

## **Caractérisation et traitement thermochimique des coques d'anacarde en vue de leur valorisation énergétique dans les procédés de transformation artisanale de noix de cajou**

TAGUTCHOU Jean-Philippe\*, NAQUIN Pascale

CEFREPADE et INSAVALOR-PROVADEMSE, INSA de Lyon, LGCIE site Sadi Carnot, 9 rue de la Physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

[jean-philippe.tagutchou@cefrepade.org](mailto:jean-philippe.tagutchou@cefrepade.org)

### **Résumé**

Le procédé de transformation des noix de cajou avant exportation se fait en plusieurs étapes, parmi lesquelles certaines nécessitent de l'énergie (première cuisson pour fragiliser et casser les coques d'anacarde, séchage des amandes). A l'échelle artisanale ou semi-industrielle, comme par exemple dans la région de Bobo Dioulasso au Burkina Faso, l'énergie provient du bois et du gaz naturel. L'utilisation du bois constitue ainsi un préjudice grave pour l'environnement dans cette zone sahélienne où la lutte contre la déforestation est un combat incessant. De même, au-delà de la subvention étatique indispensable, le gaz constitue une ressource fossile source de gaz à effet de serre. Les coques ligneuses issues du décorticage sont abondantes et encombrantes. Elles ne sont cependant pas valorisables directement en combustion car elles sont imbibées de CNSL (Cashew Nut Shell Liquid), substance huileuse générant des fumées abondantes, âcres et irritantes pour les yeux lors de leur combustion. Il se pose donc la question de savoir quel traitement peut leur être apporté pour pouvoir les valoriser énergétiquement *a minima* pour couvrir les besoins liés au procédé. S'il existe des moyens techniques pour leur valorisation à grande échelle (en Inde, au Brésil), il reste à trouver des solutions qui seraient viables et réalisables à l'échelle de petits ateliers.

Le CEFREPADE et la plateforme technologique PROVADEMSE ont été sollicités par le RONGEAD, dans le cadre d'un programme financé par la Région Rhône-Alpes (F) et la Fondation Nature et Homme, pour apporter des éléments de réponse quant à la valorisation in situ de ces coques tout en contribuant à l'autonomie énergétique des unités de transformation dont l'énergie constitue un des postes clés. L'objectif de cette étude vise donc à caractériser les coques d'anacarde provenant de la région de Bobo-Dioulasso (Burkina-faso) et proposer des voies de valorisation possibles. Après une caractérisation initiale des coques, les travaux ont porté sur des essais de traitement thermique. Une étude thermochimique comparée a été réalisée dans des conditions de torréfaction (250°C) et de pyrolyse (450°C). Les résultats des tests réalisés montrent que le traitement des coques d'anacarde permet d'obtenir trois types de produits : solide (char), liquide (huile ou fraction condensable des gaz) et gazeux (gaz incondensable), dans des proportions et de qualité relativement différentes selon la température de travail. A 250°C, on produit 48,5% de char et 13,8% d'huile, contre respectivement 17% et 47,5% lorsqu'on opère à 450°C. Les pouvoirs calorifiques (PCI) des chars produits sont de 25,6 MJ/kg à 250°C et 27,2 MJ/kg à 450°C. Les PCI des huiles produites sont presque similaires et se situent au-dessus de 36 MJ/kg, avoisinant ainsi ceux des produits pétroliers.

Sous réserve de l'analyse des fumées émises lors de la combustion de ces produits, le traitement thermochimique en conditions anoxiques semble donc une option intéressante pour valoriser les coques d'anacarde.

Mots clés : coques d'anacarde, CNSL, valorisation, pyrolyse, torréfaction

---

\* Auteur/s à qui la correspondance doit être adressée : [jean-philippe.tagutchou@cefrepade.org](mailto:jean-philippe.tagutchou@cefrepade.org)

## 1. Introduction

Les anacardiens sont cultivés dans les zones tropicales humides. Partis d'Amérique centrale et du Sud, on les retrouve aujourd'hui largement en Asie (Vietnam, Inde) et en Afrique (Nigéria, Burkina-Faso, Côte d'Ivoire). Les noix de cajou (amandes) constituent le principal produit commercial de cet arbre qui peut produire en moyenne 200 à 300 fruits par an.

