

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'Etudes

En vue de l'Obtention des Diplômes d'Ingénieur d'Etat et de Master en Génie
Chimique

Thème

Evaluation du Potentiel de Biomasse en Algérie

Etudié par :

BENBRAHIM Racha Rahil

RAHMANI Abdelkader

Soutenu le 26 juin 2013 devant le jury suivant :

Président :	CE.CHITOUR	Professeur, ENP
Examinatrices :	R.DERRICHE	Professeur, ENP
	A.TCHOULAK	Maitre assistante A, ENP
Invité :	O.ZANNDUCHE	C.R.-INFR
Rapporteurs :	T. AHMED-ZAID	Professeur, ENP
	S.HADDOUM	Maitre assistante A, ENP

Remerciements

Nous remercions notre Dieu le tout Miséricordieux pour ses grâces à notre endroit, qui nous ont fortifié dans la persévérance pour mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions infiniment nos chers parents de nous avoir offert tout ce dont nous avons besoin pour être toujours à la hauteur et réussir dans notre vie.

Nous remercions vivement nos promoteurs, Mr T.AHMED ZAYED et Mme S.HADDOUM, pour l'aide qu'ils nous ont apportée, et leurs conseils instructifs durant l'élaboration de ce mémoire.

Nous souhaitons manifester notre reconnaissance particulièrement à Mr.LOKMAN, responsable de direction de gestion des forêts pour toutes les informations relatives au domaine de foresterie.

Nous tenons à remercier Professeur CE.CHITOUR pour avoir accepté présider le jury.

Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements à Mme R.DERRICHE, Mme A.TCHOULAK et Mr O.ZANDOUCHE pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous voudrions exprimer notre profond respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon
oncle*

A Mes très chers parents, mes frères et ma sœur

A Toute la famille RAHMANI

A mon binôme Racha

A Mes amis et tous ceux qui en seront honorés

Dédicaces

« *Quand il ya le souci de réaliser un dessein
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre* »

✧ *Je dédie ce travail à ...* ✍

A ma très chère mère Djamila Bendaoud

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père Ahmed

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mon très cher frère Benziane

Mon cher frère qui m'est le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Mon ange gardien et mon fidèle accompagnant dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mon petit frère Rabiee

Mon cher petit frère présent dans tous mes moments par son soutien moral et ses belles surprises sucrées. Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

*A tout mes amis du lycée SAFIA, MOHAMED AMINE, TAHER, DADI.
De l'école : SAMRA, MERIEM, HADJER, HADJIRA, mon binôme KADA ,
A mes chers oncles SAHRAOUI Ahmed , BENTHABET , qui ont toujours cru en moi et qui n'ont cessé de m'encourager.*

A tous qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite

ملخص

هذا العمل يهدف إلى تقييم إمكانات طاقة الكتلة الحيوية الخشبية في الجزائر, وذلك من خلال استخدام المعطيات حول التحقيق على الغابات في الجزائر المتوفر لدى المديرية العامة للغابات, من أجل ذلك ثلاثة محاور متكاملة تم التطرق إليها أولا التحليل الكمي والنوعي للخشب المحصي, نتائج التحليل أشارت إلى الإنتاج السنوي للخشب المتبقي وهو ما يعادل 67478 متر مكعب والتي يمكن إدخالها في التوليد المشترك للطاقة الكهربائية والحرارة في آن واحد, ثانيا الحساب النظري للقدرة الكهربائية والحرارية الناتجتين عن التوليد المشترك, ثالثا استخدام برنامج مساعد على اتخاذ القرارات فيما يتعلق بمشاريع الطاقات المتجددة حول إمكانية فتح محطة لتوليد الطاقة المشتركة في الجزائر, بعد التحليل التقني والمالي البرنامج اظهر نتائج جد مشجعة لاتخاذ خطوة لدراسة أعمق ومن ثم الانجاز.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة, الكتلة الحية, قياس الأشجار, التوربينات البخارية, الإنتاج المشتركة.

Résumé

Ce travail a pour objectif l'évaluation du potentiel de la biomasse bois-énergie en Algérie et ce, à travers l'exploitation des données de l'enquête sur les forêts algériennes auprès de la direction générale des forêts. Pour cela, trois tâches complémentaires sont mises en œuvre : 1) l'analyse quantitative et qualitative de bois recensés, les résultats de l'analyse indiquent une production annuelle de bois résiduel équivalente à 67478.4 m^3 qui pourrait être utilisée dans une centrale de cogénération comme combustible. 2) le calcul théorique de la capacité électrique et thermique issue de la cogénération. 3) l'utilisation du logiciel RETScreen, outil d'aide à la décision sur les énergies propres avec lequel nous avons effectué une analyse technique et financière pour un projet d'installation d'une filière de cogénération. Les résultats de l'étude nous paraissent intéressants et la réflexion autour de ce sujet mérite d'être poursuivie pour examiner les possibles mesures d'incitation en faveur de ce type de projets de production d'énergie renouvelable.

Les mots clés : énergie renouvelable, biomasse, dendrométrie, cogénération, turbine à vapeur.

Abstract

This work, deals with the biomass assessment in the case of wood fuel using forestry by-products in Algeria. Using data survey provided by the " Direction Générale des Forêts", the annual production of wood equivalent residual amounts to 67478 m^3 . This quantity could be used to fuel a cogeneration power plant for the combined production of heat and electricity. RETScreen Software was used to simulate a cogeneration unit both from the environmental and economical standpoints. The simulation seems to provide encouraging results and discussion to include as many incentives in the area of renewable energy production should be taken further.

Key words : renewable energy, biomass, dendrometry, cogeneration, steam turbine.

Table des matières

Introduction

Introduction	1
---------------------------	----------

Chapitre I : Une étape Vers une Evaluation des volumes de bois disponible

I. Introduction	5
------------------------------	----------

II. La dendrométrie	5
----------------------------------	----------

II.1. Objectifs de la dendrométrie	5
--	---

II.2. Quelques descriptions	5
-----------------------------------	---

II.2.1. L'arbre	5
-----------------------	---

II.3. Les variables dendrométriques	7
---	---

II.4. Les outils de dendrométrie – Description et modes d'utilisation	8
---	---

II.4.1. Le compas forestier et le ruban dia métrique	8
--	---

II.4.2. Le relascope de Bitterlich	9
--	---

II.4.2.1. Principe	9
--------------------------	---

II.4.2.2. Utilisation	10
-----------------------------	----

III. Etudes de recollement, tarifs de cubage, analyse de cernes	11
--	-----------

III.1. Introduction	11
---------------------------	----

III.2. Catégories de bois	13
---------------------------------	----

III.3. Quelques définitions en technique de recollement	15
---	----

III.5. L'élaboration des tarifs de cubage	16
---	----

III.5.1. Principe	16
-------------------------	----

III.5.2. Echantillon et domaine de validité	16
---	----

III.5.2.1. Domaine de validité des tarifs de cubage	16
---	----

III.5.2.2. Taille de l'échantillon	17
--	----

III.5.2.3. Le cubage des bois sur pied	17
--	----

III.5.2.4. L'analyse des données et la construction des tarifs de cubage	17
--	----

III.5.2.4.1. Un exemple de courbe d'ajustement	17
III.6. L'analyse de cernes – Application aux études de croissance de quelques essences	19
III.7. Mesures par satellite	20
IV. Conclusion.....	21

Chapitre II : Aperçu sur la forêt Algérienne

I .Introduction	22
II. Répartition des terres en Algérie du Nord	22
III. Répartition des superficies forestières en Algérie.....	23
IV. Répartition des forêts par essences	25
IV.1. Volume sur pied.....	26
IV.2. La production nationale ligneuse	28
IV.2.1. Production des forêts aménagées	28
IV.2.2. Production des forêts non aménagées.....	28
V. Débouchés des bois locaux	28
VI. Structure de la production nationale ligneuse	31
VI.1. Les reboisements	33
VI.1.1. Le reboisement industriel.....	33
VI.1.2. Les reboisements de production	34
VI.1.3. Les reboisements de protection (érosion hydrique et désertification) :	35
VI.2. Planification physique et financière.....	37
VI.2.1. Bilan des réalisations cumulées au 30.06.2012.....	37
VII. Les prix du bois :.....	39
VII.1. Tarifs du bois local :	39
VII.2. Circuit économique du bois en Algérie	39
VIII. Conclusion.....	40

Chapitre III : Valorisation énergétique de la biomasse résiduelle forestière

I. Introduction	42
II. Contenu énergétique du bois.....	43
II.1. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	43
II.2. Essence du combustible	44
II.3. Humidité du combustible.....	45
III. La cogénération :	45
III.1. Définition :.....	45
III.2. Le principe de la cogénération :.....	46
III.3. Traitement de la biomasse forestière.....	49
III.4. Dimensionnement d'une installation de cogénération :	49
III.5. Tri génération :.....	50
III.6. Les réseaux de chaleur :	51
Conversion de la biomasse forestière de l'Algérie en énergie par voie de cogénération (électricité et chaleur) :.....	53
Partie I :Analyse de la conversion énergétique de la biomasse	53
IV.1. Méthodologie :.....	53
IV.2. Résultats	54
IV.2.1. Calcul de la masse de bois résiduel	54
IV.2.2. Calcul de pouvoir calorifique inférieur PCI :.....	55
IV.2.3. Calcul d'énergie :.....	55
IV.2.4. Calcul de puissance électrique théorique :	55
IV.2.5. Calcul de puissance de chaleur	56
IV.3. Discussion des résultats :.....	56
Partie II : Analyse de projets d'énergie propre issue de la biomasse en Algérie par RETScreen.....	57
IV.1. Le Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen	57
IV.2. Projet de production de chaleur et de l'électricité – turbine a vapeur:	59
IV.2.1.Démarrer	59

IV.2.1.1. Informations sur le projet	60
IV.2.1.2. Conditions de référence du site.....	60
IV.2.2. Charge et conception du réseau RETscreen.....	61
IV.2.2.1. Projet de production de chaleur du cas de référence	61
IV.2.2.2. Système de production d'électricité du cas de référence	64
IV.2.3. Modèle énergétique RETscreen :	65
IV.2.3.1. Système de production d'électricité du modèle proposé :.....	65
IV.2.3.2. Caractéristique du cas proposé :	66
IV.2.3.2.1. Electricité :	66
IV.2.3.2.2. Chaleur	67
IV.2.3.2.3. Sommaire du cas proposé :	68
IV.2.3.3. Analyse des émissions :	68
V. Conclusion	69

Conclusion

Conclusion Generale.....	71
---------------------------------	-----------

Références

Références :	73
---------------------------	-----------

Annexes

Annexe1 : Les études de recollement	75
1.1. Objectifs	75
1.2. Les coefficients d'exploitation	75
1.2.1. Objectif	75
1.2.2. Calcul des coefficients d'exploitation à partir des résultats de l'inventaire d'aménagement :	75
1.3. Le calcul des coefficients de commercialisation	76
1.3.1. Généralités	76

1.3.2. Estimation des rebuts laissés en forêt	77
1.3.3. Estimation des pertes sur parc	77
1.3.4. Suivi de la bille	78
Annexe 2 Aménagement forestier contre les incendies, les maladies et les attaques des ravageurs	78
Annexe 3	79

Liste des figures:

Figure 1 : Description de l'arbre [Réf 2].	6
Figure 2 : Mesures du diamètre de référence [Réf 2].....	7
Figure 3 : Compas forestier [Réf 2]	9
Figure 4 : Le relascope de Bitterlich [Réf 2]	9
Figure 5 : Relascope de Bitterlich [Réf 2]	10
Figure 6 : De l'effectif inventorié à une estimation du volume commercialisable [Réf 2].....	12
Figure 7 : Parties marchandes (vert) et non marchandes (bleu foncé) des résineux et des feuillus [Réf 3]	13
Figure 8 : Catégories de bois [Réf 14].....	14
Figure 9 :Exemple d'un courbe d'ajustement [Réf 2]	19
Figure 10 : Mesure des anneaux de croissance sur une coupe transversale de tronc d'okoumé [Réf 2]	20
Figure 11 : Taux de boisement en Algérie.....	24
Figure 12 - Répartition de la couverture forestière par wilaya en Algérie (2007) [Réf 6].....	24
Figure 13 : Estimation de volume sur pied.....	27
Figure 14 : Evolution de la production annuelle de bois en Algérie [Réf 6].....	32
Figure 15 : Potentiel de bioénergie dans divers secteurs d'énergie en 2050 (exajoule par année) [Réf 10].....	43
Figure 16 : Plage de variation du pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre selon les essences en KWh/t [Réf 18]	44
Figure 17 : Caractéristiques du bois selon l'humidité[Réf 18]	45
Figure 18 : Principe de fonctionnement d'une cogénération par turbine à vapeur selon cycle de Hirn [Réf 12]	47
Figure 19 : Principe de fonctionnement d'une centrale de cogénération d'électricité et de vapeur à partir de la biomasse [Réf 13]	49
Figure 20 : Réseau de chaleur alimenté par une cogénération [Réf 15].....	52
Figure 21 : Schéma de projet de production de chaleur et de l'électricité [RETSscreen].....	59
Figure 22: Schéma d'un réseau de chauffage[Réf 20]	62

Figure 23: Les pertes de bois au cours des différent étapes de l'exploitation[Réf 2]..77

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des différents variables d'un exemple de courbe d'ajustement [Réf 2].....	18
Tableau 2 : Essences dont les cernes d'accroissement sont annuels et facilement discernables [Réf 2].....	20
Tableau 3 : Occupation des terres forestières [Réf 5]	22
Tableau 4 : Superficies forestières par région en Algérie [Réf 6].....	23
Tableau 5 : Répartition des essences constituant la forêt en Algérie [Réf 7]	25
Tableau 6 : Estimation de volume sur pied [Réf 7]	26
Tableau 7 :L'évolution de la production nationale ligneuse depuis l'indépendance jusqu'en 2005 [Réf 6].....	30
Tableau 8 : La production moyenne annuelle des bois d'oeuvre, d'industrie, de chauffage et de liège [Réf 6].....	32
Tableau 9 : Wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement industriel [Réf 6]	34
Tableau 10 : L'indice de productivité de quelques wilayas [Réf 6]	34
Tableau 11 : Les wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement de production [Réf 6]	35
Tableau 12 : La répartition des surfaces à reboiser par espèce [Réf 6].....	35
Tableau 13 : Wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement de protection [Réf 6].....	36
Tableau 14 : Bilan des réalisations cumulées au 30.06.2012 [Réf 6]	38
Tableau 15 : Tarifs de produits forestier locaux en Dinars algériens [Réf 9].....	39
Tableau 16 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre feuillus [Réf 18]	44
Tableau 17 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre résineux [Réf 18].....	44
Tableau 18 : Part de la cogénération dans quelques pays en 2000 [Réf 11]	46
Tableau 19 : Exemple de coefficients d'exploitation [Réf 2]	76

Introduction

Pour répondre à une demande énergétique croissante tout en préservant notre milieu de vie, il est impératif de développer l'utilisation des énergies renouvelables. Avec l'augmentation de l'efficacité énergétique, c'est l'un des deux moyens les plus significatifs pour réduire les émissions de CO₂ et atteindre les objectifs de réduction des gaz à effet de serre et de lutte contre les changements climatiques tel que cela est consigné dans les différentes conventions et protocoles internationaux auxquels notre pays a déjà souscrit.

Aujourd'hui, la biomasse (résidus agricoles et sous-produits de l'agro-industrie, boues des stations d'épuration, bois, part organique des déchets ménagers, algues...) représente une part non négligeable d'énergie renouvelable. Elle est en effet utilisée comme combustible ou méthanisée pour produire de la chaleur, de l'électricité, du biogaz ou encore du biocarburant. Pourtant, force est de constater que cette énergie verte reste encore sous-exploitée.

Les travaux des chercheurs sur la biomasse concernent aussi bien le domaine des déchets et de l'énergie, que ceux de l'eau ou même des transports. Leurs solutions intéressent différents secteurs d'activité, qu'il s'agisse des collectivités, de l'industrie ou de l'agriculture. Ces travaux visent notamment à :

- mieux connaître les ressources mobilisables à l'échelle des régions et des industries ;
- identifier leur potentiel énergétique ;
- optimiser leurs procédés de valorisation, qu'il s'agisse des technologies existantes (combustion et méthanisation) ou émergentes (gazéification, torréfaction et pyrolyse), pour améliorer les rendements ;
- développer un système de gestion des bouquets énergétiques pour bien cerner le secteur de l'énergie sur le plan de l'offre et de la demande locales.

Vu le manque de données statistiques concernant les matières organiques en dehors du bois dans notre pays, nous n'allons considérer, dans notre travail, qu'à l'étude, en théorie du moins puisqu'il s'agit d'une simulation sur la base de nombreuses hypothèses, d'une filière de bois-énergie à l'instar de celles qui existent déjà dans de nombreux pays.

Mais avant de commencer l'étude, beaucoup de questions auxquelles il faut apporter des réponses restent posées. Quel est donc ce potentiel de bioénergie ? La bioénergie forestière est-elle bénéfique pour l'environnement ? Nos forêts sont-elles gérées de manière durable pour une bonne viabilité des projets qu'on pourrait proposer ?

Ce sont là des questions qui vont nous obliger à faire des incursions dans un domaine assez éloigné du génie chimique : celui de la foresterie qui fournit l'essentiel de la matière première que nous allons considérer, le bois, dans toutes ses variétés et les résidus forestiers.

La biomasse forestière est constituée de toutes les parties de l'arbre : le tronc, l'écorce, les branches, les aiguilles ou les feuilles et même les racines. Il est possible de convertir cette biomasse en biocombustibles solides, liquides ou gazeux que l'on peut brûler pour produire de l'énergie, ou utiliser comme combustibles de remplacement pour le transport ou les procédés industriels. Les arbres sont utiles sur le plan énergétique: ils convertissent l'énergie du soleil

en biomasse grâce à la photosynthèse, un processus qui absorbe du dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Au Canada, par exemple, la plus grande partie de la biomasse forestière utilisée pour produire de la bioénergie provient de déchets ou de résidus de procédés de fabrication. La bioénergie forestière représente une part importante de l'énergie utilisée dans le secteur des pâtes et papiers (58 % en 2007), surtout parce qu'il est avantageux, sur le plan économique, de convertir en énergie ce qui constituerait autrement un déchet devant être enfoui ou incinéré. Diverses technologies permettent de convertir la biomasse en énergie. Les producteurs de pâtes et papiers produisent ainsi de l'énergie en brûlant le déchet liquide (appelé liqueur noire) issu du procédé de désintégration dans une chaudière de récupération qui permet également le recyclage de substances chimiques. Les producteurs de pâtes, de papiers et de bois d'œuvre brûlent aussi des déchets ligneux (surtout de l'écorce) : la chaleur et parfois la vapeur obtenues permettent d'actionner des turbines et de produire de l'électricité. Toutefois, on s'intéresse de plus en plus à produire de la bioénergie à partir de l'utilisation de sous-produits de biomasse se trouvant sur des sites de coupe ou des sites perturbés, qu'il s'agisse de branches, d'arbres de faible valeur, de résidus laissés au sol après des coupes, des incendies ou des infestations d'insectes, ou de résidus d'exploitation empilés en bordure de route. La culture ou la coupe d'arbres destinés à la production de bioénergie suscite également un intérêt croissant.

Compte tenu de la fluctuation des prix de l'énergie et des préoccupations grandissantes concernant les changements climatiques, les entreprises et les gouvernements considèrent de plus en plus la bioénergie pour assurer la sécurité énergétique, et comme solution de remplacement économique et écologique aux combustibles fossiles. La récente baisse de prix des produits forestiers et les difficultés financières éprouvées par ce secteur ont aussi stimulé l'utilisation de biomasse forestière pour la production d'une gamme de bioproduits, dont la bioénergie, qui viennent s'ajouter aux produits forestiers classiques ou les remplacer [Réf 1].

La transition vers une bio-économie s'accompagne d'un intérêt accru pour les bioproduits à valeur élevée susceptibles d'améliorer le résultat net, comme les produits biochimiques et les biomatériaux pouvant remplacer des produits similaires fabriqués à l'aide de combustibles fossiles et qui sont souvent produits en même temps que la bioénergie. Il est également possible d'augmenter la production de bioénergie en employant de nouvelles technologies de conversion permettant de mieux capter l'énergie enfermée dans les résidus de produits forestiers.

La biomasse forestière constitue une source renouvelable de matières premières pour la production d'énergie. À la condition que cette biomasse provienne d'une forêt gérée de manière durable et renouvelée par régénérescence, on peut considérer que les émissions de gaz à effet de serre (GES) découlant de la production de bioénergie compensent - du moins dans une large mesure - les émissions attribuables aux combustibles fossiles. En effet, durant son cycle biologique, le carbone est absorbé par les arbres et s'intègre à la biomasse forestière; lorsque les arbres meurent et se décomposent, le carbone est rejeté dans l'atmosphère, puis réabsorbé pour assurer la régénérescence de la forêt. La conversion de la biomasse en énergie permet de capturer efficacement l'énergie du carbone. Bien que cette conversion entraîne

l'émission de dioxyde de carbone et d'autres GES dans l'atmosphère, elle remplace aussi l'utilisation de combustibles fossiles, et permet d'éviter les émissions carboniques qui y sont associées. La biomasse forestière peut donc être utilisée pour produire de l'énergie, tandis que la croissance continue de la forêt permet de « re-capter » la plus grande partie du dioxyde de carbone émis par cette production. La séquestration du carbone s'échelonne toutefois sur toute la période nécessaire pour que la forêt reprenne sa taille initiale, et même plus. Comme la bioénergie forestière présente une valeur énergétique inférieure à celle des combustibles fossiles, elle peut en fait générer, à court terme, des émissions de CO₂, plus importantes. Au fil du temps, elle présente cependant un bilan positif pour l'atmosphère en raison du caractère renouvelable de la forêt; la bioénergie constitue donc un moyen efficace de réduire les émissions nettes de GES. La période durant laquelle des bénéfices sont réalisés dépend du type de combustible fossile remplacé, de la technologie de conversion employée, des taux de croissance de la forêt ainsi que des usages et du cycle de vie du bois ou des résidus utilisés s'ils n'avaient pas servi à produire de la bioénergie.

Les forêts nous fournissent toutes sortes de produits et services, qu'il s'agisse de produits courants comme le bois d'œuvre destiné à la construction de maisons et le papier journal, ou encore de parcs et d'étendues sauvages ou d'autres services environnementaux. L'intérêt croissant que suscite la bioénergie soulève plusieurs questions. Il faut d'abord déterminer la quantité de biomasse forestière que l'on peut prélever d'un site sans en réduire la durabilité du point de vue de l'environnement, ce qui comprend la productivité.

Les forêts constituent une ressource renouvelable, et de nombreux règlements sont adoptés pour assurer leur exploitation responsable et leur régénération complète. Par le passé, seuls les troncs d'arbre étaient récoltés, selon le mode d'exploitation par tronc entier. Le reste de la biomasse abandonnée sur le parterre de coupe se décomposait, restituant des nutriments au sol et fournissant nourriture et habitat à toutes sortes d'organismes et d'animaux. Aujourd'hui, on récolte souvent toutes les parties aériennes de l'arbre, selon le mode d'exploitation par arbres entiers, la tête des arbres et les branches étant entassés au bord des routes. L'optimisation de l'utilisation de la biomasse pourrait favoriser le mode d'exploitation par arbres entiers. Dans les pays nordiques, au Royaume-Uni et dans certaines régions des États-Unis, on a toutefois noté des pertes de productivité à la suite du prélèvement intensif de biomasse forestière. Les scientifiques forestiers cherchent maintenant à déterminer la quantité de biomasse, en plus des troncs, pouvant être prélevée de façon continue dans différents types de sites, en vue d'établir des directives à l'intention des aménagistes forestiers. Selon les résultats préliminaires des chercheurs, la quantité de biomasse supplémentaire pouvant être retirée des sites varie en fonction de nombreux facteurs, dont le type de sol et sa profondeur ainsi que les conditions climatiques. Les chercheurs évaluent également la faisabilité de cultiver des arbres expressément pour produire de l'énergie. Compte tenu de l'augmentation des prix de l'énergie et des avancées technologiques, les plantations énergétiques et le prélèvement intensif de biomasse forestière sur les parterres de coupe pour produire de l'énergie présenteront probablement un intérêt économique de plus en plus grand.

On prévoit que les forêts détruites par des incendies ou des insectes produiront deux fois plus de bois mort que les forêts récoltées; la totalité de ces résidus ne sera cependant pas immédiatement disponible. Le bois mort laissé sur les parterres de coupe ou les sites perturbés

par des incendies ou des infestations d'insectes se décompose et libère du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. On pourrait penser qu'il est préférable de récupérer ce bois mort et de le convertir en bioénergie; le carbone serait alors rejeté rapidement dans l'atmosphère, alors qu'il le serait lentement si le bois se décomposait naturellement. Tout dépend cependant de la période considérée. La bioénergie forestière présente généralement une valeur énergétique moindre et émet davantage de GES par unité d'énergie produite que les énergies obtenues au moyen de combustibles fossiles (au moment où le combustible est converti en énergie). La conversion de bois récupéré en bioénergie compense donc l'utilisation de combustibles fossiles, mais entraîne dans l'immédiat des émissions de carbone plus élevées. À court terme, les émissions sont moindres si on laisse le bois mort se décomposer lentement dans la forêt. Mais la bioénergie entraîne toujours des émissions nettes inférieures à long terme (ce peut être sur plusieurs décennies), car l'utilisation d'une certaine quantité de combustibles fossiles a été compensée de manière « permanente » par l'utilisation de biomasse qui se serait décomposée de toute façon. Le point d'équilibre est plus vite atteint lorsqu'on emploie une biomasse à décomposition rapide, comme des résidus d'exploitation, plutôt que des grosses grumes, lorsque la biomasse est convertie en énergie avec une efficacité accrue, et que la technologie remplacée entraîne des émissions de GES élevées par unité d'énergie produite (par exemple, le mazout comparativement au gaz naturel). Le point d'équilibre est plus long à atteindre si une partie de la régénération préexistante est perdue à cause de la coupe de récupération, et est fonction de l'ampleur de cette perte et du stade de succession. La pratique consistant à brûler les résidus d'exploitation sur place ou à les empiler en bordure de route en vue de leur élimination est néfaste, car elle entraîne le rejet immédiat du carbone sans que l'énergie soit captée de façon à compenser l'utilisation de combustibles fossiles.

La comptabilisation sur l'ensemble du cycle de vie de toutes les émissions et de la séquestration du carbone, du début du processus à la consommation finale, est essentielle si l'on veut comparer les effets nets sur le carbone atmosphérique de différentes sources d'énergie par unité d'énergie produite [Réf 1].

Cette étude a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une collecte d'information a permis d'identifier les méthodes et outils d'évaluation appropriés pour estimer le potentiel de récupération et de production de biomasse des secteurs d'activités forestiers, agricoles et municipaux. Pour ce faire, des personnes ressources ont été contactées et des documents de références ont été consultés et analysés. La première partie de notre travail présente les méthodologies utilisées pour estimer les quantités de biomasse résiduelle potentiellement récupérables en provenance de la forêt publique. La compilation des données et les résultats y sont présentés.

