

GESTION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

PROGRAMME GICC 1999 Compte rendu final 1999-2001

Convention Gip-Médias 3/99 – Code Inra 1 133 A

Titre du projet :

Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers. Données pour une validation des paramètres du modèle d'évolution des stocks de carbone.

Coordinateur : C. Nys - Directeur de Recherches - INRA - Centre de Nancy - Equipe Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, 54280 Champenoux, France. Tél. : 03 83 39 40 73 ; Fax. : 03 83 39 40 69 ; E-mail : nys@inra.nancy.fr . Collaboration de L. Gelhaye, S. Didier Serge, C. Hossann.

Partenaires :

D. Arrouays, Directeur de Recherches - INRA - Centre d'Orléans, Unité de Science du Sol, 45160 Ardon, Tél. : 02 38 41 48 02 ; Fax. : 02 38 41 78 69 ; E-mail : arrouays@inra.orsléans.fr

J.L. Dupouey ; Directeur de Recherches - INRA - Centre de Nancy - Equipe Phytoécologie, 54280 Champenoux, France. Tél. : 03 83 39 40 49 ; Fax. : 03 83 39 40 69 ; E-mail : dupouey@inra.nancy.fr

F. Forgeard, Maître de conférence, S. Huet, M. Lebreton - doctorantes - Université de Rennes I - Laboratoire d'Ecologie Végétale - Campus de Beaulieu - 35052 Rennes Cedex. Tél. : 02 99 28 61 50, Fax. : 02 99 28 16 26 ; E-mail : fforgeard@univ-rennes1.fr

F. Le Tacon ; Directeur de Recherches - INRA - Centre de Nancy - Equipe Microbiologie des sols, 54280 Champenoux, France. Tél. : 03 83 39 40 40 ; Fax. : 03 83 39 40 69 ; E-mail : le_tacon@inra.nancy.fr

C. Richter, Ingénieur du GREF - ONF - STIR Nord-Est, Parc de Haye, 54840 Velaine-en-Haye. Tél. : 03 83 23 45 01 ; Fax. : 03 83 23 45 09 ; E-mail : stirne@onf.fr

Mots-clés : Carbone, stock, sol forestier, biomasse forestière, écosystème forestier, sylviculture, modélisation.

1) - Place du projet dans le contexte scientifique général et objectifs initiaux

Analyser et comprendre de façon exhaustive la répartition tridimensionnelle du stock et des flux de carbone du sol sur des échelles géo-politiquement différentes (du peuplement à la nation) est toujours difficilement réalisable. La variabilité spatiale de ce caractère du sol est liée à l'ensemble des facteurs qui ont déterminé sa mise en place au cours du temps. L'analyse statique d'un caractère dans un système intègre souvent l'impact de facteurs évoluant dans le temps. Cet aspect est aujourd'hui particulièrement important, lorsque l'on désire connaître l'impact des activités humaines sur la transformation des milieux.

Le devenir de l'augmentation progressive du CO₂ issu de l'utilisation massive des énergies fossiles et la déforestation est un cas particulièrement préoccupant. Le gaz carbonique (CO₂) comme élément prépondérant de la biosphère intervient dans les processus et les grands équilibres physiques, chimiques et biologiques de la planète à travers l'ensemble du cycle du carbone. Pour la période 1860-1980, les émissions humaines cumulées se sont élevées à 315 Gt CO₂ (Isermann, 1993). Les écosystèmes forestiers pourraient donc être un puits à carbone pour fixer à long terme une partie du carbone de l'atmosphère.

En fait pour le carbone, les écosystèmes forestiers jouent un double rôle : celui de « puits » mais aussi celui de « sources » selon les conditions. Le rôle le plus important d'un écosystème forestier est son potentiel de stockage du carbone lorsque l'assimilation nette du carbone (photosynthèse) par la biomasse dépasse largement l'émission, sous forme de CO₂, issue de la décomposition de la litière. Le stockage dans la biomasse est évalué à 1 Gt. an⁻¹ (James, 1996).

Dans les écosystèmes forestiers deux tiers du carbone organique sont stockés dans les sols (Dixon *et al.*, 1994). Ces stocks dépendent d'un certain nombre de facteurs : conditions climatiques, texture du sol et sa topographie, la composition végétale sont déterminants dans la distribution spatiale du carbone organique (Arrouays et Pelissier, 1994 ; Grigal et Ohmann, 1992).

L'absence d'une base de données exhaustive réunissant toutes les propriétés physico-chimiques du sol et les données climatiques rend difficile la construction d'un modèle des variations spatiales du stock de carbone combinant la nature du sol, ses propriétés, l'espèce forestière et sa sylviculture.

L'évolution des stocks de carbone dans les sols forestiers sous l'action éventuelle d'un changement climatique ne peut être mesurée directement compte tenu de la forte variabilité observée dans l'enquête sur la détermination de ces stocks (Rapports AGRIGES). L'approche par modélisation est abordée par Arrouays et al., Balesdent et al. pour l'ensemble des sols.

