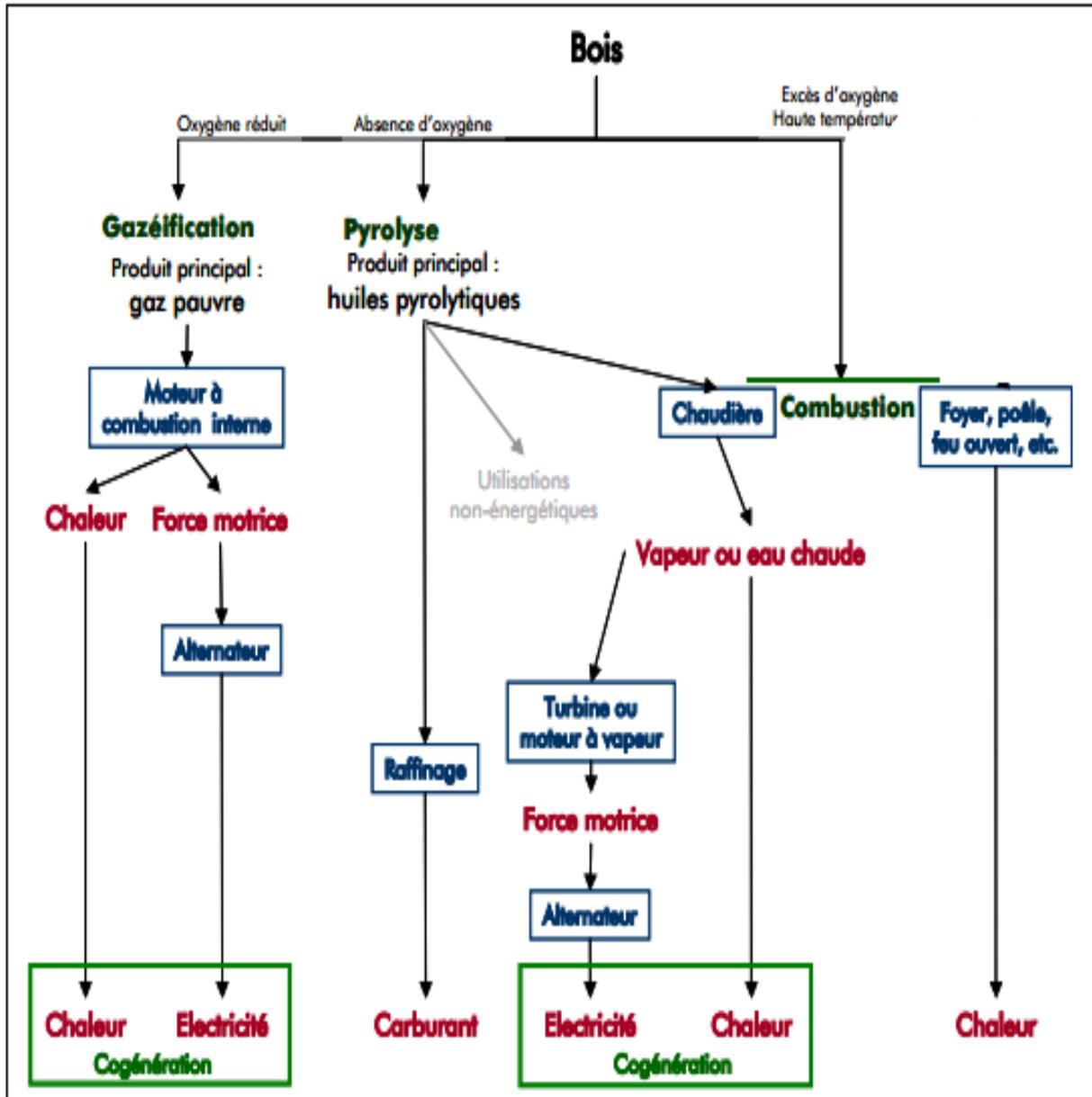


Figure 4 : Filières de la valorisation énergétique du bois.

V- Avantages du bois :

Le bois est le premier matériau combustible dont l'homme s'est servi. Aujourd'hui plus que jamais le bois est une source d'énergie importante en quantité, et intéressante autant environnementalement qu'économiquement. Les quantités de bois disponibles sont très fortes, que ce soit en récupérant les sous-produits de l'exploitation du bois ou en utilisant la ressource importante qui n'est pas valorisée actuellement.

En effet, le bois est une énergie renouvelable car la forêt se reconstitue, sur une durée allant de 5 à 200 ans, essentiellement à partir de graines produites par les arbres et grâce à la bonne gestion des forestiers. Cette ressource énergétique se renouvelle environ un million de fois plus vite que les énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Si sa gestion est raisonnable, on peut en même temps assurer le renouvellement de la forêt et satisfaire le besoin des hommes. En pérennisant cette gestion raisonnée, il est tout à fait logique de considérer le bois comme une source d'énergie renouvelable.

De plus, le bois participe à la réduction des gaz à effets de serre. Il est vrai que lors de sa combustion ou en fin de vie lors de sa décomposition, le bois rejette dans l'atmosphère du CO₂, mais durant leur croissance, les arbres utilisent le CO₂ et le transforment en bois (matière ligneuse). Ainsi le CO₂ émis par la combustion du bois ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre.

L'impact de l'usage du bois comme source d'énergie ne se limite pas seulement à une réduction des émissions de CO₂. Il permet d'améliorer la gestion et l'entretien des forêts (les éclaircies permettent de lutter contre les incendies) et par suite le maintien des équilibres hydrologiques et climatiques ainsi que la qualité des paysages. Bien entendu, il faudra toujours veiller à obtenir une production annuelle de bois excédentaire vis-à-vis des usages afin d'éviter les problèmes de déforestation rencontrés dans la plupart des pays d'Afrique et d'Amérique du Sud.

Le développement de l'usage du bois comme source d'énergie a une incidence directe sur l'emploi et le bois peut être une ressource locale permettant de favoriser le développement d'activités créatrices d'emplois, notamment en zone rurale. Actuellement la mise en œuvre du bois énergie fait appel à différentes qualifications et elle représente par exemple en France l'équivalent de 20 000 emplois qui se retrouvent au niveau de la collecte, de l'exploitation, du transport des rémanents forestiers, du conditionnement, de l'exploitation et de la maintenance des chaufferies, de leur construction et des bureaux d'études.

Cependant, il faut reconnaître que le bois à lui tout seul ne peut substituer totalement l'utilisation des énergies fossiles, mais associé à d'autres énergies renouvelables, ils peuvent réduire la dépendance aux énergies fossiles et préserver ces ressources qui sont entrain de disparaître et qui sont non renouvelables.

VI- Conclusion :

- La connaissance du matériau bois et de ses propriétés chimiques, physiques et mécaniques sont plus que jamais fondamentales à l'heure où le champ des possibles est activement exploré afin de répondre durablement aux besoins humains, en utilisant les ressources naturelles renouvelables

*Chapitre II : Conditions générales de mise en œuvre d'une filière
Bois Energie*

I- Disponibilité des ressources en bois :

La ressource en bois énergie se compose du gisement forestier (exploitation de la forêt), des sous produits des industries du bois (scieries, fabricants de meuble etc.) et des autres déchets de bois. Dans ce chapitre, nous parlerons essentiellement de la biomasse forestière et de la forêt Algérienne et des enjeux de l'exploitation d'une filière bois énergie en Algérie.

La biomasse forestière représente donc une source intéressante d'énergie à développer, sans compter que son utilisation permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Par contre, sa récolte doit être encadrée, afin d'éviter les abus et d'assurer la durabilité de cette ressource. Il est donc primordial que cette biomasse soit extraite d'une forêt gérée durablement.

Une autre source encore peu développée de biocombustibles solides peut être évaluée. Il s'agit notamment des taillis à croissance rapide, à courte ou très courte rotation (TCR ou TTCR), donc de certaines essences à croissance rapide (peuplier, saule, eucalyptus...) exploitées selon un cycle court (5 à 10 ans). La productivité des TCR (8 à 15 t de matière sèche/ha/an) est deux à dix fois supérieure à celle des boisements classiques.

Quelles sont donc les quantités de bois issues de la forêt Algérienne qui peuvent être valorisées énergétiquement. Quelles surfaces peuvent être dégagées pour développer des cultures dédiées à l'énergie (c'est-à-dire, la production de bois destiné à la production d'énergie, chaleur et électricité ou les deux à la fois) ?

I-1- Les ressources en biomasse forestière :

I-1-1- Description de la forêt Algérienne :

Présenter la forêt algérienne est une tâche délicate dans la mesure où il est difficile de donner un aperçu aussi sommaire soit-il de ce doux royaume des arbres, si divers car cette région présente des facettes différentes et contrastées . Cette diversité fait qu'il y a une richesse forestière [8].

L'Algérie fait partie intégrante du bassin méditerranéen, l'un des berceaux des plus anciennes civilisations au monde et l'une des régions où les ressources naturelles (faune, sol , végétation) ont fait l'objet de sollicitations précoces. Ce qui n'a pas été sans répercussions sur leur bon état et leur pérennité. Comme dans toute la région méditerranéenne, l'Algérie a connu des agressions humaines contre son milieu naturel et par conséquent une destruction de la flore et de la faune. Situées dans une zone où l'impact humain s'est poursuivi, les forêts méditerranéennes ont été le plus souvent pillées voire détruites par les civilisations successives qui ont trouvé des matériaux indispensables à la survie ou qui les ont considérées comme un obstacle à leur développement.

L'action conjuguée des différents facteurs : feu, exploitation inconsidérée des pâturages, abattage des forêts, ont porté un coup fatal aux forêts algériennes qui, non seulement ont régressé mais ce qui en subsiste ne représente plus les boisements primitifs. L'érosion du sol est aussi un phénomène consécutif à la destruction de la couverture du sol.

Forêt de lumière, thermophile dans son ensemble, elle renferme un sous bois puissant et envahissant. Une résistance biologique et écologique s'installe au sein des essences principales, ce qui donne une certaine pérennité.

La sylve algérienne est formée essentiellement de trois types de formations végétales : la forêt, le maquis et la broussaille. Les peuplements se présentent de façon irrégulière, on observe des arbres de tailles et d'âges différents .Il est donc très rare de trouver un peuplement régulier [8].

En considérant les critères bioclimatiques, l'Algérie présente tous les bioclimats méditerranéens en allant de l'humide au saharien. Les zones semi-arides présentent des aspects bien particuliers tant par les espèces qui les constituent, conifères essentiellement, présents également en dehors de ces zones, mais aussi par la structure des formations végétales qu'elles déterminent et qui sont en fait presque toujours des formations arborées, souvent claires, à sous-bois de type matorral répondant plutôt à des structures pré-forestières [8].

I-1-2- Superficie forestière et répartition :

I-1-2-1- Superficie :

Avec une superficie de 2,388 millions de Km², l'Algérie constitue l'un des plus grand pays du continent Africain du point de vue étendue. Le Sahara couvre près de 84% du territoire algérien, à savoir 2 millions de km². La partie nord est constituée par des terres à vocation forestière qui occupent environ 250 000 Km², soit un peu plus de 10% de la superficie totale.

Si l'on associe les forêts et maquis ensemble, nous trouvons que la superficie forestière est de 4,1 millions d'hectares, soit un taux de boisement de 16,4% et environ 1,7% de superficie totale. Cette surface est répartie comme suit :

Tableau 5 : Répartition de la surface forestière en Algérie [9]

	Superficie (10³ ha)			
	1990	2000	2005	2010
Forêt proprement dites	1667	1579	1536	1492
Maquis et Reboisements	2063	2374	2529	2685

Nous pouvons constater donc, que la forêt n'occupe qu'une faible partie du territoire national, ceci est dû essentiellement à l'histoire qui a modelé le paysage forestier algérien. En effet, la forêt algérienne a été le théâtre de luttes continues durant ces dernières années.

Tableau 6 : Répartition des forêts selon la catégorie en 2010. [9]

Catégorie	Superficie (ha)	%
Forêts dites domaniales (publiques)	1142000	76,5
Forêts privées	350000	23,5
Total	1492000	100

Les forêts privées représentent toutes les terres forestières individuelles privées ou en copropriété n'appartenant pas au domaine public forestier national.

Il est à noter que les superficies indiquées concernent uniquement les terres occupées par les forêts.

I-1-2-2- Localisation et répartition :

- **Répartition géographique :**

La forêt Algérienne de type méditerranéen est localisée entièrement sur la partie septentrionale du pays et limitée au sud par les monts de l'Atlas saharien. Elle est inégalement répartie suivant les différentes régions écologiques, ce qui leur confère des taux de boisement très variables. En effet, ces taux décroissent d'est en ouest et du nord au sud plus particulièrement. [10]

La forêt algérienne est constituée par une variété d'essences appartenant à la flore méditerranéenne, leur développement est lié essentiellement au climat.

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral, le faciès forestier change du nord au sud du pays. On peut distinguer deux principales zones bien différentes :

- ✓ Le littoral et surtout les chaînes côtières du pays comme : la Grande Kabylie, Bejaia, Jijel, Collo, El Milia El Kala. Ces régions sont bien arrosées, elles comportent les forêts les plus denses et les plus belles. C'est l'aire de répartition de deux essences principales à savoir : Le chêne liège et le chêne Zeen.
- ✓ Les hautes plaines continentales, plus sèches représentées par les régions steppiques situées entre les chaînes côtières et l'Atlas saharien. Ces zones contiennent dans leurs parties accidentées de grands massifs de pin d'Alep et de chêne vert (Aurès, Djelfa, et Saida).

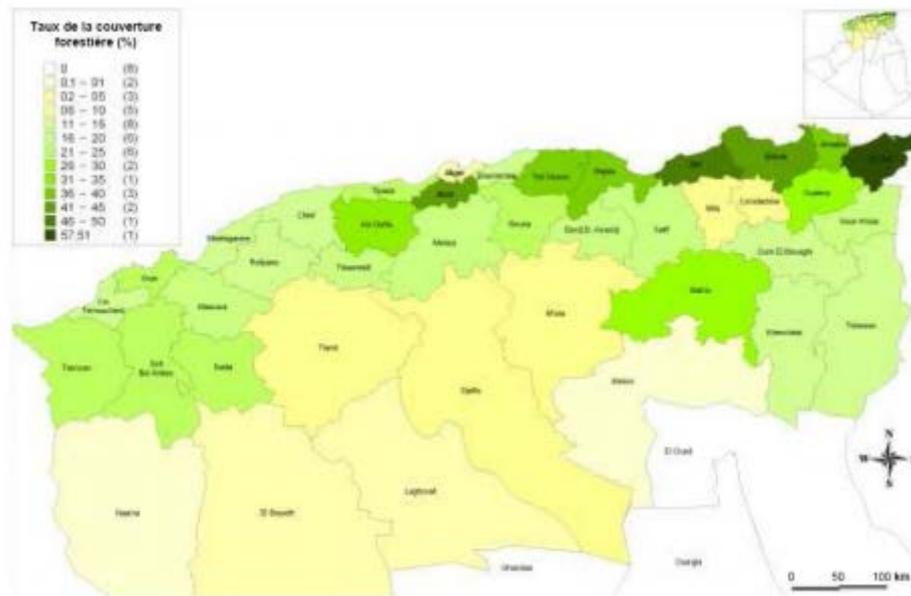


Figure 5 : Répartition de la couverture forestière en Algérie (2007) [10].