La deuxième section présente le potentiel de production de forêts Algériennes. Pour des considérations éthiques, c'est-à-dire pour éviter d'entrer en compétition avec les utilisations industrielles, seules les résidus ont été considérés dans cette étude et on mentionnera également le plan national de reboisement. La troisième section aborde la cogénération en tant que procédé de transformation accessible et adapté au « portrait biomasse » de l'Algérie, consolidé par une étude très sommaire technico-économique d'une centrale électrique de cogénération utilisant la biomasse comme combustible. Enfin une simulation sera faite en utilisant le logiciel RETScreen.

I. Introduction

La possibilité annuelle de coupe à rendement soutenu correspond au volume maximum des récoltes annuelles de bois par essence ou groupe d'essences que l'on peut prélever à perpétuité dans une unité d'aménagement donnée sans diminuer la capacité productive du milieu forestier.

Le rendement annuel correspond à la possibilité annuelle de coupe à rendement soutenu sur la base de ce qui peut être récolté en moyenne par hectare dans une aire destinée à la production forestière en tenant compte de la distribution des peuplements par classes d'âges sur cette aire forestière, des techniques sylvicoles qui peuvent s'y appliquer et des caractéristiques biophysiques de cette aire.

Dans le cas où l'aire forestière comprend des essences de qualité en feuillus ou en résineux, le rendement annuel est établi en tenant compte de techniques sylvicoles permettant non seulement de maintenir un rendement en volume, mais également d'accroître la qualité des bois produits.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter quelques éléments de « dendrométrie » qui recouvre l'ensemble des techniques permettant d'estimer le potentiel de production de bois, ainsi que les outils utilisés pour effectuer les différentes mensurations.

II. La dendrométrie

II.1. Objectifs de la dendrométrie

La dendrométrie, qui étymologiquement est le procédé de mesures des arbres, a pour objectif d'estimer le plus précisément possible : la taille, la forme, et le volume des arbres et des peuplements forestiers. Elle a, en outre, un second objectif qui est l'étude de la dynamique des arbres en peuplement, à savoir : l'évolution dans le temps des tailles, forme et volume de populations d'arbres appartenant à la même espèce ou à des espèces différentes et ceci sur un même site.

II.2. Quelques descriptions

II.2.1. L'arbre

Pour mesurer un arbre, il s'agit de définir les différentes parties qui le composent : la tige, les branches et les racines. L'intégralité des mesures ne concerne que la partie visible de l'arbre (Figure 1.A)

La tige se définit comme la partie de l'arbre que l'on suit du pied au bourgeon terminal ou bourgeon le plus élevé ;

- Les branches représentent la partie visible de l'arbre, autre que la tige.

Cette description peut être affinée (voir Figure 1.B)

- La souche : niveau inférieur de la partie de la tige extraite de forêt dans des conditions optimales d'exploitation ; typiquement le sommet des contreforts, empattements ou racines échasses, sinon entre 10 et 50 cm depuis la hauteur du sol.
- La base de la cime : niveau où la tige se ramifie nettement.
- Le fût : partie de la tige située entre la souche et la base de la cime.
- Les branches basses : branches insérées sur le fût.
- Le houppier : partie de la tige située au dessus de la base de la cime + branches insérées au dessus de la base de la cime.

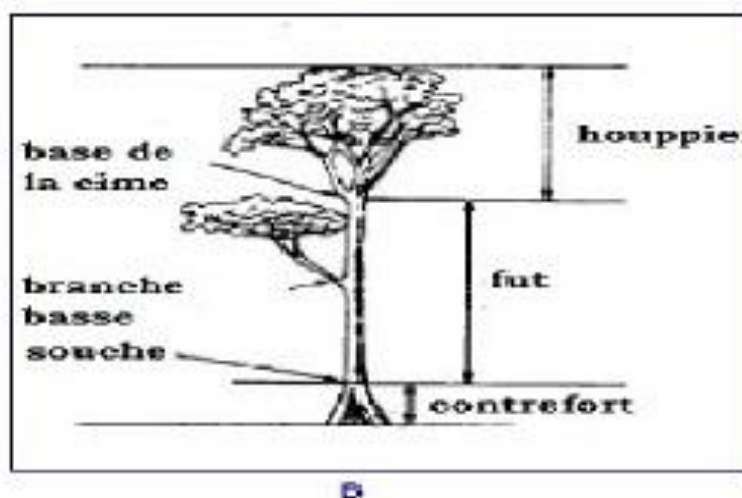
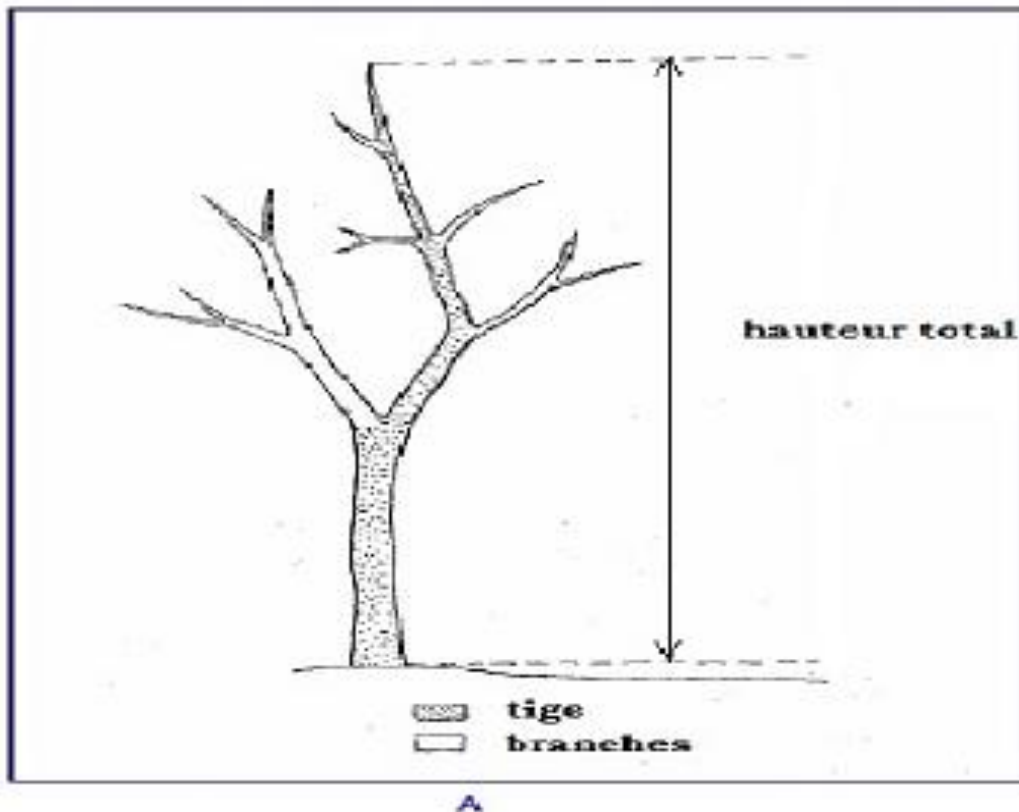


Figure 1 : Description de l'arbre [Réf 2]

II.3. Les variables dendrométriques

Les principales variables dendrométriques utilisées dans le cadre de l'aménagement sont présentées ci-après. La grosseur est décrite par le diamètre de référence, ou dhp (diamètre à hauteur de poitrine) notion dendrométrique essentielle. Sur un arbre vertical ce diamètre est mesuré :

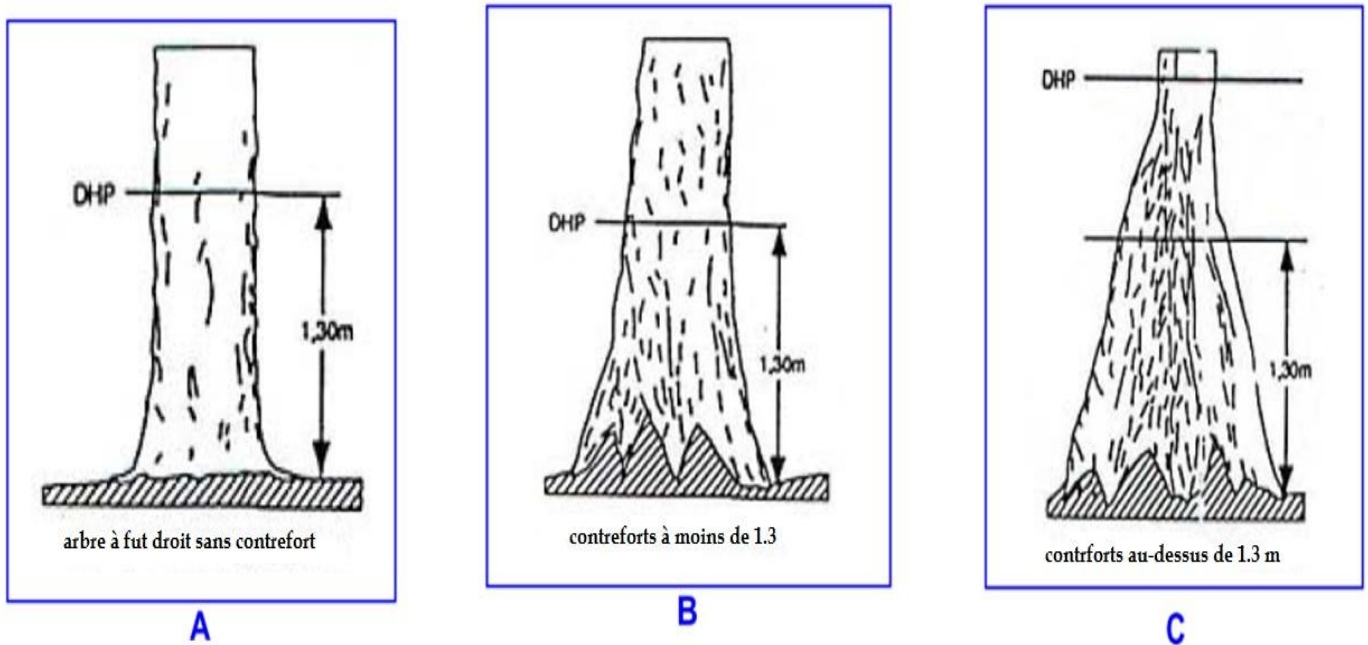


Figure 2 : Mesures du diamètre de référence [Réf 2]

- A 1,30 m du sol pour les arbres dont les contreforts (ou racines aériennes) sont inexistantes ou de hauteur inférieure à 1,30 m (Figure 2.A et B).
- A 30 cm au dessus de la fin du contrefort ou des racines aériennes si ceux-ci ont plus de 1,30 m de hauteur (voir Figure 2.C). Lors de la phase de terrain de l'inventaire, d'aménagement, seuls sont inventoriés les arbres de diamètre de référence supérieur à un diamètre minimum fixé. Ce diamètre minimum peut être, selon les protocoles, de 5, 10 ou 20 cm.

D'autres conventions sont utilisées pour mesurer le diamètre de référence dans le but de prendre en compte les différentes particularités (arbres et terrain) auxquelles peut être confrontés le compteur : arbres fourchus, terrain incliné, etc.

La densité (notée N), paramètre défini au niveau du peuplement, est le nombre de tiges sur pied ramené à l'hectare.

Formule 1 : La densité

$$N = n / S$$

avec
N : densité (en tiges/ha)
n : nombre de tiges présentes sur la surface considérée
S : surface considérée (ha)

La surface terrière (notée G), paramètre décrivant là encore le peuplement, est la somme des sections transversales au diamètre de référence de tous les arbres du peuplement.

Formule 2 : La surface terrière

$$G = \sum [(\pi / 4) \times d^2] / S$$

avec
G : surface terrière (m² / ha)
d : diamètre de l'arbre (m)
S : surface considérée (ha)

Elle s'exprime en mètres carrés, ramenée à l'hectare. Cette valeur permet de suivre l'évolution du peuplement dans son ensemble et de comparer différents peuplements.

La surface terrière d'un peuplement est égale à la somme des surfaces terrières des arbres qui le composent.

La hauteur totale d'un arbre est la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre (niveau du sol) à l'extrémité du bourgeon terminal de la tige. D'autres hauteurs peuvent être mesurées comme par exemple la hauteur du fût désignant la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre à l'endroit où la tige se ramifie (base de la cime).

Un arbre étant un objet physique complexe, il s'agit de bien identifier et définir la partie de cet objet (ou compartiment) dont on peut estimer la place qu'elle occupe dans l'espace à trois dimensions : le volume.

II.4. Les outils de dendrométrie – Description et modes d'utilisation

II.4.1. Le compas forestier et le ruban dia métrique

Pour mesurer le diamètre de référence, il est possible d'utiliser un ruban ou un compas forestier (Figure 3). Ce dernier fonctionne sur le principe du pied à coulisse. Il comporte en général deux faces. Sur l'une apparaît une règle (en cm) et sur l'autre des classes de diamètres (compas compensé).



Figure 3 : compas forestier [Réf 2]

Les rubans forestiers mesurent la circonférence d'un arbre. Certains rubans comportent une graduation en diamètre qui assure une conversion immédiate. La graduation d'un ruban forestier permet de lire directement le diamètre ou la circonférence (deux faces) de la tige mesurée.

La valeur du diamètre obtenue avec un ruban peut être sensiblement différente de celle obtenue au compas. Il est recommandé d'employer un seul de ces types d'appareils au cours d'une même étude.

II.4.2. Le relascope de Bitterlich

II.4.2.1. Principe

Le « Relascope de Bitterlich à bandes larges » est un appareil optique qui permet de mesurer le diamètre d'un tronc à différentes hauteurs (en Algérie, on utilise le relascope de Bitterlich à bandes étroites), et ce quelque soit la hauteur de mesure. C'est un appareil constitué d'un boîtier à l'intérieur duquel se déplace un pendule, sur lequel sont portées les graduations suivantes (Figure 4) :



Figure 4 : Le relascope de Bitterlich [Réf 2]

- 11 bandes larges de couleur blanche et noire alternée ;

- 4 bandes étroites de couleur blanche et noire alternée, chaque bande étroite ayant une largeur égale au $\frac{1}{4}$ de la largeur d'une bande large.

Sur chacune des 9 bandes centrales et au centre de celles-ci, est indiqué dans un cercle un chiffre pair compris entre 4 et 20. Sur ces 9 bandes larges sont indiqués, à partir du milieu de ces bandes et vers le haut, des points ronds correspondant à des mètres en hauteur.

II.4.2.2. Utilisation

Le relascope est utilisé en aménagement pour cuber les arbres sur pied en vue de l'élaboration de tarifs de cubage. Il permet de mesurer le diamètre à un point donné sur l'arbre ou à une hauteur donnée. Le premier cas est ici présenté. La première étape consiste à repérer le diamètre de référence qui marque le point de départ du fût à cuber. Ce dernier doit être repéré dans son ensemble.

L'observateur doit ensuite mesurer la distance horizontale qui le sépare de l'arbre à cuber. Cette distance, du fait de la hauteur des arbres en forêt, ne doit être en aucun cas inférieure aux $\frac{2}{3}$ de la hauteur du fût, de manière à obtenir une bonne précision des mesures. L'important est d'avoir un angle de visée le moins ouvert possible, le plus proche de 45° pour la visée la plus haute. La distance horizontale peut varier de 4 à 20 m, et doit être systématiquement paire (4m, 6 m...). Idéalement, l'opérateur doit être le plus éloigné possible du fût tout en maintenant une bonne visibilité sur la totalité de la longueur du fût à cuber. Cette mesure est réalisée à l'aide d'une corde graduée (en mètres) tendue horizontalement entre l'arbre et l'opérateur ou d'un décamètre. Un piquet matérialisant cette distance est alors planté. Il permet aussi de soutenir le relascope, support indispensable pour une bonne précision des mesures (il peut être remplacé par un trépied ou un monopied, sur lequel on visse le relascope).



Figure 5 : Relascope de Bitterlich [Réf 2]

L'observateur mesure ensuite le diamètre en relevant le nombre de bandes larges et de bandes étroites et en poussant la précision jusqu'à la demi bande étroite. En effet, une fois la hauteur de mesure repérée (pendule à droite), le diamètre à cette hauteur est mesurée selon le procédé expliqué ci-après.

L'observateur vise par l'oculaire du relascope. Le champ de vision est circulaire et divisé en deux parties séparées par une ligne horizontale (dite ligne médiane). Dans la partie supérieure du champ, l'observateur voit sans déformation l'arbre. Dans la partie inférieure, les graduations du pendule sont visibles. Une fois la ligne médiane calée sur la hauteur voulue, l'observateur compte le nombre de bandes larges et de bandes étroites couvertes par le contour apparent de l'arbre. Pour cela, il dispose le contour apparent gauche à la limite entre 2 bandes larges de manière à ce que le contour apparent droit se trouve dans la plage des bandes étroites. Le diamètre de l'arbre est ainsi mesuré (voir par un nombre entier de bandes larges auquel s'ajoute un nombre de demi-bandes étroites, la précision allant jusqu'à la demi-bande étroite).

Formule 3 : Mesure du diamètre au relascope

Le passage des unités relascope aux valeurs réelles en diamètre se fait grâce à la relation :

$$1 \text{ bande large en cm} = 2 \times \text{distance horizontale en m}$$

$$1 \text{ bande étroite en cm} = 2 \times \text{distance horizontale en m} \times \frac{1}{4}$$

L'observateur mesure ensuite la hauteur, comme suit :

Une fois la ligne médiane calée, la hauteur est fournie par le chiffre correspondant, au sein de la bande correspondant à la distance horizontale, ou peut être obtenue à partir de la pente pour les hauteurs non multiples de 2.

Les mesures se font ensuite de la même façon de, soit de 2 m en 2 m, soit aux extrémités et au milieu du fût selon l'option retenue, jusqu'au dernier billon, dont la hauteur sera estimée à partir de l'échelle de graduation du relascope .

III. Etudes De Recollement, Tarifs De Cubage, Analyse De Cernes

III.1. Introduction

Les données collectées durant l'inventaire d'aménagement permettent une estimation des effectifs bruts sur pied par essence et par classe de diamètre puis au travers du calcul d'un « coefficient d'exploitation » (également parfois appelé « taux de prélèvement »), une estimation des effectifs exploitables (Figure 6). Des études complémentaires, doivent donc être mises en œuvre afin d'obtenir une estimation des volumes effectivement commercialisables et des volumes résiduelles, données essentielles à la définition d'une stratégie viable pour la bioénergie.

Le volume brut exploitable (par essence et par classe de diamètre) est calculé à partir de l'effectif exploitable à l'aide d'une équation appelée « tarif de cubage ». Il est ensuite nécessaire d'appliquer à ce volume brut un « coefficient de commercialisation » (cette appellation, employée par tous est un peu inexacte, il s'agit plutôt d'un coefficient de

« valorisation »), calculé lors d'études dites de recollement, afin d'obtenir les volumes commercialisables (par essence et par classe de diamètre).

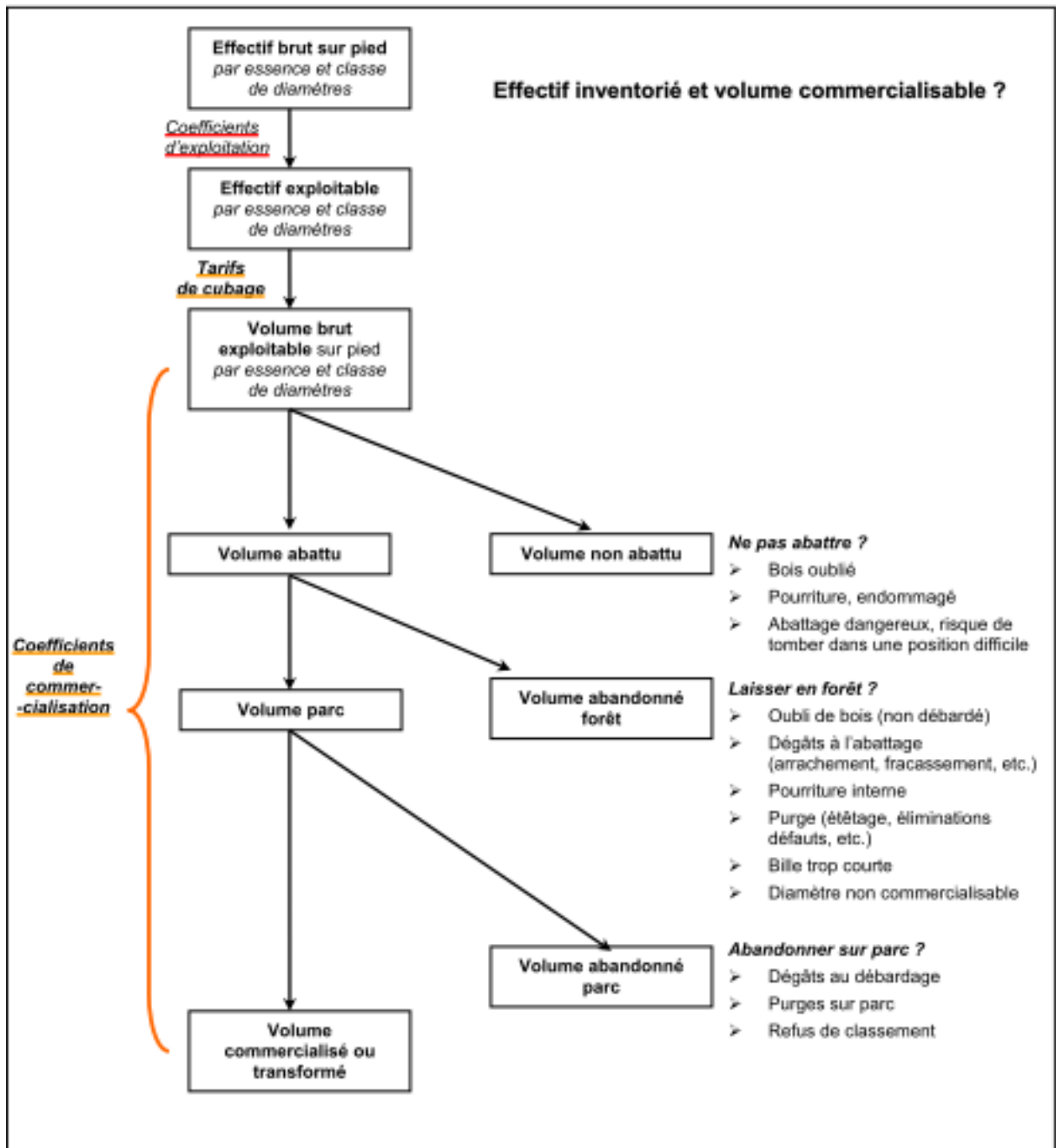


Figure 6 : De l'effectif inventorié à une estimation du volume commercialisable [Réf 2]

La biomasse résiduelle est composée de résidus provenant des secteurs forestiers, et agricoles. Ces résidus incluent les matières organiques (bois, paille, huiles, gras et déjections animales, boues d'épuration, déchets de table, etc.), ainsi que les matières « sèches » qui sont non recyclables (fibres souillées, plastiques rigides, caoutchouc, etc.). Les principaux facteurs qui déterminent la rentabilité des activités de production de bioénergie à partir de cette biomasse sont le potentiel d'approvisionnement, le coût et le transport de cette biomasse, ainsi

que le type de procédé de transformation. L'estimation des quantités disponibles à long terme et la localisation des sources d'approvisionnement doivent donc être analysées en priorité. Bien entendu, cet exercice devrait répondre aux besoins énergétiques et socio-économiques de la communauté en priorité.

Les résidus forestiers sont constitués des tiges non marchandes, des ramilles, des cimes, des souches, des racines et d'essences nuisibles lors des opérations de coupe forestière. Pour l'ensemble des forêts algériennes, ces résidus représentent 48 % du volume total. [chiffre calculé à partir de tableau 7 .

Bien que les branches, les feuilles et les souches constituent aussi une source de biomasse disponible, elles sont considérées comme étant économiquement non récupérables (figure 7).

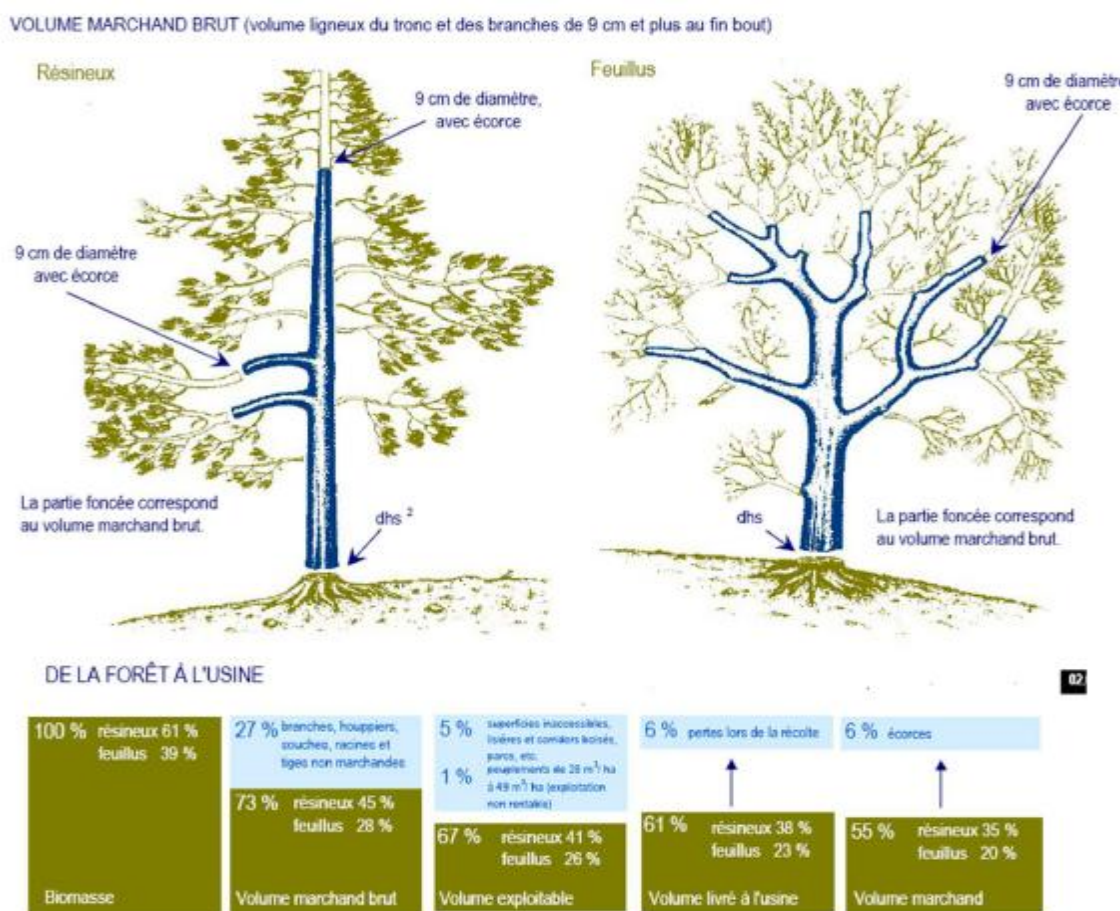


Figure 7 : Parties marchandes (vert) et non marchandes (bleu foncé) des résineux et des feuillus [Réf 3]

III.2. Catégories de bois

Pour résumer, trois catégories d'usages potentiels des bois sont définies, sans présumer de leurs usages effectifs :

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.