Dans ce projet nous avons essayé d'évaluer les impacts de facteurs sylviculturaux sur la variabilité des stocks.

Axe et thème concernés : Thème 2 = Les stratégies de réduction des émissions en France et dans l'Union européenne. Sous thème 2.5. = Changement d'utilisation des terres, forêts et agriculture.

La sylviculture est l'art de conduire le peuplement forestier. Tout changement dans la dynamique de l'aménagement par une modification des pratiques sylviculturales induit des modifications dans l'ensemble de l'écosystème forestier. Une augmentation de productivité des peuplements est un puits de carbone par l'immobilisation dans la biomasse. Est ce une immobilisation du carbone atmosphérique ? Ou bien est ce, pour partie, un transfert du carbone précédemment immobilisé dans les petits bois, la végétation herbacée ou dans le sol ?

Objectif : Déterminer si un changement d'aménagement sylvicole peut avoir des conséquences sur le stockage de carbone du sol et réduire significativement la fonction puits du peuplement. Préparer la validation des paramètres "sylviculture" du modèle d'évolution des réserves carbonées des sols.

Evaluation des gaz à effet de serre			
1 - Emissions de NO ₂ et CH ₄ dues à l'agriculture			
2 – Absorptions ou émissions de CO ₂ liées aux activités de boisement, de reboisement et de déboisement			
21 - BIOMASSE		22 - SOL	
22-1	22-2	22-1	22-2
- Immobilisation	- Flux	- Réserves	- Flux

Tableau : Pôles d'intervention des équipes dans le système forestier

La question de recherche posée est : Les écosystèmes forestiers peuvent-ils stocker plus de carbone ? Quelle sylviculture peut favoriser cette dynamique de stockage ? Les effets du stockage sont-ils durables ?

Les sols forestiers sont des puits de carbone, relativement aux sols agricoles cultivés. Le rapport (Belkacem et al., 1998) sur l'évaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers a montré un effet du type de sol sur le

niveau des stocks de carbone et une variabilité élevée. Celle-ci peut être explicitée par le fait de l'influence de l'âge du peuplement dans la rotation et de la sylviculture conduite par l'aménageur.

Les sols acides peuvent accumuler avec le temps de la matière organique en surface dans un humus évoluant vers le moder ou mor ; les effets secondaires sont alors une réduction du fonctionnement du cycle des éléments minéraux et de celui du carbone (décomposition, minéralisation). Une meilleure fertilité chimique et biologique permet d'inverser ces processus (Nys, 1998).

Lumière, température et eaux sont des facteurs clefs dans le dynamisme biologique de l'activité minéralisatrice de la matière organique donc de l'immobilisation du carbone. L'aménagement forestier par le régime d'aménagement (type de gestion) et des interventions (dynamisme des coupes) est ainsi un facteur déterminant dans la dynamique d'évolution des stocks de carbone.

Modèle carbone : vers un outil d'estimation d'évolution des stocks de carbone sous les contraintes climatiques et humaines :

Arrouays et al. ont été chargé d'une étude pour la Mission Inter-Ministérielle de l'Effet de Serre de la « Construction d'un modèle d'évolution des stocks de carbone organique des sols et évaluation des données disponibles pour sa validation ». Ce modèle doit simuler la dynamique à moyen et long terme du carbone des sols. Il est construit sur le type d'un modèle dynamique « Pro-parte mécaniste ». Les entrées du modèle seront celles du climat, de la nature de la végétation, du type d'usage (définies à chaque pas de temps) et les caractéristiques permanentes des sols. Les sorties seront les réserves de carbone et d'azote du sol à chaque pas de temps, les flux de carbone, l'état de compartiments indicateurs comme la biomasse microbienne du sol.

Parmi les compartiments du modèle, les calculs font intervenir des paramètres de l'usage et du type de peuplement. Dans le modèle initial, ces paramètres ont des valeurs constantes déterminées arbitrairement selon un principe intuitif. Les règles de calcul de ces paramètres ne peuvent être établies que si l'on dispose d'un minimum de données. Ces données n'existent quasiment pas actuellement.

Modéliser la constitution du stock organique :

Le modèle de dynamique du Carbone qui serait appliqué n'a pas la complexité de celui de Jenkinson et Rayner (1977), revu plus récemment par Jenkinson et al., (1992). Il emprunte la simplicité des modèles à deux ou trois compartiments présentés autrefois par Balesdent et Guillet (1982) et récemment repris par Elzein et Balesdent (1995) et Balesdent (1996) et dérivés du modèle CENTURY.

