



## Complément à l'étude de marché du Makala à Kinshasa : choix raisonné d'une technologie de carbonisation



Octobre 2024



## Table des matières

1	Facteurs influençant le rendement de carbonisation .....	2
2	Carbonisation traeditionnelle et traditionnelle « améliorée ».....	3
2.1	Meule traditionnelle.....	3
2.2	Meule traditionnelle « améliorée » .....	3
3	Autres techniques de carbonisation .....	4
3.1	Fours fixes .....	4
3.2	Fours métalliques transportables .....	5
3.3	Fours fixes à source de chaleur externe et chauffage direct .....	5
3.4	Four fixes à cornue type « Adam Retort ».....	5
4	Meule traditionnelle améliorée vs four Adam Retort ? .....	6
	Bibliographie .....	7

## 1 Facteurs influençant le rendement de carbonisation

---

La pyrolyse du bois est influencée par de nombreux facteurs. Trois d'entre eux peuvent être plus ou moins contrôlés, par des procédés naturels ou artificiels :

- La quantité d'air qui pénètre dans l'enceinte de carbonisation et qui active la combustion, mais génère aussi des cendres ;
- La température de cuisson, qui permet d'évaporer l'eau et active la pyrolyse (plus elle est élevée, plus le taux de carbone pur est élevé) ;
- L'humidité du bois, un bois sec nécessitant moins d'énergie pour être carbonisé.

Ainsi, les procédés de carbonisation doivent-ils être étanches pour contrôler l'eau et l'air dans l'enceinte de carbonisation, et le bois sec pour limiter les quantités d'énergie nécessaires au démarrage de la pyrolyse.

L'énergie nécessaire pour sécher le bois et augmenter la température de cuisson pour atteindre la température de pyrolyse (au-dessus de 350-380°C) peut être fournie de trois façons :

- Par combustion partielle d'une partie de la charge (cas des meules traditionnelles et de certains fours en métal/briques). Le rendement est en général moindre car la combustion est difficile à contrôler, une partie du bois est inutilement brûlé dans l'enceinte ;
- Par chauffage externe dans un foyer de chauffe mis en contact avec la charge par une surface d'échange (vase clos, cornue). Les gaz dégagés lors de la carbonisation sont récupérés et réinjectés dans le système ;
- Par contact de gaz chauds provenant d'un foyer externe et mis en contact direct avec la charge. Les gaz dégagés lors de la carbonisation sont récupérés et réinjectés dans le système (procédés de type LAMBIOTTE. Cf. infra).

NB : Dans ce qui suit, le terme rendement signifie rendement massique sur bois sec.

## 2 Carbonisation traditionnelle et traditionnelle « améliorée »

---

### 2.1 Meule traditionnelle

Les 150 charbonniers récemment enquêtés par le CIRAD dans le bassin d'approvisionnement de Kinshasa (DUBIEZ et al., 2023)<sup>1</sup> pratiquent tous la carbonisation traditionnelle : le bois est découpé et empilé en meule (au sol pour moitié des meules, dans une fosse (meule « semi-enterré ») pour l'autre moitié), puis l'énergie est fournie par combustion partielle de la charge.

Les principaux coûts d'exploitation sont : (i) la rémunération des ayants-droits fonciers pour la récolte de bois, (ii) la location de la tronçonneuse et (iii) la main d'œuvre (SalvaTerra, 2024)<sup>2</sup>. Dans le cas du projet SGW, on peut faire abstraction des deux premiers coûts (terrains gérés par M&Co / équipements initiaux, dont tronçonneuses, pris en charge sur subvention).

Le principal poste de coût, variant selon les techniques d'exploitation et de carbonisation, est finalement celui de la main d'œuvre. Ce coût est estimé entre 67 à 165 FC/kg de charbon (soit 4 020 à 9 900 FC/sac de 60 kg) dans le cas de la carbonisation traditionnelle : coupe des arbres, morcellement du bois, montage de la meule, suivi, défournement, mise en sac (*Ibid*).

Dans le contexte du bassin d'approvisionnement de Kinshasa, on retient généralement un rendement de 10 à 15% pour la carbonisation traditionnelle (SCHURE et al., 2011)<sup>3</sup>.