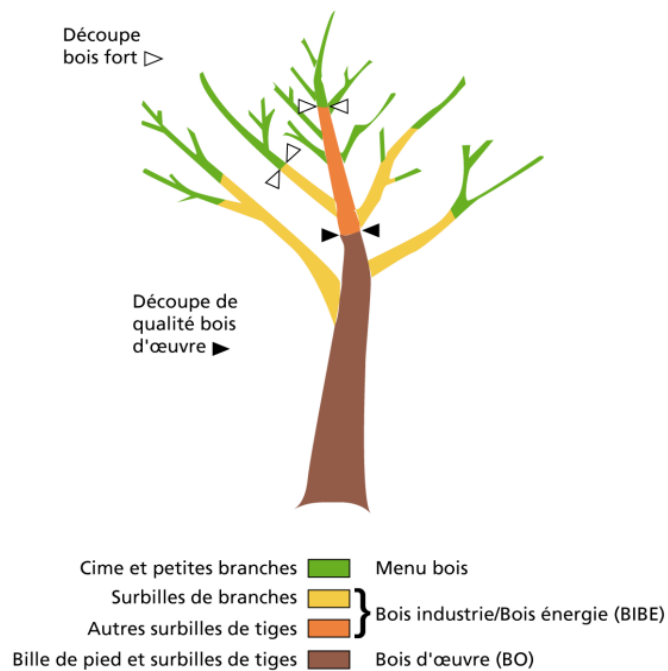


Figure 8 : Catégories de bois [Réf 14]

III.3. Quelques définitions en technique de recollement

- Le bois est le xylème secondaire qui assure la conduction de la sève brute chez les plantes ligneuses (Gymnosperme « conifères ») et Angiospermes « dicotylédones »). Chez les plantes pérennes (arbres, arbustes et buissons), le xylème secondaire ou bois se développe chaque année et forme un tissu résistant qui assure à la fois la conduction de la sève et la résistance mécanique de la plante. C'est ce tissu qui permet aux arbres de développer un tronc à des hauteurs considérables.
- Les effectifs bruts sur pied : ils correspondent au nombre d'arbres sur pied par essence et par classe de diamètre, estimés d'après l'inventaire d'aménagement.
- Les effectifs exploitables: ils correspondent au nombre d'arbres sur pied ayant atteint le diamètre minimum d'exploitabilité pour une espèce donnée, qui seront effectivement mis en exploitation en fonction de la qualité du fût.
- Le volume brut exploitable : il correspond au volume brut des effectifs exploitables. Ce volume est obtenu en appliquant pour une essence et un diamètre donné une formule appelée « tarif de cubage ». Le volume ainsi estimé correspond au volume moyen du fût depuis le haut des contreforts jusqu'à la première grosse branche.
- Le volume brut abattu = volume brut exploitable – volume brut non abattu : il correspond au volume brut des effectifs réellement exploités
- Le volume parc : c'est le volume moyen d'un fût arrivé sur le parc à bois (bord de route, en sortie de débardage), il est estimé en appliquant un coefficient au volume exploitable.
- Le volume commercialisable (ou valorisable): le fût ramené au parc subira à nouveau des purges, et les billes commercialisées seront cette fois-ci cubées soit sous écorce, soit sous aubier, ce qui n'est pas le cas lors du cubage sur pied, et avec un cubage en général plus précis. Le volume commercialisable est obtenu à partir d'un coefficient de commercialisation appliqué au volume exploitable. Ce coefficient est propre à chaque essence ou groupe d'essences, et dépend lui aussi du marché et de l'équipement industriel de la société.

$$\text{volume résiduel} = \text{volume exploitable} - \text{volume commercialisable}$$

On suppose que 80% du volume résiduel est récupérable [Réf 4]

Dans la suite nous appellerons le bois résiduel: bois de chauffage ; le bois commercialisable bois d'œuvre et d'industrie).

D'où l'importance de calculer le volume commercialisable (détails donnés en annexe 1)

III.5. L'élaboration des tarifs de cubage

III.5.1. Principe

Un tarif de cubage est un tableau chiffré, une formule ou un graphique, qui donne une estimation du volume d'un arbre (tarif individuel) ou d'un ensemble d'arbres en fonction de diverses variables, appelées « entrées » du tarif.

Les tarifs utilisés pour l'aménagement des forêts naturelles de production sont des tarifs individuels à une entrée : pour déterminer le volume brut d'un arbre, conventionnellement compris entre le diamètre de référence de l'arbre et le départ de la première grosse branche (le fût), on utilise la seule variable mesurée sur le terrain, le diamètre de référence.

Les tarifs à double entrée sont préférables car en faisant intervenir la hauteur et le diamètre des arbres, ils permettent d'atteindre une meilleure précision. Un tarif de cubage individuel ne peut pas permettre d'estimer avec une bonne précision le volume d'un seul arbre. Ce type de tarif sert à estimer le volume d'un lot d'arbres d'une essence donnée comme somme des volumes d'arbres individuels. Les données nécessaires à l'élaboration des tarifs sont récoltées à trois niveaux :

- Mesures de terrain d'arbres sur pied (étude au relascope) ;
- Mesures de terrain d'arbres abattus (lors de l'étude de recollement).
- Données bibliographiques.

III.5.2. Echantillon et domaine de validité

III.5.2.1. Domaine de validité des tarifs de cubage

En général, le diamètre de référence minimal concernant l'élaboration d'un tarif de cubage pour les arbres des essences étudiées est de 30 cm. Les tarifs ne sont donc valables que pour les arbres de diamètre supérieur à 30 cm.

Enfin, la variabilité naturelle des peuplements forestiers impose dans la mesure du possible l'élaboration de tarifs de cubages spécifiques à la zone à aménager, typiquement de l'ordre de quelques centaines de milliers d'hectares. Dans le cas de deux zones proches concédées à une même société, une analyse préliminaire peut permettre de tester s'il y a une différence statistique significative entre les deux.

Pour le choix de l'échantillon il faut constituer si possible un échantillon mixte d'arbres à cuber sur arbres abattus et arbres sur pied lorsque cela est possible. En tout état de cause, à défaut d'arbres abattus, l'échantillon peut être constitué à 100% par les arbres sur pied .

III.5.2.2. Taille de l'échantillon

Il est démontré qu'un échantillon variant de 50 à 100 arbres est suffisant pour l'élaboration d'un tarif pour une essence dans une région donnée, ou du moins que l'augmentation de l'échantillon au-delà de cette valeur n'améliore pas la qualité de la régression.

III.5.2.3. Le cubage des bois sur pied

Le principe consiste à « découper » le fût à cuber en billons fictifs de 2 m de hauteur, et de mesurer les diamètres situés à l'extrémité de chacun de ces billons. Cependant, il est possible que la mesure de 3 diamètres, l'un aux deux bouts, l'autre au milieu du fût, permette d'atteindre des résultats tout à fait équivalents (à 1% près), avec un gain de temps considérable. Les premières mesures peuvent donc permettre de tester ces deux types d'approche sur un pré-échantillon, et de retenir soit le cubage par billons de 2 m si l'écart est important, soit les mesures au milieu et aux extrémités du fût si l'écart est inférieur à 3 %.

Le cubage des arbres sur pied est réalisé à l'aide d'un « Relascope de Bitterlich à bandes larges ».

III.5.2.4. L'analyse des données et la construction des tarifs de cubage

Les données sont saisies sur un formulaire informatique. Une fois les données saisies, le volume du fût sera automatiquement calculé, puis reporté dans une base de données comprenant les informations suivantes :

Essence	Diamètre	Volume
---------	----------	--------

Les tarifs sont alors calculés mathématiquement sous la forme d'équations résultant de l'application de la méthode statistique de régression par les moindres carrés.

Ils sont du type :

$$V = a + b D^c \quad \text{si } c = 2, \text{ on aura } V = a + b D^2; \text{ si } a = 0, \text{ on aura :}$$

$$V = a D^b, \text{ et on retrouve une relation linéaire du type : } \log V = a' + b' \log D$$

$$V = a + b D + c D^2 \quad (\text{Tarifs polynomiaux})$$

Pour diverses raisons, l'utilisation linéaire en du type $V = a + b D^2$ doit être retenue en priorité.

III.5.2.4.1. Un exemple de courbe d'ajustement

Le principal critère de qualité d'une régression est sa fiabilité : les biais sont minimisés (pas de sur ou sous-estimation). La représentation de la courbe de régression sur le graphique « nuage de points » représentant le volume en fonction du diamètre est donc impérative. Si la courbe épouse la forme du nuage pour chaque classe de diamètre, on peut conclure que la

fiabilité est acquise. Cette vérification graphique est une précaution minimale et indispensable. Elle peut aussi se faire par une analyse des résidus.

Le R^2 (coefficient de corrélation, $0 \leq R^2 \leq 1$) est également un indicateur important pour juger la qualité de la régression. Plus il est proche de 1, meilleure est la régression.

Un exemple d'ajustement à partir de relevés de terrains est présenté ci-dessous. Trois tests ont été effectués :

- polynomial avec constante ($Y = aX^2 + c$)
- polynomial sans constante ($Y = aX^2$)
- exponentiel ($Y = aX^b$)

Le domaine de validité du tarif est de 60 à 200 cm. La taille de l'échantillon est de 191 données relevées au relascope et sur des arbres abattus. Les résultats statistiques des tests sont présentés ci-après. On peut noter :

- une surestimation des volumes pour les petites classes de diamètre pour le test polynomial avec constante ;
- une surestimation des volumes des grandes classes de diamètre pour le test exponentiel ;
- une régression relativement fiable pour le test polynomial sans constante.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des différents variables d'un exemple de courbe d'ajustement [Réf 2]

Le Test	La forme	A	B	c	R²
Test 1	$Y = aX^2 + c$	7,94	-	2,09	0,73
Test 2	$Y = aX^2$	9,15	-	-	0,71
Test 3	$Y = aX^b$	2,05	9,33	-	0,75

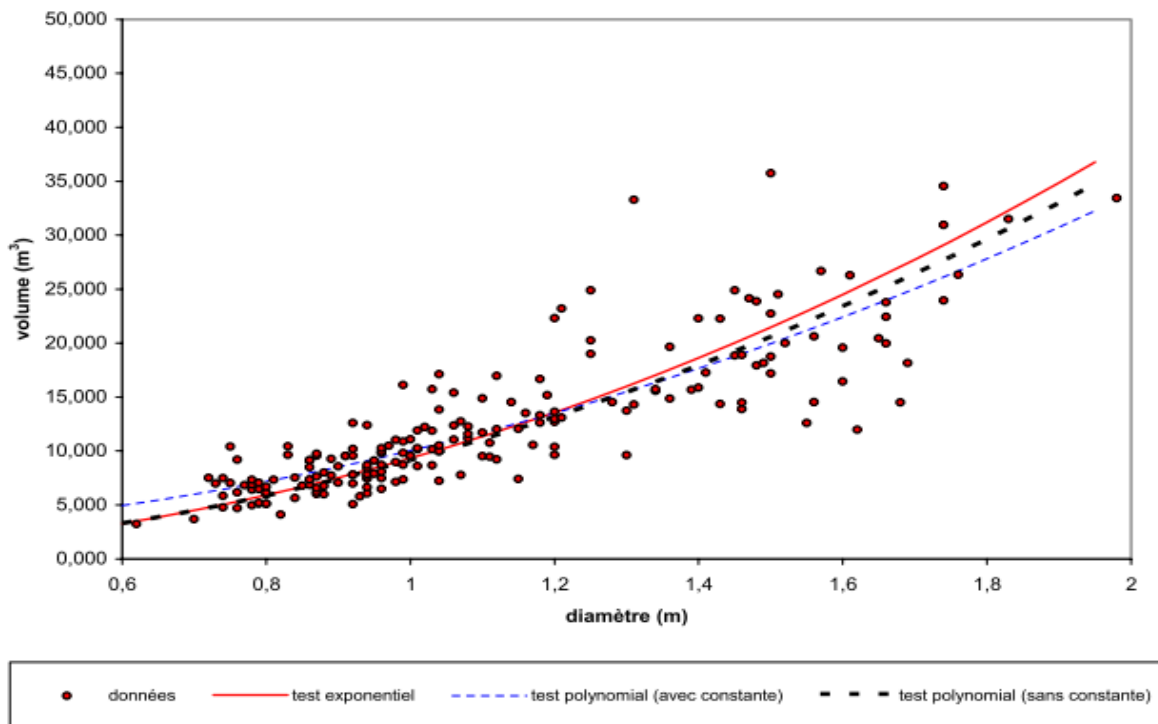


Figure 9 :Exemple d'un courbe d'ajustement [Réf 2]

III.6. L'analyse de cernes – Application aux études de croissance de quelques essences

La connaissance de la production ligneuse et donc de la croissance diamétrique des individus est fondamentale dans le cadre de l'aménagement d'une forêt. Elle constitue une des paramètres qui permettent de déterminer la rotation ainsi que le volume maximal exploitable sans risque d'appauvrissement du peuplement.

Deux techniques pour l'estimation de la croissance diamétrique des arbres existent :

- L'analyse de cernes (Figure 10)
- La mesure périodique de circonférence pendant un laps de temps donné.

Les résultats de plusieurs dispositifs d'étude où les arbres sont mesurés périodiquement depuis plus d'une décennie (Mopri, Irobo et la Téné en Côte d'Ivoire, Mbaïki en Centrafrique et Oyane au Gabon), fournissent des accroissements par essences. De même, plusieurs comptages de cernes ont été réalisés pour les essences dont les cernes sont annuels, notamment au Cameroun, en Centrafrique et au Gabon.

Toutes les essences ne présentent pas de cernes d'accroissement à rythmicité annuelle. Il faut, avant toute étude de cernes, prouver que la rythmicité existe. La méthode consiste à blesser annuellement un arbre sur pied. Après quelques années, l'arbre est abattu : la comparaison entre les marques de blessure et les cernes de l'arbre permet de définir si ces cernes sont annuels ou non.



Figure 10 : Mesure des anneaux de croissance sur une coupe transversale de tronc d'okoumé [Réf 2]

Parmi les essences de forêt tropicale présentant des cernes annuels facilement discernables, on peut noter :

Tableau 2 : Essences dont les cernes d'accroissement sont annuels et facilement discernables [Réf 2]

Nom commun	Nom scientifique
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>
Bété	<i>Mansonia altissima</i>
Iroko	<i>Milicia excelsa</i>
Kosipo	<i>Entandophragma candollei</i>
Limba	<i>Terminalia superba</i>
Okoumé	<i>Aucoumea klaineana</i>
Sapelli	<i>Entandophragma cylindricum</i>
Sipo	<i>Entandophragma utile</i>
tiamia	<i>Entandophragma angolense</i>

Dans la plupart des cas, les analyses de cernes sont réalisées par une lecture le long de plusieurs rayons perpendiculaires de rondelles prélevées sur des arbres abattus. Etant donné la lisibilité parfois délicate des cernes, la précision des mesures est au mieux de l'ordre du millimètre. De plus, les résultats ne sont pas exempts d'erreurs liées à la présence de faux cernes non identifiés comme tels ou à des cernes très fins non repérés, notamment lors des comptages sur le Sapelli.

III.7. Mesures par satellite

Des tentatives ont été effectuées dans la décennie passée d'estimer la quantité de biomasse boisée disponible employant des techniques de télédétection (Remote sensing) mais les résultats des mesures ne sont pas encore suffisamment précis pour être utilisés pour des buts de planification.

IV. Conclusion

L'inventaire d'un territoire forestier, en vue de déterminer le volume de coupe annuelle, devient de plus en plus onéreux par voie terrestre si on s'applique à réaliser un plan de sondage plus représentatif des peuplements forestiers qui composent la forêt à cause de la complexité de l'opération et des différents facteurs influant la forêt ; d'où la nécessité d'élaborer des nouvelles techniques moins chères, plus rapides et ayant une meilleure précision. L'évaluation par voie de satellite se montre prometteuse même si elle est encore dans leur début.

I. Introduction

A l'indépendance, l'Algérie a hérité d'une forêt dégradée, délaissée et désorganisée. Son rôle économique et social était négligé.

Cette grave situation exigeait un redressement urgent du secteur forestier sur un long terme. En effet, l'Algérie mène une politique forestière en prenant compte les multiples rôles que peut jouer la forêt : protection, production et promotion sociale pour l'intégrer dans un plan global de développement économique et social. Son action s'est axée sur trois volets :

- Protection et mise en valeur des forêts existantes et de l'ensemble des ressources forestières.
- Extension du patrimoine forestier par le reboisement.
- Lutte contre l'érosion.

II. Répartition des terres en Algérie du Nord

Une estimation récente établie par la Direction Générale des Forêts (DGF) en collaboration avec la FAO et publiée dans le rapport FOSA en 2000 donne l'occupation des terres forestières comme suit :

Tableau 3 : occupation des terres forestières [Réf 5]

Formations forestières	Type	Superficie (ha)	% de la surface totale du nord
Formations principales	Forêts économiques	1 249 000	
	Forêts de protection	219 000	
	Divers	47 000	
	Total	1 515 000	6.06
Maquis		1 876 000	7.50
Reboisements réalisés par l'administration (1962 à 1998)		536 000	2.14
Plantations réalisées	Dans le cadre du barrage vert	86 909	
	Par le volontariat	105 031	
	Total	191940	0.77
Total formations forestières		4 118 940	16.47

Selon les chiffres du tableau 3, les forêts occupent 16.47% des terres de l'Algérie du nord. La superficie boisée a donc augmenté en récupérant par des reboisements sur de vastes surfaces des terrains jugées improductifs pour l'agriculture. Notant que d'après les statistiques tirées de [5], la forêt occupait 8.4% des terres du Nord ce qui correspond à environ 1.2% de la superficie totale du pays.

Les essences principales couvrent 1 468 000 ha qui se répartissent en forêts d'intérêt économique et forêts de protection.

- Les forêts d'intérêt économique sont constituées par : les résineux (pin d'Alep, pin maritime et cèdre) et les feuillus Chêne-Zéen et Afarès, eucalyptus.
- Les forêts de protection sont composées de Chêne vert, thuya et genévriers.

Ces diverses forêts ont quelques traits importants en commun :

- Elles sont en général constituées de peuplements mono spécifiques, rarement en mélange de 2 ou 3 essences (chêne liège et chêne Zéen, ou chêne liège et pin maritime) ;
- Suite à l'action des usagers et de leurs troupeaux, ou aux incendies, les troncs des arbres sont souvent courts, ou tordus et les bois affectés de nombreuses tares et pourritures qui réduisent fortement leur aptitude au sciage.

III. Répartition des superficies forestières en Algérie

Le tableau 4 représente les superficies forestières ainsi que le taux de boisement par région en Algérie.

Tableau 4 : Superficies forestières par région en Algérie [Réf 6]

Région	Superficie (ha)	Superficie forestière (ha)
Total « EST »	8 104 490	1 793 560
Total « CENTRE »	11 051 004	1 183 920
Total « OUEST »	13 405 735	1 100 901

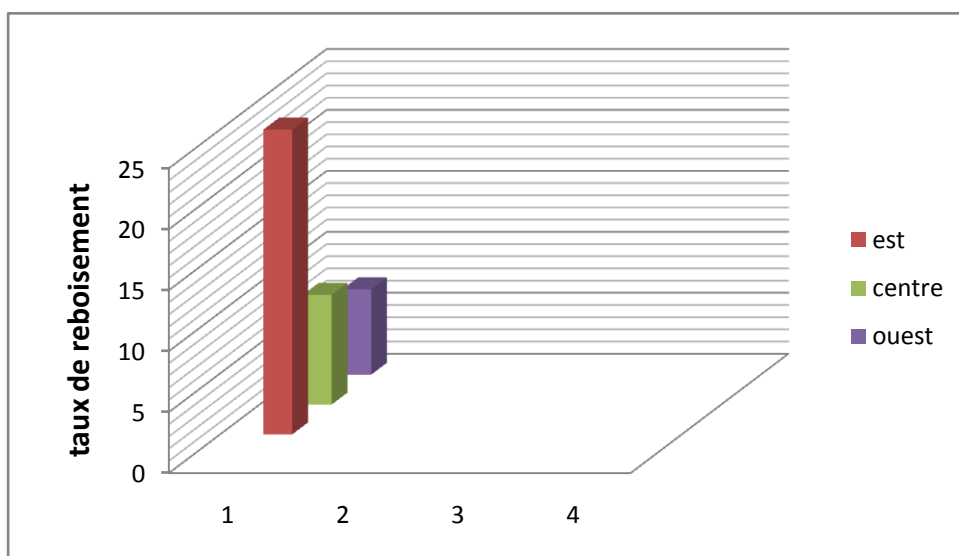


Figure 11 : Taux de boisement en Algérie.

D'après la figure ci-dessus du taux de boisement, on peut dire que l'Est algérien est le plus boisé.

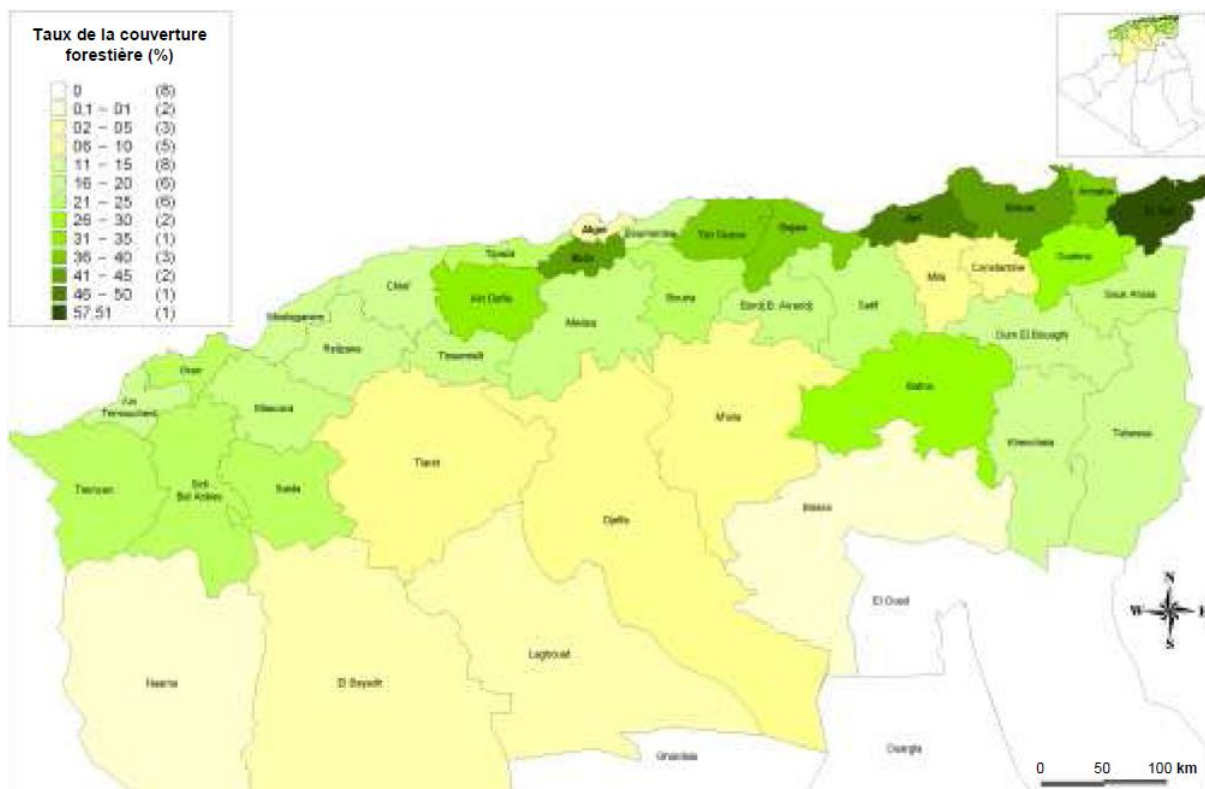


Figure 12 - Répartition de la couverture forestière par wilaya en Algérie (2007)
[Réf 6]

IV. Répartition des forêts par essences

La majeure partie des superficies forestières ont connu une nette diminution, principalement pour les feuillus comme les Chênes et une augmentation des résineux comme les Pins. Cela est probablement dû au choix des espèces lors des reboisements car on a tendance à choisir les essences à croissance rapide et qui ne nécessitent pas beaucoup d'entretien.

Les valeurs sont résumées dans le tableau 5 qui donne la dernière estimation faite par la DGF en collaboration avec la FAO et publiée dans le rapport FOSA 2000.

Tableau 5 : Répartition des essences constituant la forêt en Algérie [Réf 7]

Essence	Superficie (ha)	% de la surface totale occupée par les essences
Pin d'Alep	880 000	21.36
Chêne liège	230 000	5.59
Chêne Zéen et Afarès	48 000	1.17
Cèdre	16 000	0.39
Pin maritime	32 000	0.78
Eucalyptus	43 000	1.04

Les forêts et maquis couvrent 4,1 millions d'hectares soit un taux de boisement de 16,4% pour le nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes arides sont également prises en considération. Ces taux de boisement sont évidemment très insuffisants pour assurer l'équilibre physique et biologique.

L'essence prédominante est le pin d'Alep qui occupe 880 000 ha et se rencontre principalement dans les zones semi arides. Le capital sur pied de ces pineraies est assez pauvre. Le chêne liège avec 230 000 ha se localise principalement dans le nord-est du pays. Les chênes Zéen et Afarés avec 48 000 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie. Les cèdres sont éparpillés sur 16 000 ha en îlots discontinus dans le tell central et les Aurès. Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 32 000 ha. Les eucalyptus introduits dans le nord et surtout l'est du pays occupent 43 000 ha.

Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1 249 000 ha dont 424 000 ha de peuplements artificiels. Le second groupe, constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride jouent un rôle de protection essentiellement, ne couvre que 219 000 ha.

Le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2 603 940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727 940 ha et les maquis et broussailles qui occupent une superficie de 1 876 000 ha.

Les forêts font partie du domaine public de l'Etat. S'ajoutent à ces superficies forestières les nappes d'alfa qui totalisent 2,7 millions d'hectares.

La forêt algérienne apparaît comme une formation végétale dont les arbres sont en état de lutte continuelle contre la sécheresse (plusieurs mois secs consécutifs durant l'été).