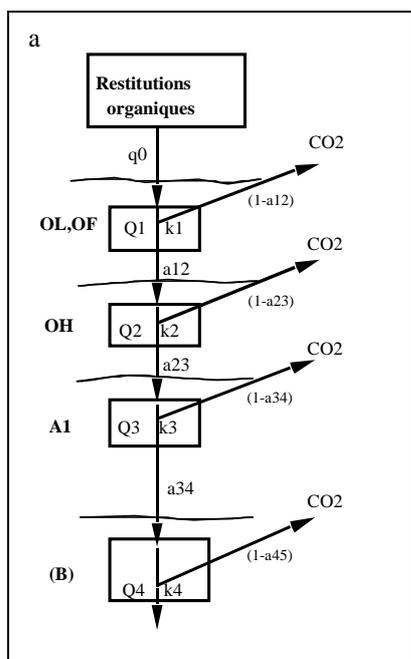
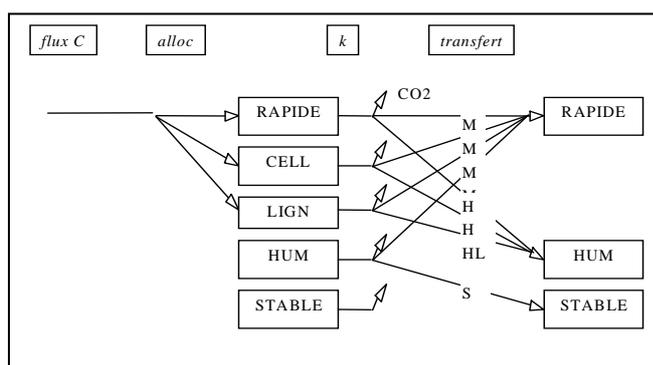


Schéma adaptatif aux sols forestiers du modèle MORGANE pour les sols agricoles (Balesdent et al.)



b - Détail pour un horizon

Figure : (a) Compartiments et flux dans un sol forestier et (b) détail pour un horizon

Equation Générale : elle est du type

$$DC_i/dt = \text{flux}C \cdot \text{alocc}_i - k_i \cdot C_i + \sum_j \text{transfert}_{ij} \cdot k_j \cdot C_j$$

où "k_i" = constante de vitesse de biodégradation du compartiment i.

C'est une fonction de : Humidité du sol ; Température de l'air ; Teneur en argiles du sol ; Type de sol ; Usage du sol (travail du sol, ...) ; Fertilité du sol

Le principe des modèles est développé par les auteurs. Ce n'est pas l'objectif de cette action.

Notre objectif n'était pas de valider ce modèle mais était contractuellement limité à la fourniture de données pour que ces spécialistes de la modélisation puissent faire leur travail de validation et améliorer l'écriture de leurs modèles.

Nous devons apporter des données dans les domaines suivants de la sylviculture :