L'amande est emprisonnée dans une coque rigide qu'il faut fragiliser avant décorticage. Ce procédé nécessite de l'énergie aussi bien pour la fragilisation que pour le séchage et le dépelliculage des amandes après décorticage (à titre d'exemple, sur l'unité de décorticage où se déroule cette étude, les noix d'anacarde produisent en moyenne 21% d'amande, 73% de coques brutes et 6% de pellicules). Les besoins énergétiques des petites unités artisanales, comme au Burkina Faso, sont comblés par le bois et le gaz naturel alors que les coques constituent une source d'énergie potentielle conséquente. Cependant, celles-ci sont imbibées d'une substance huileuse appelée CNSL (Cashew Nut Shell Liquid), dont la combustion génère des fumées abondantes, âcres et irritantes pour les yeux.

Selon le procédé d'extraction utilisé, la composition obtenue du CNSL est différente : il est naturellement constitué de 70 à 90% d'acide anacardique, de 10 à 18% de cardol et d'environ 5% de cardanol, taux qui augmente avec la température d'extraction, l'acide anacardique se décarboxylant en cardanol (Das et al. 2004 ; Patel et al. 2006 ; Senthil Kumar et al. 2009 ; Tyman et al. 1983; U.S.EPA 2006).

Le CNSL et ses composés présentent de nombreuses applications industrielles : freins et garnitures d'embrayages, tensio-actifs, caoutchouc, adhésifs, vernis, peintures, colles, agents anti-oxydant, matériaux isolants, pesticides, insecticides, résines, synthèse de polymères, protection du bois, produits chimiques de fonderie,... (Patel et al. 2011 ; Sanger S.H. et al. 2011 ; Senthil Kumar et al. 2009).

Compte tenu de sa valeur commerciale, les industriels ont développé divers procédés d'extraction selon les résultats souhaités (distillation, traitement à la vapeur d'eau surchauffée, extraction au solvant tel que l'hexane, extraction par fluide super-critique, ...) (Das et al. 2004 ; Patel et al. 2006 et 2011 ; Tyman et al. 1983). Mais si ces procédés sont rentables à l'échelle industrielle, ils le sont beaucoup moins à l'échelle d'ateliers artisanaux ou même semi-industriels. C'est pourquoi dans les unités artisanales d'Afrique le CNSL n'est pas valorisé, de même que les coques. Souvent même, à défaut de pouvoir les décortiquer sur place, les noix brutes sont transportées par bateau vers l'Asie pour être transformées et les amandes repassent ensuite par les côtes africaines en direction de l'Europe où elles sont consommées.

Dans un premier temps, nous avons orienté nos travaux vers la recherche d'un moyen permettant de substituer le bois et le gaz en utilisant les coques d'anacarde. Plusieurs études thermochimiques ont été réalisées sur différents types de biomasses, notamment les plaquettes forestières (Tagutchou 2008 ; Van de steene et al. 2010), l'eucalyptus (Kumar et al. 2010), le jatropha (Vyas and Singh 2007), la canne de maïs (Capunitan and Capareda 2012), les coques d'olives (Vamvuka et al. 2003), les granulés de bois, etc. Cependant, même si des centaines d'articles sont consacrées à la biomasse (Yaman 2004), peu concernent le traitement thermochimique des coques d'anacarde. Les articles les concernant sont pour la plupart orientés vers les procédés d'extraction du CNSL, quelques-uns seulement parlant du traitement thermochimique, notamment de pyrolyse et gazéification (Das and Ganesh 2003 ; Das et al. 2004 ; Singh et al. 2006; Tippayawong et al.; Tsamba et al. 2006). Tsamba et al. ont mené une étude comparative basée sur l'analyse thermogravimétrique (ATG) de trois biomasses dont les coques d'anacarde. D'après ces auteurs, la plage de température où l'on observe une importante perte de masse se situe entre 247°C et 420°C avec une perte de l'ordre de 77% de la masse initiale (Tsamba et al. 2006). En considérant la vitesse de perte de masse, ces auteurs ont montré qu'on obtient 2 pics de vitesse situés l'un à environ 320°C et l'autre à 395°C, correspondant à la décomposition de l'hémicellulose et à celle de la cellulose, la