Compte tenu de tous les éléments historiques qui la marquèrent et des pressions qu'exercent sans cesse sur elle, l'homme et son bétail, la forêt semble glisser rapidement sur la voie d'une dégradation progressive des essences principales et de son remplacement par le maquis et les broussailles dont le rôle reste néanmoins extrêmement important pour le contrôle et la fixation des sols en terrain à forte déclivité.

Les grands traits caractérisant la forêt algérienne peuvent se résumer comme suit:
Une forêt essentiellement de lumière, irrégulière, avec des peuplements feuillus ou résineux le plus souvent ouverts formés d'arbres de toutes tailles et de tous âges en mélange parfois désordonné (futaies jardinée ou irrégulière).

Présence d'un épais sous-bois composé d'un grand nombre d'espèces secondaires limitant la visibilité et l'accessibilité et favorisant la propagation des feux, faiblesse du rendement moyen en volume ligneux (annexe 2), existence d'un surpâturage important (surtout dans les subéraies) et empiétement sur les surfaces forestières par les populations riveraines.

IV.1. Volume sur pied

Le dernier inventaire forestier national effectué en 1984 du volume sur pied et publié dans le rapport FOSA 2000 donne les estimations résumées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Estimation de volume sur pied [Réf 7]

Essence	Capital sur pied (1000 m³)
Pin d'Alep	30427
Cèdre	7793
Chêne Zéen et Afarès	10680
Chêne vert	2848
Eucalyptus	2515
Pin maritime	672
Total	54935

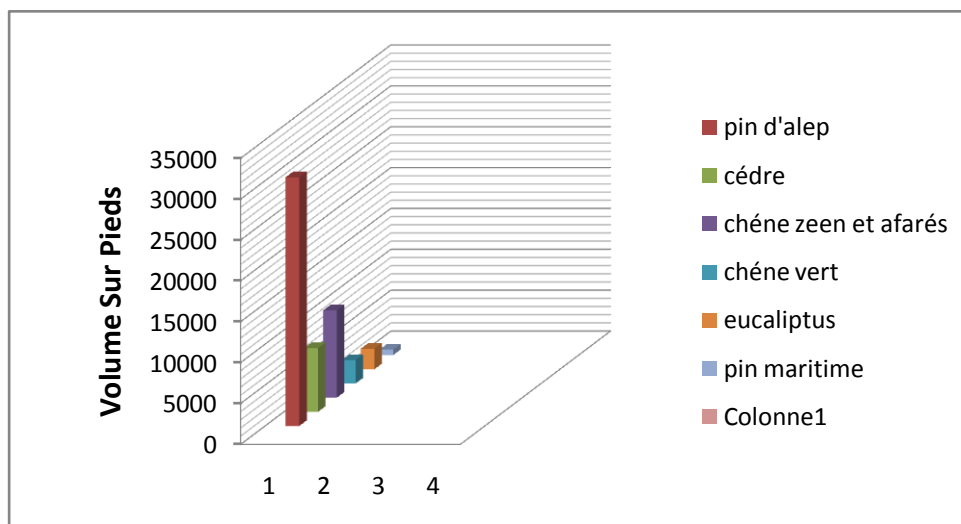


Figure 13 : Estimation de volume sur pied

Les estimations des volumes sur pied présentées sur la figure 13, nous permettent d'affirmer que le Pin d'Alep représente plus de la moitié du capital sur pied avec 55.4% soit plus de 30 millions de m³, suivi du chêne zeen et afarés avec 19.4%, le cèdre 14.2%, quant au chêne vert, Eucalyptus et le Pin maritime, respectivement, ne représentent que 5.2%, 4.6% et 1.2% de capital sur pied.

➤ **Les pineraies de pin d'Alep**

Elles comportent un capital sur pied assez pauvre, de 11 à 54 m³/ha (valeurs extrêmes) avec une moyenne de 45 m³/ha, et un accroissement moyen annuel de 1,8 m³/ha.

Le volume sur pied est présumé fournir 30 m³/ha de bois d'œuvre et d'industrie et 15 m³/ha de bois de chauffage.

➤ **Les subéraies**

Il s'agit de peuplements âgés, couvrant près de 229 000 ha, 61% des subéraies sont constituées de vieilles futaies qui ont subi plusieurs démasclages et devraient être régénérées. Les taillis et perchis ne représentent que 2,5 % de la surface.

➤ **Les chênes caducifoliés**

Ces peuplements occupent les milieux les plus frais et les altitudes élevées dans la subéraie avec une superficie de 48 000 ha. Caractérisé par une croissance rapide, le zeen a tendance à recoloniser les subéraies. Les vieilles futaies représentent 56% des surfaces, les taillis et perchis 5% seulement.

➤ **Le pin maritime**

Couvrant une superficie de 31 510 ha, le pin maritime, qui est naturel dans le nord-est de l'Algérie, s'installe dans les subéraies plus ou moins dégradées. Sa régénération naturelle est aisée, sauf en exposition sud.

➤ **Le chêne vert**

Cette essence est surtout abondante dans le nord-ouest du pays ; la surface aurait fortement régressée en 30 ans, de 700 000 ha (1955) à 108 200 ha (1984) (le plus récent plan d'aménagement des forêts Algériennes revient à 1984) .

IV.2. La production nationale ligneuse

« A l'indépendance de notre pays, les possibilités de production de nos forêts étaient réduites du fait de l'état de leur dégradation et de leur épuisement, c'est pour cela que jusqu'à ces dernières années la production a été négligeable. Cette production couvre à peine 10% de nos besoins, exception faite du bois de chauffage pour lequel les besoins sont entièrement couverts par la production nationale » [5]

La production de bois provient de forêts aménagées et non aménagées.

IV.2.1. Production des forêts aménagées

Les forêts aménagées sont constituées aussi bien de résineux (pin d'Alep) que de feuillus (chêne zéen, chêne afarès). Pour le pin d'Alep, il s'agit notamment des massifs de Telagh, Djelfa (Senalba Chergui et Gherbi) et de Khenchela (Béni-Imloul). Ces forêts sont exploitées depuis le début des années 80. En ce qui concerne les chênes zéen et afarès, les principales forêts (Guerrouch et Akfadou) sont en cours d'exploitation mais les mêmes types de problèmes se posent pour ces massifs. De plus, le bois de chêne zéen trouve difficilement des débouchés.

IV.2.2. Production des forêts non aménagées

En l'absence de plan de gestion, l'exploitation de bois au niveau des forêts non aménagées concerne principalement des coupes de vieux bois, des éclaircies et des coupes sanitaires (forêts de pin d'Alep). Des coupes d'assainissement dans les forêts incendiées sont également effectuées. Il faut signaler, cependant, que la part des produits provenant de ces forêts ne représente qu'une faible proportion de la production totale de bois. Par conséquent la production de bois des forêts naturelles provient des essences suivantes par ordre décroissant: pin d'Alep, chêne zéen, chêne afarès, cèdre, pin maritime. Le pin d'Alep fournit environ 70% de la production totale de bois, mais seulement 20% de bois d'oeuvre. L'eucalyptus est essentiellement cultivé pour le bois de trituration. La production des chênes, du cèdre et du pin maritime est à 30% environ destinée à un usage de bois d'oeuvre. Globalement, la production de ce type de bois n'excède pas 30% de la production nationale de bois alors que le bois de trituration en représente 50 à 60%.

V. Débouchés des bois locaux

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. Les bois d'eucalyptus, qui est exploité généralement à courte rotation (10ans), est destiné à la trituration. Le bois de chêne Zéen, vu son importante densité et sa dureté, est essentiellement utilisé pour la confection de traverses de chemin de fer. Le bois de pin maritime, de meilleure qualité est surtout utilisé en menuiserie, le bois de cèdre est quant à lui utilisé en ébénisterie.

Mais à nos jours la production nationale du bois couvre pratiquement 0.02 % des besoins du pays.

Dans ce contexte, l'Algérie s'est trouvée alors dans l'obligation de s'approvisionner du marché international pour combler ses besoins en bois et dérivés.

La part la plus importante des produits extraits de nos forêts revient au liège. Nos exportations, d'ailleurs très faibles, sont dans la quasi-totalité alimentées par cette matière.

Le tableau 17 et la figure 14 donnent l'évolution de la production nationale ligneuse depuis l'indépendance jusqu'en 2005.

Tableau 7 :L'évolution de la production nationale ligneuse depuis l'indépendance jusqu'en 2005 [Réf 6]

Année	Bois d'œuvre et d'industrie (m3)	Bois de chauffage (m3)	Bois total (m3)	Liège (Qx)
1963	11614	0	11614	
1964	8559	0	8559	100
1965	28665	0	28665	350
1966	4614	37725	42339	117
1967	23391	68503	91894	158363
1968	14440	86461	100901	155884
1969	18431	83530	101961	111963
1970	12892	56975	69867	10878
1971	18350	20902	39252	125123
1972	18600	41440	60040	149993
1973	14339	85618	99957	144472
1974	15390	59716	75106	199481
1975	11546	57458	69004	160443
1976	12483	10822	23305	109
1977	15460	19032	34492	99257
1978	19000	25306	44306	13708
1979	19636	42658	62294	146
1980	30000	42000	72000	155
1981	30000	46678	76678	184929
1982	35196	8394	43590	165438
1983	56512	25359	81871	131357
1984	60056	38306	98362	112145
1985	11309	17809	29118	138485
1986	30394	19633	50027	105262
1987	50803	43041	93844	197471
1988	48616	27962	76578	136447
1989	49718	37705	87423	127346
1990	36940	87050	123990	91261
1991	85559	86489	172048	92818
1992	97647	41061	138711	128478
1993	195429	43791	239220	111446
1994	133475	32505	165980	38824
1995	100973	92920	193893	32329
1996	139620	50323	189943	109482
1997	124515	78256	202771	80166
1998	150331	71369	221700	162250
1999	123747	77773	201520	123198
2000	136359	49147	185506	127724
2001	73663	67790	141454	100546
2002	89031	32089	121120	80573
2003	100850	63382	164232	69970
2004	125024	59355	184379	67808
2005	73326	67478	140804	99154

L'examen du tableau 7, illustré par la figure 14, laisse constater l'irrégularité de la production nationale du bois.

La possibilité annuelle globale, toutes catégories de bois confondues, s'élève à environ 1200 000 m³ [8] (1984). L'accroissement moyen annuel s'élèverait donc à peine à 1 m³/ha/an si l'on considère la superficie occupée par les forêts productives.

Les peuplements de pin d'Alep renferment plus de 80% de la possibilité totale annuelle. Le reste est fourni par les eucalyptus, le chêne Zéen et le chêne Afarès. La superficie des forêts ayant fait l'objet d'études d'aménagement s'élève à près d'un million d'hectares toutes essences confondues (y compris les peuplements artificiels d'Eucalyptus).

Ces forêts représentent une possibilité annuelle d'environ 460 000 m³. La production de bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance comme le montre le tableau 7 ; Faible de 1963 à 1990, le volume de la production totale du bois était limité au seuil de 100 000 m³ qui n'était atteint qu'en 1968, 1969, 1973 et 1984.

La production nationale ligneuse, au cours des années 1990, a connu une augmentation sensible à partir de 1991 atteignant ainsi en 1993 environ 240 000 m³. Cette augmentation est essentiellement due aux moyens humains et matériels mis en œuvre par le secteur pour une meilleure prise en charge des plans de gestion.

Ces dernières années, on a enregistré un accroissement sensible des besoins nationaux en bois, ce qui engendre des tensions sur le marché. Cette situation a contraint les pouvoirs publics à encourager l'exploitation des ressources locales. Le secteur des forêts devra désormais améliorer son niveau de participation au développement de l'économie nationale. C'est ainsi qu'il se fixe l'objectif de mobiliser annuellement durant les années à venir plus de 500 000 m³ de bois, l'objectif étant, bien entendu, la réalisation de la possibilité globale de plus d'un million de m³/an.

VI. Structure de la production nationale ligneuse

Le tableau 8 représente la production moyenne annuelle des bois d'œuvre, d'industrie, de chauffage et de liège

Tableau 8 : La production moyenne annuelle des bois d'oeuvre, d'industrie, de chauffage et de liège [Réf 6]

Périodes	Bois d'oeuvre et d'industrie (1000 m3)	Bois de chauffage (1000 m3)	Liège (1000 qx)
1965-1969	17.9	55.24	178.6
1970-1974	15.9	52.9	145.6
1975-1979	15.6	31.1	130.3
1980-1984	42.34	32.15	149.8
1985-1989	38.2	29.23	141
1990-1994	109.8	58.19	92.6
1995-1999	127.84	56.54	101.52
2000-2005	99.71	56.54	90,3

De loin, le plus valorisé des produits forestiers, le liège, constitue une ressource stratégique du fait de ses multiples usages (bouchonnerie, parquet, isolation thermique). Les potentialités nationales sont estimées à plus de 150 000 qx/an. Avec une production relativement faible ces dernières années (100 000 à 150 000 qx/an), l'Algérie occupe le troisième rang des producteurs de liège (7% de la production mondiale), mais loin derrière le Portugal (57%) et l'Espagne (23%). Cependant, avec une meilleure gestion et une exploitation plus rationnelle des peuplements, la production nationale de liège peut connaître une sensible augmentation à court terme.

La production du bois de chauffage est irrégulière avec les années. Par contre la production qui a connu une nette et régulière évolution est celle des bois d'oeuvre et d'industrie.

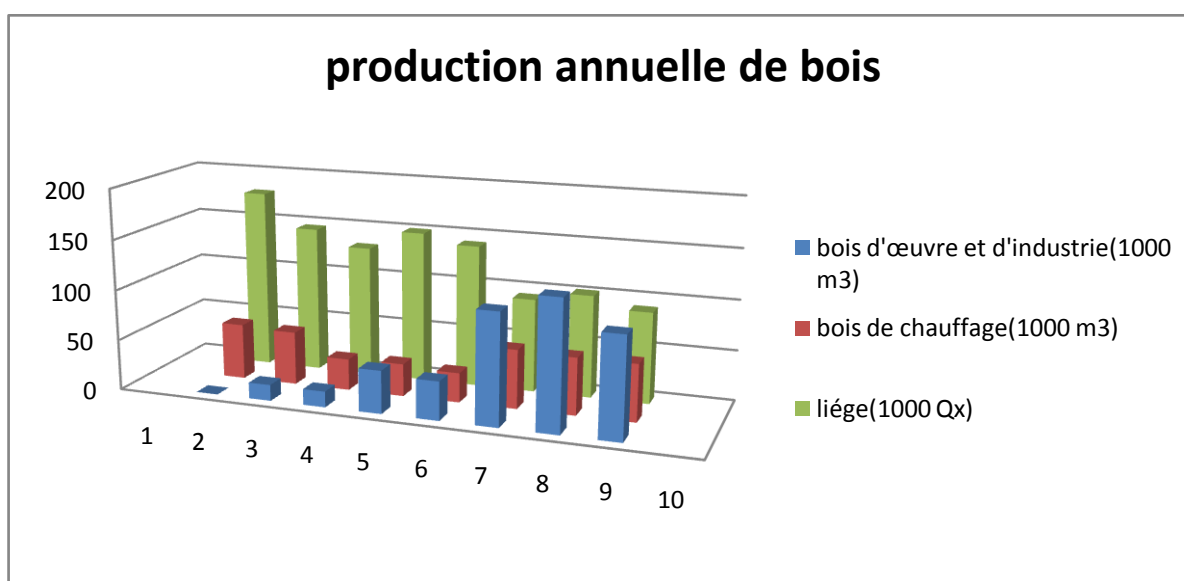


Figure 14 : Evolution de la production annuelle de bois en Algérie [Réf 6]

Une évolution qui a été rendue possible grâce au plan national de reboisement qui a été examiné et adopté lors du Conseil du Gouvernement du 26 septembre 1999. Le Plan National de Reboisement (PNR), traduit les préoccupations forestières et écologiques du pays, il intègre autant que possible les dimensions écologiques et sociales. Il s'inscrit également dans le cadre des orientations du Plan National de Développement Agricole et Rural en matière de développement de l'agriculture de montagne, de la mise en valeur des terres, de la lutte contre la désertification, de la protection et de la valorisation des ressources naturelles dans le cadre d'un développement durable.

C'est ainsi que le PNR a été initié avec pour objectif l'émergence de systèmes économiques viables qui permettant aux populations rurales de disposer de moyens adéquats de subsistance, de stabilité et de développement. Aussi, il est utile de rappeler que le taux de boisement est estimé à 11%, c'est ainsi qu'il est proposé à travers la mise en œuvre du PNR de relever ce taux à 13%.

VI.1. Les reboisements

D'après l'étude du Plan National de Développement Forestier (PNDF), les terres à reboiser sont évaluées à 4 million d'hectares. Il s'agit :

- Des maquis.
- Les zones de repeuplements dans les forêts claires,
- Les zones érodées (érosion et désertification),
- Les zones de protection des barrages existant ou prévus.

L'importance de ces volumes à reboiser reste bien sûr tributaire des moyens financiers, humains et matériels à mettre en œuvre. En égard aux moyens disponibles actuellement, les moyens financiers mobilisables et les entreprises de réalisations susceptibles de contribuer à la concrétisation des programmes arrêtés, un volume de 1 246 909 ha a été retenu pour les vingt prochaines années. Ce volume répond à des priorités relatives d'une part à la production rapide de bois sur les zones hautement potentielles bien localisées, pour des besoins actuels estimés à 2 millions de m³/an et le souci d'assurer une protection du patrimoine sol contre les effets de l'érosion et de la désertification.

VI.1.1. Le reboisement industriel

Ce type de reboisement est caractérisé par des interventions lourdes et coûteuses. Ils sont destinés essentiellement à l'industrie ou à la fabrication de panneaux. Ces plantations ont des possibilités d'extension limitées au niveau du pays. Ainsi les zones potentielles sont majoritairement localisées par les études au niveau des régions de l'Est où la pluviométrie annuelle est favorable. Ces études ont sélectionné sept wilayas :

Tableau 9 : Wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement industriel [Réf 6]

Wilaya	Surface à reboiser (ha)	Wilaya	Surface à reboiser (ha)
BEJAIA	9000	ANNABA	4946
TIZI-OUZOU	10000	GUELMA	18350
JIJEL	3890	EL-TAREF	9626
SKIKDA	19200		

Ces reboisements sont en général installés sur des zones homogènes et à forte productivité de matière ligneuse. Ils nécessitent au moment de leur installation et de leur exploitation, des actions basées sur une planification rigoureuse répondant à des objectifs de production bien précis et des techniques appropriées. Ils doivent de ce fait, être entourés de toutes les conditions de réussite (entretien, gardiennage, protection phytosanitaire, protection contre les incendies...) jusqu'au terme de leur maturité. Le choix des essences pour ces plantations sera fait sur la base de l'indice de productivité de la zone à savoir :

Tableau 10 : L'indice de productivité de quelques wilayas [Réf 6]

wilaya	Jijel	Bejaia	Annaba El-taref	Guelma	skikda	Tizi- ouzou
l'indice de productivité (m³/ha/an)	8	7.4	7.2	5.6	7	6.5

Il s'agit des zones littorales et sud-littorales s'étendant du centre du pays à la frontière Tunisienne ou le chêne liège est favorisé.

VI.1.2. Les reboisements de production

Ces reboisements ont pour but :

- De compléter les forêts existantes (repeuplement) ;
- De combles les vides et clairières ;
- De reconstituer les forêts incendiées ou réduites à un maquis dégradé ou la régénération naturelle est insuffisante ;
- De compléter les forêts trop claires pour aboutir à la densité souhaitée pour l'essence principale.

Les Vingt six wilayas suivantes qui présentent un potentiel productifs moyen de 3 à 5m³/ha/an sont retenues pour ce programme .

Tableau 11 : Les wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement de production [Réf 6]

Wilaya	Surface à reboiser (ha)	Wilaya	Surface à reboiser (ha)
BEJAIA	23060	O.EL-BOUAGHI	10000
TIZI-OUZOU	15000	BATNA	5000
DJELFA	30000	TLEMCEN	5000
JIJEL	4100	TIARET	5000
SKIKDA	19200	S.BEL-ABBES	15000
BOUMERDES	3000	CONSTANTINE	5000
ANNABA	4946	MILA	7000
GUELMA	18350	MASCARA	5000
SOUK-AHRAS	13000	ORAN	15000
EL-TAREF	9626	MOSTAGHANEM	5000
TIPAZA	3000	SETIF	9990
BLIDA	5000	B.B.ARRERIDJ	5000
KHENCHELA	3750	CHLEF	7500

Soit une superficie totale de 251 522 ha. Le tableau 12 nous montre la répartition des surfaces à reboiser par espèce :

Tableau 12 : La répartition des surfaces à reboiser par espèce [Réf 6]

Espèce	Surface à reboiser (ha)
Chêne liège	88000
Cèdre	25000
Pin pignon et Pin maritime	50000
Peuplier	25000
Noyer-Chataigner-Pcacanier et merisier	37000
Olivier-Amandier-Abricotier et Figuier	25000

VI.1.3. Les reboisements de protection (érosion hydrique et désertification) :

Les reboisements de protection ont pour objectifs la protection des sols contre l'érosion (hydrique et éolienne), la protection des ouvrages hydrauliques et des plaines agricoles et de toutes les infrastructures importantes (routes ; agglomérations, ports, etc.). L'impact de ces reboisements est localisé aussi bien dans le nord du pays (protection des bassins-versants) que dans le sud (lutte contre la désertification) avec création de ceintures vertes et brise-vent autour des agglomérations.

Les terrains à reboiser sont ceux qui présentent au moins l'un des critères suivants :

- Pauvreté des sols (impropres à l'agriculture),
- Pente élevée (risque d'érosion),
- Pente moyenne avec assise géologique instable,
- Les terrains avoisinants les infrastructures socio-économiques dont la protection s'avère nécessaire tels que les ouvrages hydrauliques, les routes les agglomérations et les ports et aéroports ;
- Les périmètres agricoles pour l'installation de réseaux brise-vent. Il va de soit que dans la mesure où le choix des essences et des techniques permet d'atteindre les objectifs de protection fixés, il y a tout avantage à leur faire jouer au mieux le rôle subsidiaire de production dans un deuxième temps. Cependant, c'est la fonction de protection qui doit prévaloir car même si ces bienfaits ne sont pas aussi palpables que ceux du reboisement de production, leur impact positif à long terme sera par le fait qu'il assure la protection des patrimoines sol et eau et des infrastructures socio-économiques.

Le programme de lutte contre l'érosion par le reboisement vise principalement les bassins versants étudiés au nombre de 26 et les ouvrages hydrauliques actuellement en exploitation, en construction ou en projet. Ces programmes sont localisés au niveau des wilayas suivantes:

Tableau 13 : Wilayas potentielles concernées par le plan de reboisement de protection [Réf 6]

Wilaya	Surface à reboiser (ha)	Wilaya	Surface à reboiser (ha)
CHLEF	20100	O.EL-BOUAGHI	12500
BATNA	20100	BEJAYA	2500
BLIDA	17500	BOUIRA	12500
TEBESSA	15000	T.OUZOU	15000
TLEMCEN	29700	TIARET	20100
ALGER	1600	JIJEL	15000
SAIDA	10050	SKIKDA	15000
S.B.ABBES	29700	A.TEMOUCHENT	12000
BOUMERDES	11700	ANNABA	16900
GUELMA	12100	S.AHRAS	15000
CONSTANTINE	7500	MILA	10050
M4SILA	15000	MASCARA	20800
ORAN	29700	MEDIA	18300
MOSTAGHANEM	29700	RELIZAINE	15000
TISSEMSILET	8620	AIN.DEFLA	8615
SETIF	40000	B.B.ARRERIDJ	20000
KHENCHELA	10000	EL-TAREF	3800
TIPAZA	12200		

soit un total de 563 335 ha.

Il est à souligner que près de 2.000.000 ha ont une vocation forestière sans compter les maquis et broussailles qu'il y a lieu de reboiser par des essences intéressantes sur le plan protection et production.

VI.2. Planification physique et financière

Les volumes physiques pour l'échéance du plan national de reboisement (vingt ans) découlent principalement des objectifs arrêtés par le plan national de développement forestiers à long terme élaboré en 1984.

L'estimation financière des programmes, arrêtés par année sur une période de vingt ans, est fondée sur les coûts actuellement en vigueur dans le secteur ; elle doit, par conséquent, faire l'objet d'actualisations périodiques.

Pour une période de 20 ans, le rythme de réalisation annuelle serait de 56 400 ha pour une enveloppe financière de 5,8 milliards de Dinars.

VI.2.1. Bilan des réalisations cumulées au 30.06.2012

Depuis le lancement du Plan National de Reboisement en 2000, plus de 601 500 ha ont été réalisés à ce jour, soit 48% de l'objectif global. Ces réalisations ont permis la mise en terre de 433 163 700 plants dont :

- 403 452 000 plants forestiers
- 29 711 700 plants fruitiers.

A ce jour 48% de l'objectif global du PNR ont été réalisés.

Tableau 14 : Bilan des réalisations cumulées au 30.06.2012 [Réf 6]

ANNEE	Objectifs du PNR	R é a l i s a t i o n s			
		Plantations Forestières	Plantations Fruitières	Total	Taux %
2000	40 847	11 650	17 299	28 949	71
2001	44 447	7 930	35 035	42 965	97
2002	49 497	8 680	28 241	36 921	75
2003	53 997	13 390	21 094	34 484	64
2004	57 697	17 313	13 798	31 111	54
2005	60 827	18 835	9 520	28 355	47
2006	63 057	34 753	9 937	44 690	71
2007	64 477	64 692	8 194	72 886	113
2008	65 000	65 766	7 651	73 417	113
2009	66 000	42 736	5 308	48 044	73
2010	66 800	42 357	10 060	52 417	78
2011	67 000	43 039	13 643	56 682	85
2012	67 000	35 682	18 999	54 681	82
TOTAL	766 646	406 823	198 779	605 602	79

Si on arrive à réaliser le plan national de reboisement à 100% , la surface forestière Algérienne serait doublée. En 1999, avant établir le plan national de reboisement, la surface forestière était d'environ 1500000 ha, si nous ajoutons à cela la surface planifiée à reboiser de 1200000 ha, la surface forestière totale d'ici 2025 (en supposant que l'âge de maturité est de 5 ans) sera portée à 2700000 ha et on peut même supposer en première estimation la multiplication de la production de bois de l'année 2000 par deux c'est-à-dire, une production de bois de chauffage de l'ordre de 100 000 m³, une quantité appréciable que l'on devrait envisager de valoriser dès maintenant.

