



**HAL**  
open science

## Bois-énergie, exportation des minéraux et lien avec le pouvoir calorifique

Laurent Saint-André, Laurent Augusto, Nicolas Bilot, Jacques J. Ranger,  
Arnaud A. Legout

► **To cite this version:**

Laurent Saint-André, Laurent Augusto, Nicolas Bilot, Jacques J. Ranger, Arnaud A. Legout. Bois-énergie, exportation des minéraux et lien avec le pouvoir calorifique. FORÊVER, Nov 2014, Nancy, France. 23 p. hal-02796624

**HAL Id: hal-02796624**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02796624v1>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Bois-énergie, exportation des minéraux et lien avec le Pouvoir Calorifique

- FORêVER, Nancy, 15 nov 2013
- SAINT-ANDRE Laurent, Augusto Laurent, Nicolas Bilot, RANGER Jacques, LEGOUT Arnaud



Forêt tropicale humide

# Contexte général

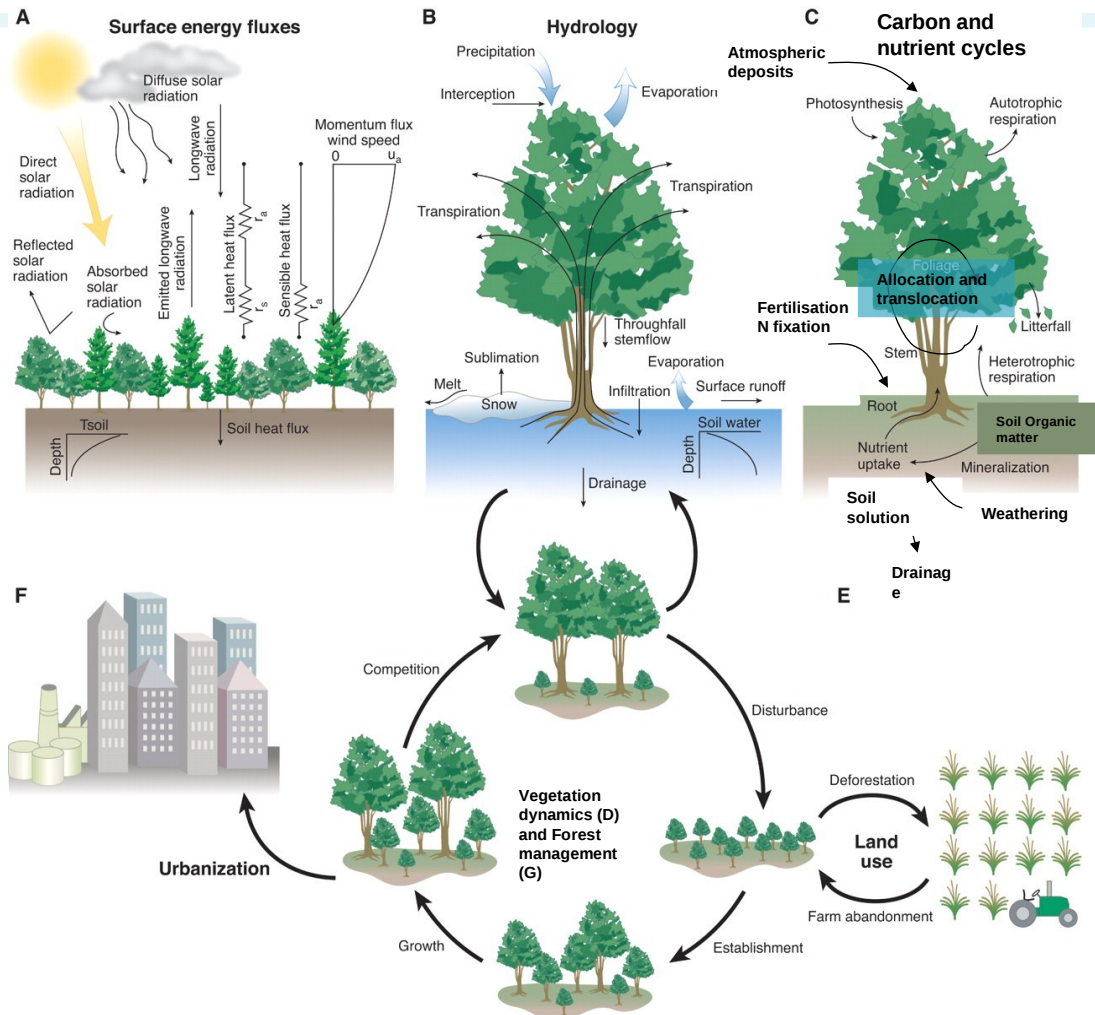
Les écosystèmes forestiers sont

**-par nature des systèmes complexes** (temporellement, spatialement, ...)

**-soumis à une forte demande sociétale**

(production, séquestration du C, biodiversité, quantité et qualité des eaux)

**-impactés** par les changements globaux **mais aussi régulateurs** (atténuation des changements climatiques, interactions avec l'atmosphère, impact des essences sur les cycles biologiques..)