### 2.2 Meule traditionnelle « améliorée »

Dans le contexte du Plateau des Batéké, la carbonisation traditionnelle « améliorée » est relativement simple à mettre en pratique pour les charbonniers professionnels, même si elle nécessite tout de même une formation de base. Elle consiste à observer certaines règles de base (PINTA et al., 2012)<sup>4</sup> (LOUPPE, 2014)<sup>5</sup>:

- Faire sécher le bois au moins un mois avant la carbonisation ;
- Homogénéiser les diamètres des bois. Les plus gros bois doivent être fendus pour mieux sécher et être placés au milieu de la meule ;
- Éviter le mélange d'essences dont la durée de carbonisation n'est pas la même ;
- Monter la meule sur des rails de bois espacés de 50 cm, sur sol plat, permettant de faire circuler l'air autour de la meule. Le lit, constitué de bois rectilignes de 4 à 5 cm de diamètre resserrés, doit être très plat. Les espaces entre les rangées de bois doivent être comblés avec des petits morceaux de bois (joints). Le paillage est effectué sur tout le pourtour de la meule, et la terre est étalée sur 40 cm d'épaisseur ;
- Les ouvertures situées à la base et au sommet de la meule, nécessaires pour allumer la meule et activer le tirage, doivent être refermées ;

---

<sup>1</sup> DUBIEZ E., OKWE A., GAZULL L., PEROCHES A., 2023. Rapport d'étude sur l'évolution de la consommation en énergies domestiques des ménages de la ville de Kinshasa. 61p.

<sup>2</sup> SalvaTerra, 2024. Etude de marché du Makala à Kinshasa – Rapport de faisabilité du projet *Sustainable Green Wood*. Paris – SalvaTerra. 36p

<sup>3</sup> SCHURE J., INGRAM V., AKALAKOU-MAYIMBA C., 2011. Bois énergie en RDC : analyse de la filière des villes de Kinshasa et de Kisangani. Projet Makala - CIFOR, Kinshasa.

<sup>4</sup> PINTA F., KALALA D., DUBIEZ E., LARZILLIERE A., MARIEN J.-N., 2012 *Guide pratique de carbonisation améliorée*, Projet Makala, 26 p.

<sup>5</sup> LOUPPE, 2014. Module de formation sur le bois énergie - Chapitre 4-2 : Améliorer la production de charbon de bois. [http://makala.cirad.fr/les\\_produits/guides\\_pratiques](http://makala.cirad.fr/les_produits/guides_pratiques)

- Faire pénétrer l'air de manière homogène en positionnant les événements au vent pour les entrées d'air et contre le vent pour la cheminée. La combustion sera homogène, limitant ainsi les incuits. Le charbonnier gère l'ouverture et la fermeture des événements pour propager le front de carbonisation et maintenir une température élevée dans l'ensemble de la meule ;
- Veiller à l'étanchéité de la meule. Les meules traditionnelles sont réputées inefficaces, en partie parce que les charbonniers surveillent rarement une meule 24h/24 pendant tout le temps que prend la carbonisation (jusqu'à 20 jours). L'étanchéité est souvent compromise pendant cette période. Réduire le temps de carbonisation et renforcer la surveillance pendant cette période représente donc un potentiel gain de rendement.

Les estimations de rendement de carbonisation traditionnelle « améliorée » issues de mesures effectuées à Mampu sur des plantations d'*Acacia auriculiformis* de 12 ans tournent autour de 20% environ (BISIAUX et al., 2009)<sup>6</sup>. Des rendements plus élevés, de l'ordre de 30%, sont rapportés sur le plateau Batéké, notamment lié au séchage du bois, à la mise en place d'événements et au suivi régulier de la carbonisation (SCHURE et al., 2019)<sup>7</sup>.

### 3 Autres techniques de carbonisation

---

#### 3.1 Fours fixes

A la différence de la meule en terre, le four fixe implique l'emploi de matériaux de construction (briques, métal) et donc un investissement initial. Ce coût varie beaucoup d'une technologie à l'autre, en fonction des matériaux, des dimensions du four, mais aussi des brevets ou patentes d'utilisation qui peuvent entourer certains d'entre eux.