- **Répartition par fonction/essences :**

De façon générale, les principales essences couvrent environ 1 500 000 ha. Elles se répartissent en trois principaux groupes, à savoir :

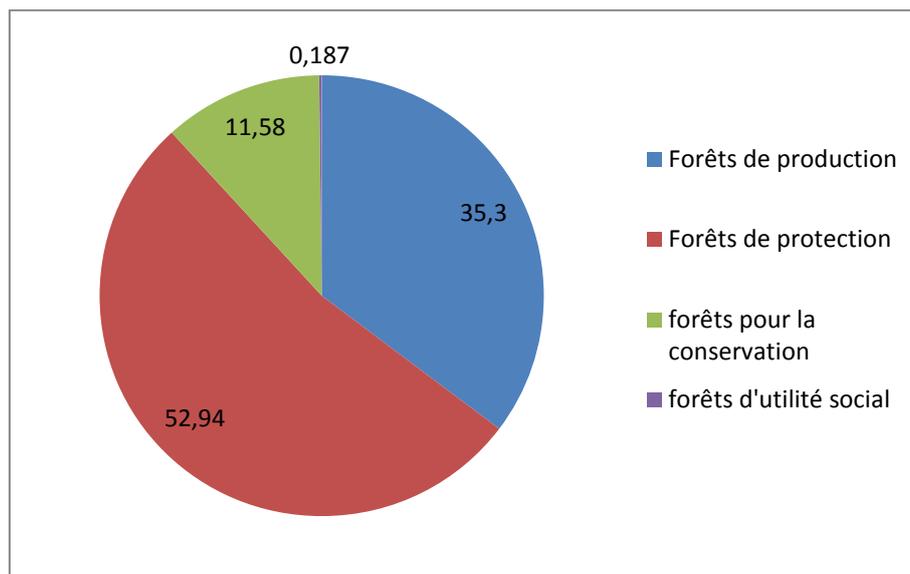
- **Les forêts d'intérêt économiques :** il s'agit des forêts qui se trouvent dans les zones à étage bioclimatique humide et subhumide et dont la production est constituée notamment de bois d'œuvre, constituées par : Les résineux (pin d'Alep, pin maritime, et cèdre).
- **Les forêts de protection :** Il s'agit des forêts localisées au niveau des zones à forte pente dont le rôle principal est la protection des sols contre toute forme de dégradation (érosion hydrique, érosion éolienne,..) et constituées particulièrement de forêts dégradées et maquis. Elles sont composées de chêne vert, thuya et genévriers.
- **Les forêts pour la conservation et d'utilité sociale :** Il s'agit des forêts localisées au niveau des aires protégées (Parcs nationaux, réserves naturelles, centre cynégétique) et des forêts qui se trouvent à proximité des agglomérations et qui ont un caractère récréatif.

Sur la base des différents travaux effectués dans le domaine de la foresterie, les forêts sont réparties comme suit (tableau 7 et 8) [9]

Tableau 7 : Répartition des forêts par fonction. [9]

Fonction	Superficie (ha)			
	1990	2000	2005	2010
Production	596 422	561 526	544 078	526 630
Protection	894 634	842 290	816 118	789 946
Conservation et utilité sociale	172 800	172 800	172 800	172 800
	2 800	2 800	2 800	2 800
Total	1 667 000	1 579 000	1 536 000	1 492 000

Les forêts pour la conservation et d'utilité sociale sont identifiées, délimitées et cartographiées. Les données qui s'y rapportent sont donc précises et concernant les forêts de production et de protection, l'INRF a établi des rapports de 40% pour les forêts de production et de 60% pour les forêts de protection.

**Figure 6 : Répartition des forêts par fonction en 2010**

La surface forestière destinée à la production du bois sous toutes ses formes est d'environ 526000 ha, soit 35 % de la surface totale de la forêt. Par contre, la surface forêt dite de protection représente plus de 50 % de la surface forestière totale. Nous pouvons conclure que la forêt algérienne joue un rôle beaucoup plus protection que production.

Tableau 8 : Principales essences forestière et leurs superficies (ha). [9]

Superficie (ha) Essence Forestière	En 2000	En 2005	En 2010
Pin d'Alep	1 021 252	1 064 976	1 108 711
Chêne Zeen et afarès	46 368	45 855	45 345
Cèdre	24 720	27 435	30 160
Pin maritime	23 416	20 929	18 434
Eucalyptus	35 224	32 789	30 359
Chêne vert	133 488	141 454	149 419
Autres	294 948	203 358	109 748
Total	1 579 000	1 536 000	1 492 000

- L'essence prédominante est le pin d'Alep qui occupe 1 108 711 ha et se rencontre principalement dans les zones semi-arides. Le capital sur pied de ces pinèdes est assez faible.
- Le chêne zeen et les afarès avec 45 345 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie.
- Les cèdres sont éparpillés sur 30 359 ha en îlots discontinus dans le Tell central et les Aurès.
- Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 30 359 ha.

Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économique.

Le second groupe constitué par le Chêne vert, le Thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride, jouent un rôle de protection.

I-1-3- Production et consommation du bois en Algérie :

I-1-3-1- Catégories d'usage potentiel du bois :

Trois catégories d'usages potentiels des bois sont définies,

1. Usage potentiel bois d'œuvre (appelé BO par convention) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse comprise le houppier et la souche, jusqu'à la découpe bois d'œuvre, et dont la qualité autorise des usages bois d'œuvre. Autre appellation possible pour

ce compartiment : bois de diamètre fin bout souvent supérieur à 9 cm et potentiellement valorisable sous une forme bois d'œuvre. On considère à priori que les branches ne comportent pas de BO.

2. Usage potentiel Bois d'Industrie et Bois Energie (appelé BIBE par convention) : Ce compartiment est défini comme la somme des trois composantes suivantes : (1) la biomasse de la tige comprise entre la découpe BO et la découpe bois fort (9 cm), (2) la biomasse de la tige de dimension BO mais dont l'usage potentiel ne peut être le BO en raison d'une qualité insuffisante, (3) la biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (9 cm). Autre appellation possible pour ce compartiment : bois de diamètre fin bout supérieur à 9 cm et valorisable sous des formes industrielles et énergétiques. Les bûches sont incluses dans cette définition.

3. Usage potentiel plaquettes et granulés (appelé MB ou menus bois ou même bois de chauffage par convention) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 9 cm à leur plus grosse extrémité. Autre appellation possible pour ce compartiment : menus bois de diamètre fin bout inférieur à 9 cm, potentiellement valorisables sous des formes énergétiques. Remarque 1: les arbres non recensables (arbres de diamètre à la hauteur de poitrine (DHP) inférieur à 9,5 cm) ne sont pas estimés. Ils ne sont pas inventoriés en raison de leur faible volume comparativement à celui des arbres recensables.

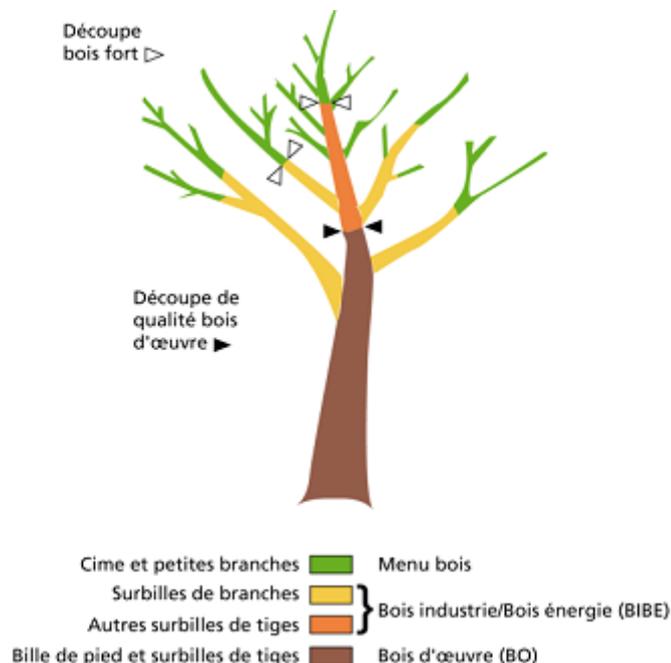


Figure 7 : Catégories d'usage potentiel du bois []

I-1-3-2- Production de bois :

Le bois, comme combustible, comme matériau propre à la construction et à l'ameublement (bois d'œuvre) ou alors le bois comme matière première approvisionnant une chaîne d'industries de transformation tient une place souvent sous-estimée dans les économies

nationales. Le bois dans tous ses degrés de transformation, a un poids important, que ce soit en termes d'emplois, en termes de valeurs ajoutée par rapport au produit national brut, ou en termes d'incidence sur les balances commerciales.

De par sa nature et les espèces méditerranéennes qui lui donnent le cachet forestier, la forêt algérienne ne fournit pas une grosse quantité de bois [11].

Comme il a été mentionné dans les paragraphes précédents, la superficie des forêts ayant fait l'objet d'études d'aménagement s'élève à près d'un millions d'hectares toutes essences confondues (y compris les peuplements artificiels d'eucalyptus). Ces forêts représentent une possibilité annuelle d'environ **460000 m³** [11].

La production de bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance. Faible de 1963 à 1990, celle-ci a connu une augmentation sensible à partir 1991, ce qui implique que le pays a souvent recours aux importations pour couvrir ces besoins.

Le bois du pin d'Alep, de loin le plus répandu, est de qualité moyenne. Ses principaux débouchés sont la menuiserie, la charpente et le coffrage, celui du Pin maritime, de meilleure qualité est surtout utilisé en menuiserie. Le bois d'eucalyptus, qui est exploité généralement à courte rotation (10ans), est destiné à la trituration. Le bois de chêne zeen, vu son importante densité et sa dureté est essentiellement utilisé pour la confection de traverses de chemin de fer. Quant au cèdre, son bois est utilisé en ébénisterie.

En matière d'offre, sur une superficie de 4,1 millions d'hectares, seuls 1,4 millions d'hectares sont constitués de forêts productives pouvant donner 1,2 millions de m³ environ.

Les possibilités prouvées par les plans de gestion réalisés sur 800000 hectares de forêts de pin d'Alep, d'eucalyptus et de chênes Zeen et Afarès, s'élèvent à 500000 m³. [12]

En résumé, on peut dire qu'à l'instar des massifs forestiers méditerranéen, la forêt algérienne joue un rôle beaucoup plus de protection que de production. Composée essentiellement d'essences locales à croissance relativement faible, elle est exploitée à hauteur de 15 à 20% de la possibilité globale estimée à 1200000 m³/an. [12]

Tableau 9 : Volume du bois prélevé des forêts

Catégorie de bois	Volume (m ³)						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2010
Bois rond industriel	136 359	73 664	89 031	100 850	125 024	73 326	-
Bois de chauffage	49 147	67 790	32 089	63 382	59 355	67 478	27 807

I-1-3-3- Consommation du bois :

- **Bois ronds industriels :**

Les besoins en bois ronds industriels qui sont actuellement de 1300000 m³, ne sont couverts qu'à hauteur de 15% par la production locale. []

En l'an 2020 on peut estimer que les besoins atteindront 2500000 m³. Il est raisonnable de penser que la production augmentera dans des proportions significatives et avoisinera le million de m³, soit un taux de couverture de 40% [11].

- **Bois de feu :**

La part des combustibles ligneux (bois de feu et charbon de bois) dans la consommation de l'énergie, a décliné graduellement depuis les années soixante-dix à mesure que le recours à des combustibles fossiles comme le gaz notamment prenait de l'ampleur du fait de sa facilité d'emploi, de sa propreté et de son prix modeste.

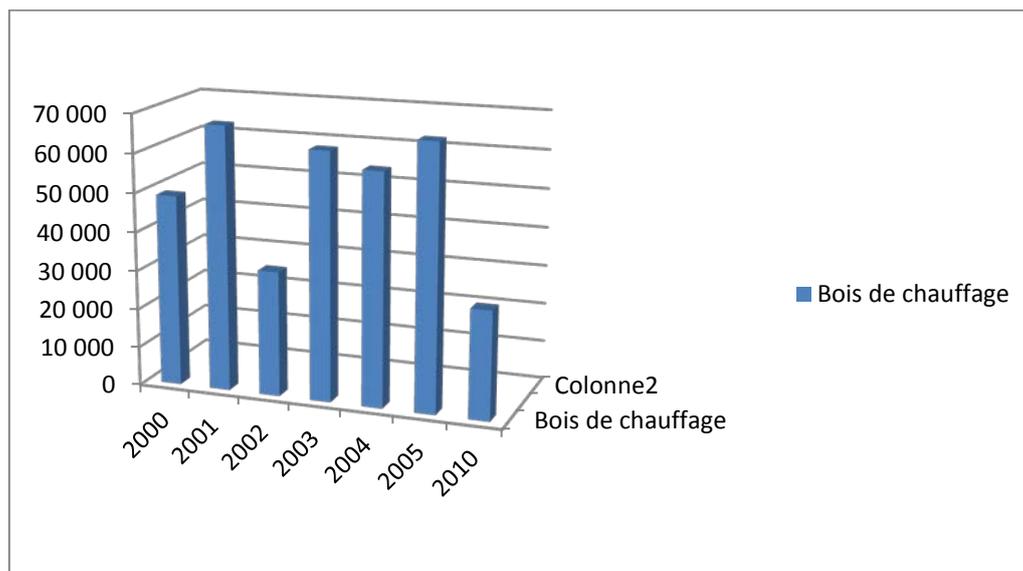


Figure 8 : Consommation en bois de chauffage en Algérie

La part des combustibles ligneux (bois de feu et charbon de bois) dans la consommation de l'énergie, exceptée une hausse très certainement conjoncturelle due à la crise traversée par le pays, ne sera pas appelée à augmenter dans les proportions importantes. On peut même penser qu'elle se réduira compte tenu des efforts considérables faits par le pays pour favoriser la consommation de gaz naturel qui reste une énergie propre et relativement bon marché.

I-2- Culture des taillis à courte ou à très courte rotation :

I-2-1- Définition :

En général, il s'agit d'espèces qui rejettent de souche telles que le peuplier, la saule, le robinier ou l'eucalyptus qui sont exploitées avec des rotations de 2 à 4 ans pour les TtCR et 5 à 10 ans pour les TCR. Par conséquent, on parle de plantation à rotation rapide [13].

Le principe de ce type de culture est simple, planter une fois et récolter plusieurs fois sachant que le bois est produit sur une période de 20 à 25 ans. Cette méthode d'exploitation du sol est très intéressante car elle permet de diminuer la dépendance au vis-à-vis des énergies fossiles et contribue à la protection de l'environnement en comparaison avec les produits agricoles conventionnels. En outre, une fois le démarrage de la plantation assuré, les TCR et TtCR constituent une source de revenus prévisible à faible charge de travail.

L'introduction des cultures à courte rotation passe par plusieurs étapes qui sont en l'occurrence le choix du site de l'implantation et de l'espèce à planter, des techniques de récolte, du séchage et du stockage de cette biomasse utilisée à des fins énergétiques.

I-2-2- Phase initiale :

- **Choix du site :**

Le choix du site est d'une importance majeure dans la démarche d'installation de la plantation. Toutefois, la culture de TCR-TtCR ne remplacera jamais les cultures alimentaires sur les meilleurs sites. C'est pourquoi ce type de plantation est plutôt destiné à des parcelles qui ne sont pas ou très peu valorisées. En effet, planter des TCR-TtCR peut être un bon moyen de valoriser une parcelle délaissée.

Toutefois, certaines limites doivent être prises en compte avant de prévoir l'installation d'une telle plantation, par exemple :

- Plantation et récolte ne sont plus possibles lorsque la pente du sol dépasse les 10 %.
- Les sols présentant un fort taux d'argile (>75%) doivent être évités car si le printemps est humide, l'engorgement de la parcelle peut poser des difficultés pour la préparation du sol et si l'été est sec, le sol risque de se compacter et de former de larges crevasses, néfaste pour le développement des racines.
- Un fort taux de sel dans le sol est très défavorable pour les plants.
- Une bonne accessibilité à la parcelle doit être garantie.