Hêtraie tempérée

# Contexte général

Deux types d'interrogations formulées par les gestionnaires:

(i) **d'ordre économique** (quel itinéraire sylvicole pour atteindre tel ou tel objectif ? en quantité et / ou en qualité de bois ? quelle valorisation de la biomasse ? comment assurer, dans le temps, la pérennité de la production ? etc.) ;



*Nombreux essais sylvicoles, réseaux de placettes permanentes [observation, type RENECOFOR, GUYAFOR] ou expérimentation (GIS Coopérative de données, Plantacomp, réseau amendement, etc..) + Modèles dendrométriques*

(ii) **d'ordre écologique** (impact des essences et du régime sylvicole sur la fertilité, la physique, la biologie et la matière organique dans les sols ? impact des changements climatiques et des changements d'usage des terres sur le double sol-plante ?)



*Essais/sites ateliers sur les cycles biogéochimiques, les flux de matière et d'énergies (ex SOERE F-ORE-T), incluant souvent un volet expérimental (ex: exclusion de pluie, manipulation de la matière organique du sol) + Modèles écophysologiques*



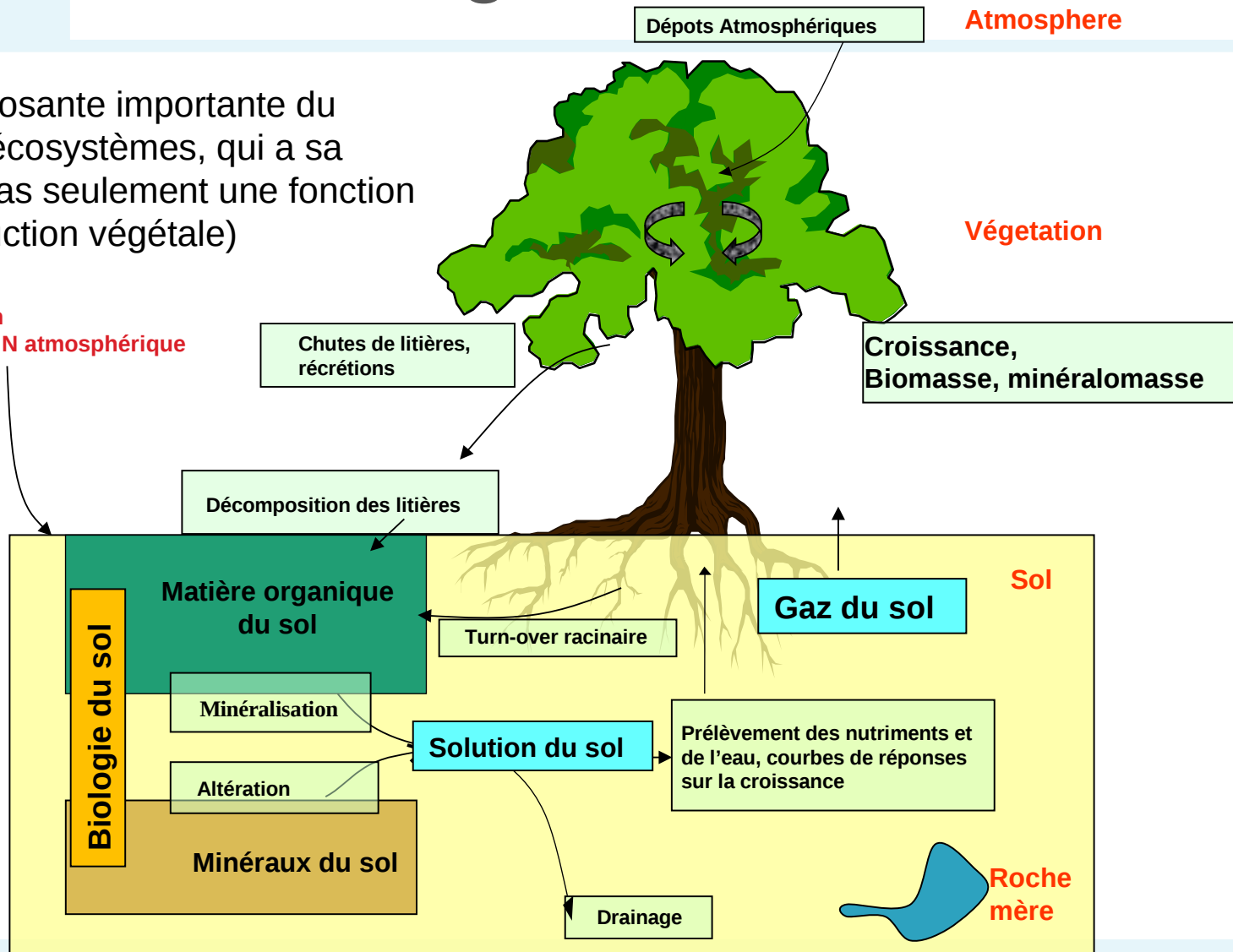
Plantations d'Eucalyptus au Congo

# Interaction sol-plante, généralité

Sols forestiers, composante importante du fonctionnement des écosystèmes, qui a sa propre dynamique (pas seulement une fonction de support à la production végétale)