décomposition de la lignine ayant quant à elle lieu autour de 500°C. Cette étude a aussi permis aux auteurs de mettre en évidence la plus importante réactivité des coques d'anacarde comparées aux autres biomasses (coques de noix de coco et granulés de bois par exemple). Ceci est ainsi confirmé par leur faible énergie d'activation (130 kJ/kg) et une forte teneur en hydrocarbures, ce qui pourrait donner lieu à une relative faible production de charbon. Mais Das et al. (Das and Ganesh 2003) mettent en avant la production des huiles par pyrolyse en mentionnant la forte valeur énergétique de celles-ci et surtout les avantages liés à la facilité de manipulation, de stockage et de transport pour les applications de combustion ou encore pour être améliorées en hydrocarbures plus légers et utilisées comme carburant. L'aspect production et utilisation du char ainsi que la combustion in situ des gaz de pyrolyse (condensables et incondensables) sont peu renseignés dans la littérature. Et pourtant, comme l'ont récemment noté Sanger et al. (Sanger S.H. et al. 2011), le charbon de pyrolyse des coques d'anacarde pourrait permettre une autonomie énergétique dans les unités de transformation avec des rendements de combustion élevés.

Nous nous proposons ici d'étudier les coques brutes d'anacarde provenant d'une unité artisanale de transformation au Burkina-Faso. Une caractérisation préalable de la matière première brute a été réalisée, les coques d'origine africaine ayant de caractéristiques un peu différentes des coques asiatiques, plus étudiées. Par la suite, des essais de traitement thermochimique des coques ont été réalisés suivant deux niveaux de température (250°C et 450°C). Ces deux niveaux de température ont été choisis sur la base des résultats d'ATG issus de la bibliographie, qui montrent nettement que l'essentiel de la dégradation thermique des coques d'anacarde se passe entre 250°C et 420°C (Tsamba et al. 2006). Par ailleurs, ces deux niveaux de température permettront d'orienter le choix en privilégiant la production de charbon, d'huiles ou celle de gaz combustible.

L'objectif poursuivi à terme est de trouver le meilleur compromis (technique, économique et environnemental) pour valoriser les coques d'anacarde à l'aide d'un procédé rustique, peu coûteux, abordable au niveau de petits ateliers de transformation et permettant de réduire la facture énergétique tout en résolvant le problème d'élimination des coques.

## 2. Matériels et méthodes

Les coques brutes d'anacarde ont été échantillonnées dans un tas d'une unité artisanale de décorticage (environ 25 kg prélevés au total). Une partie de cette matière première a été broyée en vue des différentes analyses de caractérisation. Les analyses ont été réalisées suivant les protocoles homologués de caractérisation des déchets ou des biocombustibles (normes françaises et européennes) : humidité, matières volatiles, cendres, carbone fixe, PCS et PCI, C, H, O, N, S et Cl.

Des essais de torréfaction et de pyrolyse ont été conduits dans le réacteur BIOGREEN breveté par la société ETIA (*Figure 1*). Il consiste en un réacteur à vis sans fin, cette dernière étant chauffée par effet joule d'où son nom de « SPIRAJOLE ». Le débit et le temps de séjour de la matière dans le réacteur sont automatiquement réglés par la vitesse de rotation de la vis. Le char produit sort par le bas du réacteur où il passe par un échangeur de refroidissement avant d'être récupéré. Les gaz passent par un condenseur où les condensats (huiles) sont récupérés et les gaz incondensables envoyés dans une chambre de post-combustion. Deux essais ont été conduits suivant un temps de séjour de 15 minutes et un débit de 5 kg/h, sur chaque fois 7 kg de coques brutes, à des températures moyennes de 250°C et 450°C respectivement pour la torréfaction et la pyrolyse.