Par ailleurs, certains facteurs peuvent favoriser un site en regard d'un autre :

- Une bonne exposition au soleil permet d'avoir des rendements meilleurs.
- Une forme rectangulaire du site permet une exploitation optimale de la surface.

Enfin, les conditions microclimatiques sont également à prendre en compte dans le choix du site :

- Les vallées profitant de températures plus élevées et permettant de longues périodes végétatives sont particulièrement adaptées.
- Les zones à conditions plus extrêmes telles que les zones d'accumulation d'air froid ou de neige mènent à des risques d'échec plus accentués.

En fonction des caractéristiques des parcelles choisies, on pourra déterminer quelles espèces sont les plus adaptées à chaque site pour permettre la réussite de la plantation [14].

- **Choix des espèces :**

D'après la littérature mondiale, la production annuelle de ce type de plantation est généralement de l'ordre de 8 à 15 tonnes de matières sèches par hectare et par an selon l'espèce utilisé et les conditions de site et des modalités de gestion de la plantation.

A l'heure actuelle, les espèces les plus souvent rencontrées en TCR-TtCR sont les saules (*Salix* spp), les peupliers (*Populus* spp) et les eucalyptus (*Eucalyptus globulus*). Cependant, en fonction des caractéristiques du site, d'autres espèces peuvent donner des bons rendements.

Saules et peupliers sont intéressants sur des parcelles bien alimentées en eau, mais avec des étés de plus en plus chauds, le robinier faux-acacia ainsi que l'eucalyptus sont plus performants. En effet, sur des sites secs, il a été montré que le robinier produisait plus de biomasse et avait une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau que le saule ou le peuplier. Par ailleurs, il donne de bons résultats sur des sols pauvres, qu'il peut enrichir en azote. Cependant c'est une espèce difficile à bouturer et considérée comme invasive. Enfin, lorsqu'il est planté à fortes densités, il est facilement affecté par la compétition pour l'eau.

Tableau 10 : Caractéristiques et conditions favorables pour une croissance et un rendement optimaux. [15]

	Saule	Peuplier	Robinier (faux-acacia)	Eucalyptus
Températures moyennes (annuelles)	> 7 C°	> 7 C°	> 8 C°	-
Précipitations	600-1000 mm	600-1000 mm	> 400 mm	600-1000 mm
Types de sols	Limoneux argileux à sableux	Limoneux argileux à sableux	Sableux ou sablo-argileux	Sableux ou argilo sableux
pH du milieu	5,5 - 6,5	5,5 - 7	indifférent	< 7
Altitude adaptée	< 1300 m	< 600 m	< 1600 m	< 400 m

		Saule	Peuplier	Robinier	Eucalyptus
Parcelle	En pleine lumière	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
	Fortement exposée au vent	Neutre	Très défavorable	Neutre	Neutre
	Fortement exposée au gel	Défavorable	Défavorable	Défavorable	Défavorable
	irriguée	Favorable	Favorable	Neutre/Défavorable	Neutre/Défavorable
Sol	Hydromorphe/ asphyxiant	défavorable	défavorable	Très défavorable	Très défavorable
	Marécageux	Neutre/Défavorable	défavorable	Très défavorable	Très défavorable
	Frais à humide	Favorable	Favorable	Neutre/Défavorable	Neutre/Défavorable
	Bien aéré	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
	filtrant	Très défavorable	Très défavorable	Favorable	Favorable
	sec	Très défavorable	Très défavorable	Favorable	Favorable
	profond	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
	Calcaire actif	Neutre	Neutre	défavorable	Très défavorable
Disponibilité en eau	Peu ou pas disponible	défavorable	défavorable	Favorable/Neutre	Favorable/Neutre
	Bonne disponibilité	Favorable	Favorable	Neutre	Neutre

Tableau 11 : Caractéristiques spécifiques des plantations en TCR/TtCR.[15]

	Saule	Peuplier	Robinier	Eucalyptus
Densité de plantation (plants/ha)	10000 - 20000	5000 - 15000	1250 - 12000	1250 - 5000
Longueur des rotations	2 à 4 ans	2 à 20 ans	3 à 10 ans	2 à 10 ans
Hauteur moyenne à la récolte (m)	3,5 à 5	> 12	2 à 5	-
Rendement moyen (t MS/ha/an)	7 à 12	7 à 15	6 à 10	5 à 12
Teneur en eau (%)	50 - 55	50 - 55	25 - 45	45 - 50

I-2-3- Gestion de plantation :

- **Préparation du site :**

Les travaux de préparation du site sont extrêmement importants puisqu'ils conditionnent le développement de la culture pour les 20 années qui suivent.

L'objectif est de travailler le sol comme pour une culture de printemps afin d'avoir un sol propre. L'itinéraire de préparation de la parcelle doit tenir compte du précédent cultural et de la flore présente sur la parcelle : si le taillis va être implanté sur une prairie, du glyphosate (herbicide) va être appliqué, etc. Le labour est ensuite une phase importante.

- **plantation :**

Techniques de plantation :

Les boutures doivent être implantées de manière verticale dans la terre. Elles ne doivent pas dépasser plus de 2 cm du sol. L'écorce doit impérativement rester intacte afin que le système racinaire puisse se développer de manière correcte. Juste après l'implantation, la terre doit être ramenée autour des boutures pour éviter son assèchement et permettre la reprise des plants.



Figure 9 : Développement des boutures peu après l'implantation.

L'implantation peut être manuelle ou mécanisée :

- Une **implantation manuelle** n'est intéressante que sur des parcelles de taille très réduite (<1ha) ou difficilement accessibles. Cependant cette méthode est peu performante sur des surfaces importantes et mène à des coûts élevés.
- Une **implantation mécanique** permet de réduire les coûts, notamment sur des surfaces importantes. Il existe des machines de plantation spécifiques.

Densité d'implantation :

La densité d'implantation doit dépendre de plusieurs facteurs : la durée envisagée des plantations (TCR ou TtCR ?), l'espèce choisie, la gestion future de la plantation...

Une implantation dense permet une production de biomasse plus importante sur une surface équivalente. Toutefois, si le taillis est trop dense, la compétition risque d'être trop importante et de limiter la croissance. Des essais sur une plantation de peupliers ont montré qu'après

deux ans, les arbres utilisaient l'eau plus efficacement sur la plantation la moins dense (1000 arbre/ha) et la compétition pour l'azote étaient moins importante. En situation plus dense (7500 arbre/ha), les arbres étaient plus hauts mais les tiges étaient moins épaisses et présentaient moins de branches. Néanmoins, après deux saisons de croissance, l'effet n'était plus significatif.

Écartement des plants :

La disposition des boutures en lignes simples ou doubles et l'écartement interligne dépendent généralement des espèces, de la longueur de rotation, du site, de la ligne de production (diamètre visé) et des techniques de récolte.

Dans le cas d'une très courte durée de rotation, les **lignes doubles** permettent d'augmenter la densité de la plantation. De plus, si la plantation est bien développée, la fermeture des cimes limite les problèmes de désherbage, car les arbres font suffisamment d'ombre pour empêcher le développement des mauvaises herbes.

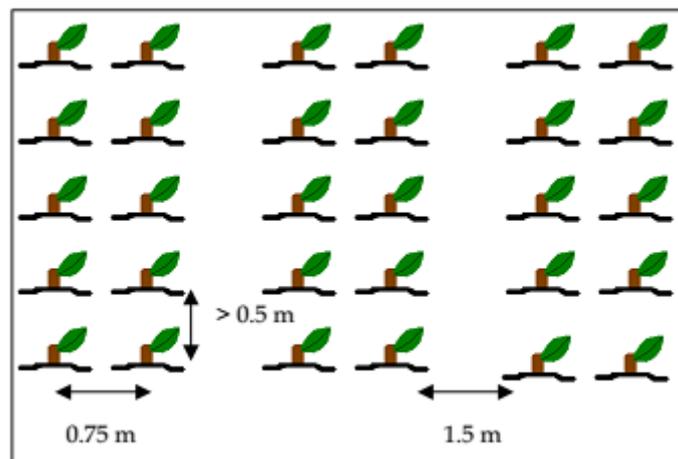


Figure 10 : Plantation des boutures en lignes doubles.

Les Lignes simples sont recommandées pour toutes les espèces avec des durées de rotation plus longues. L'écartement entre les lignes doit être suffisamment large, et un espace libre d'au moins 8 m aux extrémités de parcelle et 4 m le long de la parcelle doit être laissé, afin de permettre la circulation des machines. De plus il peut être utile d'aménager des espaces de stockage, s'il est prévu de faire sécher les arbres entiers après la récolte.

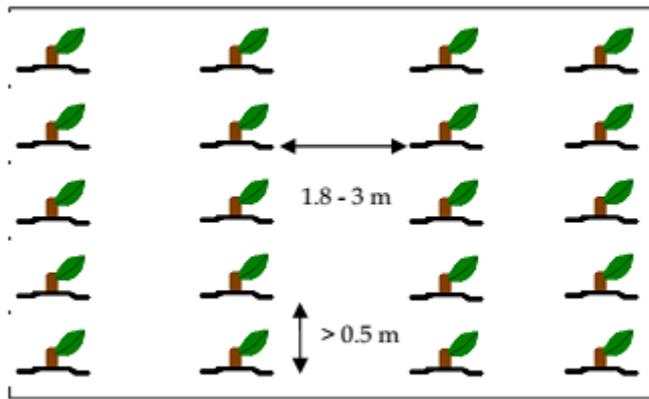


Figure 11 : Plantation des boutures en lignes simples.

- **Recépage :**

Le recépage consiste à effectuer une première coupe en fin de première année afin de stimuler la vigueur du plant. L'intérêt est de stimuler la souche des racines, ce qui mène notamment à un développement du nombre de rejets. Les arbres sont plus buissonnants, ce qui permet une meilleure gestion des adventices (Rappelons qu'une adventice est une plante qui pousse dans un endroit où on ne souhaite pas la voir se développer (champs, massifs...) car elle risquerait d'entrer en concurrence avec les plantes cultivées).

Cependant, cette opération ne doit pas être systématique. Si la pousse des plants a été très bonne la première année, effectuer un recépage n'a aucun intérêt. L'effet peut au contraire s'avérer négatif. Quant aux parcelles où la croissance a été très faible, un recépage risquerait surtout d'achever des plants. Un recépage ne peut pas rattraper un échec.

En conclusion, cette intervention est réservée à des parcelles donnant des résultats moyens : des arbres qui ne sont pas aussi développés qu'ils devraient l'être, mais qui sont tout de même suffisamment forts pour avoir une reprise normale après la coupe.

- **Désherbage :**

Après la plantation, il est important d'éviter que les plants soient en concurrence avec des adventices qui pourraient les étouffer. Cela peut compromettre les rendements pour les 20 années suivantes.

Les méthodes de désherbage sont variées et souvent complémentaires. C'est une bonne combinaison de ces différents types de méthodes qui permet un contrôle effectif des adventices avant que le plant atteigne un stade non concurrentiel [16].

I-2-4- Récolte et stockage de la biomasse issue des cultures TCR ou TtCR :

- ✓ **La récolte :**

La récolte doit normalement être faite en hiver, lorsque les arbres n'ont plus de feuilles et sont hors sève. Dans le cas d'une récolte mécanisée, le terrain doit toutefois être suffisamment

portant pour permettre le passage des machines. Une période de gel peut être par exemple une bonne occasion pour réaliser sa récolte.

Les TCR et TtCR ont pour avantage de présenter une souplesse au niveau des modalités de récolte que les cultures annuelles n'ont pas. Si l'année prévue de la récolte, la météo empêche la programmation de la récolte ou encore les arbres n'ont pas la taille prévue, il est toujours possible de reporter la récolte à l'année suivante.

Généralement, trois types de méthodes de récoltes sont utilisés dans les cultures TCR-TtCR : la récolte manuelle, qui peut être réalisée sur TCR comme sur TtCR, la récolte forestière, adaptée aux TCR, et la récolte agricole, adaptée aux TtCR. Dans ce qui suit, les caractéristiques des différentes méthodes sont mises en évidence [16].

Récolte manuelle :

La récolte est réalisée à la tronçonneuse ou éventuellement à la débroussailleuse pour des arbres de petits diamètres.

Ce type de récolte n'est réalisé que dans les cas où les techniques mécanisées ne peuvent être utilisées pour des raisons techniques ou économiques (exemple : très petites parcelles à faible densité). Sinon, cette technique demande trop de temps pour être rentables.

Récolte mécanisée forestière (TCR) :

Lorsque la rotation de la plantation dépasse les 5-6 ans, les diamètres des troncs atteignent entre 6 et 12 cm. Il s'agit de petits arbres que l'on récolte donc de la même manière qu'en forêts avec une abatteuse.

Récolte mécanisée agricole (TtCR) :

Les TtCR ayant pour vocation de produire un grand nombre de petite dimension, les diamètres des tiges dépassent rarement les 5 cm et ne doivent pas aller au-delà de 7 cm. La récolte se fait avec des machines dont le fonctionnement est très proche des machines agricoles classiques.

S'il existe plusieurs techniques de récolte, c'est qu'elles n'ont pas les mêmes objectifs, ni les mêmes coûts et chacune à ses avantages et inconvénients. Néanmoins, pour la production de plaquettes en grandes quantités, les techniques mécanisées sont les plus recommandables.

✓ Méthodes de stockage et de séchage pour la biomasse issue des cultures TCR-TtCR :

Stockage et séchage sont deux processus différents. Alors que le stockage vise le maintien des caractéristiques de la biomasse, le séchage a comme objectif la réduction de la teneur en eau du bois.

Dans le cas de la biomasse produite par des TCR ou TtCR cependant, un stockage adapté mène également à une réduction de la teneur en eau, ce qui a, inversement, une influence sur

la préservation des propriétés du produit. Il en résulte que les processus de stockage et de séchage ne peuvent pas être clairement séparés dans le domaine des TCR et TtCR.

Après la récolte, la biomasse fraîchement extraite a une teneur en eau très élevée. Généralement, les bois de peupliers, saules et eucalyptus ont une teneur en eau qui s'échelonne entre 40 et 50 %, tandis que le bois de robinier (faux acacia) peut contenir jusqu'à 40 % d'eau.

Lorsque le bois produit a pour objectif d'être broyé et très rapidement brûlé dans une chaudière industrielle, la biomasse n'a pas ou très peu besoin d'être stockée et séchée. Ce type de chaudière peut supporter des taux d'humidité très élevés (plus de 45 %). De plus, il arrive souvent que les plaquettes très humides soient mélangées avec du bois plus sec pour avoir un mélange au taux d'humidité adéquat pour la chaudière industrielle.

Enfin, lorsque le bois produit est destiné à être brûlé dans des chaudières de faibles ou moyenne puissance (particuliers ou collectivités), qui ne tolèrent pas de combustible à plus de 25 – 30 % d'humidité, une réduction de la teneur eau est nécessaire.

Cependant, quelles que soient les raisons qui mènent au stockage et au séchage du produit, cette opération doit être réalisée efficacement pour tous ses avantages [16].

II- Proximité des ressources en bois :

L'impact environnemental de la filière bois énergie est aussi lié à la nature du matériau : Les volumes mis en œuvre pour produire une même quantité d'énergie sont plus élevés que pour les autres sources fuel ou gaz.

Ce volume lorsqu'il est réduit par des procédés industriels (plaquette et plus encore granulats) implique d'autres intrants énergétiques pour la transformation du produit primaire. Il est donc primordial pour cette filière que les rayons d'approvisionnement soient les plus faibles possibles afin de minimiser les impacts liés au transport (pollution et forte dégradation des réseaux routiers). Il y aura donc nécessité à vérifier en amont des projets que les bassins d'approvisionnement soient suffisants pour éviter le recours à des importations de matière première.