Fertilisation  
Fixation du N atmosphérique

En général = les sols forestiers sont peu propices à l'agriculture (pour des raisons physiques ou chimique), pas ou peu d'intrants





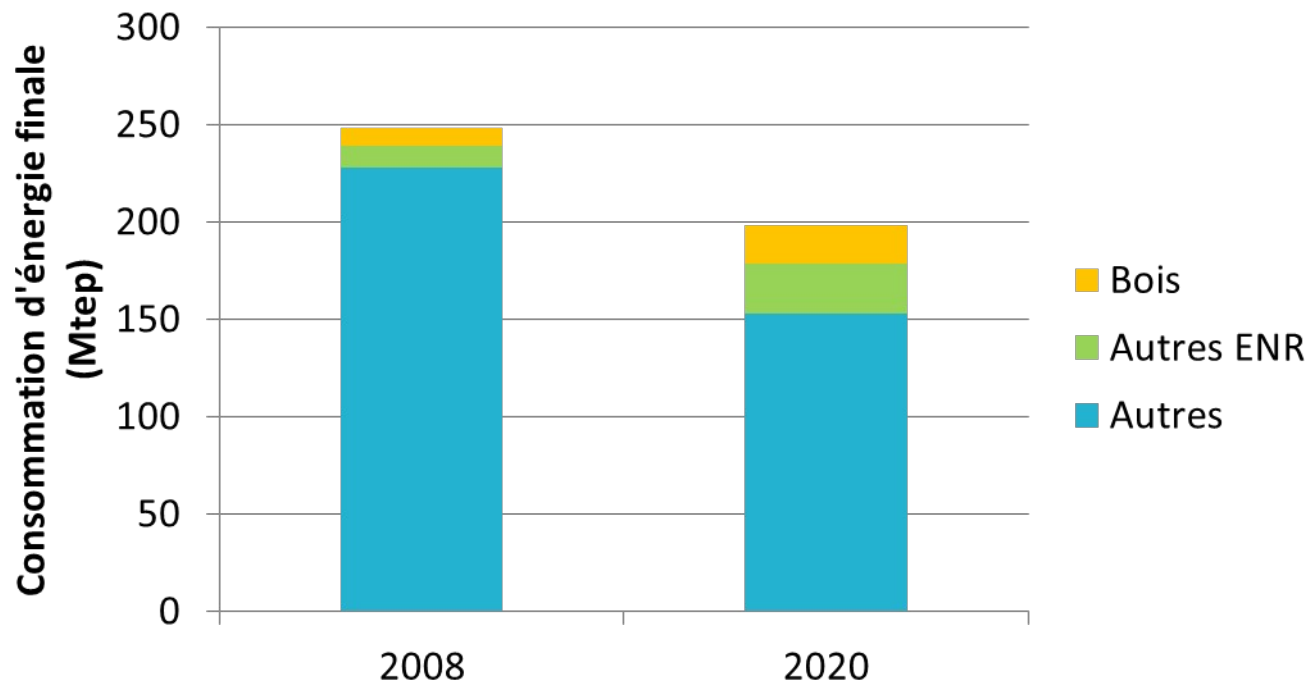
Taillis de Chêne verts

# Un contexte général qui tend à l'intensification des prélèvements

- Objectifs du paquet « Climat Energie » :
- -20% consommation totale
- +20% énergies renouvelables (ENR) (ENR = 44% de bois en 2008)



**Besoins en bois x2,3 !**  
(à modérer compte tenu des performances énergétiques)





Plantation d'hévéa

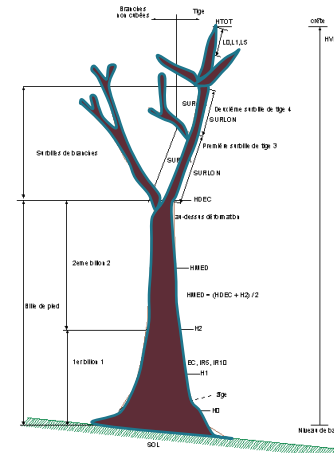
# Où trouver cette ressource ?