Effet âge du peuplement Effet amendement/fertilité Effet du traitement sylvicole

Références bibliographiques

- DUPOUEY J.L., 1987. Using artificial intelligence languages for the calculation of inbreeding coefficients. New tools for an old problem. *Computers in Biology and Medicine*, 17, 71-74.
- GITTINS R., AMIR S., DUPOUEY J.L., HEISER W.J., MEYER M., SOKAL R.R., WERGER M.J.A., 1987. Numerical Methods in terrestrial Plant Ecology. In : "Developments in Numerical Ecology", Legendre P., Legendre L. (Eds.), NATO ASI Series, Series G : *Ecological Sciences*, Vol. 14, 529-558.
- THIMONIER A., DUPOUEY J.L., TIMBAL J., 1992. Floristic changes in the herb-layer vegetation of a deciduous forest in the Lorraine Plain under the influence of atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management*, 55, 149-167.
- DUPOUEY J.L., THIMONIER A., MÉNETTE B., 1993. Dynamique de la végétation et pollution atmosphérique, *Annales de Géographie*, 572, 386-396.
- BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., DUPOUEY J.L., PICARD J.F., ULRICH E., 1995. Long-term changes in forest productivity in northeastern France: the dendroecological approach. In : "*Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*", Landmann G., Bonneau M. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 143-156.
- CLUZEAU C., DUPOUEY J.L., COURBAUD B., 1995. Polyhedral representation of crown shape. A geometric tool for growth modelling. *Annales des Sciences forestières*, 4, 297-306.
- THIMONIER A., DUPOUEY J.L., 1995. Floristic changes in the understorey of French forests between 1970 and 1990. Possible role of nitrogen deposition. In : "*Effects of nitrogen deposition on integrated monitoring sites*", Forsius M., Kleemola S. (Eds.), Oslo, 6-7 Mars 1995, Finnish Environment Agency, Helsinki, 153-157.
- GARBAYE J., KABRE A., LE TACON F., MOUSAIN D., PIOUS D., 1979 - Fertilisation minérale et fructification des champignons supérieurs en hêtraie. *Annales des Sciences Forestières*, 36, 2, 151-164.
- BECKER M., LE TACON F., TIMBAL B., 1980 - *Les plateaux calcaires de Lorraine. Type de stations et potentialités forestières*. Publication ENGREF, 14, rue Girardet, 54042 NANCY Cedex, 216p + annexes.
- GARBAYE J., LE TACON F., 1982 - Influence of mineral fertilization and thinning intensity on the fruit body production of epigeous fungi in an artificial spruce stand (*Picea excelsa* Link.) in north eastern France. *Acta Oecologica, Oecologia plantarum*, 3, 17, 2, 153-160.
- BECKER M., LE TACON F., 1985 - Santé de la forêt : importance d'une sylviculture adaptée aux conditions de milieu. *Revue Forestière Française*, XXXVII n° spécial, 7-28.
- TOUTAIN F., DIAGNE A., LE TACON F., (1987) - Effets d'apports d'éléments minéraux sur le fonctionnement d'un écosystème forestier de l'Est de la France. *Rev.Ecol.Biol.Sol*, 24,283-300.
- TOUTAIN F., DIAGNE A., LE TACON F., (1988) - Possibilités de modification du type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. *Revue Forestière Française*, XL, 2, 99-107.
- BECKER M., BONNEAU M. and LE TACON F. (1992). - Long term vegetation changes in an *Abies alba* forest : natural development and response to fertilization. *Journal of Vegetation Science*, 3, 467-474.
- BECKER M., LE TACON F., LEVY G. (1994) - Conjonction des facteurs naturels et des pratiques sylvicoles dans le dysfonctionnement des écosystèmes forestiers. *Revue forestière française*, XLVI, 5, 572-578.
- BONNEAU M., LANDMANN, G., GARBAYE, J., RANGER, J. & NYS, C. (1994) : Gestion et restauration de la fertilité minérale des sols. *Rev. for. fr.*, XLVI, 5 : 579-585. - 16 réf.
- BELKACEM, S. & NYS, C. (1995) : Consequences of liming and gypsum top-dressing on nitrogen and carbon dynamics in acid forest soils with different humus form. *Plant Soil*, 173 : 79-88. - 38 réf.
- RANGER, J. & NYS, C. (1996) : Biomass and nutrient content of extensively and intensively managed coppice stands. *Forestry*, 69, 2 : 91-110. - 24 réf.
- BONNEAU, M., NYS, C., PORTÉ, A., ADRIAN, M. & DIDIER, S. (1997) : Effet de la fertilisation minérale et du drainage sur la croissance de jeunes chênes sur des sols lessivés à pseudogley de la région de Blois (Loir-et Cher). *Rev. for. fr.*, XLIX, 3 : 225-234. - 5 réf.
- BELKACEM, S. & NYS, C. (1997) : Effects of liming and gypsum regimes on chemical characteristics of an acid forest soil and its leachates. *Ann. Sci. for.*, 54 : 169-180. - 35 réf.

BONNEAU, M. & NYS, C. (1997) : Effets des amendements calci-magnésiques en forêt. C. r. Acad. Agric. Fr. Séance du 15 Octobre 1997, 83, 6 : 161-169. - 18 réf.

BAKKER, M. R., NYS, C. & PICARD, J.F. (1998 ?) : The effects of liming and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (M.) Liebl.) stand at La Croix-Scaille (French Ardennes). I. Site characteristics, soil chemistry and aerial biomass. Plant Soil, (accepté)

BAKKER, M. R., KÉRISIT R., VERBIST, K. & NYS, C. (1998) : Effects of liming on growth of fine roots and seedlings of Sessile Oak (*Quercus petraea*) in relation to lime-induced changes in rhizosphere chemistry. Colloque IUFRO "Les Racines principales, structure et fonctionnement" (20-24 juillet 1998 ; Bordeaux, France). Plant Soil, (sous presse)

PICARD, J.F., BECKER, M., NYS, C. & DUPOUEY, J.L. (1998 ?) : Evolution à moyen terme de la croissance radiale de l'Epicéa et du Hêtre en relation avec la fertilisation. Rev. for. fr., (soumis)

BAKKER, M. R., GARBAYE, J. & NYS, C. (1998 ?) : Effect of lime on ectomycorrhizal composition on fine roots of oaks (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). For. Ecol. Manage., (soumis)

NYS, C., PICARD, J.F., DELEPORTE, S. & JABIOL, B. (1997) : Modifications of a beech ecosystem after 25 years of liming and fertilization. Indicators of sustainable forest management. IEA- Bioenergy task XII Activity 4.2 Environmental issues. 1997 Conference. Eddleston (Scotland) 20-25 September 1997. (Communication orale & poster)

NYS, C. (1997) : Age effect on beech ecosystem function: a case-study. Indicators of sustainable forest management. IEA- Bioenergy task XII Activity 4.2 Environmental issues. 1997 Conference. Eddleston (Scotland) 20-25 September 1997. (Communication orale & poster)