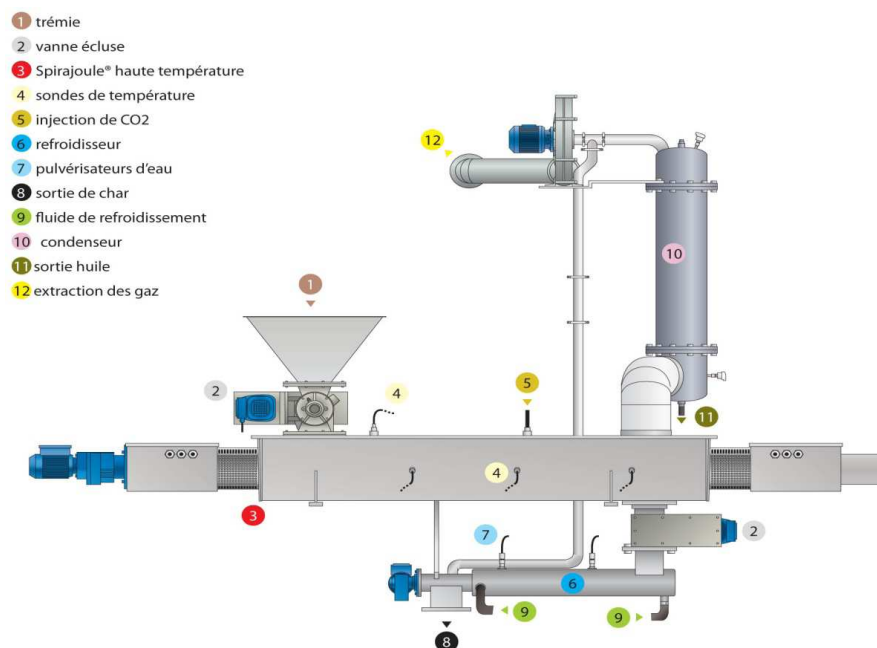


Figure 1. Réacteur d'essai (procédé BIOGREEN® de ETIA)

Les produits issus de chaque test sont récupérés pour des analyses, à l'exception des gaz incondensables. Un piquage permet de prélever et d'analyser ces derniers en ligne avant leur combustion, permettant ainsi d'obtenir leur composition. Les huiles et le charbon obtenus sont stockés en vue de leur caractérisation ultérieure.

### 3. Résultats obtenus et interprétation

#### 3.1. Analyse des coques brutes et des chars de torréfaction et de pyrolyse

Le tableau 1 présente les résultats des analyses réalisées sur les coques brutes d'une part et sur les charbons issus des deux procédés de traitement d'autre part.

Table 1. Analyse des coques brutes et des charbons de torréfaction et de pyrolyse

	Résultats en % sur sec hors humidité										
	Humidité (%)	Matières volatiles	Carbone fixe	Cendres	PCI (MJ/kg)	C	H	O	N	S	Cl
Coques brutes	9,9	81,6	15,8	2,6	21,3	56,4	7,1	33,5	0,6	<0,10	0,01
Char de torréfaction	1,0	64,5	30,8	4,6	24,6	63,0	6,0	25,9	0,7	0,10	0,02
Char de pyrolyse	6,1	27,3	65,3	7,4	27,3	77,7	3,8	10,8	0,9	<0,10	0,03

Les résultats montrent que les coques brutes contiennent près de 82% de matières volatiles, 16% de carbone fixe et moins de 3% de cendres. Cette composition avoisine celle de plaquettes forestières comme du pin maritime évaluée respectivement à 82,6%, 17,2% et 0,2% (Tagutchou 2008), à la seule différence que les coques d'anacarde ont une teneur en cendres beaucoup plus élevée. La teneur en carbone et hydrogène (56,6% et 7,1%) des coques d'anacarde est beaucoup plus élevée que dans le cas de la biomasse forestière (45% et 5,7%). La pyrolyse à 450°C et 15 minutes de temps de séjour permet d'obtenir un char à 65,3% de carbone fixe et 27,3% de matière volatiles. L'analyse élémentaire de ce même charbon permet

de constater qu'il contient près de 78% de carbone et 3% d'hydrogène, ce qui en soit est un excellent combustible comme le prouve son PCI estimé à plus de 27MJ/kg. Ce PCI correspond à celui récemment trouvé par des auteurs ayant travaillé à environ 450°C (Sanger S.H. et al. 2011). Ces analyses sont comparées sur la figure 2 où on peut remarquer l'évolution de chaque propriété caractéristique en fonction du niveau de traitement thermique.