VII. les prix du bois

VII.1. Tarifs du bois local

Tableau 15 : Tarifs de produits forestier locaux en Dinars algériens [Réf 9]

Nature des produits	Unité	Tarifs par essence en dinars				
		Cèdre Merisier Cyprés	Thuya Frêne Orme Aulne Peupliers Erables	Chêne liège Olivier Chêne vert Pin maritime Casuarina	Eucalyptus Autres	Chêne zeen
Perche :						
0.20 à 0.30m de tour	u	110	70	60	50	50
0.31 à 0.40m de tour	u	160	120	100	80	80
0.41 à 0.50m de tour	u	210	150	140	110	110
0.51 à 0.60m de tour	u	310	230	210	160	160
0.61 à 0.70m de tour	u	470	320	270	210	210
Grumes : Plus de 0.70m de tour	M3	3220	2650	2000	1530	1000
Bois d'œuvre et de service Incendié	Réduction de 20 à 50% sur les tarifs de bois vifs					
Bois de feu	Stère	Variable : de 160 à 260				

Les tarifs du bois varient selon la nature des essences. Il est vendu au mètre cube ou en stère déjà abattu par les entreprises du secteur des forêts, soit sur pied et dans ce cas là ce sont les exploitants privés qui font eux même l'abattage, le débardage et le transport à l'usine. D'ailleurs cette seconde manière de travailler est la plus rentable pour eux.

Le bois algérien pourrait être de meilleure qualité si les traitements sylvicoles étaient effectués, c'est pourquoi le travail avec le bois local est limité, et ceux qui travaillent avec n'ont pas le choix.

VII.2. Circuit économique du bois en Algérie

Le stade de départ est le bois sur pied, prêt à être abattu à l'occasion de coupes d'amélioration ou de coupes d'exploitation. Le sylviculteur (propriétaire privé, Direction

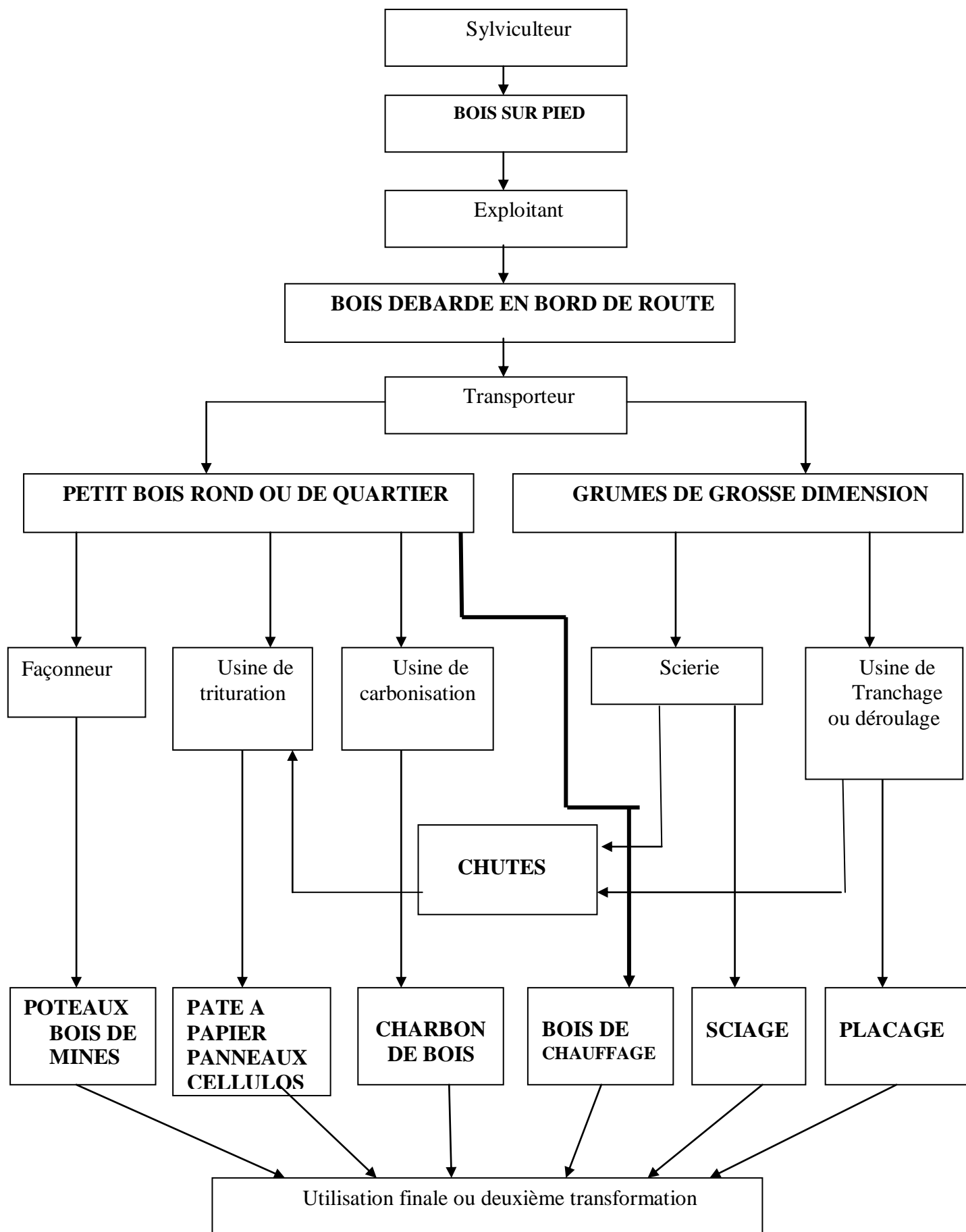
Générale des Forêts, etc.) vend ses produits à l'exploitant forestier (par cession amiable ou le plus souvent aux enchères) soit sur pied (procédé le plus courant), soit lors de l'abattage, soit sitôt après, et dans ce dernier cas, les bois étant classés par catégories de qualités.

C'est l'exploitant forestier qui procède à l'abattage des arbres, à leur premier façonnage (découpe de différentes longueurs), et à la vidange de la coupe, c'est-à-dire au transport en bord de route des produits classés et cubés. C'est à ce stade de bois débardé au bord de route que sont publiées dans les statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, les qualités et la valeur des bois exploités chaque année.

Le diagramme suivant résume les principales étapes depuis l'exploitation du bois jusqu'à sa transformation.

VIII. Conclusion

Même si la production de bois a considérablement évoluée depuis l'indépendance jusqu'à nos jours, la demande en bois et dérivés est probablement encore appelée à s'accroître. La lutte contre le gaspillage du bois s'avère d'une importance primordiale. Dans une économie forestière intégrée, les résidus du bois pourraient être convertis en énergie comme nous le montrerons dans le chapitre suivant.



I. Introduction

Les combustibles fossiles ne sont pas renouvelables et les réserves globales sont limitées. La question qui se pose donc, dans un contexte d'expansion de la demande mondiale, n'est pas si ces ressources vont s'épuiser, mais bien quand elles s'épuiseront. Le pétrole brut pose particulièrement la question de la rareté.

Actuellement, le monde consomme 85 millions de barils de pétrole par jour (4,2 GTEP par an). Si la crise économique actuelle s'avère transitoire, l'Agence Internationale de l'Energie estime que la demande de pétrole pourrait s'élever à 130 millions de barils par jour en 2030 (6,5 GTEP par an)!

Dans son World Energy Outlook 2008, l'AIE tire une nouvelle fois la sonnette d'alarme s'appuyant sur une étude de grande ampleur couvrant les 800 plus grands gisements pétrolifères du monde, l'agence constate un déclin plus rapide que prévu des champs existants. Même en posant l'hypothèse d'une croissance nulle de la demande mondiale, il faudra trouver l'équivalent de 45 M barils/jour de nouveaux gisements d'ici 2030, soit l'équivalent de 4 Arabie Saoudite!

Le Secrétariat de la coalition de Johannesburg pour les énergies renouvelables, basé en Allemagne et surnommé REN21, réalise une étude sur le potentiel des énergies renouvelables au niveau mondial, estime que les sources d'énergie renouvelable pourraient à l'horizon 2050 en produire 10 fois plus. Concernant la biomasse-énergie, elle pourrait couvrir une part importante des besoins énergétiques mondiaux, et ce même si on soustrait l'utilisation du sol et la biomasse nécessaire à la production alimentaire. Le graphique ci-dessous est très parlant à cet égard. Le potentiel énergétique des résidus de la biomasse serait d'environ 2,1 Gtep, celui des cultures énergétiques de 6,2 Gtep.

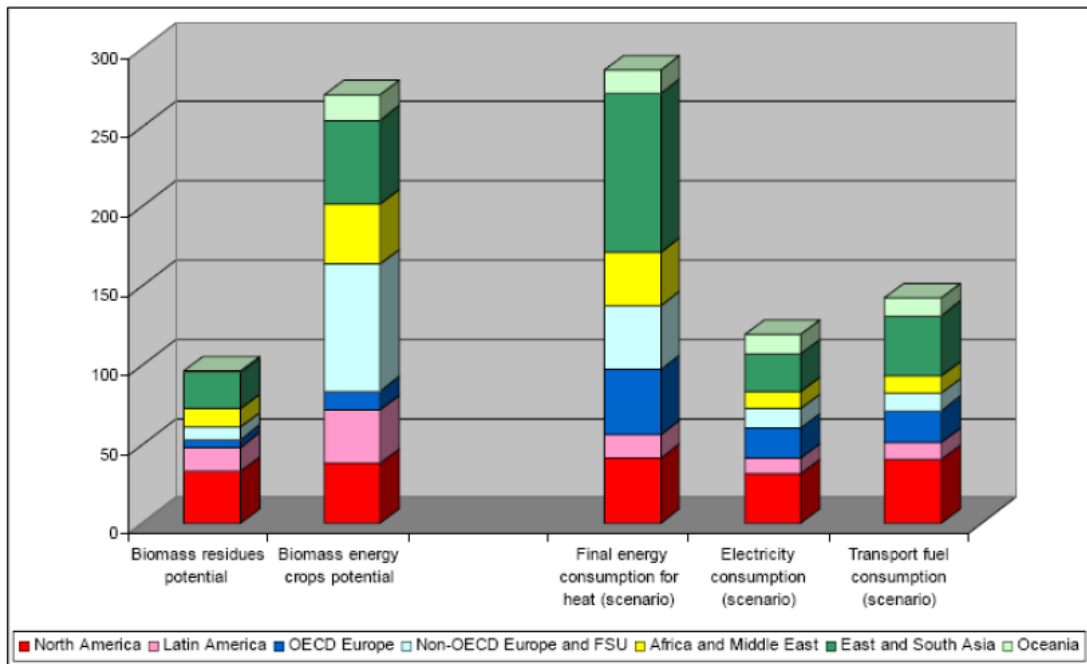


Figure 15 : Potentiel de bioénergie dans divers secteurs d'énergie en 2050 (exajoule par année) [Réf 10]

Notre pays, dont l'économie repose essentiellement sur les énergies fossiles, se doit d'assurer sa transition progressive vers les énergies renouvelables. En matière d'électricité, le choix est déjà fait et le pays est résolument engagé dans le développement de l'énergie solaire. A l'instar de nombreux autres pays, l'Algérie doit diversifier son mix énergétique et la bioénergie offre, à côté des autres sources d'énergies renouvelables, de nombreux avantages pour répondre aux besoins spécifiques en énergie des différentes régions du pays.

Dans ce contexte, il nous paraît indispensable d'examiner les possibilités de filière bois énergie à même de valoriser sur le plan énergétique les immenses richesses que recèle notre patrimoine forestier, et cela en considérant le procédé de transformation le plus rentable : la cogénération.

II. Contenu énergétique du bois

II.1. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

– Il correspond à l'énergie produite par la combustion d'un combustible donné si l'on ne tient pas compte de la chaleur latente de vaporisation contenue dans la vapeur d'eau produite. Il dépend de l'essence et de l'humidité du combustible.

II.2. Essence du combustible

– La variation du PCI du bois anhydre selon les essences (en kWh/t) est donnée à la figure 16 et aux tableaux 16 et 17.



Figure 16 : Plage de variation du pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre selon les essences en kWh/t [Réf 18]

Tableau 16 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre feuillus [Réf 18]

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 17 : Valeurs moyennes du PCI du bois anhydre résineux [Réf 18]

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

II.3. Humidité du combustible

La figure 17 indique la caractérisation du bois selon l'humidité .

L'humidité est le facteur qui influe le plus sur le PCI. Plus le bois est humide, plus son PCI est bas. Le pouvoir calorifique d'un combustible humide est déterminé à partir de son PCI anhydre et de son humidité H (% sur brut) :

$$PCI = (PCI \text{ anhydre} \times (100 - H)/100) - 6 \times H \text{ (en Wh/kg ou kWh/t)}$$

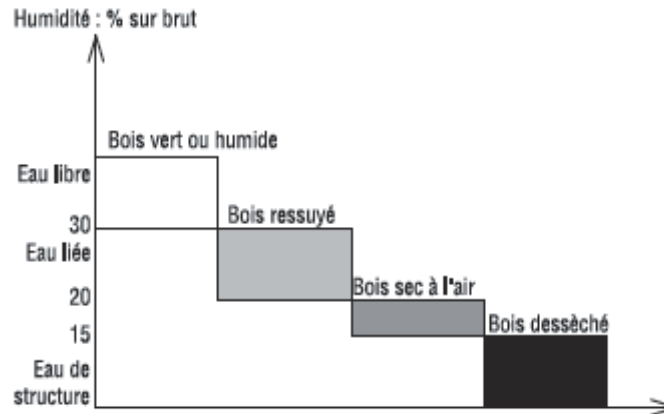


Figure 17 : Caractéristiques du bois selon l'humidité [Réf 18]

III. La cogénération

III.1. Définition

La cogénération est une des technologies prometteuses pour satisfaire les critères de meilleure efficacité énergétique et de moindres émissions de gaz à effet de serre, c'est la production combinée d'électricité et de chaleur (eau chaude ou vapeur) en faisant appel à la biomasse. Dans la plupart des applications, l'énergie mécanique produite est immédiatement convertie en énergie électrique pour être autoconsommée ou vendue à d'autres utilisateurs. L'énergie thermique peut servir au chauffage de bâtiments, à la production d'eau chaude ou à des procédés industriels. Ce système est caractérisé par un rendement supérieur (70 à 90 %) à celui obtenu avec une production séparée de chaleur et d'électricité, de plus, il permet de réduire de façon importante la facture énergétique et de limiter les émissions de polluants. La cogénération à partir de biomasse peut faire appel à différentes technologies : turbine à vapeur, moteur à vapeur, cycle organique de Rankine, moteur Stirling .

Dans de nombreux pays (tableau 18), les applications des systèmes de cogénération, dans les secteurs industriel et tertiaire, se multiplient, soutenues par plusieurs motivations convergentes: libéralisation du marché de l'électricité, favorisant l'émergence de la production décentralisée, indépendante ou non; développement des marchés dans de

nouveaux créneaux, pour les entreprises de services énergétiques (y compris les producteurs et les distributeurs d'électricité) ; économies financières et énergétiques pour le consommateur ; triple avantage pour la collectivité (protection de l'environnement, préservation des stocks d'énergie fossile et émergence de nouveaux types d'emplois).

Dans les pays africains, certaines sucreries et usines de transformation de bois avec séchage ont des besoins simultanés de chaleur et d'électricité et pourraient faire appel à la cogénération pour réduire leur facture énergétique. Quant à la tri génération, c'est à dire la valorisation de la chaleur cogénérée pour la production de froid, elle est pertinente pour les pays tropicaux et permettrait de diminuer la demande d'électricité de pointe dans les villes et les industries agroalimentaires.

Tableau 18 : Part de la cogénération dans quelques pays en 2000 [Réf 11]

Pays	Electricité congène (GWh)	Part de la production totale (%)
Union Européenne	258763	10
Canada	38900	7
Etas-unis	304000	8
Brésil	10000	3

III.2. Le principe de la cogénération

Le principe de la cogénération est contenu dans son nom : elle consiste à produire, à partir d'une énergie primaire combustible (fossile ou renouvelable), deux énergies secondaires utilisables : une énergie mécanique ou électrique et une énergie thermique.

Alors que dans une centrale électrique, c'est le rendement électrique maximum qui est recherché (rendement électrique de l'ordre de 40% avec un cycle simple et atteignant 55% avec un cycle combiné), dans la cogénération, on vise un rendement global accru par l'utilisation prioritaire de l'énergie thermique, soit dans un processus industriel soit dans une chaufferie ; la cogénération d'électricité (ou de force) n'est plus dans ce cas le but mais une conséquence, améliorant le bilan économique de l'équipement dont le rendement global peut alors atteindre 90%. L'énergie thermique sert le plus souvent au chauffage de bâtiments et/ou à la production d'eau chaude sanitaire ou à des procédés industriels.

L'énergie électrique est obtenue par conversion de l'énergie mécanique produite par une turbine ou moteur à gaz, ou turbine à vapeur. Cette conversion est obtenue en couplant une dynamo (courant continu) ou un alternateur (courant alternatif) à la turbine. Le rendement de conversion mécanique/électrique est d'environ 90%. Dans un équipement de cogénération, l'énergie électrique est soit autoconsommée, soit réinjectée sur le réseau électrique public de transport (haute tension) ou distribution (moyenne tension), suivant des conditions économiques fixées par les pouvoirs publics.

Actuellement, les technologies principalement utilisées pour la cogénération sont :

- La cogénération par moteur : les moteurs de cogénération visent surtout les petites applications, de quelques dizaines de kW à environ 3 MW. Ce sont donc surtout les petites installations et les applications domestiques qui sont concernées par ce type de technologie. Leurs rendements électriques se situent généralement entre 30 et 40 %. La forte proportion d'énergie thermique basse température après le cycle de production d'électricité implique, pour obtenir un bon rendement, d'avoir à disposition une utilisation sous forme d'air ou d'eau chaude, tels que par exemple des réseaux de chauffage urbain ou industriel.

- La cogénération par turbine à combustion (ou à gaz) : les turbines à combustion sont disponibles dans une gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW à plusieurs dizaines de MW. Leur rendement électrique varie entre 25 et 40% en fonction de la puissance. Les gaz d'échappement, après le cycle de production d'électricité, contiennent toujours beaucoup de chaleur (500°C) et sont donc dirigés vers une chaudière de récupération, où leur énergie thermique sera transmise à un fluide caloporteur (généralement de l'eau).

- La cogénération par turbine à vapeur : cette technique permet de produire de l'électricité lorsque de la vapeur est produite en excédent. La turbine à vapeur est aussi la principale technique utilisée dans les grosses centrales électriques, nucléaires ou à combustibles fossiles, pour convertir l'énergie thermique du combustible en électricité. La cogénération par turbine à vapeur permet d'utiliser des sources d'énergie primaires variées, dont entre autres les sources d'énergie diverses issues de la valorisation des déchets de l'industrie, tels que les déchets de bois dans les scieries, où les déchets végétaux de l'agriculture. Le cycle thermodynamique des turbines à vapeur est basé sur le cycle de Hirn (figure 18). A l'aide de la chaleur dégagée par la combustion d'un combustible, on produit de la vapeur à haute pression dans une chaudière. Cette vapeur est ensuite surchauffée et dirigée vers une turbine où elle se détend. Sortie de la turbine, la vapeur est condensée et ramenée à la chaudière, où ce cycle recommence.

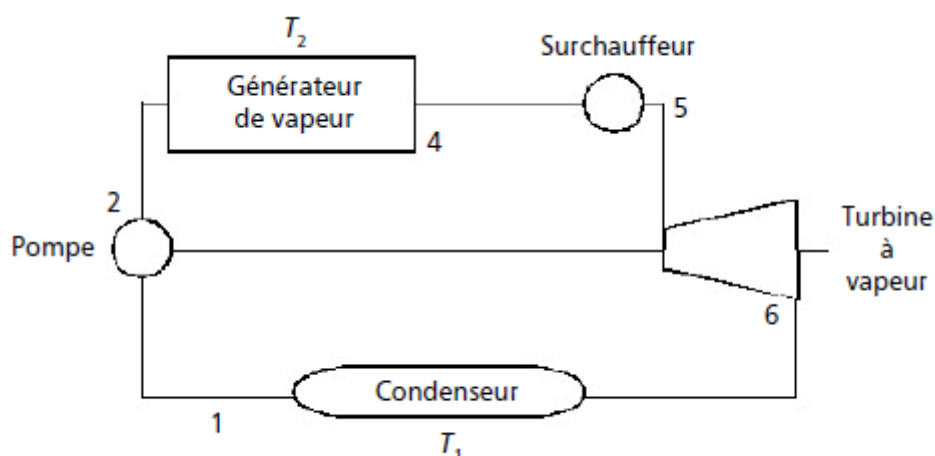


Figure 18 : Principe de fonctionnement d'une cogénération par turbine à vapeur selon cycle de Hirn [Réf 12]

Les avantages principaux de la cogénération, comparés à la production séparée de chaleur et d'électricité, sont les suivants :

- Le rendement d'une centrale de production électrique, qu'elle fonctionne au combustible nucléaire, au fioul ou au charbon, ne dépasse guère les 40%, le reste de l'énergie produite étant dispersée dans l'environnement (cours d'eau, atmosphère) sous forme de chaleur. La cogénération fait donc une meilleure utilisation de l'énergie primaire contenue dans le combustible.

- Nous savons que les réserves de combustibles fossiles sont limitées et nous devons donc en faire usage avec parcimonie. La cogénération amène alors à faire des économies d'énergie fossile grâce à sa meilleure utilisation de l'énergie primaire du combustible.

- Le transport sur de longues distances de l'énergie électrique produite de façon centralisée génère d'importantes pertes supplémentaires "en ligne", par effet Joule, et implique des infrastructures coûteuses, polluantes visuellement.

- La cogénération, lorsqu'elle se substitue à une production d'énergie à partir de pétrole ou de gaz, limite l'émission des polluants et de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Un moteur possède un rendement électrique d'environ 40 à 45%, une turbine, un rendement électrique d'environ 35 à 40%, et celui d'une pile à combustible se situe aux alentours de 20 à 30%. La quasi-totalité du solde de l'énergie consommée est transformée en chaleur. La cogénération consiste à récupérer au mieux cette énergie, afin de la valoriser pour atteindre un rendement total pouvant aller jusqu'à 90%, voire un peu au-delà pour des applications industrielles. Ceci implique une production locale par de petites unités. En effet une production électrique de, par exemple un réacteur nucléaire de 1GW, implique la dissipation d'environ 2 GW de chaleur. Il s'agit de la puissance permettant théoriquement de chauffer 100000 logements récents de 100 m². En pratique, comme la chaleur se transporte beaucoup moins bien que l'électricité, elle est souvent considérée comme un déchet industriel.

Lorsque, grâce à la cogénération, cette option peut être évitée, les principaux moyens d'utilisation de cette énergie sont la production d'air chaud, la production d'eau chaude et la production de vapeur.

Récemment, la technologie de la trigénération est devenue d'application. Elle consiste en une extension de la cogénération, avec production d'une troisième catégorie d'énergie, en général du froid.

Les unités de cogénération qui utilisent la biomasse comme combustible se multiplient, elles fonctionnent suivant l'un de ces deux principes :

- Co-combustion : le principe est d'envisager la biomasse comme combustible conjoint remplaçant partiellement le charbon dans les centrales thermiques. Il s'agit du marché le plus porteur actuellement (USA, Allemagne, Suède, Italie). Le gros avantage est la faiblesse des coûts additionnels de capital et les bons rendements électriques (de l'ordre de 35%) car ils utilisent des centrales au charbon existantes.

- Gazéification : la biomasse est oxydée partiellement pour obtenir un combustible gazeux. Le gros avantage est d'améliorer les rendements électriques par rapport aux turbines vapeur : 25% pour les petites installations et 50% pour les grosses installations.

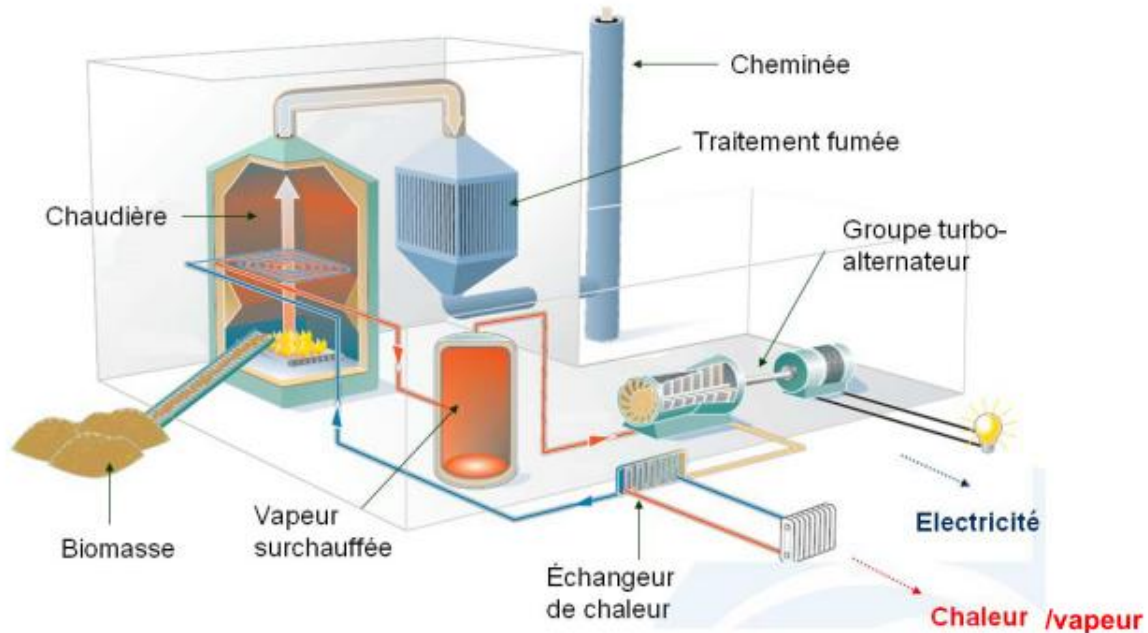


Figure 19 : Principe de fonctionnement d'une centrale de cogénération d'électricité et de vapeur à partir de la biomasse [Réf 13]

III.3. Traitement de la biomasse forestière

La biomasse forestière doit être préalablement traitée afin de répondre aux besoins des différents acteurs du secteur énergétique, comme les producteurs d'énergie et les fabricants de bioproduits énergétiques ; ces utilisations exigent une matière première ligneuse de qualité, qui est décontaminée, calibrée, séchée et dont les propriétés sont constantes. De plus, la fragmentation et le séchage sont nécessaires avant de passer aux autres étapes de valorisation énergétique de la biomasse.

III.4. Dimensionnement d'une installation de cogénération

Le dimensionnement d'une installation de cogénération consiste à choisir les équipements susceptibles de couvrir au mieux les besoins énergétiques du site d'application. Le choix porte sur le type de technologie, la puissance installée, la connexion au réseau électrique, la période de fonctionnement. D'emblée, il doit être décidé si le dimensionnement se fait selon les besoins électriques ou les besoins de chaleur, puisqu'un paramètre crucial de la faisabilité et la rentabilité des systèmes est l'utilisation de la puissance thermique disponible en cogénération:

- Dans les pays visant des gains énergétiques et des réductions d'émissions, le dimensionnement sur la base des besoins en chaleur est indiqué parce qu'il procure une meilleure efficacité énergétique des systèmes de cogénération. Si les besoins locaux d'électricité sont insuffisants pour consommer toute l'électricité produite, celle-ci doit impérativement être reprise par le réseau local à des conditions correctes (prix, prime à la tonne de CO₂ évitée, etc.).