Ces fours sont fixes, ce qui implique qu'ils doivent être situés à proximité des plantations pour limiter les coûts de transport du bois abattu ou façonné, ainsi que les coûts de manutention (chargement/déchargement).

Les moyens de transport varient du moins cher (charrette) au plus cher (couple tracteur + remorque ou chargeur + porteur), et représentent donc des investissements potentiellement conséquents dans du matériel roulant, dans des frais d'entretien, etc. En saison des pluies, l'utilisation d'engins roulants lourds occasionne des dégâts sur les pistes, d'autant plus importants que le chargement est lourd.

Ce type de four implique également que la ressource soit renouvelée périodiquement, pour que les fours puissent être réutilisés, moyennant une remise en état (remplacement de tôles, réfection des cheminées, etc.).

Il y a une grande variété de modèles, plus ou moins adaptés aux pays en développement, utilisées depuis des décennies (FAO, 1983)<sup>8</sup>. Parmi les plus répandus, on peut citer :

- Les fours en briques fixes. Un type de four en brique fixe est le four brésilien dit "en nid d'abeille". Son rendement atteindrait 35%, ce qui paraît toutefois très élevé pour un four qui ne récupère pas les gaz de pyrolyse (Practical Action, non daté)<sup>9</sup>.

---

<sup>6</sup> BISIAUX F., PELTIER R., MULIELE J.C., 2009. Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, Mampu, en République démocratique du Congo. Bois For. Trop. 3

<sup>7</sup> SCHURE J., PINTA F., CERUTTI P., KASEREKA-MUVATSI L., 2019. Efficiency of charcoal production in Sub-Saharan Africa: Solutions beyond the kiln. Bois et Forêts des Tropiques, 340: 57-70. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.340.a31691>

<sup>8</sup> FAO, 1983. Techniques simples de carbonisation. Etude FAO For. 41.

<sup>9</sup> Practical Action, non daté. Technical brief: Charcoal production.

- Les fours métalliques fixes. De tels fours ont été testés sur le site agroforestier de Mampu, puis abandonnés à cause des coûts de transport trop élevés du bois entre la plantation et le four (MARIEN et DUBIEZ, 2013)<sup>10</sup>.

### 3.2 Les fours métalliques transportables

Les fours métalliques transportables (TPI, Magnien ou Mark V, etc.) sont généralement de forme cylindrique avec un chapeau en forme de cône. Ils sont scindés en trois parties pouvant être roulées à terre vers un autre site de carbonisation ou chargées sur une remorque agricole (Practical Action, non daté).

La technique est simple à maîtriser. Le rendement est en règle générale meilleur que les meules traditionnelles et la qualité du makala semble meilleure. Il requiert également moins de main d'œuvre. Un cycle de carbonisation de 7 stères dure 3 à 4 jours, le refroidissement étant plutôt rapide. On notera que ce cycle est assez similaire à celui de la meule traditionnelle améliorée.

Un four métallique standard de sept stères peut produire entre 100 et 150 t de makala par an (rendement de 25 à 30%). Ils sont donc peu adaptés pour des zones de production conséquentes. En général, ils sont employés dans les zones où le bois est disparate, pour une production à petite échelle (Practical Action, non daté) (ONFI et Novacel SPRL, 2012)<sup>11</sup>.

### 3.3 Fours fixes à source de chaleur externe et chauffage direct

Le chauffage est direct et permis par la circulation de gaz chauds inertes. Deux modèles connus de tels fours (FAO, 1983) :

- Four Schwartz, fait d'alliage de briques, métal et fonte. Ce four présente l'inconvénient majeur de ne pas bien se fermer hermétiquement pour le refroidissement, d'où des entrées d'air. Le feu est également difficile à contrôler ;
- Four LAMBIOTTE, en métal. C'est un four vertical fonctionnant en continu et nécessitant de l'eau et de l'électricité pour fonctionner. Il nécessite une grande expertise et un suivi constant de la carbonisation.