Photo Laurent Augusto



Photo Laurent August



Augmentation des prélèvements dans les peuplements forestiers actuels



Où des cultures dédiées (sols agricoles abandonnés) – TCR, TTCR



Plantation d'hévéa

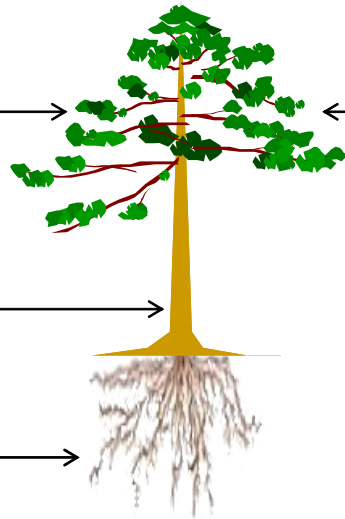
# Gestion de la fertilité chimique des sols

## Résineux

Branches : 40–60%‡  
(70–80%¶)  
Aiguilles : 30–50%‡  
(10% si récolte après séchage<sup>£</sup>)

Ecorces : 80%‡,  
20% dans certaines  
situations (engins  
d'abattage)<sup>†</sup>

Souches/racines :  
50–70%‡

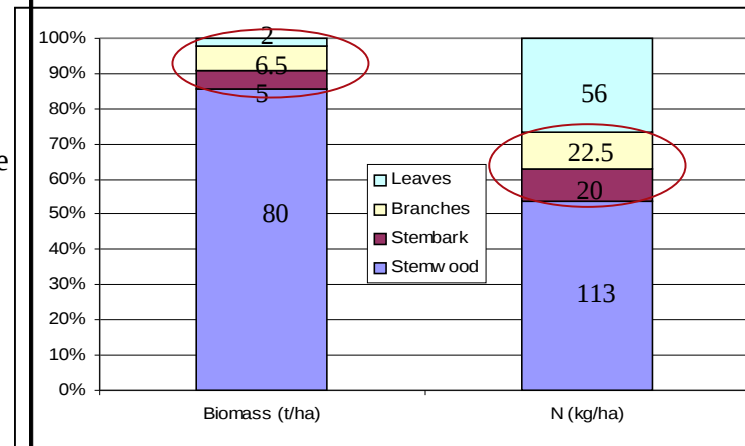


## Feuillus

Branches : 50–70%\*  
(90%#)  
Feuilles ≈ 0 si récolte  
après séchage sur la  
parcelle\*

**Ademe,  
Resobio**

## Eucalyptus, 6 ans, Pointe-Noire, Congo



**Effet du type de produit récolté, les menus bois et l'écorce ne sont pas des déchets pour la forêt, il contiennent une part très importante des nutriments**

‡Cacot (2007), Fraysse (2008) & Augusto (2010) : taux de récolte pour des peuplements de pin maritime dans les Landes de Gascogne (branches, souches, écorces) et de douglas vert (branches) en Bourgogne.

†Sur la base d'observations SMURFIT pour des peuplements de pin maritime (landes de Gascogne).

¶Eriksson (1993), Bergquist et al. (1999) & Egnell & Leijon (1999) : peuplements d'épicéa en Suède.

£Nurmi & Hillebrand (2001) ; Wall (2008) ; Wall & Hytonen (2011) : perte de 90 % des aiguilles après 1–3 mois de séchage en été, peuplements d'épicéa en Finlande.

\* Cacot (2007) : divers peuplements de feuillus (taillis, accrus ou futaies de châtaignier, chêne, hêtre ...), Midi-Pyrénées et Limousin.