- Lorsque le prix de l'électricité est très élevé, le porteur de projet peut dimensionner son installation de manière à couvrir le maximum de ses besoins en électricité. Dans ce cas, il n'est pas rare que toute la chaleur cogénérée ne soit pas consommée, ce qui entraîne une réduction du rendement utile.

Il est donc nécessaire de bien évaluer les besoins de chaleur et d'électricité de l'établissement concerné ainsi que leurs variations journalière, hebdomadaire, mensuelle, si possible à partir d'une année complète de référence. Il est préférable de choisir une année de référence de consommation faible si l'activité de l'établissement est susceptible de diminuer et/ou si des mesures d'utilisation rationnelle d'énergie sont prévues, et inversement une année de consommation élevée si l'activité est susceptible d'augmenter, par exemple si une extension de l'établissement est envisagée. Une analyse des consommations d'énergie des dernières années et des projets éventuels planifiés permet de connaître la tendance à la hausse ou à la baisse pour les années à venir.

III.5. Trigénération

La chaleur récupérée lors de la production d'électricité peut aussi être utilisée, en partie ou totalement, dans les machines frigorifiques munies d'un cycle à absorption ou à adsorption. C'est la trigénération, particulièrement intéressante pour les pays tropicaux où la climatisation contribue largement à la demande de pointe électrique. Dans les régions à climat tempéré, les deux modes de fonctionnement peuvent alterner (production de chaleur en hiver et de froid en été).

Le potentiel de la trigénération concerne tous les consommateurs d'une quantité suffisante et régulière de froid, qu'ils consomment seulement du froid (entrepôts frigorifiques de conservation et de conditionnement des aliments) ou de la chaleur et de froid (abattoirs, industries pharmaceutiques, chimiques et agroalimentaires, immeubles de bureaux et certains parcs de logements).

La valorisation de l'unité de cogénération pour la production de froid peut être réalisée de deux manières:

- Indirecte: La chaleur récupérée de l'unité de cogénération est utilisée pour produire de la vapeur ou de l'eau chaude dans une chaudière classique. L'unité de réfrigération est alors alimentée par l'eau chaude ou la vapeur provenant de la chaudière. Ce système présente l'avantage de disposer d'eau chaude ou de vapeur pour d'autres applications.

- Directe: La chaleur récupérée est envoyée directement au générateur de l'unité de réfrigération. Ce système présente l'avantage de ne pas utiliser de chaudière, permettant une économie en frais d'investissement et de maintenance. En outre, le système est plus compact.

Les machines frigorifiques classiques à compression consomment exclusivement de l'électricité; leur coefficient de performance (COP), représentant le rapport entre l'effet frigorifique utile et l'énergie consommée, est élevé, entre 2,5 et 5. Par opposition, les machines frigorifiques à trigénération consomment quasi-exclusivement de la chaleur; leur COP est faible, entre 0,6 et 1,2. L'intérêt de la trigénération est mis en évidence si le rendement global de conversion de l'énergie primaire en froid est évalué, en tenant compte du rendement de production de l'électricité consommée par les cycles à compression (0,25 à 0,55). La trigénération offre deux types de technologies:

- Les machines à absorption utilisent, comme absorbant- réfrigérant:

a) Le couple Eau-Ammoniac adapté pour les moyennes et grandes puissances à des températures de refroidissement inférieures à 5°C. Les applications sont de type industriel, pour une puissance frigorifique allant jusqu'à plusieurs MW.

b) Le couple Bromure de Lithium-eau, utilisé pour le conditionnement d'air ($T > 5^{\circ}\text{C}$) dans les bâtiments. Le COP est plus élevé (0,7-1,2).

• Les machines frigorifiques à adsorption fonctionnent avec le couple gel de silice/eau. Les applications concernent les besoins en eau froide jusqu'à 3 °C (applications dans les nouvelles constructions). Les machines disponibles sur le marché répondent à une puissance frigorifique nominale de 50 à 353 kWf. Par rapport aux machines à absorption au Bromure de Lithium à un seul étage, elles offrent un meilleur COP pour de plus faibles températures d'eau chaude (65-85°C).

III.6. Les réseaux de chaleur

Un réseau de chaleur (également appelé 'chauffage urbain') est une installation qui comprend une ou plusieurs sources de chaleur (chaufferie), un réseau (primaire et/ou secondaire) de canalisations empruntant la voirie publique ou privée et aboutissant à des postes de livraison de la chaleur aux utilisateurs, appelés les sous-stations. La chaleur est produite par une unité de production et ensuite transportée par un fluide caloporteur (généralement de l'eau) dans divers lieux de consommation : logements principalement, mais aussi aux autres bâtiments publics et privés ayant des besoins en chaleur (hôpitaux, piscines, écoles, etc.). En France par exemple, les 2/3 de la chaleur distribuée par les réseaux vont à l'habitat.

On peut distinguer deux types de production de chaleur. D'une part, des centrales thermiques sont créées dans le but de créer un réseau de chaleur à distance pour un vaste quartier d'habitation et/ou de services. Ces centrales utilisent des combustibles de différents types gaz, fioul, bois... D'autres réseaux de chaleur à distance se basent sur la production de chaleur d'une industrie pour redistribuer cette chaleur. On peut citer l'exemple de certaines centrales nucléaires et d'incinérateurs redistribuant de l'eau chaude pour certains besoins proches.

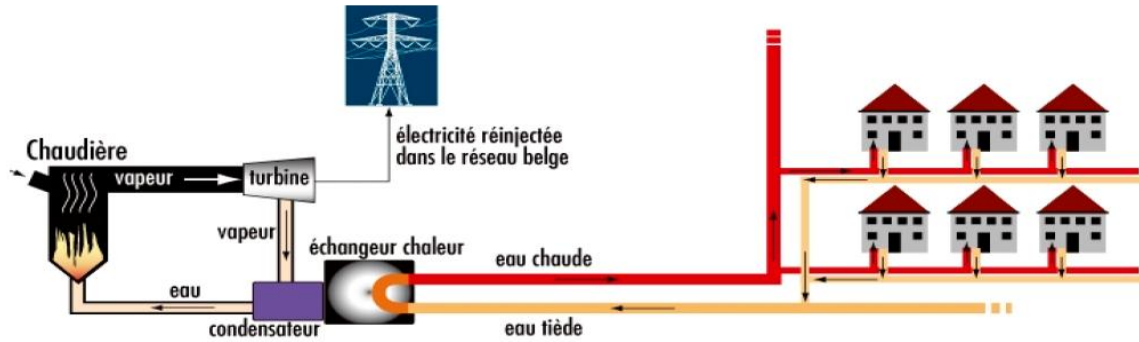


Figure 20 : Réseau de chaleur alimenté par une cogénération [Réf 15]

En Europe, on peut estimer le nombre de consommateurs (logements et tertiaire) raccordés à un réseau de chaleur à 100 millions. L'importance des réseaux de chaleur dans la consommation d'énergie domestique (hors électricité) varie de 1 à 50% en fonction des pays. Les réseaux les plus étendus se situent en Allemagne (12% des besoins en chaleur), en Suède, au Danemark (50%) et dans nombre de pays de l'Est (Pologne, République Tchèque, etc.). Le marché des réseaux de chaleur est caractérisé par la stabilité et une croissance relativement faible. Le secteur voit deux tendances récentes se dégager :

- Changement de combustible (fuel switch) : du pétrole et du charbon vers le gaz et la biomasse, afin de baisser substantiellement l'empreinte carbone.
- Une conversion progressive des centrales thermiques vers des centrales de cogénération, particulièrement en Suède et en Pologne. En Finlande et au Danemark, la part de chaleur générée par cogénération atteint déjà 75 à 80%.

Le système de distribution a été réalisé pour faire circuler une eau dont la température maximale est de 90 °C, à une pression maximale de 90 lb/po² (6,1 atm). La température de l'eau d'alimentation est maintenue à environ 85 °C alors que les températures de retour varient entre 45 et 50 °C. Durant l'été, la température de l'eau d'alimentation est abaissée entre 65 et 70 °C, ce qui est suffisant pour les besoins en eau chaude des maisons. Par souci de sécurité, les canalisations du réseau de chauffage peuvent être fermées par des valves, de façon à isoler un bâtiment qui pourrait être endommagé lors d'une catastrophe, par exemple.

Pour réduire les pertes de chaleur, les tuyaux acheminant l'eau chaude sont en acier ou en polyéthylène réticulé en fonction du diamètre et de la pression induite. Un isolant de haute qualité en mousse dure de polyuréthane entoure le tuyau, et cette mousse est protégée par une coque en polyéthylène. Tout au long du réseau, 2 tuyaux sont disposés en parallèle (une pour l'aller, une pour le retour) en percement de voirie, idéalement dans une tranchée remplie de béton cellulaire et fermée par une membrane d'étanchéité. Ces techniques de calorifugeage permettent de réduire les pertes en ligne à un niveau restreint (de l'ordre de 1 à 2% par km). Sur un réseau de 50 km, il faut compter environ 10% de pertes thermiques par rapport à la consommation totale du réseau.

Conversion de la biomasse forestière de l'Algérie en énergie par voie de cogénération (électricité et chaleur) :

Partie I :Analyse de la conversion énergétique de la biomasse

IV.1. Méthodologie

Une fois que les quantités de biomasse forestière sont déterminées, l'étape suivante consiste à trouver la quantité d'énergie que cette biomasse forestière pourrait produire, sous forme d'électricité et de chaleur, si elle était utilisée comme combustible dans une centrale de cogénération. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs mesures sont effectuées. Premièrement, la chaleur calorifique des résineux et de feuillus pour toutes les catégories correspondantes de biomasse forestière est déterminée. Pour cette étude, les chaleurs calorifiques des résineux et des feuillus pour toutes les composantes de la biomasse forestière sont prises à partir des tableaux 16 et 17. Les données sont basées sur une teneur en humidité de 50% et tiennent donc compte de la quantité d'énergie qui est consommée au cours de la vaporisation de l'eau, ce qui est communément désigné sous le terme chaleur calorifique inférieure (« Low Heating Value LHV », en français Pouvoir calorifique inférieur (PCI)).

La teneur en humidité de la biomasse varie considérablement selon le type de biomasse ainsi que la façon dont elle est entreposée. La teneur en humidité normale du bois fraîchement coupé varie de 45 à 58% avec une moyenne de 50% pour les copeaux de bois des résineux et de feuillus. Dans le cadre de cette étude, la teneur en humidité moyenne pour tous les types de biomasse forestière est fixée à 50%.

L'étape suivante consiste à estimer le contenu énergétique total de chaque catégorie de biomasse forestière pour toutes les aires d'approvisionnement:

$$E = 1000 m [PCI]$$

Où E est le contenu énergétique de la biomasse forestière (MJ), m est la quantité de biomasse forestière (tonne métrique verte (T.M.V.) à 50% de teneur en humidité) et LHV est la chaleur calorifique inférieure de la biomasse forestière (MJ / kg), tandis que la constante 1000 fait référence à la conversion des T.M.V en kilogrammes.

Une fois que la quantité d'énergie a été déterminée, la puissance électrique d'une centrale de cogénération alimentée à la biomasse forestière est calculée:

$$Pe = \left(\frac{E}{t}\right) \eta_e$$

Où Pe est la puissance électrique (MWe), E est le contenu énergétique de la biomasse forestière (MJ), t est le temps (en secondes) et η_e est le rendement électrique de la centrale de cogénération.

Pour sa part, la puissance thermique de la centrale de cogénération est donnée par :

$$P_{th} = \left(\frac{E}{t} \right) \eta_{th}$$

Où P_{th} est la puissance thermique (MWth), E est le contenu énergétique de la biomasse forestière (MJ), t est le temps (en secondes) et η_{th} est le rendement thermique de la centrale de cogénération.[Réf 16]

Richardson *et al.* [Réf 17] décrivent le rendement d'une centrale de cogénération comme « la proportion de l'énergie contenue dans le carburant qui peut être convertie en chaleur et en électricité ». Les propriétés du carburant, le type de chaudière et le facteur de charge joueront également un rôle dans l'efficacité de la centrale.

Le rendement électrique (η_e) d'une centrale de cogénération alimentée à la biomasse forestière peut varier entre 20 et 30% [Réf 17]. Dans cette étude, le rendement électrique est établi à 25%. Quant au rendement thermique (η_{th}), les centrales de cogénération modernes peuvent convertir entre 55 et 70% de leur apport énergétique en chaleur [Réf 16]. Pour cette étude, le rendement thermique est établi à 60% (comme première hypothèse, on prend la moyenne entre 55% et 70% c-a-d 60% pour faciliter et simplifier les calculs).

Ainsi, le rendement global d'une centrale de cogénération alimentée à la biomasse forestière est obtenu par l'équation suivante:

$$\eta_{tot} = \eta_e + \eta_{th}$$

Où η_{tot} est le rendement total, η_e est le rendement électrique et η_{th} est le rendement thermique. Par conséquent, dans cette étude, le rendement global de la centrale de cogénération alimentée à la biomasse forestière se situe à 85%.

IV.2. Résultats

IV.2.1. Calcul de la masse de bois résiduel

Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre précédent, le total de la récolte annuelle de bois de chauffage (résidu forestière) en Algérie pour l'année 2005 est de l'ordre de 67478 m³ (volume métrique anhydre), pour convertir ce volume en TMA (tonnes métrique anhydre) multiplie par la densité :

$$TMA = VMA * d$$

Pour chaque essence, la densité oscille entre un maximum et un minimum assez éloignés ; la plus part des essences ont une densité moyenne que l'on admet comme caractéristique. On prend la densité égale à 0,4 kg/dm³

$$\begin{aligned}\text{Application numérique :} \quad TMA &= 67478 * 0.4 * 1000^3 \\ &= 26991.2 \text{ tma}\end{aligned}$$

Pour convertir la masse anhydre en masse verte on ajoute le pourcentage d'humidité qu'on l'a fixé égal à 50% de la masse verte donc on multiplie TMA par deux :

$$\begin{aligned}TMV &= TMA * 2 \\ &= 26991.2 * 2 \\ &= 53982.4 \text{ tmv}\end{aligned}$$

IV.2.2. Calcul de pouvoir calorifique inférieur PCI :

En appliquant la relation suivante, on peut calculer le PCI :

$$PCI = (\text{PCI anhydre} \times (100 - H)/100) - 6 \times H \text{ (en Wh/kg ou kWh/t)}$$

Puisqu'on ne connaît pas la contribution de chaque espèce dans le volume total de bois résiduel, on prend le pouvoir calorifique inférieur anhydre de tout le volume égal au pouvoir calorifique inférieur anhydre le plus faible des espèces présentes. Dans notre cas c'est le PCI de peuplier qui est égal à 4890 kWh/t d'où :

$$\begin{aligned}PCI &= (4890 * (100 - 50)/100 - 6 * 50) \\ &= 2172 \text{ kwh/t} \\ &= 2172 * 3600 \\ &= 7.82 \text{ MJ/kg}\end{aligned}$$

IV.2.3. Calcul d'énergie

$$\begin{aligned}E &= 1000 * m * (\text{PCI}) \\ E &= 1000 * 53982.4 * 7.82 \\ &= 422139.24 \text{ GJ}\end{aligned}$$

IV.2.4. Calcul de puissance électrique théorique

$$\begin{aligned}P_{eth} &= (E / t) \eta_{th} \\ &= (422139.24 * 10^9 / (365.25 * 24 * 3600)) * 0.25 \\ &= 3.34 \text{ MW}\end{aligned}$$

IV.2.5. Calcul de puissance de chaleur

$$\begin{aligned}P_{ch} &= 422139.24 * 10^9 / (365.25 * 24 * 360) * 0.6 \\ &= 8.03 \text{ MW}\end{aligned}$$

En prenant le pouvoir calorifique inférieur égal au pouvoir calorifique inférieur moyen des espèces tiré de la banque de données du logiciel RETScreen (PCI = 18,4 MJ/kg) au lieu de pouvoir calorifique inférieur le plus faible on arrive à des résultats encore plus intéressants.

$$E = 1000 * 53982.4 * 18,4$$

$$E = 993276.16 \text{ GJ}$$

$$P_{th} = (993276.16 * 10^9 / (365.25 * 24 * 3600)) * 0.25$$

$$P_{eth} = 7,87 \text{ MW}$$

$$P_{ch} = 18,89 \text{ MW}$$

IV.3. Discussion des résultats

La méthodologie proposée dans cette étude est basée sur les données de l'inventaire forestier, les possibilités annuelles de coupe, les équations de la biomasse forestière.

Ces récoltes annuelles potentielles de biomasse forestière sont ensuite attribuées aux aires d'approvisionnement de centrale de cogénération. Une fois que la ressource en biomasse forestière est évaluée pour l'aire d'approvisionnement, la puissance technique des centrales de cogénération peut être déterminée.

En ce qui concerne la disponibilité de la biomasse forestière résiduelle, son utilisation a toujours été limitée et la majeure partie de la biomasse forestière résiduelle de l'Algérie reste inexploitée. Cette catégorie de biomasse forestière, avec un potentiel annuel estimé à plus de 53982 T.M.V, est donc considérée comme ayant le plus de potentiel pour être utilisée comme combustible dans le développement de nouvelles centrales de cogénération, avec des potentiels théoriques électriques et thermiques des 7,87 MW e et 18,89 MW th respectivement.

Une centrale à cycle de Rankine de 5 à 7 MWe consomme :

- 26 MW PCI entrants de biomasse,
- Soit 10 tonnes de bois à l'heure,
- Ou 34 m³/h,
- Soit 20 semi-remorques de biomasse par jour

En ce qui concerne l'aspect temporel de l'étude, il est important de noter qu'étant donné que la méthode utilisée dans ce projet est basée sur les possibilités annuelles de coupe, les quantités résultantes de biomasse forestière potentielle représentent inévitablement les conditions actuelles. Dans le futur, les PAC (Possibilités Annuelles de Coupes) peuvent changer en raison de nouveaux objectifs de gestion, de la mise à jour des inventaires forestiers, des informations plus à jour à partir d'enquêtes sur le développement forestier et de nouvelles projections de croissance des forêts. L'augmentation prévue des activités qui se déroulent dans les forêts aménagées comparativement aux forêts naturelles aura également un impact sur la quantité de biomasse forestière disponible ainsi que sur la distribution de la biomasse forestière selon chacune de ces catégories.

En bref, quoique la quantité de biomasse forestière peut être évaluée de façon relativement précise lorsqu'on a accès à des données complètes et fiables, la quantité de cette biomasse forestière facilement disponible, est, elle, beaucoup plus difficile à prévoir et des études plus détaillées devraient être menées, surtout au niveau des aires d'approvisionnement spécifiques, avant d'envisager le développement d'une nouvelle centrale de cogénération alimentée à la biomasse forestière.

En résumé, les résultats de cette étude permettent de présager des perspectives bénéfiques d'exploitation des ressources de biomasse forestière dans notre pays pour la production d'énergie. Des quantités substantielles d'énergie électrique et thermique pourraient en effet se dégager de cette biomasse forestière si elle était utilisée comme combustible dans des centrales de cogénération. Tenant compte du fait que la plupart de la biomasse forestière qui est composée de bois marchand est déjà utilisée par les installations de transformation du bois, le développement de futures centrales de cogénération devrait accorder une attention particulière à la biomasse forestière résiduelle ainsi qu'à l'écorce, car ces dernières sont restées largement inexploitées.

À côté des avantages sur le bilan énergétique et les substantielles économies d'énergie fossile, ce type de projets ont également des retombées socioéconomiques et environnementales évidentes : création d'emploi, gestion durable des forêts, etc.

Dans la section suivante, nous terminons par la simulation d'une filière de bois énergie en utilisant un logiciel spécialement dédié à l'encouragement de ce type de filières, en utilisant les données obtenues ou estimées au cours de notre étude.

Partie II : Analyse de projets d'énergie propre issue de la biomasse en Algérie par RETScreen

IV.1. Le Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen

Le Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen est un outil unique d'aide à la décision développé en collaboration avec de nombreux experts de l'industrie, du gouvernement et du milieu académique canadien. Offert gratuitement, il peut être utilisé partout à travers le monde pour évaluer la production et les économies d'énergies, le coût, les réductions des émissions, la viabilité financière et le risque de différentes technologies d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Le logiciel (disponible en plusieurs langues) inclut des bases de données de produits, de projets, hydrologiques et climatiques, un manuel de l'utilisateur, ainsi qu'un cours de formation de niveau collégial et universitaire basé sur des études de cas, incluant un e-manuel d'ingénierie.

Le Centre d'aide à la décision sur les énergies propres, RETScreen International, est administré sous le leadership et l'aide financière continue du Centre de la technologie de l'énergie de CANMET - Varennes (CTEC-Varennes) de Ressources naturelles Canada (RNCan), en partenariat avec, entre autres, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et la « *National Aeronautics & Space Administration (NASA)* ».

RETScreen 4 est une évolution très importante de cet outil qui permet de juger rapidement si un projet potentiel d'énergie propre est suffisamment prometteur pour être étudié plus à fond.

Le Modèle pour cogénération 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 de cogénération hors réseau ou raccordées à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité, et ce partout à travers le monde. Le logiciel peut modéliser une gamme de projets allant de centrales de grande taille composées de plusieurs turbines à vapeur alimentée au charbon ou de plusieurs turbines à gaz à cycle combiné alimentées au gaz naturel et connectées à des réseaux énergétiques urbains, jusqu'aux systèmes de production d'énergie décentralisée alimentés à la biomasse et fournissant du froid, de la chaleur et de l'électricité à des bâtiments institutionnels, commerciaux et industriels, en passant par des systèmes d'alimentation autonomes pour les bâtiments commerciaux et institutionnels et par des systèmes de moteurs à pistons de petite envergure en régions éloignées.

Le logiciel peut être utilisé pour évaluer différents équipements de production d'électricité, de chaleur et de froid, chacun ayant diverses conditions d'opérations (production de base, intermédiaire ou de pointe). De plus, il permet l'analyse avec une vaste gamme de combustibles renouvelables et conventionnels (combustibles fossiles), qui peuvent être utilisés parallèlement, notamment les gaz de sites d'enfouissement, la biomasse, la bagasse, le biodiesel, le biogaz, l'hydrogène, le gaz naturel, le pétrole, le diesel, le charbon, les déchets municipaux, etc. La feuille de calcul *Charge et conception du réseau* permet de faire une conception préliminaire et une estimation des coûts d'un réseau de chauffage urbain et/ou de distribution de froid. De plus, la production de gaz d'enfouissement peut être estimée à l'aide d'un outil avancé de calcul des Gaz d'enfouissement, et un outil de calcul des Biogaz est fourni pour estimer la quantité de biogaz produite par la décomposition biologique des différents déchets. Le logiciel (disponible en plusieurs langues) inclut des bases de données de produits, de projets et climatiques, ainsi qu'un manuel de l'utilisateur détaillé.

Au Canada, RETScreen fait partie des contributions du Gouvernement fédéral à la lutte aux changements climatiques et à la protection de l'environnement. Le programme EcoAction offre des mesures incitatives, des outils et des conseils qui vont au-delà de la portée de RETScreen.

IV.2. Projet de production de chaleur et de l'électricité – turbine à vapeur

RETScreen 4 propose une analyse standard en cinq étapes utilisant le logiciel bien connu Microsoft Excel comme interface conviviale. RETScreen complète les capacités et la flexibilité de Excel au moyen de plusieurs milliers de lignes de codes de programmation supplémentaire.

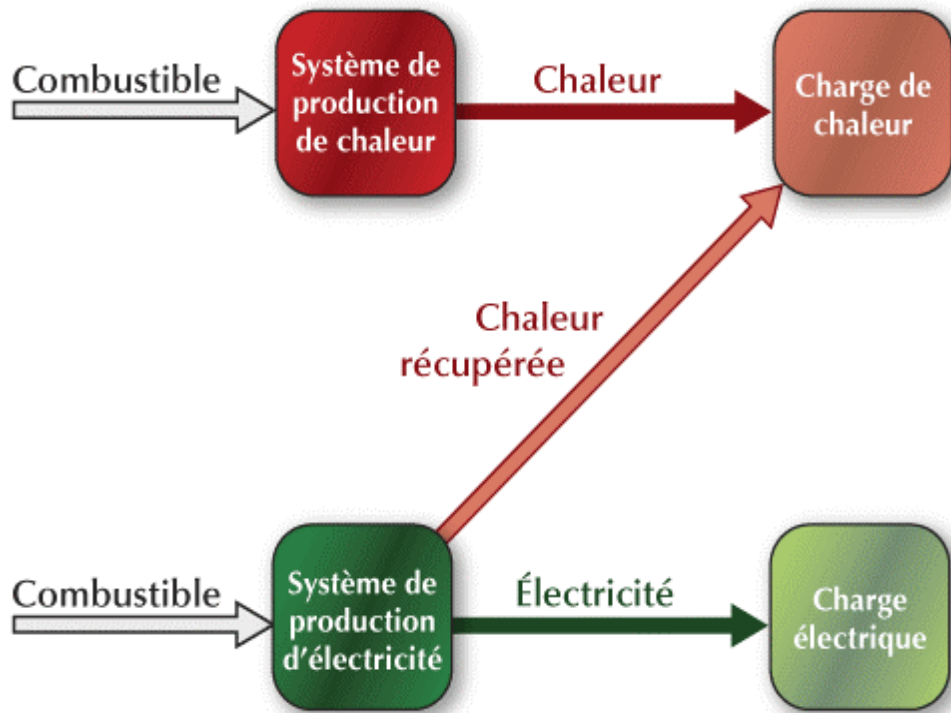


Figure 21 : Schéma de projet de production de chaleur et de l'électricité [RETSscreen]

IV.2.1.Démarrer

À l'ouverture de RETScreen, c'est la feuille *Démarrer* qui apparaît. Nous introduisons le nom du projet : « centrale biomasse - Algérie », ensuite nous sélectionnons la langue de travail, les devises et les unités dans lesquelles nous désirons travailler ainsi que les données climatiques du lieu du projet. nous avons le choix de 2 méthodes d'analyse : la « Méthode 1 » est une feuille de calcul simplifiée unique alors que la « Méthode 2 » propose une approche plus détaillée. C'est ensuite que commence l'analyse RETScreen en cinq étapes. Nous avons choisi la méthode 1 en raison de sa simplicité.