Ces types de fours semblent peu adaptées au contexte du Plateau des Batéké (technologies difficiles à maîtriser, équipements introuvables localement, besoin d'électricité, implantation fixe d'où complexité/coût de l'approvisionnement en bois, etc.)

### 3.4 Four fixe à cornue type « Adam Retort »

Une cornue (*retort* en anglais) est une enceinte de matériaux réfractaires : c'est un synonyme de "four". Les cornues étaient tombées en désuétude à cause de leur coût élevé et de leur faible rendement, bien qu'elles produisent un charbon d'excellente qualité et permettent la récupération de sous-produits. Ces technologies étaient employées dans l'industrie de l'acier.

Cependant, un four à cornue en brique dénommé Adam Retort a été spécialement conçu pour limiter les coûts d'investissement et améliorer les rendements de carbonisation. Ce procédé est avant tout destiné aux pays en développement (SalvaTerra, 2014)<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> MARIEN J.-N., DUBIEZ E., 2013. Quand la ville mange la forêt : les défis du bois-énergie en Afrique centrale, Matière à débattre et décider. Éditions Quae.

<sup>11</sup> ONFI et Novacel SPRL, 2012. Étude de préféabilité sur les potentialités de développement des filières agroforesterie et bois-énergie dans le bassin de Kinshasa - Volet bois énergie. Banque Mondiale, Paris.

<sup>12</sup> SalvaTerra, 2014. Carbonisation et commercialisation du makala produit à partir des plantations commerciales du Puits de carbone agroforestier d'Ibi Batéké en périphérie de Kinshasa, RDC – Financé par le programme « Biodiversité et Forêts » de la GIZ. Paris – SalvaTerra. 71p

Ce four est en métal et en briques et comprend deux chambres : une chambre à combustion servant à réchauffer la chambre principale pour initier la pyrolyse en brûlant de la biomasse et des résidus de biomasse (*Ibid*).

Lorsque la charge est assez chaude et que l'humidité du bois s'est évaporée, les gaz de pyrolyse, dont le méthane, sont récupérés pour être brûlés dans la chambre de combustion et accélérer la pyrolyse. Ainsi non seulement le procédé améliore le rendement obtenu avec les fours en briques classiques, mais en plus il contribue à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, son action sur la santé des travailleurs est bien meilleure car davantage de fumées sont récupérées (*Ibid*).

Son constructeur annonce un rendement de 30% à 35% et ce chiffre est repris dans certaines publications, notamment (PNUD, 2014)<sup>13</sup>. Ceci apparaît optimiste et mériterait d'être vérifié.

## 4 Meule traditionnelle améliorée vs four Adam Retort ?

---

Ces deux techniques, jugées les plus prometteuses, ont été analysées en détail dans (SalvaTerra, 2014). Voici en substance les conclusions de ces analyses :

Dans l'hypothèse de fours Adam Retort, la densité de construction de fours serait très élevée (1 four pour 1,14 ha en moyenne), du fait de la faible capacité de charge du four Adam. Ainsi il serait préférable de construire des petites unités rassemblant une vingtaine de fours pour chaque sous-bloc de 25 ha. Ces unités seraient disposées à proximité des pistes pour faciliter l'évacuation des produits.

Ceci impliquerait donc des coûts de chargement/déchargement et transport du bois sec entre les plantations et les fours. Ce coût est conséquent : pour rappel, un stère d'Acacia sp. à 15-20% d'humidité a une densité estimée entre 800 et 900 kg/m<sup>3</sup>, d'où un poids estimé entre 560 et 720 kg/stère (à raison de 0,7 à 0,8 m<sup>3</sup>/stère). On comprend aisément que la manutention d'une matière première pondéreuse et son transport sur des km complique fortement la logistique et grève fortement la rentabilité de l'opération (et ceci sans parler des coûts d'investissement dans des tracteurs agricoles + bennes dédiés au transport du bois).

In fine, le coût total de la carbonisation avec four Adam était estimé (en 2014) à 8,3 USD/sac (sans tenir compte des coûts d'entretien des fours et des engins roulants (tracteurs + bennes), de même que les coûts d'investissement dans les engins roulants), à comparer à celui de la carbonisation traditionnelle améliorée, estimé entre 2,3 à 9,5 USD/sac.