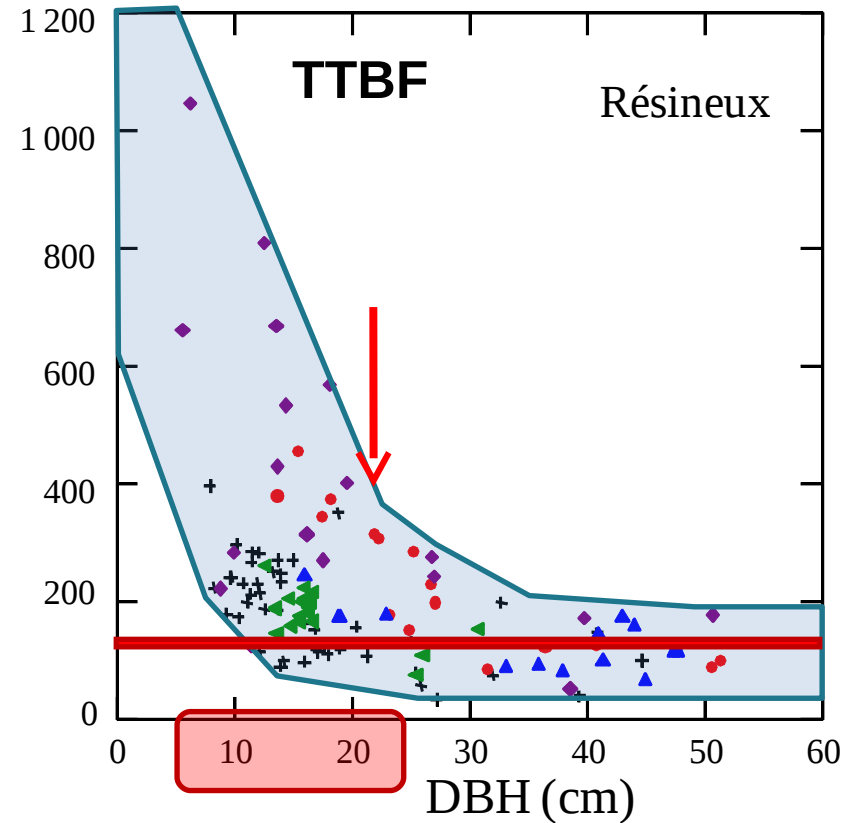
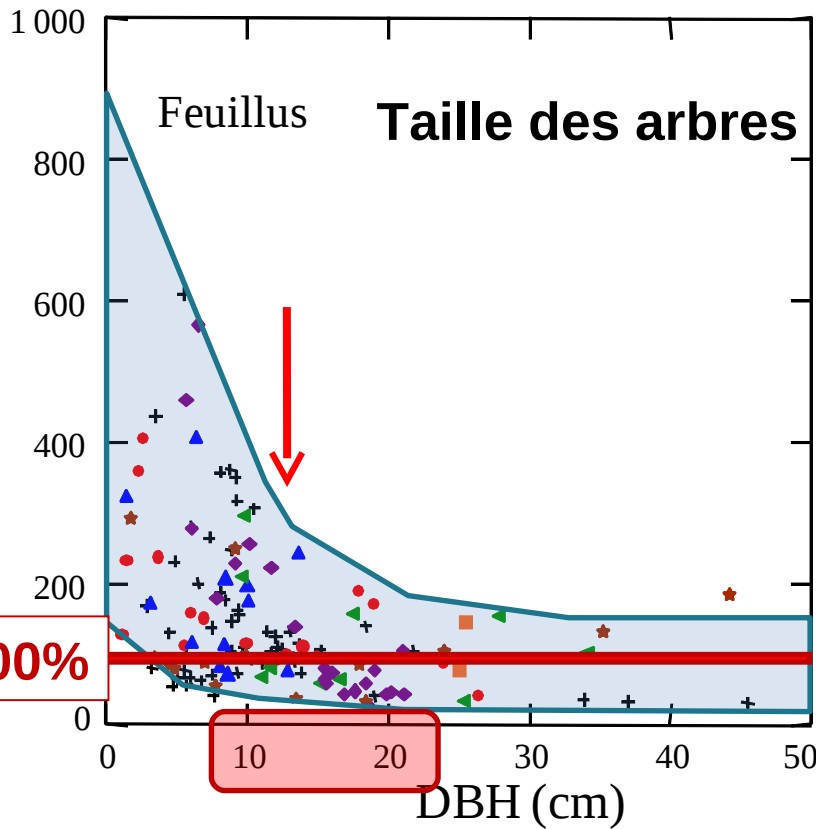
#Johnson et al. (1982), Tritton et al. (1987) & Yanai (1998) : peuplements de feuillus, USA.