RANGER, J., GELHAYE, D., NYS, C., BOUCHON, J., GAVALAND, A., GAUVIN, J. & BONDUELLE, P. (1997) : Production de matière ligno-cellulosique et maintien de la fertilité des sols. Communication aux 1^{ères} journées scientifiques du bois : Optimisation de la ressource du produit et des procédés pour l'utilisation du bois, organisé par le Comité de gestion du projet Fédérateur État-Région Lorraine "Forêt-Bois" 10, 11 et 12 Septembre 1997, ENSTIB - Epinal, (France). (Communication orale)

NYS, C., DUPOUEY, J.L., ULRICH, E., BADEAU, V., JAMES, L., DIDIER, S. & GELHAYE L. (1997) : Stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers, Journée technique - INRA - Centre de Nancy

NYS, C., DUPOUEY, J.L. & BALESSENT, J. (1995) Cycle du carbone dans l'écosystème forestier : impact du milieu et de la sylviculture sur les immobilisations et les flux. In Perrier A coord., Agriculture et gaz à effet de serre. Dossiers de l'Environnement de l'INRA Paris N°10. 49-55.

JAMES, I. (1995) : Variation du taux de carbone dans le peuplement, le sol et les solutions. Impact sur le cycle du carbone dans l'écosystème forestier. DEA "Ecologie générale et Production végétale" option Ecologie fonctionnelle. Univ. Paris XI Orsay. 31p + annexes.

JAMES, I. (1996) : Variation du taux de carbone dans les peuplements forestiers. Diplôme de Recherche Doctorale : Sciences techniques et biologie. Univ. Henri Poincaré-Nancy I : 30 p. + annexes.

BAKKER, M. R. (1998) : Effets des amendements calcaïques sur les racines de chênes (*Quercus petraea* et *robur*) : conséquences des changements dans la rhizosphère. Thèse de doctorat : Université Henri Poincaré-Nancy I. 291 p. + annexes.

NYS C., BONNEAU M. (1998) : Evolution de la fertilité des sols forestiers. Rapport scientifique final, DG VI. 30 p., annexes 200p.

NYS C., (1998) : Correction immédiate et sur le moyen terme de l'acidification des sols forestiers. Compte rendu final, DG VI, 24p, annexes 300p.

NYS C., (1998) : Etude des facteurs écologiques et sylvicoles du fonctionnement de l'écosystème Hêtraie de basse altitude. Gestion durable de la fertilité de l'écosystème hêtraie acidiphile de basse altitude. Rapport final, 60p.

NYS, C. (Ed.) (1994) : Forêt et amendements calcaires. In : Réunion "Amendements calcaires". Journée d'information et de discussion du 26 janvier 1993 sur l'état des travaux et des connaissances dans le domaine de l'application des amendements calcaire. Ses conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème forestier. INRA Centre de Recherches forestières de Champenoux. Nancy. : 156 p.

BONNEAU, M., LANDMANN, G., RANGER, J., DREYER, E. & NYS, C. (1995) : Fertilization of declining conifers in the Vosges and the Ardennes: effects on soil, nutrient cycling, and tree health, growth and physiology. ch. 3.7. : 300-328. - 37 réf. In : G. Landmann, M. Bonneau (Eds) 1995. Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Springer : 461 p.

A] - Effet de l'âge du peuplement sur les variations des stocks de carbone

A] - 1 - Objectif : *Evaluer les modifications des réserves de carbone dans différents compartiments de l'écosystème forestiers et les flux principaux de carbone entre ces compartiments. Estimer l'impact de l'âge du peuplement sur ces stocks et flux.*

Au cours de la rotation du peuplement, du semis ou plant à l'arbre adulte, l'arbre fixe du carbone qui est immobilisé (fonction de puits). Une partie de ce carbone retourne au sol par la chute des litières. Au cours de la décomposition de cette litière du CO₂ est émis et libéré dans l'atmosphère. Une autre partie est transformée en composés organiques immobilisés dans les couches de l'humus ou transférés dans le sol où ils peuvent être immobilisés ou déplacés dans les solutions du sol.

Cette approche ne peut se faire qu'à l'échelle de l'écosystème.

A] - 2 - Matériel et méthode :