En ajoutant les coûts d'entretien des fours Adam et des engins roulants de même que les coûts d'investissement dans les engins roulants, le coût de la carbonisation améliorée avec fours Adam dépasse largement celui de la carbonisation traditionnelle améliorée.

Qui plus est, en tenant compte de l'état des pistes et du temps nécessaire pour réparer les avaries sur le matériel, le rythme réel de production serait fortement diminué et les objectifs de production ne sauraient être atteints.

Considérant ce qui précède, nous recommandons donc d'améliorer l'efficacité de la carbonisation de façon pragmatique (*low tech / low cost / low risk*) et sans changer de famille de technologie, en optant pour la carbonisation traditionnelle "améliorée". A l'instar de la carbonisation traditionnelle, l'énergie y est fournie par combustion partielle de la charge. On peut tendre vers un rendement de l'ordre de 15% à 20% et surtout le stabiliser. Ceci dépend de multiples facteurs, et notamment du savoir-faire du charbonnier et de sa capacité à gérer des petites améliorations techniques (séchage préalable des bois « en feuilles » avant façonnage ; insertion d'une cheminée et d'évents latéraux pour mieux gérer les entrées d'air ; empilage ordonné de la meule en gros / moyens / petits bois ; suivi continu des fumées, etc.).

---

<sup>13</sup> PNUD, 2014. NAMA Study for a sustainable charcoal value in Côte d'Ivoire. Abidjan.

## Bibliographie

---

BISIAUX F., PELTIER R., MULIELE J.C., 2009. Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, Mampou, en République démocratique du Congo. Bois For. Trop. 3

DUBIEZ E., OKWE A., GAZULL L., PEROCHES A., 2023. Rapport d'étude sur l'évolution de la consommation en énergies domestiques des ménages de la ville de Kinshasa. 61p.

FAO, 1983. Techniques simples de carbonisation. Etude FAO For. 41.

LOUPPE, 2014. Module de formation sur le bois énergie - Chapitre 4-2 : Améliorer la production de charbon de bois. [http://makala.cirad.fr/les\\_produits/guides\\_pratiques](http://makala.cirad.fr/les_produits/guides_pratiques)

MARIEN J.-N., DUBIEZ E., 2013. Quand la ville mange la forêt : les défis du bois-énergie en Afrique centrale, Matière à débattre et décider. Éditions Quae.

ONFI et Novacel SPRL, 2012. Étude de préfaisabilité sur les potentialités de développement des filières agroforesterie et bois-énergie dans le bassin de Kinshasa - Volet bois énergie. Banque Mondiale, Paris.

PINTA F., KALALA D., DUBIEZ E., LARZILLIERE A., MARIEN J.-N., 2012 *Guide pratique de carbonisation améliorée*, Projet Makala, 26 p.

PNUD, 2014. NAMA Study for a sustainable charcoal value in Côte d'Ivoire. Abidjan.

Practical Action, non daté. Technical brief: Charcoal production.

SalvaTerra, 2014. Carbonisation et commercialisation du makala produit à partir des plantations commerciales du Puits de carbone agroforestier d'Ibi Batéké en périphérie de Kinshasa, RDC – Financé par le programme « Biodiversité et Forêts » de la GIZ. Paris – SalvaTerra. 71p

SalvaTerra, 2024. Etude de marché du Makala à Kinshasa – Rapport de faisabilité du projet *Sustainable Green Wood*. Paris – SalvaTerra. 36p

SCHURE J., INGRAM V., AKALAKOU-MAYIMBA C., 2011. Bois énergie en RDC : analyse de la filière des villes de Kinshasa et de Kisangani. Projet Makala - CIFOR, Kinshasa.

SCHURE J., PINTA F., CERUTTI P., KASEREKA-MUVATSI L., 2019. Efficiency of charcoal production in Sub-Saharan Africa: Solutions beyond the kiln. Bois et Forêts des Tropiques, 340: 57-70. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.340.a31691>