Plantation d'hévéa

# Gestion de la fertilité chimique des sols



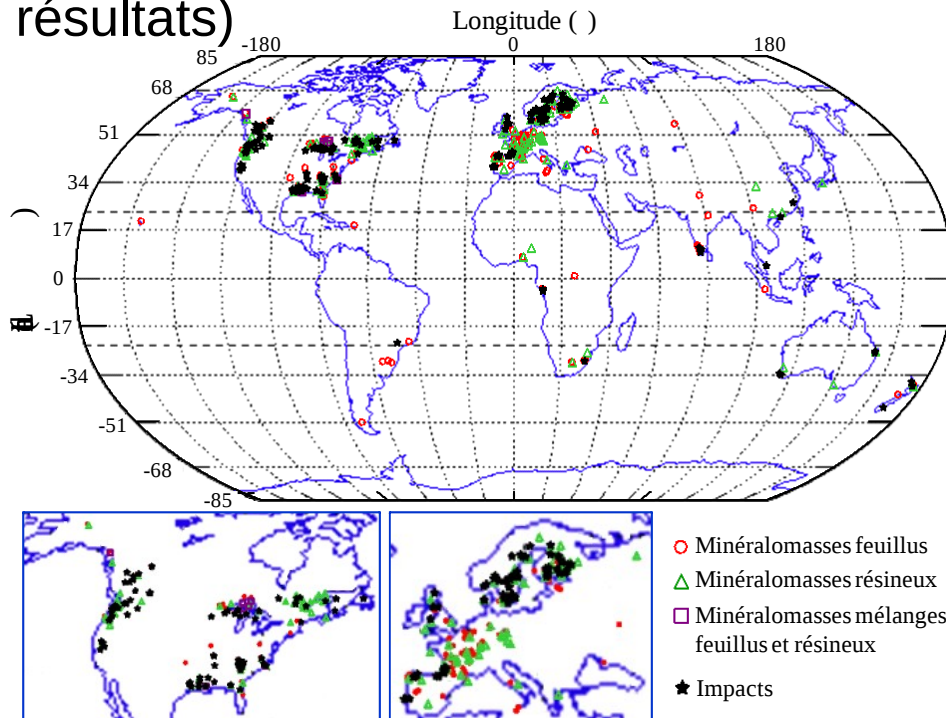
- Feuillus : ● bouleau ▲ châtaignier ◀ chêne ◆ eucalyptus ■ hêtre ★ peuplier + autres feuillus  
Résineux : ● douglas vert ▲ pin maritime ◀ pin sylvestre ◆ épicéa commun + autres résineux

# Quels impacts sur les forêts ?



Futaie de chêne et sous-étage de charme

- Compilation des données de la littérature  
→ 2 bases de données (230 & 130 articles ; 749 forêts ; 6169 & 6815 résultats)



Augusto et al. (D. Achat, N. Pousse, G. Landmann, C. Deleuze, C. Richter...).

Projet RESOBIO 2012-2013

**RESOBIO**

« Gestion des Rémanents forestiers :  
préservation des Sols et de la  
Biodiversité »





Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Quels impacts sur les forêts?

→ diminution des stocks de C des sols

→ diminution des stocks de nutriments sous leurs formes *biodisponibles*

(N, P, K, Ca, Mg ...)

→ diminution de l'activité microbologique des sols

→ diminution des performances de croissance des arbres (-3 à

-70% environ)



feuillage)

→ impacts augmentent avec l'intensité des récoltes (**max =**

→ impacts négatifs **non systématiques** (plus fréquents sur **sols pauvres**)  
Mais à préciser dans un contexte de forêts tempérées

# Quelles recommandations ?



Mélange pin d'Alep - Chêne vert

→ récolte du feuillage déconseillée :

- faible biomasse
- pouvoir calorifique < bois
- taux en cendres élevé
- exportation très importante en nutriments



*récolter en hiver ou  
laisser un temps de  
séchage*

→ privilégier la récolte de rémanents ligneux dans les stades matures



*mener une réflexion sur les récoltes de bois-énergie  
à l'occasion des premières éclaircies*

→ peut on augmenter le retour au sol des écorces ? (hors récolte rémanents)



*mener une réflexion sur les « pertes » d'écorce  
occasionnées par le machinisme*

# Quelles pistes de recherches ?



Mélange pin d'Alep - Chêne vert

→ développement d'un outil de simulation des exportations en nutriments



- bon état d'avancement (RESOBIO, EMERGE, ...)
- possibilité d'un outil fiable et robuste
- relativement facile à renseigner

→ développement d'indicateurs de sensibilité des forêts



→ développement d'un outil de R&D de bilans de fertilité



→ expérimentations en grandeur nature sur l'utilisation d'intrant



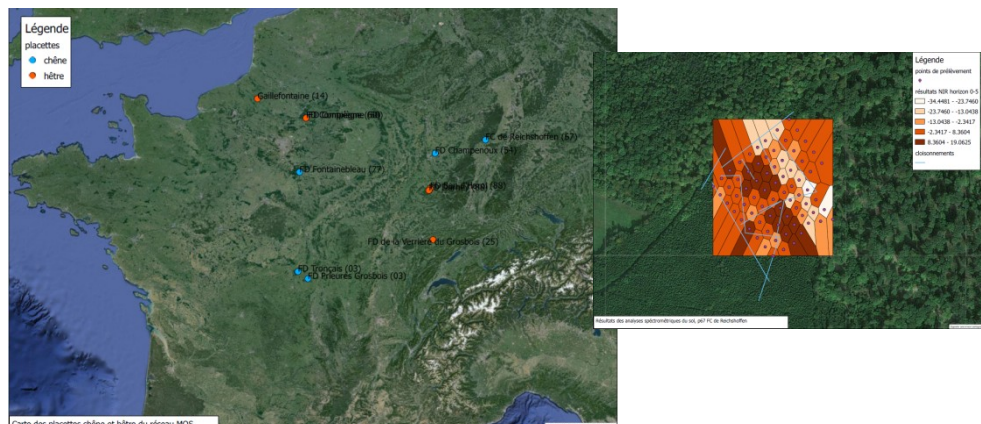
- engrais de synthèse ?
- cendres de bois ?
- amendements ?