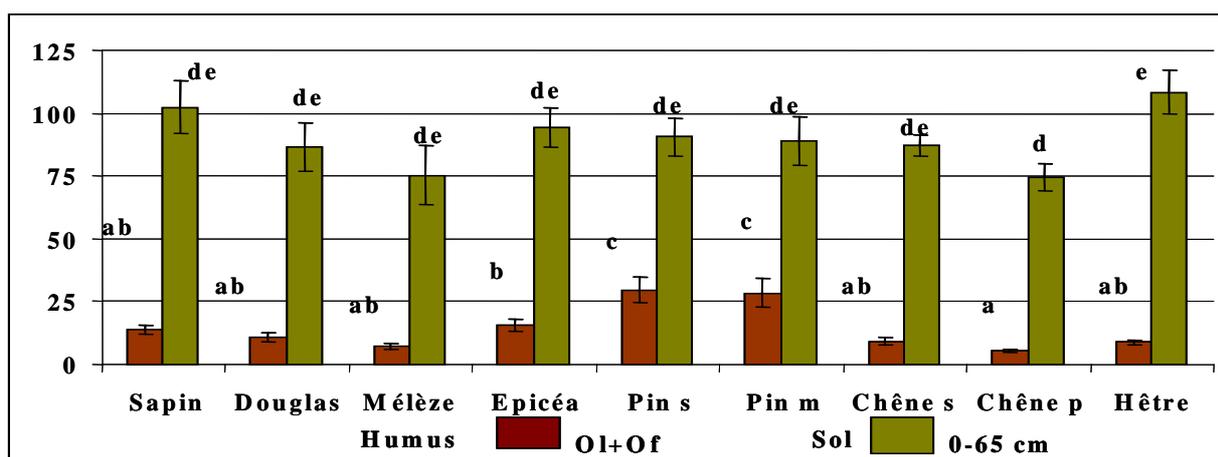
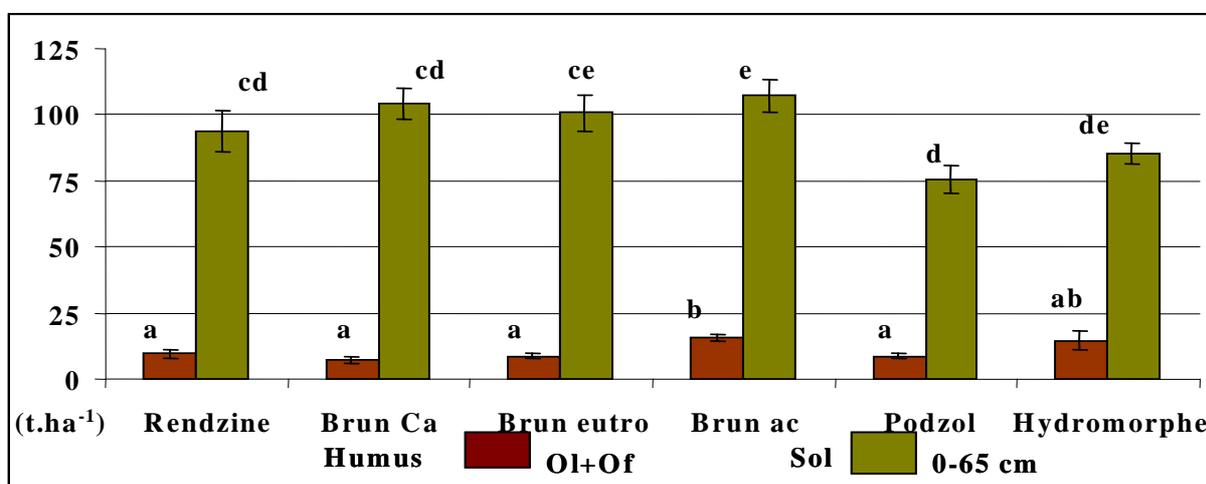
La méthodologie reste celle classique des bilans dans les écosystèmes forestiers. Chacun des compartiments et des flux est mesuré et le carbone, comme tout autre élément, est analysé selon les méthodes spécifiques au

compartiment considéré (Analyse au CHN pour la phase solide ; analyse des solutions par dosage infra rouge du CO₂ libéré par combustion dans un four haute température -COT). Le nombre des échantillons et analyses est très important. Les résultats impliqués dans ce travail représentent plusieurs milliers d'échantillons. Cela n'a été possible que grâce à l'infrastructure des sites ateliers (GIP ECOFOR) et des dispositifs expérimentaux de l'INRA - FMN. L'aide financière du GICC n'est qu'une fraction petite (5% environ) des coûts réelles des mesures mises en œuvre dans ces observatoires forestiers.

A] -3 - Evaluation des stocks

A] -3.1 - Variations des stocks dans les sols et selon l'espèce : Ceci est un rappel d'AGRIGES. Il faut être conscient que la mesure de l'effet de l'âge ne peut être réalisée que sur quelques rares sites ateliers compte tenu de l'ampleur des mesures. Il faut donc se remettre en mémoire la forte variation liée d'une part au type de sol et d'autre part à l'espèce forestière sur ce type de sol. Les deux figures ci-dessous fixeront l'ordre de grandeur de cette variabilité.

Les réserves dans les couches organiques (Ol, Of, Oh) et les couches minérales (65cm) des sols forestiers varient en fonction du type de sol.



Couche minérale : La réserve totale moyenne est d'environ 90 tonnes par hectare. La variabilité est élevée du fait de l'hétérogénéité spatiale des peuplements. Les coefficients de variation ont une valeur moyenne de 50 [de 30 pour les sols bruns acides à plus de 75 pour les sols saturés]. Les couches organiques représentent environ 20 % des réserves.