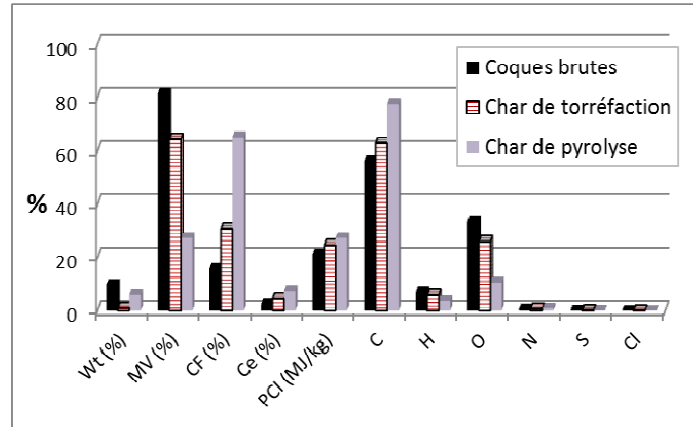


Figure 2. Analyse comparée de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques au cours du traitement thermique des coques d'anacarde

### 3.2. Analyse des Huiles

Les huiles de torréfaction et de pyrolyse sont visuellement distinctes et multiphasiques. Nous avons procédé à une première décantation (Voir figure 2). En première estimation, la phase lourde (claire) est plus importante dans les huiles de torréfaction (96%) contre 4% pour la phase légère plus sombre, tandis que cette tendance est inversée pour les huiles de pyrolyse, représentant ainsi respectivement 30% et 70% pour la phase lourde et la phase légère. L'huile de pyrolyse s'enflamme plus facilement moyennant un pré-chauffage et brûle longuement avec une belle flamme (figure 3), témoignant ainsi de son faible point éclair.



Figure 3. Comportement des huiles de pyrolyse : Séparation en deux phases et test d'inflammabilité

Le PCI est de l'ordre de 36 MJ/kg, valeur avoisinant ainsi celui de produits pétroliers tel que l'ont remarqué plusieurs auteurs (Das et al. 2004 ; Patel et al. 2006 ; Sanger S.H. et al. 2011).

L'étuvage des huiles à 105°C montre qu'elles restent très volatiles à ce niveau de température (Figure 4). En 24h d'étuvage, les huiles de torréfaction perdent 58% de leur masse initiale tandis que les huiles de pyrolyse en perdent 82%. Des analyses plus poussées vont être

effectuées et devraient permettre d'améliorer la connaissance des caractéristiques de ce produit et surtout de mieux envisager les filières de valorisation potentielles.

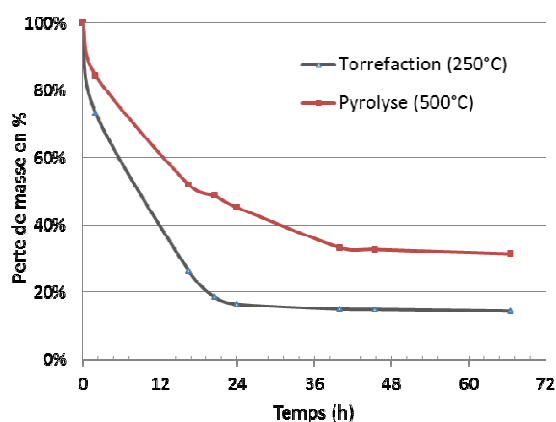


Figure 4. Perte de masse des huiles (CNSL) à 105°C en fonction du temps

### 3.3. Analyse des gaz

Les gaz incondensables produits après le condenseur sont analysés en ligne à l'aide d'un analyseur « GEIT GAS 3100 SYNGAS Analyser ». Les gaz produits en régime permanent sont majoritairement constitués de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et d'autres hydrocarbures  $\text{C}_x\text{H}_y$ . Les résultats obtenus dans les 2 procédés sont synthétisés de manière comparée en figure 5. Le gaz produit par torréfaction a un PCI d'environ  $0,6 \text{ MJ/Nm}^3$  contre  $3,4 \text{ MJ/Nm}^3$  pour les gaz de pyrolyse. Nous remarquons que contrairement à la torréfaction qui produit un gaz très pauvre, la pyrolyse permet de produire un gaz environ 6 fois plus riche, mais restant peu calorifique.