IV.2.1.1. Informations sur le projet

Information sur le projet [Voir la Base de données de projets](#)

Nom du projet: centrale cogeneration - algerie-
 Lieu du projet: alger

Préparé pour: projet fin d'étude
 Préparé par: R- kada et B-racha

Type de projet: Production de chaleur et d'électricité
 Type de réseau: Réseau central
 Type d'analyse: Méthode 1
 Pouvoir calorifique de référence: Pouvoir calorifique inférieur (PCI)
 Afficher paramètres:
 Langue - Langue: French - Français
 Manuel de l'utilisateur: French - Français
 Devise: Euro
 Unités: Unités métriques

IV.2.1.2. Conditions de référence du site

Conditions de référence du site [Choisir le lieu des données climatiques](#)

Lieu des données climatiques: Alger Port
 Afficher information:

	Unité	Lieu des données climatiques	Lieu du projet
Latitude	'N	36,8	36,8
Longitude	'E	3,1	3,1
Élévation	m	60	60
Température extérieure de calcul de chauffage	°C	3,1	
Température extérieure de calcul de climatisation	°C	33,1	
Amplitude des températures du sol	°C	14,2	

Mois	Température de l'air	Humidité relative	Ragonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température du sol	Degrés-jours de chauffage	Degrés-jours de climatisation
	°C	%	kWh/m ² /j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janvier	12,2	71,0%	2,20	97,2	3,0	11,6	180	68
Février	12,6	66,0%	3,00	97,1	3,0	12,4	151	73
Mars	13,8	65,0%	4,10	96,9	3,0	14,6	130	118
Avril	16,0	62,0%	4,90	96,6	3,0	17,1	60	180
Mai	18,5	66,0%	6,00	96,7	3,0	21,0	0	264
Juin	22,1	66,0%	6,20	96,8	3,0	25,8	0	363
Juillet	24,3	67,0%	7,00	96,8	3,0	28,9	0	443
Août	25,2	65,0%	6,40	96,8	3,0	29,0	0	471
Septembre	23,2	68,0%	5,10	96,8	3,0	25,8	0	396
Octobre	20,0	66,0%	3,30	96,9	3,0	21,5	0	310
Novembre	16,7	68,0%	2,70	96,9	3,0	16,6	39	201
Décembre	13,9	68,0%	2,00	97,1	3,0	13,0	127	121
Annuel	18,2	66,5%	4,42	96,9	2,9	19,8	687	3 008
Mesuré à	m				10,0	0,0		

IV.2.2. Charge et conception du réseau RETScreen

En premier, le modèle énergétique va évaluer les bénéfices énergétiques du projet proposé par rapport à un projet conventionnel de référence pour le même besoin. En second lieu, on évalue les coûts additionnels du projet proposé d'énergie propre par rapport au projet de référence. La troisième étape est optionnelle; il s'agit de calculer les réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES), selon une méthode standard développée en collaboration avec le Programme des Nations-Unies pour l'environnement et le Fonds prototype du carbone de la Banque mondiale. En quatrième étape, on dresse le sommaire financier du projet. C'est dans cette partie que l'on découvre si le projet est financièrement intéressant ou non, compte-tenu des flux monétaires, des taxes et impôts, des subventions et des crédits pour réductions d'émissions de GES, par exemple. Enfin, une dernière étape propose une analyse de sensibilité et une analyse de risques. Ces analyses montrent comment les variations de certains paramètres affectent la rentabilité du projet, au moyen notamment d'une simulation de type « Monte Carlo » qui consiste à effectuer 500 analyses différentes en combinant et en faisant varier aléatoirement les paramètres critiques à l'intérieur de leurs plages probables prédéterminées de variation, notant que cette dernière étape est optionnelle.

IV.2.2.1. Projet de production de chaleur du cas du référence

Le projet conventionnel de référence a été choisit comme étant une centrale de production de chaleur par combustion du combustible fossile qui est le gaz naturel pour le même besoin avec le projet proposé, après avoir calculé la quantité de biomasse qui pourrait être fournie à la centrale comme suit :

- La masse de bois résiduel issu de la récolte annuelle est de 53982.4 TMV (masse calculée au paragraphe IV.2.1 de chapitre III) ; La quantité d'énergie produite est de 993 815.984 GJ (énergie calculée au paragraphe IV.2.5 de chapitre III) .
- La quantité du combustible fournie à la centrale est :

$$993815.984 / (365.25 * 24) = 113.37 \text{ GJ/h}$$

Le modèle calcule la quantité de chaleur de base (annexe3) générée par la combustion de la biomasse qui est de l'ordre de 16000 kW, nous avons donc choisi le projet de référence, considérant le gaz naturel comme combustible, produisant la même quantité qui sera utilisée comme chaleur pour procédé industriel d'un seul bâtiment avec un rendement saisonnier de 100%.

Les résultats indiquent que :

- La consommation du combustible Gaz nécessaire pour produire une telle quantité de chaleur est de : 14 850 184 m³/an.
- Le coût du combustible est estimé à 109 891 €/ an. Sur la base d'un prix de référence limité par le ministère de l'énergie et des mines ; 1 m³ = 0.007 €.

Projet de production de chaleur	Unité	
Système de production de chaleur du cas de référence		
Un seul bâtiment - chaleur pour procédé		
Surface de planchers chauffés du bâtiment	m ²	0
Type de combustible	Gaz naturel - m ³	
Rendement saisonnier	%	100%
Calcul de la charge de chaleur		
Charge de chaleur de pointe du procédé	kW	16 000,0
Caractéristiques de la charge de chaleur du procédé	Standard	
Heures équivalentes à plein régime - chaleur pour procédé	h	8 760
Chaleur totale	MWh	140 160
Charge de chaleur de pointe totale	kW	16 000,0
Consommation de combustible - annuelle	m ³	14 850 184
Prix du combustible	€/m ³	0,007
Coût en combustible	€	109 891
Mesures d'efficacité énergétique du cas proposé		
Réduction des besoins énergétiques	%	0%
Charge de chaleur de pointe nette	kW	16 000,0
Chaleur nette	MWh	140 160

Mais si on choisit d'utiliser cette même quantité de chaleur pour chauffer plusieurs bâtiments alors :

- Si on considère qu'une maison de 100 m² de surface consomme 20 kw alors un nombre de 2 200 maisons feront part du groupe de bâtiment 1 avec une surface de planchés chauffées de 220 000 m².
- Le groupe de bâtiment 2 est considéré comme étant un hôpital d'une surface de planché chauffée de 900 m².
- Le groupe de bâtiment 3 est une école de surface estimée à 800m².
- Le groupe de bâtiment 4 est un édifice à bureaux de 1000m².
- Le groupe de bâtiment 5 est un Edifice résidentiel de 1500 m².

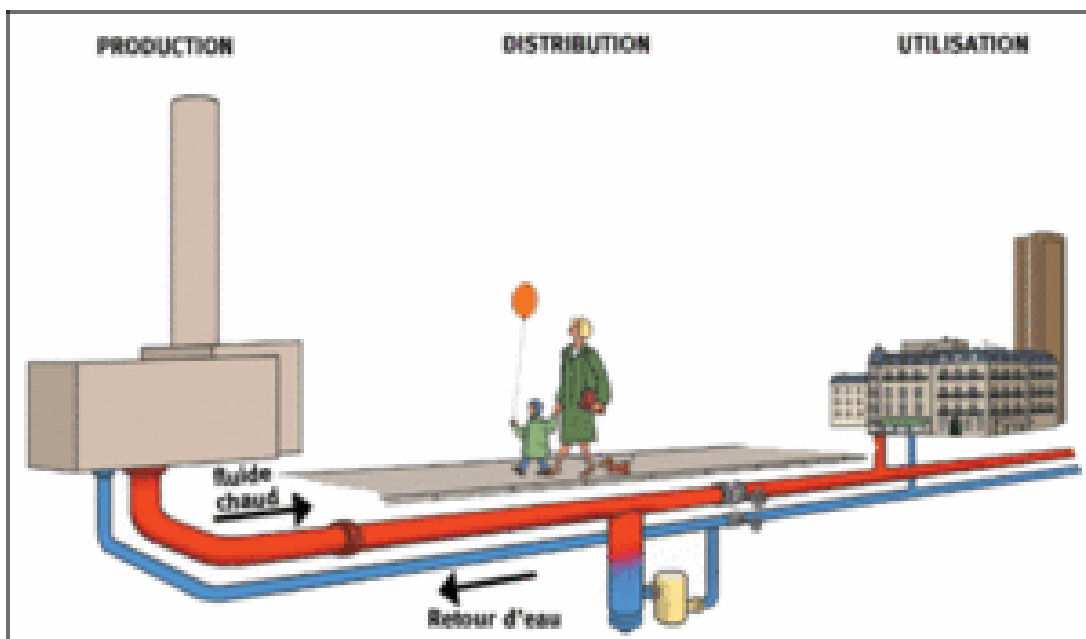


Figure 22 : Schéma d'un réseau de chauffage [Réf 20]

Valorisation énergétique de la biomasse résiduelle forestière

Projet de production de chaleur		Unité										
Système de production de chaleur du cas de référence		Plusieurs bâtiments - chauffage										
<i>Voir la note technique sur la conception du réseau de chauffage urbain</i>							Groupe de bâtiments					
Surface de planchers chauffés du groupe de bâtiments	m ²	224 200	1	2	3	4	5					
Nombre de bâtiments du groupe de bâtiments	bâtiment	2 204	220 000	900	800	1 000	1 500					
Type de combustible			1	1	1	1	1					
Rendement saisonnier	%	-	Gaz naturel - 65%	Gaz naturel - 65%	Gaz naturel - 100%	Gaz naturel - 70%	Gaz naturel - 60%					
Calcul de la charge de chaleur												
Charge de chauffage du groupe de bâtiments	W/m ²		70	90	70	65	100					
Demande de base d'eau chaude sanitaire	%	10%										
Chaleur totale	MWh	16 842	16 466	87	60	69	160					
Charge de chaleur de pointe totale	kW	15 752	15 400	81	56	65	150					
Consommation de combustible - unité		-	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²					
Consommation de combustible - annuelle		-	2 683 991	14 117	6 344	10 519	28 321					
Prix du combustible - unité		-	€/m ²	€/m ²	€/m ²	€/m ²	€/m ²					
Prix du combustible		-	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007					
Coût en combustible	€	19 203	€ 18 788	€ 99	€ 44	€ 74	€ 198					
Mesures d'efficacité énergétique du cas proposé												
Réduction des besoins énergétiques	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%					
Charge de chaleur de pointe nette	kW	15 752	15 400	81	56	65	150					
Chaleur nette	MWh	16 842	16 466	87	60	69	160					

Le système de référence utilise le gaz naturel comme combustible et son rendement saisonnier dépend du type de groupe de bâtiment.

Les critères du réseau de chauffage urbain et les caractéristiques de la ligne de distribution principale et secondaire sont indiquées dans la feuille suivante.

Réseau de chauffage urbain du cas proposé		Données/Total									
Critères de conception du réseau de chauffage urbain											
Température de calcul d'alimentation	°C	95									
Température de calcul de retour	°C	65									
Différentiel de température	°C	30									
Ligne principale de distribution de chaleur											
Surdimensionnement des tuyaux du réseau principal	%	10%									
Sections de tuyaux											
	Charge kW	Longueur m	Dimension des tuyaux mm	Le groupe de bâtiments est-il alimenté par cette section de tuyaux? (oui/non)							
Section 1	15 400,0	59	DN 300	1	2	3	4	5	6	7	8
Section 2	15 537,0	69	DN 300	Oui	Oui	Oui	Non	Non			
Section 3	215,0	42	DN 65	Non	Non	Non	Oui	Oui			
Section 4											
Section 5											
Section 6											
Section 7											
Section 8											
Section 9											
Section 10											
Section 11											
Section 12											
Section 13											
Longueur totale des tuyaux de la ligne principale de distribution	m	170									
Lignes secondaires de distribution de chaleur											
Surdimensionnement des tuyaux du réseau secondaire	%										
Longueur de la section de tuyaux	m	11 190		Longueur des tuyaux de distribution secondaire par groupe de bâtiments							
Dimension des tuyaux	mm			m	11 110	25	15	15	25		
				DN 32	DN 40	DN 32	DN 40	DN 50			
Coût du réseau de chauffage urbain											
Longueur totale des tuyaux	m	11 360									
Méthode d'évaluation des coûts		Formule									
Type de connexion des stations de transfert d'énergie		Direct									
Facteur de coût des stations de transfert d'énergie		1,00									
Facteur de coût des tuyaux de la ligne principale de distribution		1,00									
Facteur de coût des tuyaux des lignes secondaires de distribution		1,00									
Taux de change	€/CAD	1,40									
Coût des stations de transfert d'énergie	€	4 162 807		Coûts des stations de transfert d'énergie et des tuyaux de distribution secondaire par groupe de bâtiment							
Coût des tuyaux des lignes secondaires de distribution	€	9 445 886		€ 4 074 840	€ 21 433	€ 14 818	€ 17 199	€ 34 518			
Coût total de connexion du groupe de bâtiments	€	13 608 693		€ 9 410 170	€ 11 011	€ 6 163	€ 6 607	€ 11 935			
				€ 13 485 010	€ 32 444	€ 20 981	€ 23 806	€ 46 453			
Coûts des tuyaux de la ligne principale de distribution selon leur dimension											
Sommaire des dimensions de tuyaux de la ligne princ. de distrib.	mm			DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150
Sommaire des longueurs de tuyaux de la ligne princ. de distrib.	m			-	-	-	42	-	-	-	-
Sommaire des coûts de tuyaux de la ligne principale de distribution	€	201 758		-	-	-	22 379	-	-	-	-
Coût total du réseau de chauffage urbain	€	13 810 451									

Le coût total du réseau de chauffage urbain sans considérer la voie par laquelle la chaleur a été produite revient à 13 810 451 € avec profits d'exploitations pour la même puissance électrique - sans soutirage- (annex3) égaux à 1 450 330 €, cette valeur est inférieure à celle revenant du chauffage destiné à un procédé industriel qui serait à 1 546 019 € et cela est dû aux frais induits par l'installation du réseau de chauffage urbain.

Pour cette raison nous avons opté pour l'utilisation de la chaleur dégagée au cours de la cogénération dans un procédé industriel ayant un rendement saisonnier de 100% ceci va réduire la quantité de pertes de chaleur, donc augmenter la rentabilité du projet.

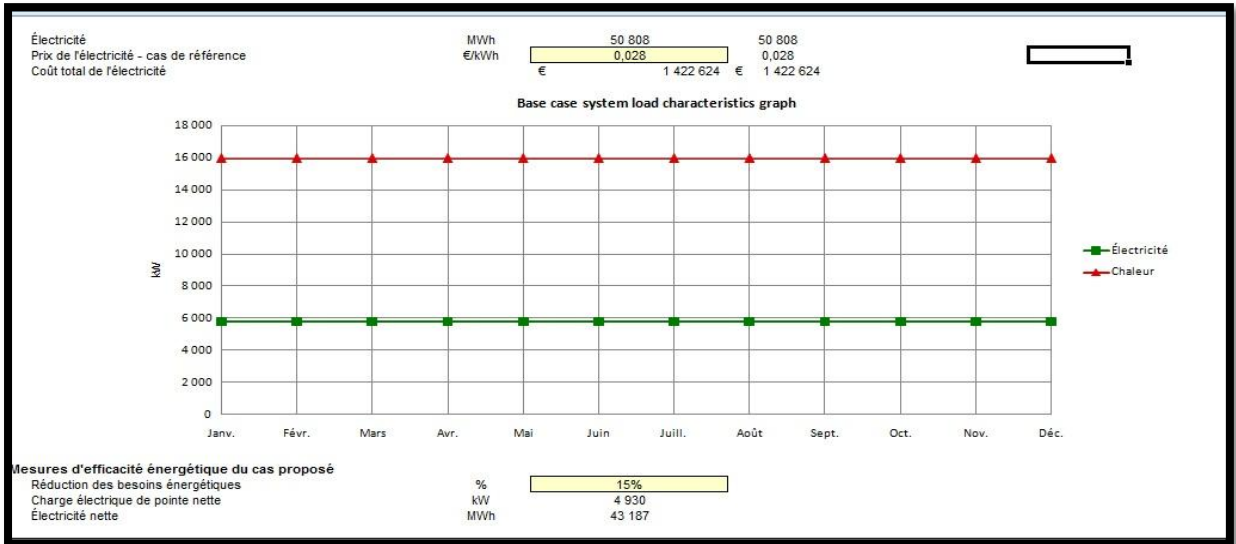
IV.2.2.2. Système de production d'électricité du cas de référence

Dans cette section, nous avons fourni des renseignements sur le système de production d'électricité du cas de référence de source fossile ; gaz naturel, et sur La charge électrique moyenne brute (annexe 3) sur une base mensuelle qui serait de 5800 kW.

Le modèle calcule la charge électrique moyenne nette (annexe 3) pour le système du cas proposé en multipliant la charge électrique moyenne nette du cas de référence sur une base mensuelle par la réduction des besoins énergétiques (annexe3) en électricité du cas proposé.

Projet de production d'électricité		Unité	
Système de production d'électricité du cas de référence		Réseau central	
Type de réseau			
Caractéristiques de la charge du cas de référence			
Mois	Charge électrique moyenne brute kW	Charge électrique moyenne nette kW	Charge de chaleur moyenne kW
Janvier	5 800	5 800	16 000
Février	5 800	5 800	16 000
Mars	5 800	5 800	16 000
Avril	5 800	5 800	16 000
Mai	5 800	5 800	16 000
Juin	5 800	5 800	16 000
Juillet	5 800	5 800	16 000
Août	5 800	5 800	16 000
Septembre	5 800	5 800	16 000
Octobre	5 800	5 800	16 000
Novembre	5 800	5 800	16 000
Décembre	5 800	5 800	16 000
% à ajouter à moyenne mensuelle max. pour charge de pointe	0,0%		
Charge de pointe - annuelle	5 800	5 800	16 000
Électricité	MWh	50 808	50 808
Prix de l'électricité - cas de référence	€/kWh	0,028	0,028
Coût total de l'électricité	€	1 422 624	€ 1 422 624

Le graphique des caractéristiques de la charge du cas de référence montre le profil de la charge moyenne du cas de référence pour les systèmes de production d'électricité de chaleur sur une base mensuelle.



IV.2.3. Modèle énergétique RETscreen

IV.2.3.1. Système de production d'électricité du modèle proposé

Le système de production d'électricité de base du cas proposé utilise une turbine à vapeur fabriquée par GENERAL ELECTRIQUE de type C et d'une capacité électrique de 5844 kw.

Le choix de telles caractéristiques était basé sur la disponibilité du combustible qui est limitée par 113.4 GJ/h et qui peut générer une capacité d'environ 5MW, cette dernière est assurée par la turbine à vapeur.

système de production d'électricité du cas proposé		Surcoûts à l'investissement	
Choix du système	Système de base		
Système de production d'électricité de base	Turbine à vapeur		
Technologie	%		
Disponibilité	100,0%	8 760 h	
Méthode de choix du combustible	Un seul combustible		
Type de combustible	Biomasse		
Prix du combustible	€/t	0,000	
Turbine à vapeur			
Débit de vapeur	kg/h	23 900	
Pression d'opération	bar	150	
Température de saturation	°C	342	
Température de surchauffe	°C	700	
Enthalpie	kJ/kg	3 839	
Entropie	kJ/kg/K	6,96	
Soutirage de vapeur	Non		
Sortie de turbine - pression de vapeur	kPa	350,0	
Température	°C	139	
Indice de qualité de la vapeur d'eau		1,00	
Enthalpie	kJ/kg	2 739	
Consommation spécifique théorique de vapeur	kg/kWh	3,27	
Rendement de la turbine à vapeur (TV)	%	80,0%	
Consommation spécifique réelle de vapeur	kg/kWh	4,09	
Sommaire			
Capacité électrique	kW	5 844	112,0%
Charge minimale	%	30,0%	
Fabricant	GE		
Modèle et capacité	C		
Électricité fournie à la charge	MWh	45 727	100%
Électricité exportée au réseau	MWh	5 465	
Rendement saisonnier	%	75,0%	
Température de retour	°C	70	
Combustible nécessaire	GJ/h	113,0	
Capacité thermique	kW	16 191,2	101,2%

La section stratégie d'exploitation permet de spécifier la stratégie d'exploitation optimale du système de production d'électricité du cas proposé. Notons que cette méthode est seulement un indicateur de la rentabilité du système choisi.

Le modèle calcule alors les profits (ou les pertes) d'exploitation ; dans notre simulation nous parvenons a des profits de 1 546 019 €. Cette valeur représente les profits d'exploitation du système de production d'électricité choisi basé sur la stratégie d'exploitation retenue intitulée -pleine puissance électrique sans soutirage - Ce calcul ne tient pas compte des coûts liés aux coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien, au financement, etc.

Stratégie d'exploitation - système de production d'électricité							
Prix du combustible - production de chaleur du cas de référence	€/MWh	0,78					
Prix de l'électricité - cas de référence	€/MWh	28,00					
Prix du combustible - production d'électricité du cas proposé	€/MWh	0,00					
Prix de l'électricité exportée	€/MWh	28,50					
Prix de l'électricité - cas proposé	€/MWh	28,50					

Stratégie d'exploitation	Électricité fournie à la charge MWh	Électricité exportée au réseau MWh	Électricité - complément nécessaire MWh	Chaleur récupérée MWh	Chaleur - complément nécessaire MWh	Combustible pour production d'électricité MWh	Profit (pertes) d'exploitation €	Rendement %
Pleine puissance électrique - sans soutirage	45 727	5 465	0	140 160	0	274 996	1 546 019	69,6%
Pleine puissance électrique - avec soutirage	-	-	-	-	-	-	-	-
Asservi à la charge électrique - sans soutirage	45 727	0	0	126 693	13 467	245 637	1 379 694	70,2%
Asservi à la charge électrique - avec soutirage	-	-	-	-	-	-	-	-
Asservi à la charge de chaleur	45 727	4 861	0	140 160	0	271 748	1 528 785	70,2%

Choix de la stratégie d'exploitation : Pleine puissance électrique - sans soutirage

IV.2.3.2. Caractéristique du cas proposé

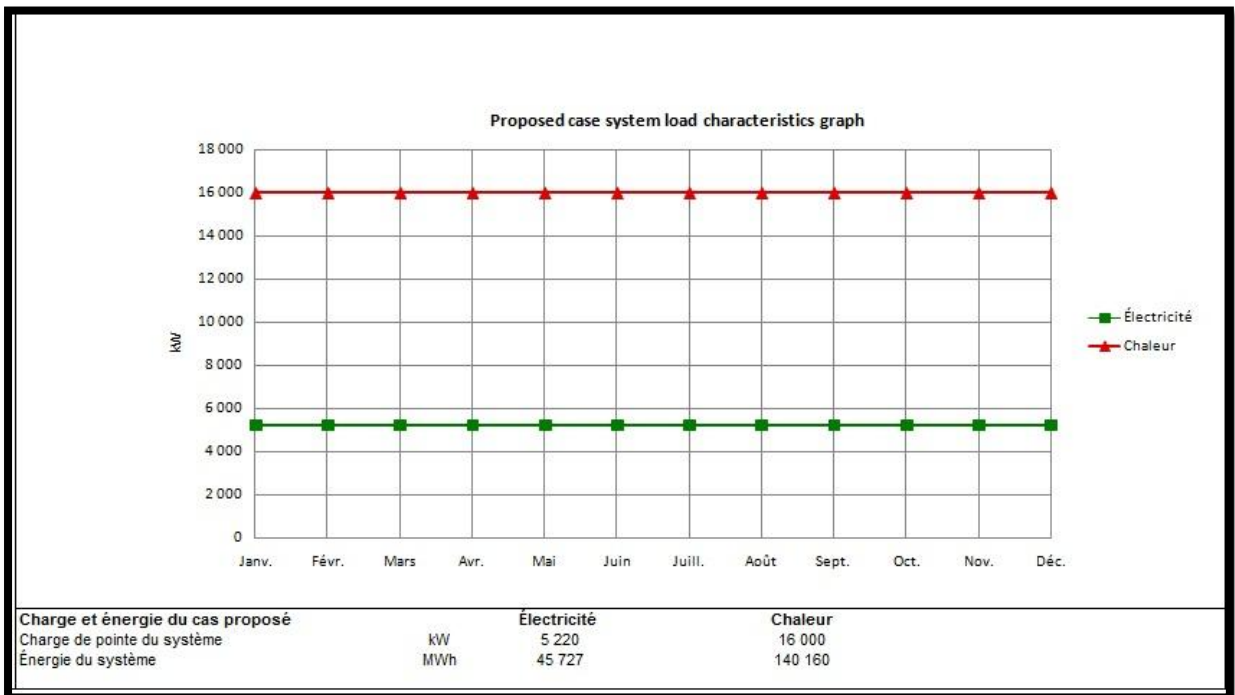
IV.2.3.2.1. Electricité

Le système de production d'électricité de base par la turbine assure la capacité de 5844 kW c'est-à-dire 45 727 MWh d'électricité fournie à la charge (annexe 3), alors que l'électricité de pointe avec une capacité suggérée à 1000 kW soit (19.2%) serait fournie par le réseau lui même.

Caractéristiques du cas proposé	Unité	Données	%	Surcoûts à l'investissement	Contribution des systèmes
Electricité					
Système de production d'électricité de base					
Technologie		Turbine à vapeur			
Stratégie d'exploitation		Pleine puissance électrique - sans soutirage			
Capacité	kW	5 844	112,0%		
Électricité fournie à la charge	MWh	45 727	100,0%		
Électricité exportée au réseau	MWh	5 465			
Système de production d'électricité de pointe					
Technologie		Électricité du réseau			
Capacité suggérée	kW	0,0			
Capacité	kW	1 000	19,2%		
Électricité fournie à la charge	MWh	0	0,0%		
Système de production d'électricité de secours (optionnel)					
Technologie					
Capacité	kW	0			

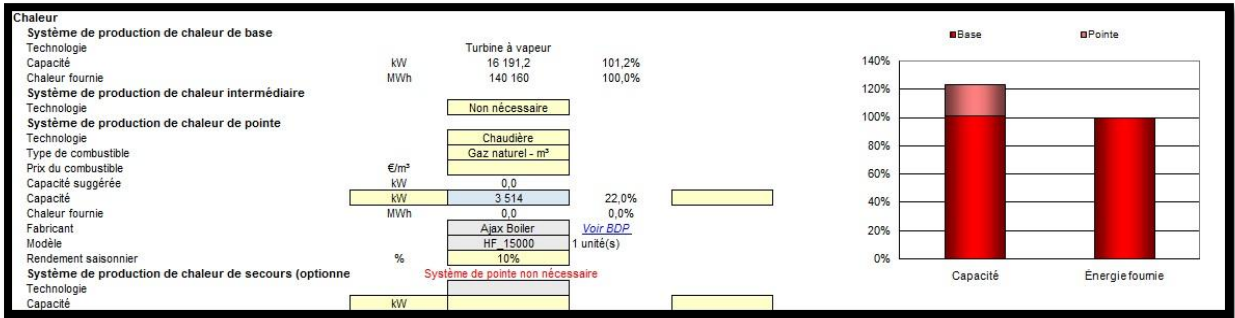
Caractéristiques de la charge du cas proposé		
Mois	Charge électrique moyenne nette kW	Charge de chaleur moyenne nette kW
Janvier	5 220	16 000
Février	5 220	16 000
Mars	5 220	16 000
Avril	5 220	16 000
Mai	5 220	16 000
Juin	5 220	16 000
Juillet	5 220	16 000
Août	5 220	16 000
Septembre	5 220	16 000
Octobre	5 220	16 000
Novembre	5 220	16 000
Décembre	5 220	16 000
Charge de pointe - annuelle	5 220	16 000

Le graphique des caractéristiques de la charge du cas proposé montre le profil de la charge moyenne du cas proposé pour les systèmes de production d'électricité, de chaleur, sur une base mensuelle.