III- Bois énergie et durabilité des forêts :

Les ressources en bois doivent être récoltées de forêts gérées durablement, ceci permet d'éviter les récoltes anarchiques et de protéger ces forêts des dangers de la déforestation. Dans ce qui suit, nous allons explorer et définir le concept de gestion durable des forêts.

III-1- La Gestion Durable des forêts :

Les forêts et les zones boisées jouent depuis toujours un rôle essentiel dans la survie des populations humaines, en tant que fournisseurs directs d'abri et de nourriture pour les individus et le bétail, ainsi que d'eau, de plantes médicinales, de matériaux de construction et de combustible. En plus de cela, elles régulent notre environnement de manière indirecte en ralentissant l'érosion des sols, en maîtrisant le ruissellement des eaux pluviales et en les

retenant, avant d'en réguler l'écoulement dans les rivières et les lacs. Au niveau planétaire, elles jouent un rôle dans la régulation du climat et la protection du littoral. En outre, forêts et zones boisées préservent un grand nombre de nos valeurs culturelles, spirituelles et religieuses, tout en jouant un rôle important dans le développement socio-économique des pays industrialisés et en représentant une ressource vitale pour la stabilité socio-économique des pays en développement. La disparition des forêts et des zones boisées entraîne la perte d'une ressource vitale et un bouleversement des activités socio-économiques qui en dépendent. L'accent mis ces dernières années sur le développement durable a entraîné un meilleur contrôle de l'utilisation des forêts.

La gestion durable des forêts est un concept universellement accepté qui guide les politiques et les pratiques forestières dans le monde. Une approche globale de la gestion des forêts et son application supposent l'existence de politiques, de lois et d'institutions qui la facilitent et, sur le terrain, l'application de pratiques de gestion bien conçues reposant sur des connaissances scientifiques ou traditionnelles de qualité. L'Assemblée générale des nations unies décrit la gestion durable des forêts en tant que concept dynamique et en évolution comme visant à maintenir et à renforcer les valeurs économiques, sociales et écologiques de tous les types de forêt, pour le bien des générations présentes et futures [17].

La gestion durable des forêts s'applique à tous les types de forêt, quels que soient les objectifs de cette gestion (production, préservation, protection et utilisations multiples par exemple), Les efforts déployés de par le monde pour faire progresser la gestion durable des forêts ont produit un vaste ensemble de connaissances, de données d'expérience, de directives pratiques, d'instruments, de mécanismes et de partenariats qui peuvent s'appliquer à la solution des problèmes causés par le changement climatique, la déforestation, les incendies, etc.

III-2-Les visions de la forêt et de sa gestion :

Les diverses visions de la forêt peuvent être regroupées en quatre grandes approches :

une approche fonctionnaliste qui envisage la forêt comme un écosystème pouvant remplir de nombreuses fonctions valorisables par l'homme, une approche sociologique qui appréhende la forêt à travers ses perceptions et représentations et en fait avant tout un objet social, une approche chiffrée par les économistes qui tentent de déterminer une valeur économique total du milieu naturel et enfin une approche systémique par les géographes qui s'intéressent avant tout aux interrelations entre l'écosystème et les sociétés [17].

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'approche fonctionnaliste et économique de la forêt.

III-2-1- L'approche fonctionnaliste : les fonctions de la forêt

Cette approche, appréhende la forêt à l'aide des sciences naturelles, permettant de caractériser et de comprendre le fonctionnement de l'écosystème forestier, et des savoirs techniques qui permettent de la gérer. Elle conduit à aborder la forêt et sa gestion à travers le filtre de trois

fonctions : la fonction économique, la fonction écologique et la fonction sociale. Celles-ci se constatent et se mesurent ce qui permet d'évaluer leur importance voire de juger de leur réalité objective.

➤ **La forêt, espace de production d'une matière première : le bois**

Grâce à la croissance des arbres, la forêt est un milieu qui produit une matière première renouvelable : le bois. La culture et l'entretien des peuplements se traduisent par une récolte plus ou moins importante de produits ligneux qui vont ainsi alimenter toute une filière de transformation. Ces récoltes sont directement dépendantes de la physionomie des forêts, elle mêmes issue de la combinaison de facteurs naturels (les conditions écologiques) et de facteurs humains (propriétaires, mode de gestion). Les résultats des inventaires et des études statistiques l'Inventaire Forestier National permettent de dresser un bilan de l'état de la ressource forestière.

Cette fonction de production s'enrichit d'une nouvelle demande liée aux changements climatiques avec le recours aux énergies renouvelables. Il s'agit du développement du **bois-énergie**.

➤ **La forêt, écosystème :**

La présence d'un couvert forestier modifie localement les conditions écologiques créant ainsi un écosystème spécifique. Celui-ci, grâce à ses caractéristiques propres, rend des services écologiques qui peuvent être classés en deux catégories. Les **services physico-chimiques**, en premier lieu, concernent les influences des forêts sur d'autres éléments naturels (sol, eau, air). Ce sont les rôles de maintien des sols, de régulation du cycle de l'eau, d'effet sur la qualité des eaux ou de fixation de gaz carbonique. Les services biologiques, ensuite, prennent en compte le rôle que jouent les forêts dans la conservation de nombreuses espèces animales et végétales, c'est-à-dire la biodiversité. Il convient d'ajouter à ces services la contribution des forêts à la formation des paysages qui participent tout autant aux fonctions écologiques qu'à la fonction sociale.

III-2-2 –L'approche économique :

L'évaluation économique offre un moyen de mesurer et de comparer les divers avantages d'un milieu naturel, et peut être un instrument précieux permettant d'appuyer et d'améliorer l'utilisation rationnelle et la gestion des ressources naturelles à l'échelle locale, nationale ou mondiale. Cette approche s'appuie sur le principe que la valeur d'un bien ou service se mesure grâce à notre propension à payer plus que ce qu'il en coûte pour le produire et prend toute son importance dès que l'on s'intéresse à l'environnement qui fournit des produits et services sans aucun frais.

III-3- Concept de gestion durable des forêts :

la gestion forestière, consiste à planifier et réaliser des travaux très variés. Ceci implique de connaître la forêt et son environnement écologique, social et économique, mais aussi de faire

des choix, puis de planifier et programmer l'ensemble des opérations dans le respect de l'équilibre de l'écosystème. La gestion forestière peut ainsi se schématiser sous forme d'une démarche générale en deux grandes étapes : **la planification et la mise en œuvre.**

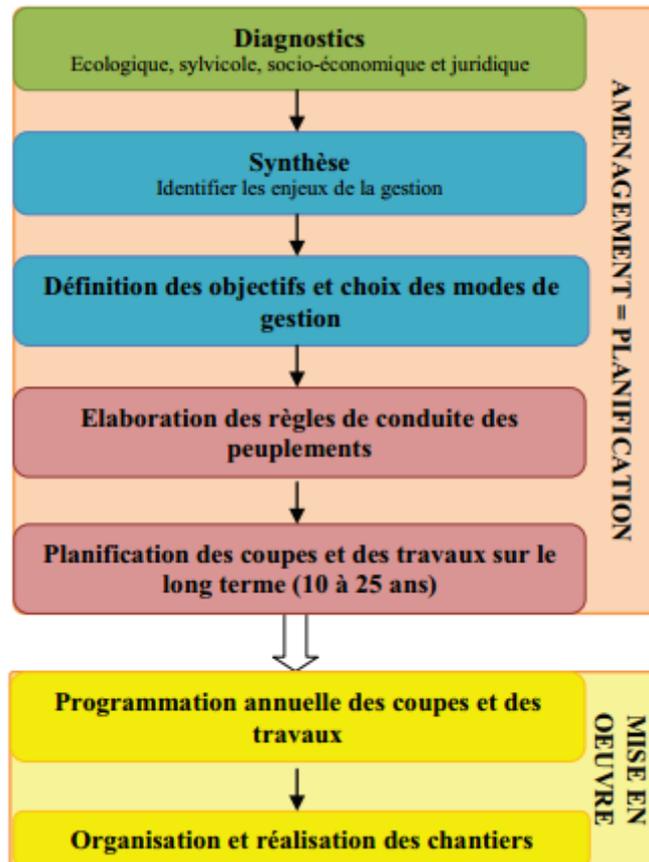


Figure 12 : Schéma général de la démarche de la gestion forestière [17].

Il s'agit donc aujourd'hui d'intégrer les principes du développement durable à cette démarche de gestion forestière.

La fabrication du concept de gestion durable des forêts à partir de celui du développement durable peut être décomposée en trois étapes [17].

✓ **Étape I :**

L'étape I est franchie lorsque le concept global et universel du développement durable est adopté officiellement par la communauté internationale. Le développement durable se définit alors comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins [17].

Pour la forêt, c'est la Déclaration de principes relatifs aux forêts (ou Principes forestiers), élaborée et signée lors de la CNUED, qui introduit, la notion de gestion durable : « Les

ressources et les terrains forestiers doivent être gérés durablement, afin de répondre aux besoins sociaux, économiques, écologiques, culturels et spirituels des générations présentes et futures ». Cette définition suggère l'appellation qui sera donnée au développement durable des forêts, à savoir la **gestion durable**.

✓ Etape II :

C'est la plus marquante et la plus érosive pour le concept. Il s'agit d'un découpage des forêts du monde et des pays où elles se situent en sept grandes aires géographiques et culturelles. Pour chacun de ces ensembles, un processus intergouvernemental, ou ce qui en faisait office, fût chargé d'établir en quoi consistait, à leur échelle, la gestion durable des forêts et à construire des ensembles de critères et indicateurs permettant de juger de la durabilité forestière.

✓ Etape III :

L'étape III accentue encore cette dérive avec la construction de jeux de critères et indicateurs complétant la définition de la gestion durable et définit ainsi six critères et 35 indicateurs de gestion durable. Ces critères et indicateurs, au nom de l'objectivité et de la mesure scientifique, occultent presque définitivement les acteurs et leurs besoins et s'intéressent presque exclusivement à l'état de la forêt. Ainsi, La gestion durable devient : « la gérance et l'utilisation des forêts et des terrains boisés, d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité de satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes, aux niveaux local, national et mondial. »

✓ Conclusion :

La forêt algérienne est couverte par le processus Afrique du nord et proche orient de définition des critères et indicateurs de gestion durable. L'élaboration et la mise en œuvre de ces critères et indicateurs constituent un processus dynamique de gestion durable pour la forêt algérienne.

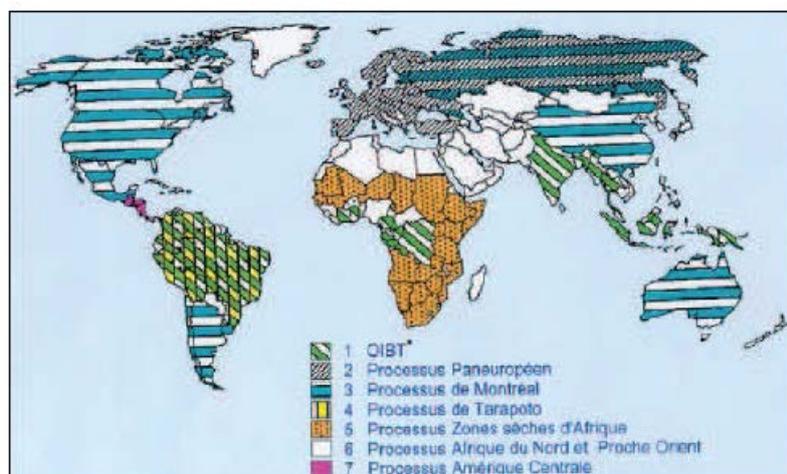


Figure 13 : Les forêts du monde couvertes par les processus intergouvernementaux de définition des critères et indicateurs de gestion durable [17].

IV-Conclusion :

Lors de l'exploitation d'une filière bois énergie, l'approvisionnement en bois doit être assuré à long terme et doit provenir de forêts gérées durablement. Concernant les cultures bois dédiées à la production d'énergie, On peut prendre comme hypothèse que les surfaces peuvent être dégagées pour leurs développements soit l'affectation de 10% des surfaces qui restent à reboiser dans le cadre du PNR (Plan National de Reboisement).

Chapitre III : Le bois-énergie pour la production d'électricité

I-Production d'électricité et la cogénération par combustion-vapeur :

I-1- Les turbines à vapeur :

La turbine à vapeur est une machine à vapeur rotative qui comprend essentiellement un générateur de vapeur, composé d'une chaudière et d'un foyer, la turbine proprement dite, un condenseur où vient se condenser la vapeur qui a travaillé et une pompe qui aspire l'eau condensée et la refoule à la chaudière [18].

Dans la turbine à vapeur, la vapeur commence par se détendre dynamiquement dans une tuyère, en acquérant de la vitesse, puis vient frapper les aubes d'une roue à qui elle cède sa force vive, en créant un couple. Il y a donc d'abord transformation d'énergie thermique en énergie cinétique dans la tuyère, puis d'énergie cinétique en travail dans la roue de la turbine. Lorsque la totalité de la transformation en force vive s'opère dans les tuyères fixes, la turbine est dite à action ; si au contraire la détente dans les tuyères n'est que partielle et qu'elle se poursuit dans l'aubage mobile, la turbine est dite à réaction. Le degré de réaction est le rapport de la force vive produite dans l'aubage mobile à la force vive totale.

On distingue aussi les turbines d'après la direction générale de l'écoulement de la vapeur dans la machine. Lorsque celle-ci s'écoule suivant un cylindre parallèle à l'axe de rotation, la turbine est dite **hélicoïdale** ou **axiale**. Si elle s'écoule suivant un plan perpendiculaire à l'axe, la turbine est dite **centrifuge** ou **radiale**.

Le principal emploi de la turbine à vapeur est la production de l'énergie électrique, mais cet emploi est loin d'être le seul.

On peut classer les turbines suivant la manière dont on emploie la vapeur :

Les turbines à condensation sont employées surtout à la production thermique de l'énergie électrique. La vitesse est habituellement normalisée à 3000 tr/mn, de telle sorte que la turbine puisse être directement accouplée à l'alternateur, sans engrenages démultiplicateurs. On réalise couramment des unités de 250000 KW.

Dans **les turbines à contrepression**, on évacue la vapeur sous des pressions et des températures relativement élevées, en vue de son emploi à des usages industriels (industrie chimique et autres). Au lieu de préparer directement la vapeur nécessaire aux besoins de la fabrication, on trouve plus avantageux de produire une vapeur plus chaude, dont la détente dans la turbine fournit, du même coup, la force motrice nécessaire à l'usine.

Dans **les turbines à soutirage**, on utilise un condenseur, mais on soutire, en un point approprié de la turbine, la vapeur destinée aux emplois industriels. Le soutirage peut se faire en plusieurs points, si l'on a besoin de plusieurs températures de la vapeur. Dans ce dernier cas, on emploie parfois simultanément le soutirage et la contrepression.

Dans la turbine à condensation, la plus répandue, on utilise toute la chute thermique disponible depuis la sortie de la chaudière jusqu'au condenseur. Dans certaines turbines

modernes, de grande puissance, la pression de la vapeur va jusqu'à 300 bars et sa température à 620°C. Lorsque la pression est très élevée, le rapport de détente est considérable et comme la température de surchauffe est limitée par des considérations de résistances des matériaux, dans les derniers étages, on pénètre assez profondément dans le domaine de la vapeur saturée. Dès que l'humidité de la vapeur dépasse 10 à 12%, non seulement les gouttelettes d'eau qui se forment freinent la rotation des roues et abaissent ainsi le rendement, mais elles provoquent, l'usure de l'aubage mobile. Pour y remédier, on est conduit à pratiquer la resurchauffe qui consiste à soutirer totalement la vapeur de la turbine, en point convenable, à la surchauffer à nouveau sous pression constante et à la ramener à l'étage suivant.