# Nouveau réseau MOS



Mélange pin d'Alep – Chêne vert



Réponse des écosystèmes aux prélèvements accrus, effet d'une remédiation par les cendres de bois (recyclage des matériaux, bioéconomie)

Réseau de 18 placettes expérimentales (6 placettes/essences) réparties sur la France

3 essences: **hêtre**, **chêne** (*sessile et pédonculé*), **douglas**

- Zones stratégiques pour le développement de la filière bois-énergie
- En tenant compte des aires de répartition actuelles et modélisées pour le futur
- 4 modalités (témoin, sol nu, prélèvement menus bois, prélèvements menus bois avec remédiation)

*Projet RESPIRE, accepté ADEME REACTIFF2*



Forêt tropicale humide

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

Problématique :

## **Peut-on connecter les sciences forestières aux sciences de l'énergie ?**

→ Objectif :

⇒ Evaluer le potentiel énergétique de nos forêts à partir des modèles de croissance-production et qualité des bois !

- Composition élémentaire → g/kgMS
  - Proportion d'éléments présents dans le bois (Carbone, Hydrogène, Potassium ...).
- Pouvoir Calorifique (PCS) → kJ/kgMS
  - Energie libérée sous forme de chaleur valorisable suite à la réaction de combustion.



Hêtraie tempérée

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- Quelques modèles existants en science de l'énergie :

| Reference                  | Données de calibration                                 | Equations  |
|----------------------------|--|--|
| Boucher et al (2002)       | Wood   | $[a]_{HHV} = 32.76 * [C] + 60 * \left( [H] - \frac{[O]}{8} \right) + 9.25 * [S]$ $[b]_{HHV} = 35.33 * [C]$ $[c]_{HHV} = 37.98 * [C] - 230.4$ |
| Channiwala & Parikh (2002) | Miscellaneous (biomass, gas, coal ...)                 | $HHV = 34.91 * C + 117.83 * H + 10.05 * S - 10.34 * O - 1.51 * N - 2.11 * A$   |
| Friedl et al. (2005)       | 122 plant material samples (wood, agro-biomass, straw) | $HHV = 0.0355 * [C]^2 - 23.2 * [C] - 223 * [H] + 0.512 * [C] * [H] + 13.1 * [N] + 20600$   |
| Sheng & al. (2005)         | 191 biomass samples (data from literature)             | $HHV = -1367.5 + 31.37 * [C] + 70.09 * [H] + 3.18 * [O]$   |
| Tillman (1978)             | a – wood and bark<br>b – divers biomass                | $[a]_{HHV} = 43.73 * [C] - 306$ $[b]_{HHV} = 38.88 * [C]$  |
| Yin (2011)                 | 44 biomass samples (8 wood)                            | $HHV = (29.49 * [C] + 82.50 * [H])$  |

⇒ **C**arbone, **H**ydrogène, **O**xygène, azote (**N**), **S**oufre utilisés dans la littérature en énergétique





Plantation de Douglas

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- Base de 6000 échantillons caractérisés pour C, N, S, P, K, Ca, Mg, Mn, Ca, et Al (BEF)

⇒ **Par rapport aux sciences de l'énergie :**

⇒ **manquent H et O**

Compléter les données (PCI, H et O)

⇒ **P, K, Ca, Mg, Mn, Na et Al en plus !**

- Ecophysiologie (BEF)

➔ **séchage à 65°C**

- Sciences de l'énergie (LERMAB)  
**103°C**

➔ **séchage à**

➔ **Dévolatilisation de la biomasse entre 65 et 103°C:**

Matrices de conversion

⇒ **Évaporation d'eau résiduelle**

⇒ **Volatilisation de carbone et azote**



Plantations de  
Pins dans les  
Landes

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- **Pouvoir calorifique (PCS) (kJ/kg)**
  - ⇒ *Mesure en bombe calorimétrique sur sec à 103°C selon la norme CEN/TS 14918.*
- **Concentration en Hydrogène [H] (g/kg)**
  - ⇒ *Développement d'un protocole original : Pyrolyse en atmosphère réductrice (1450°C en He) puis détermination de  $^2\text{H}_2$  formé par IRMS (Spectromètre de masse isotopique),*
  - ⇒ *Protocole développé par Claude BRECHET, Ingénieur de recherche sur la plateforme PTEF*
- **Taux de cendres (Tc  $\Leftrightarrow$  A) (g/kg)**
  - ⇒ *Incinération en four à moufle selon la norme NF EN 14775 (Mars 2010) pour Biocombustibles solides*
- **Concentration en Oxygène [O] (calcul) (g.kg)**
  - ⇒ *Convention en sciences de l'énergie :  $[O] = 1 - [C] - [H] - [O] - \text{Cendres}$*





Taillis de Chêne verts

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- Perte de près de 3,14% de la masse entre 65°C et 103°C
- ⇒ Impact sur les concentrations des éléments non volatiles: augmentation

$$[X]_{103} = 1.0314 * [X]_{65}$$

- Volatilisation de Carbone et Azote !
- ⇒ Détermination de formules particulières pour relier les concentrations selon les deux normes.