L'effet de l'espèce (souvent l'action d'une seule rotation pour les espèces de reboisement Douglas, Mélèze, Epicéa) se caractérise par un faible impact sur les couches minérales (0 à 65 cm). S'il y a effet, il est limité aux premiers horizons organo-minéraux (0 – 20 cm)

		TYPES DE SOLS												
		Rendosol et Calcosol		Calcisol		Brunisol		Alocrisol		Podzosol		Luvisol		
		Couches→	Ol-Oh	0-65 cm	Ol-Oh	0-65 cm	Ol-Oh	0-65 cm	Ol-Oh	0-65 cm	Ol-Oh	0-65 cm	Ol-Oh	0-65 cm
ESSENCES FORESTIERES	Epicéa commun	Moyennes →±	7.4 <i>6.0</i>	87.0 <i>43.5</i>	15.7 <i>21.3</i>	130.3 <i>60.4</i>	18.7 <i>16.4</i>	117.7 <i>66.5</i>	18.6 <i>7.4</i>	100.8 <i>24.6</i>	8.5 <i>18.6</i>	108.1 <i>11.5</i>	6.3 <i>3.5</i>	91.8 <i>7.4</i>
	Sapin pectiné	Moyennes →±	9.6 <i>13.2</i>	80.6 <i>142.6</i>	18.7 <i>48.8</i>	131.5 <i>23.2</i>	12.6 <i>13.8</i>	152.2 <i>209.1</i>	15.0 <i>4.6</i>	109.3 <i>26.8</i>	4.2 <i>-</i>	130.7 <i>16.2</i>	4.9 <i>30.2</i>	114.9 <i>12.7</i>
	DOUGLAS	Moyennes →±→	- <i>-</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	18.3 <i>25.9</i>	81.3 <i>78.7</i>	9.7 <i>3.6</i>	129.5 <i>35.5</i>	21.5 <i>243.3</i>	150.9 <i>27.8</i>	4.1 <i>2.9</i>	80.8 <i>4.6</i>
	Mélèze	Moyennes →±→	10.1 <i>101.1</i>	109.0 <i>369.9</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	7.5 <i>20.9</i>	121.9 <i>166.9</i>	6.9 <i>2.7</i>	79.0 <i>65.2</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>
	Pin maritime	Moyennes →±→	70.7 <i>62.8</i>	30.8 <i>13.6</i>	- <i>-</i>	- <i>-</i>	12.8 <i>8.6</i>	90.6 <i>67.7</i>	33.5 <i>20.6</i>	102.1 <i>47.6</i>	8.0 <i>1.8</i>	74.0 <i>6.0</i>	51.6 <i>-</i>	65.4 <i>5.7</i>
	Pin sylvestre	Moyennes →±→	10.2 <i>6.1</i>	90.3 <i>38.3</i>	7.9 <i>52.8</i>	44.3 <i>-</i>	18.1 <i>18.7</i>	98.6 <i>75.9</i>	32.6 <i>14.3</i>	90.6 <i>78.6</i>	31.8 <i>29.3</i>	113.7 <i>20.5</i>	53.6 <i>61.9</i>	90.9 <i>9.0</i>
	Chêne pédonculé	Moyennes →±→	4.6 <i>2.8</i>	93.9 <i>252.5</i>	4.1 <i>3.1</i>	85.2 <i>33.7</i>	4.2 <i>0.9</i>	95.6 <i>37.1</i>	6.7 <i>2.3</i>	68.6 <i>29.9</i>	4.1 <i>2.7</i>	89.7 <i>54.0</i>	5.5 <i>2.7</i>	75.3 <i>3.8</i>
	Chêne sessile	Moyennes →±→	3.8 <i>4.6</i>	51.8 <i>13.5</i>	2.0 <i>0.8</i>	112.1 <i>14.2</i>	3.9 <i>0.8</i>	97.4 <i>26.8</i>	11.4 <i>6.9</i>	100.0 <i>31.0</i>	7.8 <i>3.5</i>	82.2 <i>4.5</i>	19.4 <i>9.4</i>	71.5 <i>3.0</i>
	Hêtre	Moyennes →±→	8.1 <i>4.2</i>	120.1 <i>39.6</i>	7.8 <i>4.3</i>	106.3 <i>19.6</i>	9.3 <i>5.3</i>	95.9 <i>31.4</i>	10.8 <i>3.6</i>	120.1 <i>48.5</i>	8.3 <i>4.8</i>	120.7 <i>22.0</i>	4.9 <i>3.9</i>	76.2 <i>6.4</i>