I-1-1- Les turbines vapeur à condensation :

Les turbines à condensation exploitent pratiquement l'entièreté de l'énergie contenue dans la vapeur. A leur sortie, elles ne laissent qu'une vapeur à très basse pression, en mélange avec des gouttelettes d'eau et difficilement utilisable excepté pour le chauffage à basse température comme le préchauffage d'eau. Ces turbines sont donc adaptées à la seule génération d'électricité, ce qu'elles font avec un bon rendement.

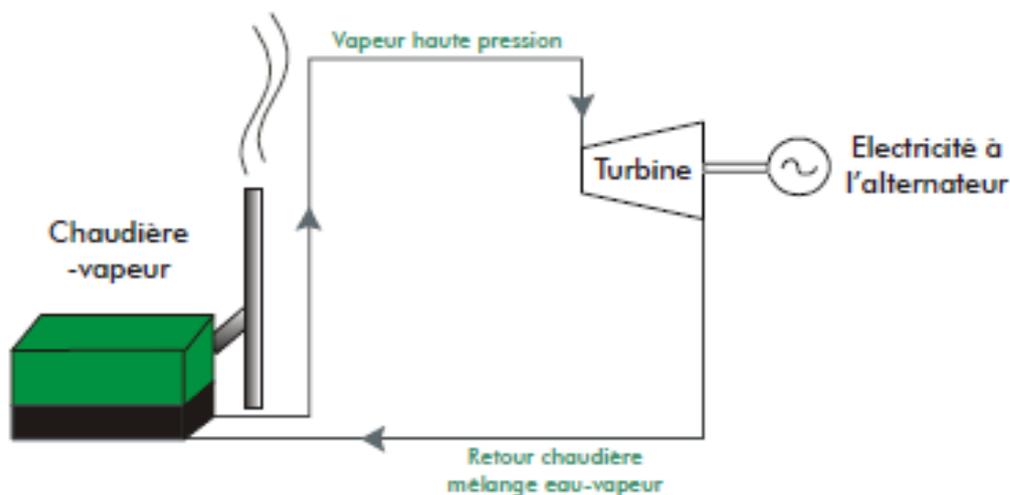


Figure 14 : Schéma général d'une installation de production d'électricité avec une turbine vapeur à condensation [18].

Les turbines à condensation produisent en continu un maximum d'électricité, la vapeur à la sortie de la turbine étant condensée sous vide pour accroître le rendement du cycle.

I-1-2- Les turbines vapeur à contre-pression :

A la sortie des turbines à contre-pression, la vapeur est uniquement en phase gazeuse et à une pression qui permet encore de satisfaire des besoins en chaleur (process industriel avec vapeur basse pression ou chauffage de bâtiments). Les rendements électriques de turbines à contre-pression sont plus faibles mais elles assurent également une exploitation de chaleur et elles demandent un investissement moins important.

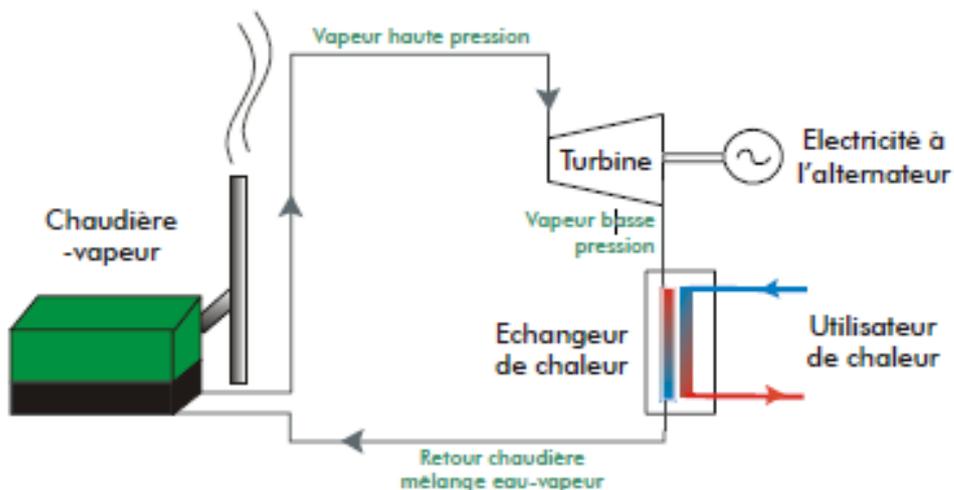


Figure 15 : Schéma général d'une installation de cogénération avec une turbine vapeur à contre pression [18].

I-2- Cycles de production d'électricité à vapeur :

I-2-1- Cycle de HIRN (ou de RANKINE) avec surchauffe :

Le cycle de Hirn (ou de Rankine avec surchauffe) utilise un fluide condensable qui est refroidi à une pression et une température suffisantes pour qu'il soit entièrement liquéfié avant compression. Dans ces conditions, le travail de compression devient quasiment négligeable devant le travail de détente (alors qu'il en représente environ 60 % dans une turbine à gaz). Le liquide comprimé est vaporisé et surchauffé dans la chaudière par échange thermique avec la source chaude, puis détendu et condensé. L'état diphasique du fluide lors des phases de condensation et de vaporisation est très favorable pour les échanges de chaleur.

Le schéma de principe d'une centrale thermique à vapeur idéale fonctionnant selon le cycle de Hirn est donné sur la figure ci-dessous. Il montre qu'une telle centrale comprend quatre composants, traversés par le même débit d'eau :

- ✓ Une pompe ;
- ✓ Une chaudière ;
- ✓ Une turbine ;

- ✓ Un condenseur.

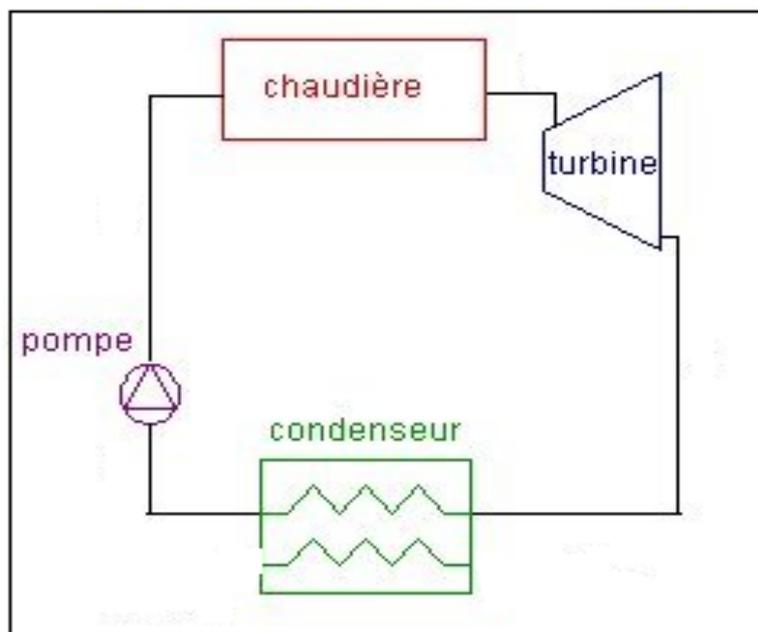


Figure 16 : schéma représentant la production d'électricité, cas d'un cycle de Hirn.

La pompe est généralement du type centrifuge, multi étagée compte tenu du très haut rapport de compression à réaliser.

La chaudière remplit trois fonctions successives et se comporte donc comme un triple échangeur :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- et enfin la surchauffer à la température désirée.

Le condenseur est un échangeur dont la particularité est de travailler en dépression par rapport à l'atmosphère, compte tenu de la faible tension de vapeur de l'eau à la température ambiante.

la pompe et la turbine peuvent être supposées adiabatiques. Quant à la chaudière et au condenseur, on peut en première approximation faire l'hypothèse qu'ils sont isobares.

I-2-2- Description du cycle :

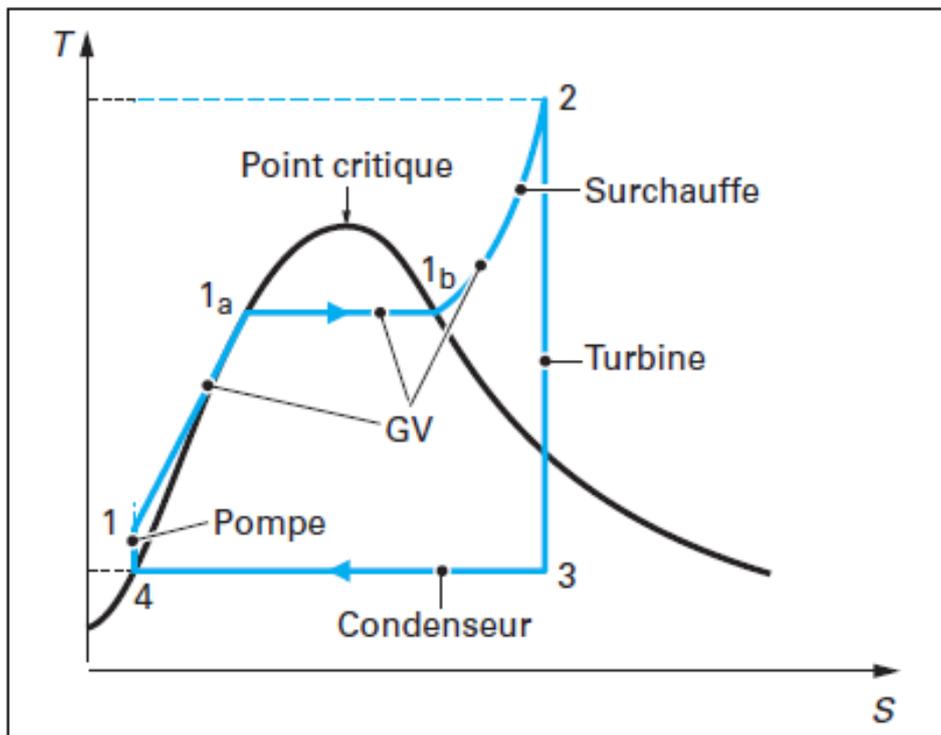


Figure 17 : Cycle de Hirn idéal avec surchauffe

Au point 4, l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ $T_4 = 20\text{ °C}$, sous une faible pression (0,023 bar). **La pompe** la comprime et augmente sa pression et le rapport de compression est considérable. La compression (4-1) du liquide peut être légitimement considérée isentropique, et la température T reste sensiblement constante.

L'eau sous pression est ensuite portée à haute température dans **la chaudière**, l'échauffement comportant les trois étapes suivantes, bien visibles sur la figure :

- ✓ chauffage du liquide de près de 20 °C , jusqu'à environ T_{1a} , la température de début d'ébullition, évolution (1-1a) sur le diagramme entropique. Le point 1a se trouve sur la courbe de vaporisation à l'ordonnée T_{1a} sur la même isobare que le point 1, $P_{1a}=P_1$.
- ✓ vaporisation à température constante T_{1a} : évolution (1a-1b). La vaporisation s'effectuant à pression et température constantes, elle se traduit sur le diagramme par un segment horizontal 1a-1b.

- ✓ surchauffe de la vapeur de T_{1a} à T_{1b} : évolution (1b-2) . la surchauffe augmente la température (l'énergie) de la vapeur. Le point 2 est encore par hypothèse à la même pression P_1 .

L'évolution (2-3) est une détente adiabatique de P_1 à P_4 . Dans le cycle idéal, obtenu sans irréversibilités et donc à entropie constante, le point 3 se trouve à l'intersection de la verticale passant par le point 2 et de l'isobare P_4 . Le point étant dans la zone mixte, cette dernière est confondue avec l'horizontale T_4 . Le point 3' est à la même pression que le point 3 mais son entropie est différente du fait des irréversibilités (plus grande d'après le second principe). Son enthalpie peut être déterminée si l'on connaît le rendement isentropique de la turbine. Le cycle devient alors :

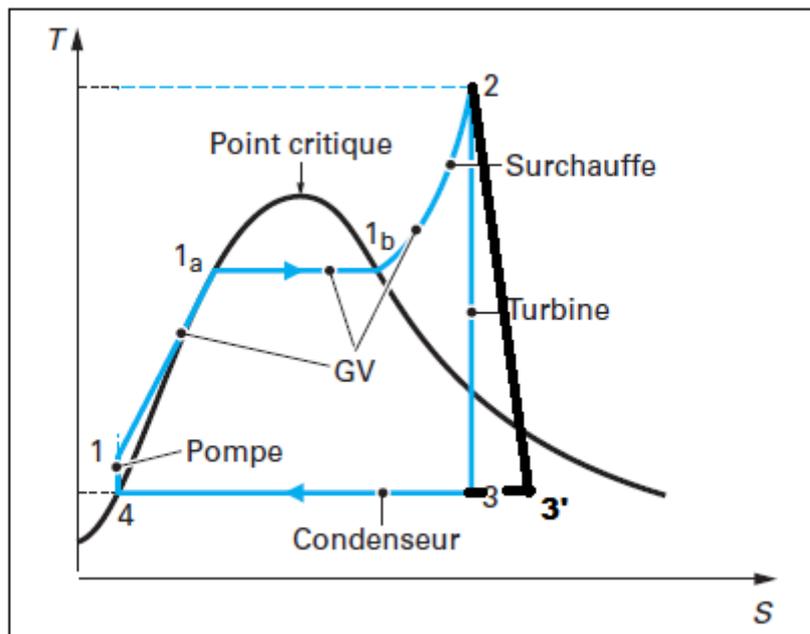


Figure 18 : Cycle de Hirn non idéal avec surchauffe.

Le mélange liquide-vapeur est enfin condensé jusqu'à l'état liquide dans un condenseur, échangeur entre le cycle et la source froide. Le cycle est ainsi refermé. Evolution (3' - 4).

En résumé :

<p>2-3'</p>	<p>Détente adiabatique irréversible, de HP à BP, dans la turbine, le rendement isentropique de cette détente est :</p> $\eta_{TV} = \frac{h_2 - h_{3'}}{h_2 - h_3}$
<p>3-4</p>	<p>Condensation isobare et isotherme du mélange jusqu'à eau liquide</p>

4-1	Compression de l'eau dans la pompe, passage de BP à HP ; W_{pompe} négligé et $h_4 = h_1$
1-1a-1b	Chauffage isobare et évaporation isobare et isotherme dans la chaudière.
1b-2	Chauffage isobare de la vapeur, $Q_{1b-2} = (h_2 - h_{1b})$ (III-2)

Le rendement théorique du cycle de Hirn est calculé comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{h_2 - h_{3'}}{h_2 - h_4} \quad \text{(III-3)}$$

I-3- La Cogénération/ Cycle combiné :

Le bois peut servir de source d'énergie pour produire de la chaleur seule, de l'électricité seule ou de la chaleur et de l'électricité. Dans ce dernier cas, le rendement global est bien meilleur que pour des productions séparées de chaleur et d'électricité. On avance généralement les chiffres suivants en termes de rendement : les centrales destinées à produire de l'électricité à partir de bois présentent une efficacité énergétique pouvant varier de 20% (installations les moins performantes) à 60% environ (cycles combinés gaz-vapeur). Cela signifie que 40 à 80% de l'énergie primaire utilisée sont relâchés sous forme de chaleur (pertes) dans l'environnement.

La cogénération consiste en la production simultanée et l'utilisation d'énergie mécanique ou électrique et de chaleur, à partir d'une seule machine et à partir d'une seule source d'énergie primaire.

A l'échelle industrielle, la cogénération est réalisée dans ce qu'on appelle un cycle combiné qui est une association d'un cycle de turbine à gaz (TG) et d'un cycle de turbine vapeur. Les cycles combinés permettent d'atteindre une efficacité motrice de plus de 60%. Le gaz d'échappement de la turbine à gaz sont valorisés dans une chaudière de récupération où l'on produit de la vapeur qui ensuite détendue dans une turbine à condensation.