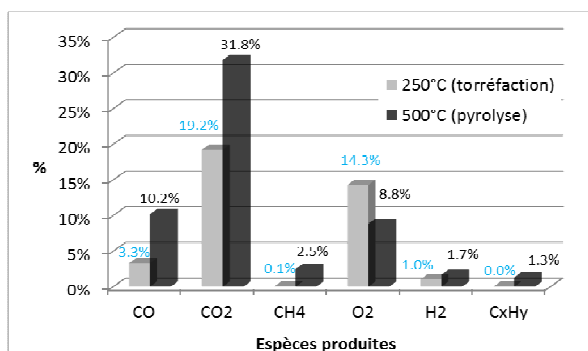


Figure 5. Composition des gaz produits dans les deux cas de procédé

Dans la littérature, il n'existe pas de données comparatives en ce qui concerne la composition des gaz incondensables issus du traitement thermique des coques d'anacarde. Ces valeurs restent tout de même très faibles comparées aux valeurs de la littérature concernant la pyrolyse de la biomasse forestière. En effet, dans des conditions quasi-similaires (température et temps de séjour) Fassinou et al obtiennent pour la pyrolyse des plaquettes de pin maritime des compositions de gaz avec des PCI situés entre  $7$  et  $12 \text{ MJ/Nm}^3$  (Fassinou et al. 2009). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que tous les composés à forte valeur énergétique se retrouvent dans les fractions condensables (huiles), d'où les valeurs élevées des PCI des huiles.

### 3.4. Bilan matière et d'énergie

On remarque que la torréfaction des coques d'anacarde à  $250^\circ\text{C}$  aboutit à la production de  $48,5\%$  de char,  $13,75\%$  d'huile et  $37,75\%$  de gaz incondensable. En revanche, la pyrolyse à  $450^\circ\text{C}$  donne  $17\%$  de char,  $47,5\%$  d'huile et  $35,5\%$  de gaz incondensable. On se rend compte

aussi que la proportion de gaz incondensable produit ne varie pratiquement pas lorsqu'on passe de la torréfaction à la pyrolyse. Les chiffres de la littérature nous montrent que l'on obtient par exemple pour la biomasse 12% de char, 75% d'huiles et 14% de gaz lors de la pyrolyse à 500°C (lit fluidisé) du bois de hêtre ; ces chiffres passent à 22%, 47% et 14% respectivement lorsqu'il s'agit de résidus agricoles (paille de blé) dans les mêmes conditions (Jendoubi et al. 2012).

Du point de vue énergétique, on remarque que 21%, 75% et 4% d'énergie se retrouvent respectivement dans le char, les huiles et les gaz incondensables pour ce qui est du procédé de pyrolyse à 450°C. Ces chiffres montrent que ce procédé permet de concentrer la majeure partie de l'énergie des coques d'anacarde dans les huiles. En revanche, en torréfaction, la majeure partie de l'énergie reste dans le char (59%) tandis que les huiles contiennent alors seulement 20% de l'énergie initiale des coques.

#### 4. Conclusion

Les essais que nous avons menés (torréfaction vers 250°C et pyrolyse vers 450°C) ont montré des différences importantes dans les sous-produits obtenus. Des analyses ont été réalisées sur les chars et les huiles obtenus ainsi que sur la composition des gaz. Le bilan matière et énergie réalisé a montré que la pyrolyse privilégie la production d'huiles à fort pouvoir calorifique alors que la torréfaction privilégie celle de charbon. Le PCI des huiles est élevé et se rapproche de celui des produits pétroliers, donnant ainsi à ce produit un possible champ de valorisation (en mélange avec des carburants par exemple, sous réserve de l'étude de son comportement en combustion dans des moteurs). Les gaz incondensables produits dans les deux cas sont faiblement calorifiques.