## 1. Séchage à 65°C

⇒ Mesures de  $[C]_{65}$  et  $[N]_{65}$

## 1. Séchage à 103°C

⇒ Mesures de  $[C]_{103}$  et  $[N]_{103}$

## 1. Régressions linéaires :

$$[C]_{103} = 0.8525 * [C]_{65} + 77.1786$$

$$[N]_{103} = 1.016 * [N]_{65}$$

( $n = 16$ ,  $r^2 = 0,91$  et  $0,99$ )



Plantations  
d'Eucalyptus au  
Congo

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- **Les caractérisations BEF donnent une information qui permet de remonter au taux de cendres mesuré !**

$$Ashes = 1.87 * \sum ([S]_{65}, [P]_{65}, [K]_{65}, [Ca]_{65}, [Mg]_{65}, [Mn]_{65}, [Na]_{65}, [Al]_{65})$$

$(n = 37, r^2 = 0,98)$

**➔ Simplification de la prise en compte des paramètre  
S, P, K, Ca, Mg, Mn, Na et Al**

*D'autres modèles disponibles en fonction des analyses faites (sans Al, sans Na etc...)*



# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- Régressions linéaires sur les données converties (n = 37) : deux modèles retenus

## 1. C seul,

$$HHV = 48.11 * [C]_{103} + - 3413.67$$

(MAE = 0,93 % de HHV moyen)

## 2. CNA avec interactions

$$HHV = 26.34 * [C]_{103} - 872.08 * [N]_{103} - 87.23 * A + 1.82 * [C]_{103} * [N]_{103} + 0.19 * [C]_{103} * A + 6922.14$$

(MAE = 0,65 % de HHV moyen)



Plantation d'hévéa

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- **Comparaisons de performances des modèles sur les différents jeux de données :**
  - « CEA » = 70 échantillons par Capucine Dupont
  - « Littérature » = 85 échantillons compilés de la littérature

| <u>Classements</u> | AIC sur littérature | AIC sur CEA | AIC sur validations | AIC sur tous | AIC sur calibration |
|--------------------|---------------------|-------------|---------------------|--------------|---------------------|
| <u>1</u>           | Sheng               | Sheng       | Sheng               | CNA          | CNA                 |
| <u>2</u>           | Friedl              | Friedl      | Friedl              | Friedl       | C                   |
| <u>3</u>           | Yin                 | Yin         | Yin                 | Sheng        | Friedl              |
| <u>4</u>           | Channiwala          | Channiwala  | Channiwala          | Yin          | Sheng               |
| <u>5</u>           | CNA                 | CNA         | CNA                 | C            | Yin                 |
| <u>6</u>           | Boucher b           | Boucher b   | Boucher b           | Channiwala   | Tillmann a          |
| <u>7</u>           | C                   | C           | C                   | Boucher b    | Boucher b           |
| <u>8</u>           | Boucher c           | Boucher c   | Boucher c           | Boucher c    | Channiwala          |
| <u>9</u>           | Tillman a           | Tillmann a  | Tillmann a          | Tillman a    | Boucher c           |
| <u>10</u>          | Tillman b           | Tillmann b  | Boucher a           | Tillman b    | Tillmann b          |
| <u>11</u>          | Boucher a           | Boucher a   | Tillmann b          | Boucher a    | Boucher a           |



Plantations  
d'Eucalyptus au  
Congo

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

- Traduction du modèle pour application directe sur données BEF ⇔ à la suite des modèles EMERGE :

## 1. C seul,

$$HHV = 41.01 * [C]_{65} + 299.39$$

## 2. CNA avec interactions

$$\begin{aligned} HHV &= 41.01 * [C]_{65} + 299.39 \\ &= 22.45 * [C]_{65} + 2032.88 - 886.03 * [N]_{65} - 87.23 \\ &\quad * A + 1.58 * [C]_{65} * N_{65} + 142.71 * [N]_{65} + 0.16 \\ &\quad * [C]_{65} * A + 14.66 * A + 6922.14 \end{aligned}$$



Plantations  
d'Eucalyptus au  
Congo

# Biogéochimie et Energie, *du peuplement au PCI ?*

## BILAN

**Bases de données et modèles en écophysiologie  
(biomasse - t, minéralomasse - kg)**



**Perspectives énergétique  
(ressource énergétique - kWhc)**