Le rendement élevé résulte de la combinaison du processus à hautes températures de turbine à gaz avec le processus basse température de vapeur. La chaleur résiduelle des fumées chaudes à une température de 500-600 °C est transférée au processus pour la production à contre-courant de vapeur.

Dans un cycle combiné, environ deux-tiers du courant électrique est produit dans la TG et un tiers dans la turbine à vapeur.

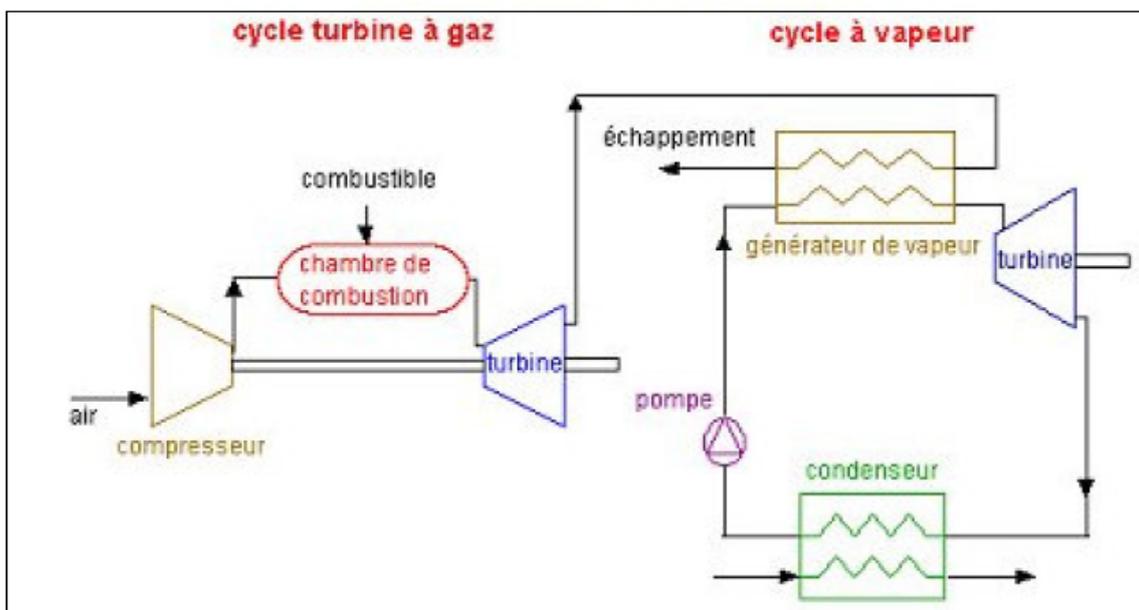


Figure 19 : Schéma représentant la cogénération, cas d'un cycle combiné.

II-Projet de Production d'énergie propre à partir de la biomasse forestière en Algérie :

L'objectif de notre étude est la vérification de la faisabilité technique et économique d'un projet d'implantation d'une centrale électrique produisant 5 MW d'électricité en Algérie. Une partie de l'électricité produite alimentera un procédé industriel par exemple et l'autre sera vendue à un distributeur d'électricité comme la Sonelgaz. La technologie envisagée pour ce projet est une turbine vapeur à condensation fonctionnant selon un cycle de Hirn avec surchauffe. Cette centrale sera alimentée par le combustible bois, issu de la forêt algérienne.

II-1-Estimation des ressources en bois et détermination du gisement mobilisable pour la production de 5 MW d'électricité :

La détermination de la quantité de bois nécessaire à la production de cette énergie nécessite la connaissance de la quantité de chaleur qui est fournie par le combustible à la chaudière pour produire de la vapeur qui alimente par la suite la turbine à vapeur. Pour pouvoir calculer cette quantité de chaleur, il est nécessaire de connaître les caractéristiques thermodynamiques de chaque point du cycle de la turbine. Aussi, il faut connaître le pouvoir calorifique inférieur du combustible. Les caractéristiques de la turbine utilisée sont émises comme hypothèses de départ.

✓ **Les hypothèses de départ :**

- La température à l'entrée de la turbine est $T_2=420^\circ\text{C}$;
- La pression d'entrée de la vapeur est $P_2=6\text{MPa}$;
- La pression à la sortie de la turbine à vapeur est $P_3=10\text{kPa}$;
- Le rendement de la turbine à vapeur est $\eta_{TV} = 88\%$;
- Le rendement de la chaudière est $\eta_{CH} = 96\%$;

II-1-1- Caractéristiques thermodynamique de chaque point du cycle :

✓ **A l'entrée de la turbine :**

$$T_2= 420^\circ\text{C}$$

$$P_2= 6 \text{ MPa}$$

La lecture à partir de tables thermodynamiques :

$$h_2= 3227,752 \text{ kJ/kg}$$

$$S_2= 6,615 \text{ kJ/kg.K}$$

✓ **A la sortie de la turbine :**

$$P_3= 10 \text{ kPa}$$

$$S_3= S_2= 6,615 \text{ kJ/kg.K}$$

La lecture à partir de tables thermodynamiques :

$$h_3= 2094,821 \text{ kJ/kg}$$

$$X_3= 0,795$$

A partir de l'équation (III-1), on obtient la relation suivante :

$$h_{3'}=h_2 - \eta_{TV}(h_2 - h_3) \tag{III-3}$$

$$h_{3'}=3227,752 - 0,88(3227,752 - 2094,821)$$

$$P_{3'}=P_3$$

Lecture à partir des tables thermodynamiques :

$$T_{3'}= 45,81^\circ\text{C}$$

$$X_{3'}= 0,852$$

✓ **Le point (4) :**

$$P_4 = P_3 = 10 \text{ kPa}$$

$$X_4 = 0$$

Lecture à partir des tables thermodynamiques :

$$h_4 = 191,805 \text{ kJ/kg}$$

$$S_4 = 0,6492 \text{ kJ/kg.K}$$

$$T_4 = 45,81^\circ\text{C}$$

✓ **Le point (1) :**

$$P_1 = 6 \text{ MPa}$$

$$S_1 = S_4 = 0,6492 \text{ kJ/kg.K}$$

$$h_1 = 197,847 \text{ kJ/kg}$$

$$T_1 = 46,01^\circ\text{C}$$

II-1-2- Chaleur utile qui sert à la production de la vapeur : (Q')

La chaudière transforme l'énergie du combustible en une forme appropriée, il s'agit de la vapeur. A mesure que l'eau est chauffée, sa température augmente et atteint le point d'ébullition. Cette chaleur est appelée chaleur sensible ou utile. Lorsque le point d'ébullition est atteint, l'ajout supplémentaire de chaleur entraîne la transformation d'une certaine quantité d'eau en vapeur et lorsque la vapeur est vaporisée à la température d'ébullition, elle est appelée vapeur sèche saturée. Cela signifie que la vapeur ne contient alors aucune gouttelette d'eau. Il faut savoir que lorsque l'eau est chauffée à une pression supérieure à la pression atmosphérique, le point d'ébullition dépasse les 100°C et la quantité de chaleur sensible requise est élevée.

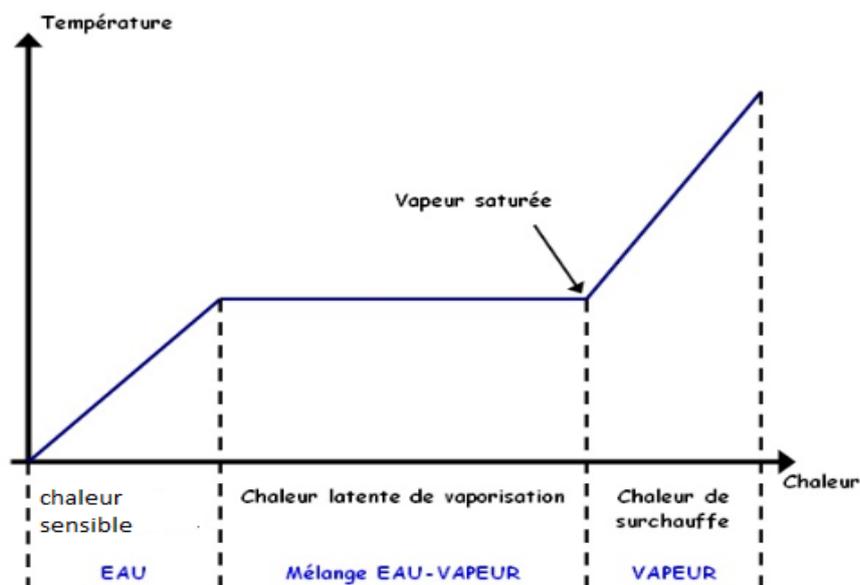


Figure 20 : Changements d'états de l'eau.

Pour pouvoir calculer cette chaleur utile, il faut connaître le débit massique de la vapeur produite.

✓ **Calcul du débit de vapeur \dot{m}_v :**

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_v[(h_2 - h_{3'}) - (h_4 - h_1)] \quad \text{(III-5)}$$

$$\dot{m}_v = 17945,80 \text{ kg/h}$$

✓ **Calcul de la chaleur utile Q' :**

$$Q' = \dot{m}_v(h_2 - h_1) \quad \text{(III-6)}$$

$$Q' = 54,374 \text{ GJ/h}$$

II-1-3- Chaleur fournie par le combustible : (\dot{Q})

On mesure le rendement de la chaudière par le rapport de la chaleur utile rendue par la chaudière (débit calorifique à la sortie) sur l'énergie contenue dans le combustible (débit calorifique à l'entrée).

Le rendement de la chaudière s'exprime par l'équation suivante :

$$\eta_{CH} = \frac{Q'}{\dot{Q}} \quad \text{(III-7)}$$

L'énergie fournie par le combustible est donnée par la relation suivante :

$$\dot{Q} = \frac{Q'}{\eta_{CH}} \quad \text{(III-8)}$$

$$\dot{Q} = 56,64 \text{ GJ/h}$$

II-1-4- Détermination de la quantité de combustible (bois) nécessaire à la production de 5MW d'électricité :

Le contenu énergétique du bois est exprimé par son pouvoir calorifique. Il représente la chaleur dégagée par sa combustion complète.

Le contenu énergétique ou bien l'énergie fournie par le combustible utilisé (bois) est fonction de son pouvoir calorifique inférieur. Cette énergie s'exprime par l'équation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m}_b \times PCI_{brute} \quad \text{(III-9)}$$

Où \dot{m}_b représente le débit massique du combustible, exprimé en tonne/h .

Le débit massique du combustible bois est défini donc, comme étant le rapport de l'énergie fournie par le combustible sur son pouvoir calorifique inférieur brute.

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{Q}}{PCI_{brut}} \quad (\text{III-10})$$

Pour déterminer ce débit, il faut connaître les principaux paramètres caractérisant le combustible utilisé qui est le bois.

Caractéristiques du combustible :

✓ L'humidité :

L'humidité représente la quantité d'eau contenue dans le bois par rapport à sa masse humide ou sèche. Le bois vert contient environ 50 % d'eau. Après séchage, la teneur en eau du bois se stabilise : elle est en équilibre avec celle de l'air et atteint environ 20 % pour un séchage à l'air libre. Sous abri, le bois sèche plus vite et atteint une humidité d'équilibre plus faible, jusqu'à 15 %.

Nous prenons comme hypothèse que l'humidité du combustible bois utilisé est $H\% = 20\%$.

✓ Le PCI_{brut} :

Le PCI du bois anhydre (c'est-à-dire contenant 0% d'eau), et dépourvu de matière minérale, est relativement constant, de l'ordre de 18,4 MJ/kg, soit l'équivalent de 5100 kWh/t et ce, quelle que soit l'essence (résineux ou feuillus).

La formule de la variation du PCI en fonction du taux d'humidité est la suivante :

$$PCI_{brut} = PCI_{anhydre} \times \left(\frac{100-H\%}{100} \right) - 6 \times H\% \quad (\text{III-11})$$

L'influence de l'humidité est donc très importante sur le PCI brut.

✓ Masse volumique :

La masse volumique du bois, exprimée en kg/m^3 représente la masse du bois par unité de volume.

La connaissance de la masse volumique du bois est importante car celui-ci est parfois vendu par unité de volume apparent (stère) alors que son contenu énergétique dépend de sa masse.

Tableau 12 : Masse volumique moyenne de quelques essences, en kg/m³[19].

	Bois vert (H% = 40-60 %)	Bois sec à l'air (H% = 20-30 %)	Bois anhydre
Chêne	1000	750	625
Hêtre	980	750	625
Epicéa	760	450	400
Douglas	-	550	460
Sapin	970	550	460

La masse volumique du combustible utilisé est égale à 600 kg/m³ (densité moyenne).

Calcul du débit massique : pour cela, nous utilisons l'équation (III-10).

$$\dot{m}_b = \frac{56,64}{3960 \times 3,6 \times 10^{-3}}$$

$$\dot{m}_b = 3,973 \text{ t/h}$$

La centrale de production de 5MW d'électricité fonctionne pendant 8347h durant toute l'année. Ainsi, la quantité de bois annuelle nécessaire à l'alimentation de cette centrale est de :

$$m_b = 3,973 \times 8347$$

$$m_b = 33163 \text{ t/an}$$

Ce qui nous fait un volume de :

$$V_b = \frac{33163}{0,600} = 55272 \text{ m}^3$$

L'alimentation en combustible de la centrale doit être continue, c'est la raison pour la quelle, la question de l'approvisionnement en combustible doit être posée avant l'installation d'une tel centrale. D'où va provenir le bois utilisé, à quelle distance et sous quelle formes (bûches, plaquettes, granulés,...) faut-il l'utiliser pour alimenter la centrale?. Son prix doit être discuté aussi. Le volume de bois estimé représente 82% du volume de bois de chauffage récolté des forêt en 2005 sachant que ce bois récolté n'est pas transformé mais le bois utilisé dans la centrale est supposé être transformé en granulé.

la faisabilité d'un tel projet dépend essentiellement de la disponibilité et de la proximité de la ressource en bois.

II-2- Analyse financière du projet de production d'énergie propre en Algérie par l'outil RETScreen® :

Plusieurs outils d'analyse du coût du cycle de vie sont disponibles pour aider au processus décisionnel à l'égard des technologies de l'énergie renouvelable dont un grand nombre sont privés, mais Ressources naturelles Canada offre un logiciel gratuit appelé RETScreen® pour aider aux évaluations de faisabilité. Le logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen® est un outil unique d'aide à la décision élaboré par des experts de l'industrie et des universités.

Dans le cas de notre étude, RETScreen® est utilisé pour faire une étude de viabilité financière et une analyse d'émission de gaz à effet de serre d'un seul projet présentant deux cas différents. Ceci nous permettra par la suite de comparer ces derniers. Le premier est un cas de référence et il s'agit de la production de 5 MW d'électricité en utilisant une centrale à turbine à vapeur alimentée par un combustible fossile (gaz naturel). Le deuxième est le cas proposé, c'est le même projet mis à part le combustible qui diffère, dans ce cas le combustible utilisé est le bois (énergie propre).

II-2-1- Présentation du Logiciel RETScreen® International :

RETScreen® International est à la fois un outil de sensibilisation aux énergies propres, d'aide à la décision et de renforcement des compétences. L'outil consiste en un logiciel normalisé et intégré d'analyse de projets d'énergies propres qui peut être utilisé partout dans le monde pour évaluer la production énergétique, les coûts du cycle de vie et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour différentes technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Il est fourni gratuitement par le gouvernement du Canada dans sa stratégie de lutte contre les changements climatiques et de réduction de la pollution. Il a été démontré que l'outil RETScreen® facilite les projets d'énergies propres à l'échelle mondiale.