L'état actuel de l'étude ne nous permet pas encore de privilégier l'un ou l'autre de ces procédés mais les résultats sont très encourageants. Le choix va dépendre notamment de la possibilité ou non de valorisation énergétique directe des gaz (avant condensation) et de la qualité des fumées de combustion des chars et des huiles éventuelles obtenues (si les gaz sont condensés et non brûlés). De nouveaux essais en pilote de laboratoire sont en cours, notamment pour effectuer des analyses des fumées de combustion afin de savoir si le char (de pyrolyse et de torréfaction) est complètement débarrassé des produits à l'origine des fumées irritantes émises lors de la combustion directe des coques brutes. Ces essais permettront aussi d'affiner les réglages avant de passer à un prototype semi-industriel.

#### 5. Remerciements

Nous remercions l'Association RONGEAD, notre partenaire dans cette étude.

Nous tenons à remercier également la Région Rhône Alpes ainsi que la Fondation Nature et l'Homme de Nicolas Hulot pour le financement de ce projet.

#### 6. Références bibliographiques

- Capunitan, J. A., and Capareda, S. C. (2012). "Assessing the potential for biofuel production of corn stover pyrolysis using a pressurized batch reactor." *Fuel*(In Press).
- Das, P., and Ganesh, A. (2003). "Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell : a near fuel." *Biomass and Bioenergy*, 25(1), 113-117.
- Das, P., Sreelatha, T., and Ganesh, A. (2004). "Bio oil from pyrolysis of cashew nut shell-characterisation and related properties." *Biomass and Bioenergy*, 27(3), 265-275.
- Fassinou, W. F., Van de Steene, L., Toure, S., Volle, G., and Girard, P. (2009). "Pyrolysis of Pinus pinaster in a two-stage gasifier: Influence of processing parameters and thermal cracking of tar." *Fuel Processing Technology*, 90(1), 75-90.
- Jendoubi, N., Broust, F., Commandre, J. M., Mauviel, G., Sardin, M., and Lede, J. (2012). "Inorganics distribution in bio oils and char produced by biomass fast pyrolysis: The key role of aerosols." *JAAP*, 92(1), 59-67.

- Kumar, G., Panda, A. K., and Singh, R. K. "Optimization of process for the production of bio-oil from eucalyptus wood." *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 38(2), 162-167.
- Patel, R. N., Bandyopadhyay, S., and Ganesh, A. (2006). "Extraction of cashew (*Anacardium occidentale*) nut shell liquid using supercritical carbon dioxide." *Bioresource Technology*, 97(6), 847-853.
- Sanger S.H., A.G. Mohod, Y.P. Khandetode, H.Y. Shrirame, and Deshmukh, A. S. (2011). "Study of Carbonization for Cashew Nut Shell." *Research Journal of Chemical Sciences*, 1(2), 43-55.
- Singh, R. N., Jena, U., Patel, J. B., and Sharma, A. M. (2006). "Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock." *Renewable Energy*, 31(4), 481-487.
- Tagutchou, J. P. (2008). "Gazéification du charbon de plaquettes forestières : particule isolée et lit fixe continu," Thèse de Doctorat, Université de Perpignan; CIRAD Montpellier; Ecole Mines Albi, Perpignan (France).
- Tippayawong, N., Chaichana, C., Promwangkwa, A., and Rerkkriangkrai, P. "Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory." *Energy for Sustainable Development*, 15(1), 69-72.
- Tsamba, A. J., Yang, W., and Blasiak, W. (2006). "Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells." *Fuel Processing Technology*, 87(6), 523-530.
- Vamvuka, D., Kakaras, E., Kastanaki, E., and Grammelis, P. (2003). "Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite." *Fuel*, 82(15-17), 1949-1960.
- Van de steene, L., Tagutchou, J. P., Salvador, S., Mermoud, F., and Martin, E. (2010). "A new experimental Continuous Fixed Bed Reactor to characterise wood char gasification." *Fuel*, 89(11), 3320-3329.
- Vyas, D. K., and Singh, R. N. (2007). "Feasibility study of *Jatropha* seed husk as an open core gasifier feedstock." *Renewable Energy*, 32(3), 512-517.
- Yaman, S. (2004). "Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks Energy Conversion and Management, 651-671." *Fuel and Energy Abstracts*, 45(4), 267.