IV.2.3.2.2. Chaleur

La turbine à vapeur de la centrale génère de la chaleur de base proposée à 16 191.2 kW comme l'indique la feuille du sommaire, et concernant la chaleur de pointe qui serait assurée par une chaudière de modèle HF _ 15000 fabriquée par Ajax Bolier, fonctionnant au gaz naturel, capable de produire 3 514 kW soit 22% de la chaleur de base.



IV.2.3.2.3. Sommaire du cas proposé

Cette section présente un résumé des types de combustible utilisés, de la consommation estimée de chacun de ces combustibles, de la capacité installée et de l'énergie fournie par chacun des différents systèmes de production d'électricité, de chaleur afin de répondre à la charge de pointe et aux besoins d'énergie du cas proposé. Toutes ces valeurs sont calculées dans les feuilles de calcul *Modèle énergétique* et *Charge et réseau* et le résultats sont donnés ci-après :

Sommaire du cas proposé		Type de combustible	Consommation de combustible - unité	Consommation de combustible	Capacité (kW)	Énergie fournie (MWh)
Électricité						
Charge de base		Biomasse	t	53 675	5 844	45 727
Charge de pointe		Électricité	MWh	0	1 000	0
Électricité exportée au réseau						5 465
					Total	6 844
Chaleur						
Charge de base		Chaleur récupérée			16 191	140 160
Charge de pointe		Gaz naturel	m ³	0	3 514	0
					Total	19 705

IV.2.3.3. Analyse des émissions

Nous avons entré le facteur d'émission du dioxyde de carbone (CO₂) du combustible. Il représente la masse de gaz à effet de serre émis par unité d'énergie produite. Les unités sont données en kilogrammes de gaz émis par giga joule d'énergie thermique produite (kg/GJ).

Notons que le modèle calcule aussi le facteur d'émission de CO₂ basé sur l'analyse immédiate, cette valeur s'affichant à droite de la cellule d'entrée. Toutefois, pour les biogaz, il est suggéré de mettre cette valeur égale à zéro lors de la préparation de l'analyse des émissions GES, puisque l'on reconnaît généralement que la biomasse se renouvelle suffisamment rapidement pour que la quantité de CO₂ émise lors de la combustion de la biomasse soit absorbée par la végétation en train de renouveler une quantité similaire de biomasse.

Dans la réduction annuelle nette d'émission de GES, 1 tonne de CO₂ est équivalente à 0.2 automobiles et camions légers non utilisés, le modèle calcule cette réduction dans le cas de notre projet : l'équivalent de 12 667 automobiles.

Analyse des émissions					
Réseau électrique de référence (Niveau de référence)		Facteur d'émissions GES	Pertes t-d	Facteur d'émissions GES	
Pays - région	Type de	tCO2/MWh	%	tCO2/MWh	
Algérie	Gaz naturel	0,695	10,0%	0,772	
Électricité exportée au réseau	MWh	5 485	Pertes t-d	0,0%	
Émissions de GES					
Cas de référence	tCO2	71 135,6			
Cas proposé	tCO2	1 972,1			
Réduction annuelle brute d'émissions de GES	tCO2	69 163,6			
Frais de transaction pour les crédits de GES	%	0,0%			
Réduction annuelle nette d'émissions de GES	tCO2	69 163,6	est équivalente à	12 667	Automobiles et camions légers non utilisés
Revenu pour réduction de GES	€/tCO2	0,00			
Crédit pour réduction de GES					

V. Conclusion

Dans cette étude nous avons utilisé un logiciel d'analyse de projets d'énergie propre appelé RETscreen.

Après avoir déterminé la quantité de combustible (biomasse) disponible à une moyenne annuelle et choisi ensuite comment utiliser les produits issus de la cogénération, et l'électricité et la chaleur, le logiciel nous a évalué les bénéfices énergétiques de notre projet proposé qui est l'installation d'une centrale de cogénération de biomasse en Algérie par rapport à un projet conventionnel de référence qui est la production de l'électricité et la chaleur par voie de combustion du combustible fossile ; le gaz naturel pour le même besoin.

Les résultats montrent qu'une capacité électrique de 5800 kW pourrait être générée par la turbine à vapeur et exportée ensuite vers le réseau, et une capacité de 1000kW représentait l'électricité de pointe qui serait fournie par le réseau lui-même.

D'autre part une capacité de 16 191 kW de chaleur de base récupérée après la cogénération sans compter les 3514 kW qui seront générés par la chaudière à gaz pour couvrir les besoins en chaleur de pointe.

Pour donner une idée plus concrète de cette quantité d'énergie, elle correspondrait approximativement aux besoins :

- En électricité, pour alimenter près de 43 000 habitants pendant une année, en supposant que chaque habitant consomme 1,2 MWh (chiffre communiqué par SONALGAZ, 2010).

$$\text{Nbre} = (5.8 * 8760) / 1.2 = 42\ 340 \text{ habitants}$$

- En chaleur, pour chauffer l'équivalent de 2200 logements de 100 m² (chiffre calculé par RETScreen au chapitre III). Ces 2200 logements correspondraient à une population de 13 000 habitants, ce qui veut dire qu'un tiers des habitants du village pourraient disposer aussi de la cogénération (chauffage).

Le modèle calcule aussi les profits d'exploitation par rapport au projet conventionnel de référence, dans notre simulation nous sommes parvenus à des profits de 1 546 019 €. Ce calcul ne tient pas compte des coûts liés aux coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien et de financement. Par contre le modèle prend les prix de gaz naturel et de l'électricité en Algérie comme prix de référence, ce qui n'est pas le cas au niveau de l'international ou le prix de l'électricité est plus élevé (en France le prix est de l'ordre de 0.1263 euros /kWh [19]), donc si on prend ce prix comme prix de référence les profits seront encore plus importants.

En fin, l'analyse d'émission des GES calcule une réduction annuelle équivalente à 12 667 automobiles et camions légers non utilisés qui parcourent 15 000 km/an, les résultats fournis par le modèle énergétique nous a permis de juger rapidement que notre projet potentiel d'énergie propre est suffisamment prometteur pour être étudié plus à fond.

Conclusion générale

Le monde de la biomasse est extrêmement vaste et il est difficile d'en faire une présentation à la fois rapide et complète. Vu le manque de données statistiques concernant les matières organiques candidates pour la valorisation énergétique, nous nous sommes intéressés, dans le cadre de notre travail, à l'étude d'une filière de bois-énergie à l'instar de celles qui existent déjà dans de nombreux pays.

Outre l'exploitation des sites potentiels spécifiques pour l'énergie solaire et éolienne en Algérie, l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie renouvelable est essentielle à l'élaboration d'une politique énergétique propre et durable.

Même si la production de bois a considérablement évolué depuis l'indépendance jusqu'à nos jours, la demande en bois et ses dérivés est probablement encore appelée à s'accroître. Pratiquer une sylviculture intensive avec des espèces à croissance rapide sur les terres forestières à haut rendement sur de petites surfaces pour un meilleur suivi, afin d'augmenter la production locale est l'une des solutions proposées afin de satisfaire nos besoins en bois.

La valorisation énergétique de la biomasse permet une production énergétique (électricité, chaleur, froid) qui est neutre sur le plan des émissions de CO₂. La rentabilité économique des installations de valorisation énergétique de la biomasse sera établie par des faibles coûts d'exploitation, malgré des investissements élevés au début et la nécessité d'établir une structure logistique pour l'évaluation des volumes de biomasse, leur transport et leur mise en place.

Exploiter davantage la forêt n'est pas épuiser une ressource rare. Loin de la fragiliser, c'est la meilleure façon de la renforcer. Une forêt « sanctuarisée » est une forêt mal entretenue, dans laquelle les arbres peinent à croître, et sont plus vulnérables aux agressions comme les incendies. C'est précisément à cet entretien que contribue la filière bois énergie. Il s'agit de prélever, pour en faire une source d'énergie, des bois non utilisables par les filières du bois d'œuvre et du bois d'industrie : petits bois issus des éclaircies, bois abîmés, sous-produits des coupes d'arbres à maturité (branches, cime), etc., ce que l'on appelle plaquettes forestières, dès lors que le bois est broyé pour alimenter une chaudière

L'économie d'énergie procurée par la production combinée dépend fortement de la référence choisie. Chaque cas est spécifique, la décision d'investir dans une unité de co-/trigénération se basera donc sur une analyse fine des besoins réels d'électricité, de chaleur et de froid de l'établissement mais aussi du coût des investissements et du prix des énergies. La cogénération pourra contribuer à la diminution de la pression sur la pointe électrique journalière dans les centres urbains, d'une part parce qu'elle limite la demande électrique des autoproducteurs, et d'autre part, parce qu'elle pourrait fournir au réseau le surplus de production.

Dans les industries de transformation de bois, la cogénération au bois diminuera considérablement la consommation de gazole, actuellement privilégiée par les installations situées hors du réseau central. Une autre application intéressante est la production de vapeur pour le dessalement de l'eau de mer. À côté des énergies renouvelables, la cogénération permettra à l'avenir aux pays en développement de contribuer aux efforts mondiaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Comme toute technologie de production décentralisée d'énergie, elle améliore finalement la fiabilité de l'approvisionnement énergétique tout en diminuant les coûts de transport et de distribution de l'énergie électrique.

Le Centre d'aide à la décision sur les énergies propres, RETScreen International a mis au point plusieurs modèles d'analyse technique et financière dont celui sur la cogénération. Nous l'avons utilisé pour évaluer la production énergétique et le coût du cycle de vie ; les résultats auxquels nous avons abouti semblent très encourageants et incitent à réfléchir sur la promotion de telles filières d'énergie sobre dans notre pays.

Enfin, le bois et les produits forestiers en général, n'ont pas seulement une importance économique dans le marché intérieur, ou dans le comblement du déficit de la balance commerciale, ils ont aussi un rôle social très important. En effet, la récolte de ces produits de même que les travaux qui la précèdent, l'accompagnent et le suivi créent des possibilités d'emploi et fournissent un revenu monétaire pour la population, contribuant ainsi à la réduction du taux de chômage notamment aussi par tous les métiers de la forêt (tourisme, forestier, plantations serres et élevage d'abeilles...) ceci sans perturber l'équilibre écologique de la forêt .

Références

[1] La bioénergie forestière est-elle bénéfique pour l'environnement ? Document élaboré par Services Canadien des Forêts sur la Science et les Politiques ; décembre 2010 ; 4 p .

[2] Dendrométrie et Topographie. Document élaboré par Terre Environnement Aménagement (TEREA) , Ecole Nationale des Eaux et Forêts d'Ébouhadji Libreville (Gabon) (2006) , 47 p.

[3] Luce Bergeron et al ; Évaluation du potentiel de production de bioénergies dérivées de la biomasse dans la MRC de Kamouraska, 31 mars 2008, 64 p .

[4] Favreau Feric . J ,1997 ; CRIQ et MRNF 2006.

[5] Kechebar M.S.A ; Economie du bois en Algérie état actuel et perspectives, thèse magistère, INA, Alger, 2008, 365 p .

[6] Rapport National 2007, document élaboré par Direction Générale des Forêts (DGF) , 8^{ème} session du Forum des Nations Unies sur les forêts, 2007.

[7] Etude prospective du secteur forestier en Afrique, document élaboré par FOSA, Algérie, Rome, 2000, 36 p.

[8] Plan National de Développement Forestier (PNDF), rapport de synthèse nationale ; Document élaboré par Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural, mars 2009 ;87 p .

[9] Document élaboré par Conservation des forêts de la wilaya de Constantine, 2007

[10] Document élaboré par Renewable Energy Potentials, Secrétariat de la coalition de Johannesburg pour les énergies renouvelables REN21, 2007 .

[11] La cogénération-trigénération ; document élaboré par l'institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie (IEPF), 2010 ; 8 p .

[12] Meunier F. ; Aide-mémoire ,Thermodynamique de l'ingénieur, Dunod, Paris, 2004 370 p .

[13] La centrale de cogénération biomasse de Grand-Couronne : un exemple d'efficacité environnementale et énergétique ; document élaboré par Sofiprotéol (entreprise de développement durable), 27 juin 2012, 16 p .

[14] Biomasse forestière, Populicole et Bocagère disponible pour l'énergie a l'horizon 2020 ; document élaboré par l'Inventaire Forestier National (IFN), avec l'Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et l'association SOLAGRO, novembre 2009 , 105 p .

[15] Laurent M .; Tendances, juin 2007 .

[16] Bouchard S. and al. ; Atlas de la Ressource Energétique de la Biomasse Forestière au Nouveau-Brunswick ; Université de Moncton, Septembre 2012, 31 p .

[17] Richardson J. and al. ; Bioenergy from Sustainable Forestry, Guiding Principles and Practice ; Dordrecht, les pays bas: Kluwer Academic Publishers. 2002.

[18] Biomasse pour le chauffage ; document élaboré par technique de l'ingénieur, 2013,18p.

[19] Disponible sur [www.fournisseurs – électricité.com](http://www.fournisseurs-électricité.com)

[20] Disponible sur www.google image.com

Annexe1 : Les études de recollement

1.1. Objectifs

L'étude de recollement a pour objectif de calculer les coefficients d'exploitation et de commercialisation, afin de connaître les volumes qui seront effectivement commercialisables et donc les volumes résiduels en but de leur valorisation.

Rappelons que les inventaires d'aménagement fournissent des effectifs bruts sur pied, par essence et par classe de diamètre. Les inventaires d'exploitation fournissent des effectifs exploitables par essence et par classe de diamètre. Ces inventaires permettent donc, après application des tarifs de cubage, de connaître les volumes destinés au bioénergie,

1.2. Les coefficients d'exploitation

1.2.1. Objectif

La ressource inventoriée n'est pas exploitée dans sa totalité car d'une part toutes les essences ne sont pas exploitables et d'autre part certains arbres des essences commercialisées ne remplissent pas les critères de qualité exigés par le marché des bois et les critères de rentabilité. Ce pourcentage de pieds refusés peut être considéré comme constant pour une essence donnée, dans un site donné et à un « état du marché » donné (donc à un moment donné). Il varie donc principalement selon le type de forêt (changements dans la conformation des tiges, défauts naturels, exploitation antérieure, accessibilité), la stratégie de commercialisation de la société (critères du marché, stabilité de la demande, dynamisme commercial) et les capacités de transformation (possibilité d'une transformation locale permettant de valoriser les bois de seconde qualité). L'application du coefficient d'exploitation aux effectifs bruts issus des données de l'inventaire d'aménagement fournit donc les effectifs exploitables par essence.

1.2.2. Calcul des coefficients d'exploitation à partir des résultats de l'inventaire d'aménagement :

Dans le cadre de l'inventaire d'aménagement, les tiges d'essences commercialisables supérieures à un certain diamètre ont reçu une appréciation de la qualité de leur fût allant par exemple de 1 à 4, avec en classes 1 et 2 les qualités export, classe 3 la qualité sciage et classe 4 les rebus. Ces critères de qualité peuvent varier en fonction du contexte et de la méthodologie retenue. La synthèse de ces données fournit directement les coefficients d'exploitation. Par exemple, si seuls les arbres de qualité 1 et 2 sont exploitables pour une essence donnée, alors le pourcentage d'arbres de qualité 1 et 2 de cette essence, issu de l'inventaire d'aménagement, nous donne son coefficient d'exploitation.

Une limite d'intervalle peut être retenue, par exemple de 50 à 80%, pour valider les coefficients obtenus. Dans les cas où les données sont insuffisantes (par exemple échantillon

trop restreint), un coefficient allant de 50 à 80% peut être choisi à partir de données bibliographiques.

Tableau 19 : Exemple de coefficients d'exploitation [Réf 2]

Essence	Coefficient d'exploitation
Acajou	0.76
Anzem noir	0.6
Anzem rouge	0.8
Azobe	0.68
Bahia	0.77
Bilinga	0.73
Bosse clair	0.68
Tiama blanc	0.77
wenge	0.6

1.3. Le calcul des coefficients de commercialisation

1.3.1. Généralités

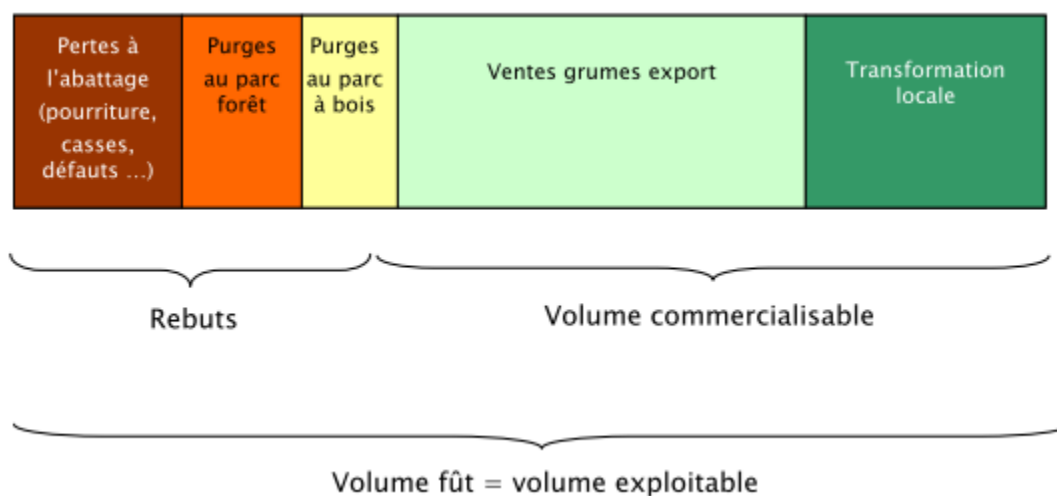
Le suivi des opérations d'abattage et de tronçonnage jusqu'à l'évacuation des bois ou leur transformation permet d'évaluer le pourcentage de bois abandonné (en forêt ou sur parc) et d'estimer la part de bois récupérable suite à une amélioration des pratiques de travail.

Ce suivi du fût jusqu'à sa commercialisation ou sa transformation permet également d'estimer par essence ou groupe d'essence, la part qui sera effectivement commercialisée, et donc d'estimer les coefficients de commercialisation et donc d'estimer les rebuts.

En pratique, le calcul du coefficient de commercialisation se fait en regroupant les classes de qualité. Le coefficient de commercialisation donne la part du volume commercialisé toutes classes de qualité exploitables confondues.

A chaque étape de l'exploitation, les fûts abattus sont tronçonnés, entraînant des pertes de bois. Ce processus peut être illustré par la figure suivante.

Figure 23 : Les pertes de bois au cours des différentes étapes de l'exploitation [Réf 2]



Le calcul du coefficient de commercialisation se fait à partir de la formule suivante :

Ccom = coefficient de commercialisation

Vexpl = volume exploitable

Vcom = volume commercialisable

$$Ccom = Vcom / Vexpl \times 100$$

1.3.2. Estimation des rebuts laissés en forêt

Les mesures se font au fur et à mesure du tronçonnage des fûts en forêt, avant le passage des engins de débusquage. L'équipe de mesurage est chargée de mesurer les différentes parties du fût après son tronçonnage, en distinguant :

Les billons laissés sur place car inutilisables pour des raisons inhérentes à la qualité du bois (bosses, pourritures ...) les billons laissés sur place suite à un défaut d'abattage (casse) mais qui auraient pu être valorisés avec un abattage de meilleure qualité ; les parties du fût abandonnées suite à une négligence de l'équipe de tronçonnage qui n'a pas cherché à valoriser la totalité de la grume ; le volume effectivement évacué. Chaque billon situé hors des contreforts doit être mesuré (en général par tronçons de 2 m de long, ou avec 3 mesures de diamètre – aux extrémités et au milieu. Les mesures des diamètres se feront à l'aide d'un compas forestier.

1.3.3. Estimation des pertes sur parc

Chaque bille mesurée en forêt est ensuite suivie et mesurée au niveau du « parc à bois forêt » Cette étape permet de comparer le volume sorti de la forêt au volume chargé sur le grumier. Arrivé au parc à bois final, avant livraison aux industries ou l'évacuation à l'extérieur des concessions, la bille peut être façonnée à nouveau. Les pertes doivent

également être mesurées à ce niveau (ou les volumes des billes relevés sur les formulaires utilisés pour le suivi des grumes).

1.3.4. Suivi de la bille

La destination de chaque bille doit enfin être relevée : évacuation sous forme de grume ou approvisionnement des industries. Avant transformation dans les industries, il peut également y avoir à nouveau façonnage de la bille. Les volumes perdus doivent alors être mesurés.

Annexe 2 Aménagement forestier contre les incendies, les maladies et les attaques des ravageurs

Indépendamment des considérations sur le changement climatique, la gestion de la santé des forêts devrait faire partie intégrante de toutes les activités d'aménagement forestier.

Toutefois, la nécessité se fera de plus en plus sentir afin de prendre en compte les effets potentiels du changement climatique sur les incendies, les insectes et les maladies dans l'élaboration de plans stratégiques de développement du secteur forestier.

Les programmes destinés à protéger la santé des forêts devraient inclure une composante de suivi, des critères décisionnels pour la gestion des incendies, des ravageurs et des maladies fondés sur critères écologiques, économiques et sociaux valables, et un certain nombre de méthodes respectueuses de l'environnement (biologiques, chimiques, culturelles, mécaniques et réglementaires). Celles-ci doivent pouvoir être utilisées dans les systèmes modernes de lutte contre les incendies de forêt et de lutte intégrée contre les ravageurs, pour créer des conditions défavorables au développement de grands incendies ou à l'attaque des ravageurs, des maladies et pour réagir efficacement à ces phénomènes.

Les stratégies et les tactiques d'intervention à envisager pour intégrer le changement climatique (FAO, 2003) dans l'élaboration de programmes de lutte contre les incendies de forêts, les insectes et les maladies consistent à :

Augmenter la capacité des pays en développement à diriger des programmes modernes de lutte contre les incendies de forêt comprenant la prévention générale, la préparation de la défense contre les incendies et leur extinction, et à améliorer la santé des forêts par le biais de la sylviculture et de la lutte intégrée contre les ravageurs ;

Insister davantage sur la nécessité d'harmoniser les essences forestières et les provenances avec les sites dans les programmes de plantation d'arbres, l'utilisation de matériel de plantation provenant d'une base génétique étroite qui pourrait être fondamentalement incapable de s'adapter aux conditions changeantes du climat doit être évité ;

Ne pas s'en tenir uniquement à une ou deux essences forestières dans les programmes de boisement ou de reboisement. Au contraire, inclure plusieurs essences chaque fois que possible dans des plantations plurispécifiques, bien adaptées aux sites locaux et aux

conditions climatiques et répondant aux besoins nationaux en matière de produits et de services forestiers ;

Accélérer les programmes de récupération du bois d'œuvre et de gestion des combustibles afin de réduire les risques de feux incontrôlés en forêts, surtout dans celles très endommagées par les ravageurs et les maladies ou par des processus de dépérissement (INRA, 1990) ;

Mettre au point des programmes de suivi des insectes et des maladies permettant de détecter des accroissement de la fréquence et de l'intensité des cas de dépérissement de la forêt et de l'activité de nouveaux ravageurs et de nouvelles maladies (à la fois indigènes et introduits) s'ajoutant à ceux déjà connus. Les systèmes de suivi devraient également être capables de détecter des changements dans la biologie, l'écologie et les aires de répartition naturelle des ravageurs, comprenant le calendrier des événements les plus importants dans leur cycle biologique, le nombre de générations, les modes d'alimentation et les interactions hôte/ravageur (HOUSSARD et CLAUDIE, 1998) ;

Débuter des programmes de recherche en vue de déterminer les effets à long terme du changement climatique sur la biologie et les interactions hôte/ravageur-maladie des espèces de ravageurs traditionnelles. En outre, identifier les espèces qui pourraient devenir des ravageurs en cas de changement de climat. Intégrer aussi rapidement que possible les nouvelles informations fournies par la recherche dans les programmes déjà opérationnels ;

Etudier les effets des feux, des insectes et des maladies sur la biodiversité au niveau des espèces pionnières, des espèces de succession secondaire et des espèces climatiques. Déterminer le degré de « perturbations » dues au changement climatique dans l'auto-régénération des systèmes de végétation : incapacité des forêts à reconquérir des zones brûlées ou exploitées, succession « stoppée », où la végétation de broussailles ou de lianes n'est plus remplacée par la forêt.

Annexe 3

- Le système de production de chaleur de base, qui est conçu pour répondre au demande de chaleur annuelle.
- Capacité électrique (TV) [- sans soutirage]

Le modèle calcule le pourcentage que représente la capacité électrique produite par la turbine à vapeur sans soutirage par rapport à la charge de pointe du système de production d'électricité du cas proposé.

- charge électrique moyenne

Le modèle calcule la charge moyenne par mois en divisant la demande d'électricité par le nombre d'heures par mois. Ces valeurs peuvent alors être employées dans la section

« Caractéristiques de la charge du cas de référence » dans la feuille de calcul *Charge et réseau*, dans la colonne « Charge électrique moyenne brute » pour aider l'utilisateur à compléter son analyse

- Charge électrique moyenne nette

Le modèle calcule la charge électrique moyenne nette pour le système du cas proposé en multipliant la charge électrique moyenne nette du cas de référence sur une base mensuelle par la réduction des besoins énergétiques en électricité du cas proposé.

- Réduction des besoins énergétiques

L'utilisateur entre le pourcentage de la charge électrique de pointe totale du système de production d'électricité du cas de référence qui est réduite grâce à l'implantation des mesures d'efficacité énergétique du cas proposé. Cette valeur est utilisée pour calculer la charge électrique moyenne nette dans la section « Caractéristiques de la charge du cas proposé ». Elle est aussi utilisée pour calculer la charge électrique de pointe nette et la demande d'électricité nette du système du cas proposé. Les valeurs typiques sont comprises entre 0 et 25 % et dépendent des mesures implantées.

Note : Ces mesures d'efficacité énergétique du cas proposé sont à ajouter aux améliorations d'efficacité énergétiques qui résultent de l'implantation du système du cas proposé, comme cela est calculé dans les autres feuilles. Par exemple, lors de l'implantation d'un nouveau système de production de froid, de chaleur et/ou d'électricité, l'utilisateur peut vouloir implanter d'autres mesures, comme l'amélioration des dispositifs d'éclairage, ce qui réduirait la charge du nouveau système du cas proposé.

- Électricité fournie à la charge

Le modèle calcule la quantité d'électricité fournie à la charge par le système de production d'électricité de base dans la feuille de calcul *Choix des équipements* et elle est copiée automatiquement dans la feuille de calcul *Modèle énergétique*.

Le modèle calcule le pourcentage que représente la quantité d'électricité fournie à la charge par le système de production d'électricité de base par rapport à la demande énergétique du système de production d'électricité du cas proposé.