Chaque modèle de technologie d'énergie propre RETScreen® a été développé dans un classeur Microsoft® Excel individuel. Chaque classeur est ensuite composé d'une série de feuilles de calcul. Ces feuilles de calcul ont un aspect commun et suivent une démarche standardisée, commune à tous les modèles RETScreen®.

En plus du logiciel, l'outil comprend des bases de données (produits, coûts et données météorologiques), un manuel en ligne, un site Web, un manuel d'ingénierie, des études de cas et un cours de formation [20].

Figure 21 : Présentation de RETScreen® International.**✓ Avantages :**

Mis à part le fait que RETScreen® est un logiciel gratuit et peut être utilisé dans n'importe quel pays du monde, il présente plusieurs avantages.

-RETScreen® réduit considérablement les coûts (financiers et de temps) liés à l'identification et à l'évaluation de projets d'énergie potentiels. Ces coûts, qui sont associés aux études de préfaisabilité et de faisabilité ou à l'élaboration et conception technique du projet, peuvent constituer une barrière importante au déploiement des technologies d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. En aidant à supprimer ces barrières, RETScreen® réduit les coûts associés aux énergies propres.

-RETScreen® permet aux décideurs et aux professionnels de déterminer si un projet d'énergie renouvelable est financièrement viable. Si le projet est viable ou non, RETScreen® l'indiquera au décideur et ce, rapidement, sans équivoque, dans un format convivial et à un coût relativement bas.

II-2-2- Modèle RETScreen® pour la production d'électricité - Turbine à vapeur :

Le Modèle pour turbines à vapeur du logiciel RETScreen® permet d'évaluer la production et les économies d'énergie, les coûts, les réductions d'émissions de gaz à effet de serre, la viabilité financière ainsi que les risques pour des projets de centrales à turbines à vapeur hors réseau ou raccordées à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité, et ce partout à travers le monde [20].

Le logiciel peut modéliser une gamme de projets allant de centrales électriques de grande taille composées de plusieurs turbines, jusqu'aux systèmes de production d'électricité décentralisée situés sur des bâtiments industriels. De plus, le modèle permet l'analyse avec une vaste gamme de combustibles renouvelables et non renouvelables (qui peuvent être utilisés parallèlement), notamment les gaz de sites d'enfouissement, la biomasse, la bagasse, le biodiesel, l'hydrogène, le gaz naturel, le pétrole, le diesel, le charbon, les déchets municipaux, etc. Le modèle permet aussi de spécifier les diverses conditions d'opérations.

Ce modèle pour les projets de production d'électricité en utilisant une centrale à turbine à vapeur contient une feuille pour introduire des informations concernant le projet et cinq feuilles de calcul qui doivent être remplies dans l'ordre suivant :

- ✓ Modèle énergétique ;
- ✓ Analyse des coûts ;
- ✓ Analyse des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (Analyse des GES) ;
- ✓ Analyse financière et Analyse de risque.

Dans notre étude, seules les quatre premières feuilles de calcul seront considérées. Quand à la dernière (Analyse de risque), elle nécessite l'introduction de certaines données que nous n'avons pas.

II-2-3- Feuille démarrer :

La feuille de démarrage s'affiche lors de l'ouverture de RETScreen®. Elle nous permet de spécifier le nom et le lieu du projet, le lieu des données climatiques et quelle convention utilisée pour caractériser le contenu énergétique des combustibles : à savoir le Pouvoir calorifique inférieur ou le Pouvoir calorifique supérieur. L'utilisateur choisit entre la « Méthode 1 » pour une analyse simplifiée tenant sur une seule feuille de calcul, ou la « Méthode 2 » pour une approche plus détaillée présentant des feuilles séparées pour les différents éléments de l'analyse.

✓ Information sur le projet :

Le choix du « type de projet » est une étape importante de la configuration. Une liste déroulante propose une gamme étendue d'options, dont plusieurs se rapportent à des projets de production d'électricité. La technologie employée pour produire l'électricité du projet proposé est choisie dans cette feuille de démarrage, et parmi les nombreux choix offerts dans la liste déroulante à droite de la cellule « Technologie ».

Cette feuille comporte également une liste déroulante pour le « Type de réseau », à l'aide de laquelle nous indiquerons si le projet sera raccordé à un réseau central, à un réseau isolé ou s'il s'agira d'un projet hors-réseau et aussi de spécifier si l'on alimente une charge interne ou pas et donc déterminer le surplus en électricité que l'on peut envoyer sur le réseau. Ce choix de charge interne est important lorsque le tarif pour l'électricité achetée du réseau diffère du prix que l'on peut obtenir pour l'électricité que l'on envoie vers le réseau.

Information sur le projet		Voir la Base de données de projets
Nom du projet	Bois energie	
Lieu du projet	Algerie	
Préparé pour	PFE	
Préparé par	Ait Abdelmalek	
Type de projet	Production d'électricité	
Technologie	Turbine à vapeur	
Type de réseau	Réseau central et charge interne	
Type d'analyse	Méthode 2	
Pouvoir calorifique de référence	Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	

Figure 22 : Information sur le projet de production d'électricité.

Une fois l'étude de cas ouverte à la feuille Démarrage (Figure 22), on constate que RETScreen® a bien été configuré pour un projet de production d'électricité employant une turbine à vapeur et raccordé au réseau central avec charge interne qui peut être un procédé industriel.

On voit que le contenu énergétique du combustible est défini par son Pouvoir calorifique inférieur, c'est la convention généralement utilisée en Algérie où se situe ce projet. Même si elles ne sont pas nécessaires à l'étude, les données climatiques pour Dar El Beida, Algérie ont été choisies dans la base de données climatiques .

✓ **Conditions de référence du site :**

Les conditions de référence du site et les données climatiques de ce dernier sont illustrées par la figure :

Lieu des données climatiques		Dar-El-Beida/Houari	
Afficher information		<input checked="" type="checkbox"/>	

	Unité	Lieu des données climatiques	Lieu du projet
Latitude	°N	36,7	36,7
Longitude	°E	3,2	3,2
Élévation	m	29	29
Température extérieure de calcul de chauffage	°C	3,0	
Température extérieure de calcul de climatisation	°C	33,4	
Amplitude des températures du sol	°C	14,2	

Mois	Température		Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température e du sol	Degrés-jours de chauffage	Degrés-jours de climatisation
	de l'air	Humidité relative						
	°C	%	kWh/m ² /j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janvier	10,6	78,2%	2,48	97,2	2,6	11,6	229	19
Février	11,0	79,2%	3,38	97,1	2,7	12,4	196	28
Mars	13,1	77,1%	4,59	96,9	2,8	14,6	152	96
Avril	15,2	75,1%	5,69	96,6	3,0	17,1	84	156
Mai	18,5	75,6%	6,49	96,7	2,9	21,0	0	264
Juin	22,5	70,8%	7,20	96,8	3,1	25,8	0	375
Juillet	25,4	69,8%	7,13	96,8	3,0	28,9	0	477
Août	26,1	69,4%	6,44	96,8	2,9	29,0	0	499
Septembre	23,6	71,3%	5,28	96,8	2,7	25,8	0	408
Octobre	20,0	73,4%	3,82	96,9	2,5	21,5	0	310
Novembre	15,2	76,8%	2,63	96,9	2,6	16,6	84	156
Décembre	12,1	78,9%	2,15	97,1	2,7	13,0	183	65
Annuel	17,8	74,6%	4,78	96,9	2,8	19,8	928	2 853
Mesuré à	m				10,0	0,0		

Figure 23 : Conditions de références et données climatique du site du projet.

Il est à noter que nous devons soit sélectionner l'emplacement des données climatiques à partir de la base de données climatiques RETScreen® et coller les données dans la feuille de calcul, soit entrer les données climatiques manuellement dans les cellules bleues.

II-2-4- Charge et Conception du réseau :

Dans un réseau central ou isolé sans charge interne, on considère que la totalité de la production d'électricité sera transmise au réseau. Lorsqu'une charge interne est présente, RETScreen® ajoute une feuille « Charge et réseau » où nous spécifions les caractéristiques de la charge des projets de production d'électricité proposé et du cas de référence.

Nous indiquons donc les valeurs de la charge moyenne mensuelle, la charge de pointe annuelle, et le prix de l'électricité du cas de référence. RETScreen® calcule la portion des besoins annuels en énergie électrique de la charge interne qui est assurée par le projet proposé, l'économie de coûts résultante et quelle quantité d'électricité le projet proposé est capable de produire pour exportation au réseau.

Caractéristiques de la charge du cas de référence		Charge électrique moyenne brute kW
Mois		
Janvier		3 200
Février		3 200
Mars		3 200
Avril		3 200
Mai		3 200
Juin		3 200
Juillet		3 200
Août		3 200
Septembre		3 200
Octobre		3 200
Novembre		3 200
Décembre		3 200
% à ajouter à moyenne mensuelle max. pour charge de pointe		40,0%
Charge de pointe - annuelle		4 480
Électricité	MWh	28 215
Prix de l'électricité - cas de référence	\$/kWh	0,040
Coût total de l'électricité		\$ 1 128 602

Figure 24 : Caractéristiques de la charge du cas de référence.

La charge électrique moyenne brute est fixée à 3200 kW (par hypothèse). Nous supposons qu'elle est constante durant toute l'année pour simplifier les calculs.

Cette charge est la même pour le cas de référence et le cas proposé.

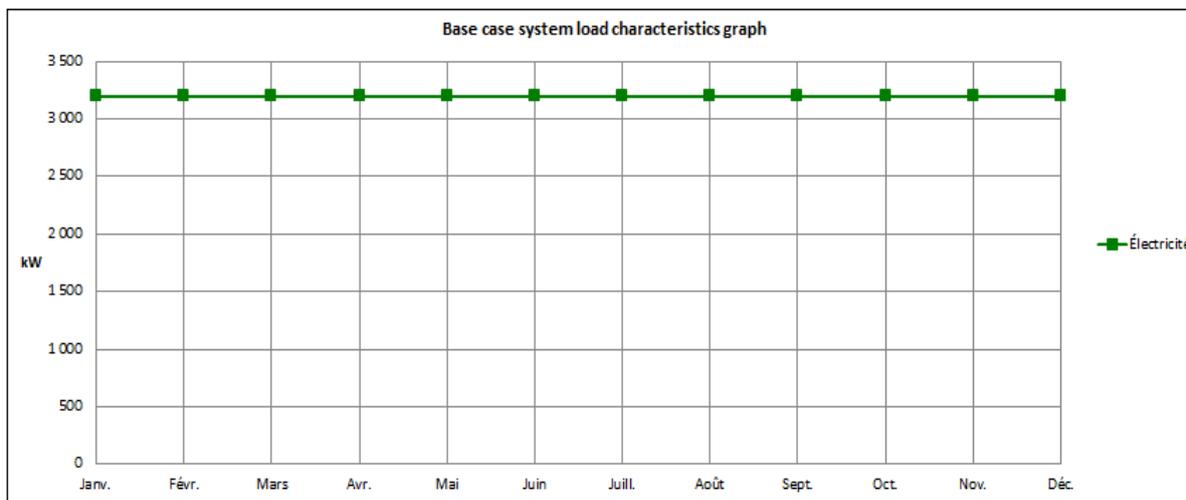


Figure 25 : Profil de la charge moyenne du cas de référence.

II-2-5- Les différentes feuilles de calcul :

II-2-5-1- Modèle énergétique :

- **Système de production d'électricité du cas proposé :**

Lorsque l'on clique sur l'onglet Modèle énergétique, la feuille modèle énergétique s'affiche. Les quelques paramètres qui apparaissent en premier décrivent l'installation électrique du projet proposé. La turbine à vapeur est en mesure de fonctionner environ 8 347 heures par année, ce qui correspond à une disponibilité de 95,3 %, elle ne consomme qu'un seul combustible, du bois (granulé) disponible à 100\$/t par hypothèse.

Le prix du combustible est un facteur clé pour l'étude de la viabilité financière du projet mais il est difficile d'évaluer le prix du bois destiné à la production d'énergie en Algérie. La plupart le récoltent gratuitement, s'agissant d'un usage traditionnel mais il ne faut pas oublier que ce bois récolté doit être transformé avant d'être utilisé dans le type d'installation que nous avons choisi pour notre projet. En revanche le bois utilisé pour d'autres usages (industrie, menuiserie, construction...) a certainement un prix plus élevé que celui destiné au chauffage. Le marché du bois pour alimenter des centrales biomasse n'existe pas encore chez nous. C'est pour cela qu'il nous a semblé plus raisonnable d'estimer ce prix par rapport à celui pratiqué en Europe sachant que celui-ci oscille entre 80 et 260 €/t [21].

Système de production d'électricité du cas proposé			
Technologie	Turbine à vapeur		
Disponibilité	%	95,3%	8 347 h
Méthode de choix du combustible	Un seul combustible		
Type de combustible	Bois - granule		
Prix du combustible	\$/t	100,000	

Figure 26 : Système de production d'électricité du cas proposé.

- **Sommaire du cas proposé :**

La capacité de production de ce projet étant de 5000 kW, nous choisissons un modèle de turbine à vapeur dans la base de données de RETScreen®, ceci nous permettra par la suite d'avoir le coût d'une telle installation suivant la gamme de puissance où elle se situe.

RETScreen® nous montre qu'une centrale électrique de 5 MW offrant une disponibilité annuelle de 8 347 heures, exportera 14 802 MWh par année au réseau et fournie à la charge 26 883 MWh. Ceci exigera une consommation de 68,3 GJ/h de combustible.

Sommaire			
Capacité électrique	kW	4 994	111,5%
Charge minimale	%	40,0%	
Fabricant	GE		
Modèle et capacité	P		
Électricité fournie à la charge	MWh	26 883	95%
Électricité exportée au réseau	MWh	14 802	
Rendement saisonnier	%	80,0%	
Température de retour	°C	46	
Combustible nécessaire	GJ/h	68,3	
Capacité thermique	kW	0,0	

Figure 27 : Sommaire du cas proposé.

- **Stratégie d'exploitation :**

Dans cette section, nous introduisons le « Prix de l'électricité exportée » ou la valeur monétaire du montant payé par un service public ou autre client pour 1 MWh d'électricité envoyé vers le réseau.

Pour le prix de l'électricité produite par cogénération/biomasse et injectée dans le réseau, on peut l'estimer au double du prix pratiqué par Sonelgaz (c'est-à-dire 200% du prix pratiqué pour l'électricité conventionnelle), nous le fixons à 200 \$US/MWh. Ce prix reflète bien le

prix de 0,2 \$US/kWh auquel l'électricité produite pourra être vendue au distributeur d'électricité. (Sonelgaz dans le cas de l'Algérie). (figure 28)

Stratégie d'exploitation - système de production d'électricité		
Prix de l'électricité - cas de référence	\$/MWh	40,00
Prix du combustible - production d'électricité du cas proposé	\$/MWh	19,59
Prix de l'électricité exportée	\$/MWh	200,00
Prix de l'électricité - cas proposé	\$/MWh	0,00

Figure 28 : Stratégie d'exploitation du système de production d'électricité.

II-5-2-2- Analyse des coûts :

Cette feuille nous permet d'introduire les coûts d'investissement initiaux du projet. Ces derniers concernent les coûts des équipements utilisés pour la production de l'électricité et les coûts de leur entretien. Dans le cas de notre étude, l'équipement considéré est la turbine à vapeur et concernant les coûts d'entretien, ils seront négligés pour manque de données.

Une fois les coûts d'investissement introduits, le logiciel estime le coût total de l'investissement relatif au projet, ainsi que le coût du combustible utilisé (coût annuel).

Système de production d'électricité				
Charge de base - Turbine à vapeur	kW	4 994,29	\$ 800	\$ 3 995 435
Charge de pointe - Électricité du réseau	kW	4 480,00		\$ -
Chemin d'accès	km			\$ -
Ligne électrique	km			\$ -
Poste de raccordement	projet			\$ -
Mesures d'efficacité énergétique	projet			\$ -
Défini par l'utilisateur	coût			\$ -
				\$ -
Sous-total:				\$ 3 995 435 100,0%

Coût en combustible - cas proposé

Bois - granule	t	31 036	\$ 100,000	\$ 3 103 574
Électricité	MWh	1 332	\$ -	\$ -
Sous-total:				\$ 3 103 574

Coût en combustible - cas de référence

Électricité	MWh	28 215	\$ 40,000	\$ 1 128 602
Sous-total:				\$ 1 128 602

Figure 29 : Analyse des coûts du projet de production d'électricité.

II-5-2-3- Analyse des réductions d'émissions de GES :

L'analyse d'émissions calcule la réduction annuelle nette d'émissions de GES. Dans ce cas particulier, les émissions associées à la production d'électricité du projet proposé sont comparées aux émissions pour l'électricité de réseau qu'il remplace (projet de référence).

Cette feuille de calcul comprend cinq sections principales: Choix d'options, Réseau électrique de référence (Niveau de référence), Sommaire des GES du cas de référence (Niveau de référence), Sommaire des GES du cas proposé (Projet) et Sommaire des réductions d'émissions de GES.

Les sections Réseau électrique de référence et Sommaire des GES du cas de référence dressent un bilan des émissions de GES du système de référence.

La section Sommaire des GES du cas proposé expose le bilan des émissions de GES du système proposé.

La section Sommaire des réductions d'émissions de GES estime les réductions d'émissions de GES d'après les données entrées par l'utilisateur dans les sections précédentes.

- **Résultats :**

Le lieu du projet est l'Algérie. RETScreen® nous indique qu'en Algérie, un pays où l'utilisation des énergies fossiles prédomine largement, que le facteur moyen d'émissions de GES n'est que de 0,600 tonnes d'équivalent CO₂ par MWh d'électricité de réseau. Cela comprend des pertes moyennes de transport et de distribution qui sont de l'ordre de 10 %.

Réseau électrique de référence (Niveau de référence)				
Pays - région	Type de combustible	Facteur d'émissions GES (avant pertes)	Pertes t-d	Facteur d'émissions GES
		tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Algeria	Gaz naturel	0,540	10,0%	0,600

Changement du niveau de référence durant le projet

Figure 30 : Emission de GES du réseau électrique de référence.

Sur la base de cette information, RETScreen® calcule que la réduction annuelle nette d'émissions de GES émanant de ce projet se situe à environ **23 886** tonnes d'équivalent CO₂.

Le calculateur d'équivalences de RETScreen nous aide à évaluer concrètement cette valeur. Il nous indique que 23 886 tonnes d'équivalent CO₂ annuel est comparable au retrait de la circulation de 4 375 voitures ou camionnettes, l'effet de 23 000 foyers nord-américains

réduisant leur consommation énergétique de 20 %, ou la consommation de 49 520 barils de pétrole brut en moins. (Figure 31)

Sommaire des réductions d'émissions de GES					
	Émissions de GES cas de référence tCO2	Émissions de GES cas proposé tCO2	Réduction annuelle brute d'émissions de GES tCO2	Frais de transaction pour les crédits de GES %	Réduction annuelle nette d'émissions de GES tCO2
Projet de production d'électricité	25 821,2	1 935,4	23 885,8		23 885,8
Réduction annuelle nette d'émissions de GES	23 886	tCO2	est équivalente à	4 375	Automobiles et camions légers non utilisés

Figure 31 : Sommaire des réductions d'émissions de GES.

II-5-2-4- Analyse financière :

RETScreen® demande de fournir les valeurs de plusieurs paramètres nécessaires à l'analyse financière, notamment le taux d'inflation, le taux d'intérêt sur la dette, la durée de vie du projet et le ratio d'endettement. Des coûts d'exploitation et d'entretien ainsi que de d'autres paramètres financiers n'ont pas été pris en compte dans le cas de notre étude pour manque de données.

Analyse financière RETScreen - Projet de production d'électricité

Paramètres financiers		
Général		
Taux d'indexation des combustibles	%	0,0%
Taux d'inflation	%	5,0%
Taux d'actualisation	%	10,0%
Durée de vie du projet	an	20
Financement		
Encouragements et subventions	\$	
Ratio d'endettement	%	

Figure 32 : Paramètres financiers du cas proposé.

Le modèle fournit d'une part le total des frais annuels et des paiements de la dette du projet, et d'autre part le total des économies et des revenus annuels qu'il génère. L'écart entre les deux fournit le revenu net du projet sur lequel est basée l'analyse financière, il est estimé à environ

4 088 946 \$ sachant que seul le prix de la turbine à vapeur et le prix annuel qui ont été pris en considération. (Figure 33)

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production d'électricité	100,0%	\$	3 995 435
Infrastructures connexes et divers	0,0%	\$	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	\$	3 995 435
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		\$	0
Coût en combustible - cas proposé		\$	3 103 574
Total des frais annuels		\$	3 103 574
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		\$	1 128 602
Revenu d'exportation d'électricité		\$	2 960 345
Total des économies et des revenus annuels		\$	4 088 946

Figure 33 : Sommaire des coûts, économies et revenus du projet.

Plusieurs indicateurs financiers sont calculés par RETScreen®. Trois d'entre eux sont plus connus : le temps de retour simple sur investissement, la valeur actualisée nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI) appelé aussi retour sur investissement (RI). Le temps de retour simple sur investissement est le nombre d'années qu'il faut pour rembourser le capital investi dans un projet à partir des économies ou revenus qu'il génère. La valeur actualisée nette ou VAN d'un projet est la meilleure façon de valoriser les revenus futurs du projet. Il s'agit de la valeur cumulée de tous les coûts et bénéfices d'un projet ramené à leur valeur monétaire actuelle présente. Si la VAN d'un projet est positive, c'est que le projet est rentable selon le taux d'actualisation choisi par l'utilisateur. Si la VAN est négative, cela signifie que l'investissement monétaire pourrait être plus rentable ailleurs que dans ce projet. C'est pourquoi le taux d'actualisation est souvent considéré comme étant le rendement que l'on peut couramment escompter d'un investissement. Le choix d'un taux d'actualisation fera souvent l'objet de discussions.

Le taux de rendement interne ou TRI d'un projet ne demande pas à l'utilisateur de fixer un taux d'actualisation, car il s'agit en fait de la valeur du taux d'actualisation permettant d'obtenir une valeur actualisée nette du projet égale à zéro. Le TRI est donc le taux d'intérêt réel obtenu sur l'investissement dans le projet, pendant toute la durée de son exploitation. On peut comparer cette valeur au rendement que l'on obtiendrait sur des investissements dans d'autres projets ayant des niveaux de risque équivalents [20].

Viabilité financière		
TRI avant impôt - capitaux propres	%	24,3%
TRI avant impôt - actifs	%	24,3%
TRI après impôt - capitaux propres	%	24,3%
TRI après impôt - actifs	%	24,3%
Retour simple	an	4,1
Retour sur les capitaux propres	an	4,1
Valeur Actualisée Nette (VAN)	\$	4 393 597
Économies annuelles sur la durée de vie	\$/an	516 070
Ratio avantages-coûts		2,10
Coût de réduction de GES	\$/CO2	(22)

Figure 34 : Indicateurs clés (sorties) de la viabilité financière pour le cas où le prix de l'électricité exportée est de 200 \$ /MWh

Un graphique des flux monétaires cumulatifs en est déduit. Ce graphique montre tout de suite que ce projet est très intéressant. RETScreen® montre que le temps de retour simple sur investissement de 4,1 années.

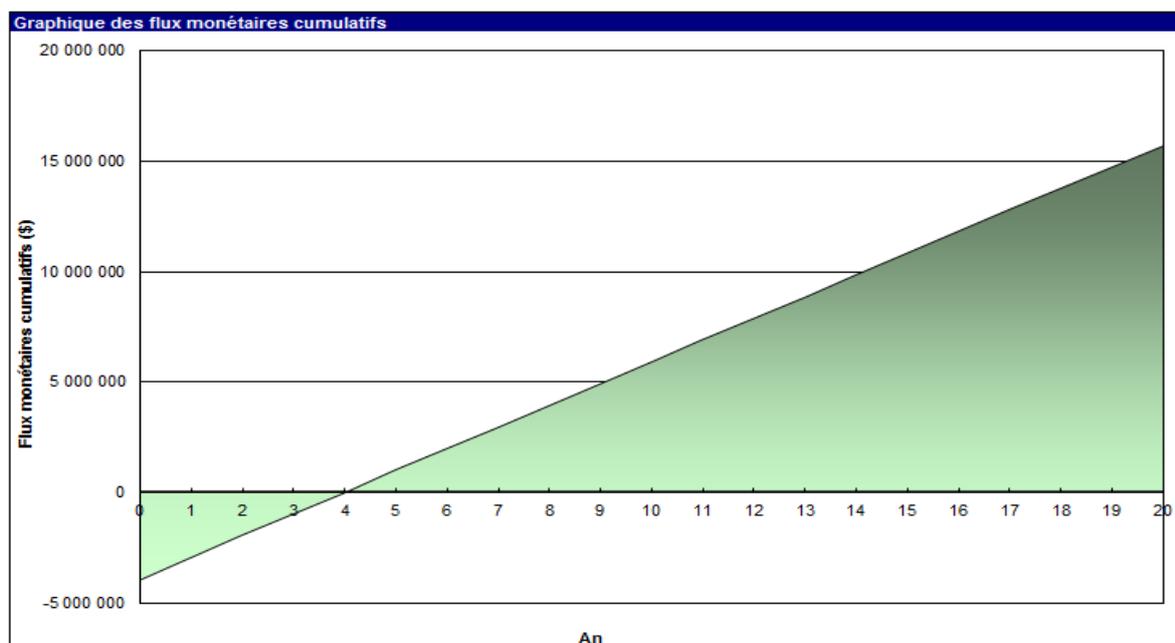


Figure 35 : Diagramme des flux monétaires cumulatifs avec un prix de l'électricité exportée de 200\$ /MWh

III- Conclusion :

L'analyse financière RETScreen® d'un projet d'énergies propres prend en compte tous les facteurs clés qui peuvent affecter la viabilité financière d'un tel projet. Cela inclut les coûts initiaux d'investissement, les frais d'exploitation et d'entretien, les frais de combustible, les impôts, les crédits pour production d'énergies renouvelables ou pour réduction des gaz à effet de serre. RETScreen calcule automatiquement les valeurs des principaux indicateurs financiers reconnus pour déterminer la rentabilité d'un projet. . Dans le cas de notre étude, plusieurs paramètres n'ont pas été pris en compte et ceci est dû au manque de données nécessaire à la réalisation d'une étude financière approfondie.

En général, la décision d'investir ou non dans le projet proposé sera de s'assurer que le TRI du projet dépasse un seuil minimum qui est le rendement minimum que l'on attend de ce type d'investissement.

Conclusion :

L'utilisation du bois comme source d'énergie est une alternative intéressante et prometteuse qui a toute sa place parmi les énergies renouvelables. En effet, le bois est une source d'énergie renouvelable qui peut se substituer aux énergies fossiles et permettre en même temps de lutter contre le réchauffement climatique (effet de serre) car, à la différence des énergies fossiles, le CO₂ émis lors de sa combustion est celui qu'il a absorbé pour se développer. De plus, le bois-énergie peut être une excellente valorisation des sous-produits et déchets de la filière bois, mais également participer à la gestion rationnelle et durable de nos forêts et donc à la qualité des paysages et au maintien des équilibres hydrologiques et climatiques.

Le développement de la filière (récolte, transformation et utilisation du bois-énergie) est un facteur puissant de développement de l'emploi, notamment en zones rurales.

L'aspect vieillot et traditionnel du bois-énergie ne doit pas faire oublier les développements en cours et l'existence de systèmes performants qui permettent de produire de la chaleur, de l'électricité et des deux à la fois (cogénération) à partir du bois. Il convient cependant, comme pour toutes les autres sources d'énergie, d'étudier préalablement les opportunités pour adapter au mieux ces systèmes aux besoins.

La simulation effectuée grâce à l'outil d'analyse RETScreen® nous montre l'investissement dans un projet de bois énergie peut être économiquement viable. Cependant, le coût d'une installation automatique au bois demeure le plus souvent bien supérieur à celui d'un système au fioul ou au gaz mais des retours sur investissement peuvent être rapides en tenant compte de plusieurs paramètres comme l'aide au financement de projet d'énergie propre par l'état faire des économies en gaz et en pétrole. Toutefois, Des progrès restent à accomplir, en particulier dans les domaines des coûts et des textes visant le soutien de projets d'énergie propre comme le bois énergie car pour le moment, ce soutien n'est consenti qu'aux installations solaires ou éoliennes.

Références

- [1] www.fao.org
- [2] ADEME ; Evaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions de polluants atmosphérique; 2009.
- [3] Deglise X. ,Donnot A. ,Bois énergie-Traité génie énergétique, Technique de l'ingénieur, BE 8 535, 2004.
- [4] Sawerysyn Jean-Pierre, La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air, Air pur-N° 81, 2012.
- [5] Rogaume Yann, Production de chaleur à partir du bois-Combustible et appareillage, Technique de l'ingénieur, BE 8 747, 2011.
- [6] Biomasse pour le chauffage, Technique de l'ingénieur, tba2625, 2007.
- [7] Rogaume Yann, Production de chaleur à partir du bois-Emissions atmosphériques-Notions de base, Technique de l'ingénieur, BE 8 750, 2011.
- [8] Ikermoud M., Evaluation des ressources forestières nationales, Alger : Direction Générale des Forêts, 2000, 39p.
- [9] FAO, Evaluation des ressources forestières mondiales-Rapport National-Algérie, Rome, 2010, 47p.
- [10] Ouelmouhoub S. ,Gestion multi-usage et conservation du patrimoine forestier : cas des subéraies du Parc National d'El Kala (Algérie), Thèse Magister, CIHEAM, Montpellier, France, 2005.
- [11] Mezali M. ,Etude prospective secteur forestier en Algérie, Direction Générale des Forêts, 2003, 10p.
- [12] Ghazi A. , Rapport National de réflexion sur le secteur des forêts , Programme des nations unies pour le developpement, 2009, 21p.

- [13] Dallemand J.F, Petersen J.E., Karp A. ,Short rotation forestry -Short Rotation Coppice and perennial grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives , JRC Scientific and Technical Reports, Italy, 2007.
- [14] Hilton B. ,Growing short rotation coppice-Best practice guidelines for applicants to energy crop system, DEFRA Publications, London, UK, 2004.
- [15] Garcia J. ,Guyen N., Espèces ligneuse pour la production de biomasse, FCBA, 2008.
- [16] Tubby I., Armstrong A., Establishment and Management of short rotation coppice-Forestry practice note, Edinburgh: Forestry Commission, UK, 2002.
- [17] Tillier S. ,Gérer durablement la forêt méditerranéenne, Thèse Doctorat, Université du Maine-Le Mans,France, 2011.
- [18] Gonclavès E., Thibault J.P. ,Cours Cycles Thermodynamique des Machines Thermiques, Institut Polytechnique de Grenoble,France, 2008.
- [19] Nussbaumer T. ,Jenni A. ,Chauffage au bois-Planification et exécution, Suisse énergie-Office Fédéral de l'énergie, 2003, 174p.
- [20] www.retscreen.net
- [21] [www.nextenergies.com/media/e-documentation/ressourcebiomasse/ADEME Rapport prix bois 2010-2011.pdf](http://www.nextenergies.com/media/e-documentation/ressourcebiomasse/ADEME_Rapport_prix_bois_2010-2011.pdf)