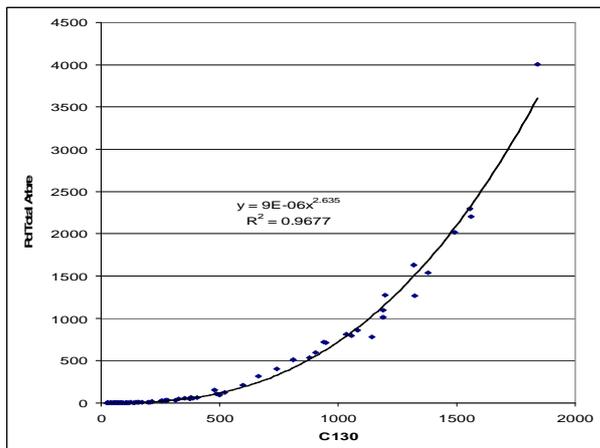
Tableau : Stocks de carbone ($t \cdot ha^{-1}$) des couches Ol+Oh et 0-65 cm des sols sous différentes essences forestières et par type de sol (les chiffres en italiques représentent l'intervalle de confiance de risque de 5 %)

Le tableau ci-dessus résume les valeurs des stocks de carbone pour les principales espèces forestières françaises en fonction des types de sol, et cela pour une profondeur retenue de 65 cm.

L'impact sur l'immobilisation dans les couches organiques est hautement significatif. Ceci est lié à la qualité intrinsèque des retombées de litières. Elle est d'environ 5 t/ha pour les Chênes et de 30 t/ha pour les Pins.

A] -3.2 - Variations des biomasses : un exemple de biomasse aérienne, la hêtraie de Fougères.

Dans la chronoséquence de Fougères, les biomasses compartimentées (Tronc, branches, feuilles ou bourgeons et pour des découpes 1, 4 et 7 cm) ont été évaluées. Des peuplements de 3, 8, 12, 25, 30, 81 et 145 ans ont été échantillonnés, de 6 à 16 arbres par peuplement. Matière sèche, carbone et nutriments ont été analysés. Les tarifs, modèles de type régression, sont en cours de calcul. Ces tarifs seront appliqués aux inventaires périodiques afin d'estimer le stock par compartiment et l'évolution de ce stock entre les compartiments. Le choix de la compartimentation permettra de simuler les évolutions selon différents scénarii de sylviculture. C'est ce qui est prévu dans le cadre de Carboflux.



La figure ci contre représente la liaison entre le C130 de l'arbre et la masse totale de matière sèche de l'arbre, sans les feuilles. L'ensemble des arbres de la chronoséquence est représenté. Le modèle général appliqué est une fonction puissance, son R² est élevé :

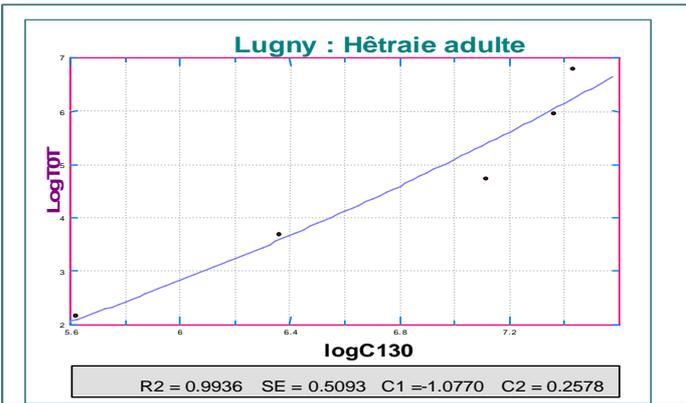
Masse de l'arbre = 9E-06*(C130)^{2.635} [R2 = 0.97]

Pour l'ensemble des compartiments (physiologiques ou commerciaux), des tarifs seront calculés et pourront être ensuite utilisés dans une modélisation plus générale.

A] -3.3 - Variations des biomasses : Un exemple de biomasse racinaire.

A] -3.3.1 - la souche de l'arbre : La masse et la répartition par catégorie des racines sont dépendantes de l'arbre. Il est possible d'établir des relations entre indice dendrométrique (ex. : C₁₃₀) et matière sèche des racines. L'application de ces tarifs (modèles) permet l'évaluation à l'échelle peuplement après inventaires des arbres. Un exemple est donné pour le site RENECOFOR de Lugny (21).

ARBRE	C130 (mm)	Poids sec (kg) Rac. Diam >7	Poids sec (kg) Rac. 4 à 7cm	Poids sec (kg) rac 1 à 4 cm	Poids sec (kg) rac < à 1 cm	Poids sec (kg) total racine
LUGNY-2	1230	46.9	22.7	36.3	6.8	112.7
LUGNY-4	275	5.5	1.6	0.9	0.6	8.6
LUGNY-6	1571	272.0	25.5	79.6	8.1	385.2
LUGNY-8	578	31.6	1.2	5.7	1.7	40.2
LUGNY-10	1682	511.8	115.9	184.8	70.7	883.2

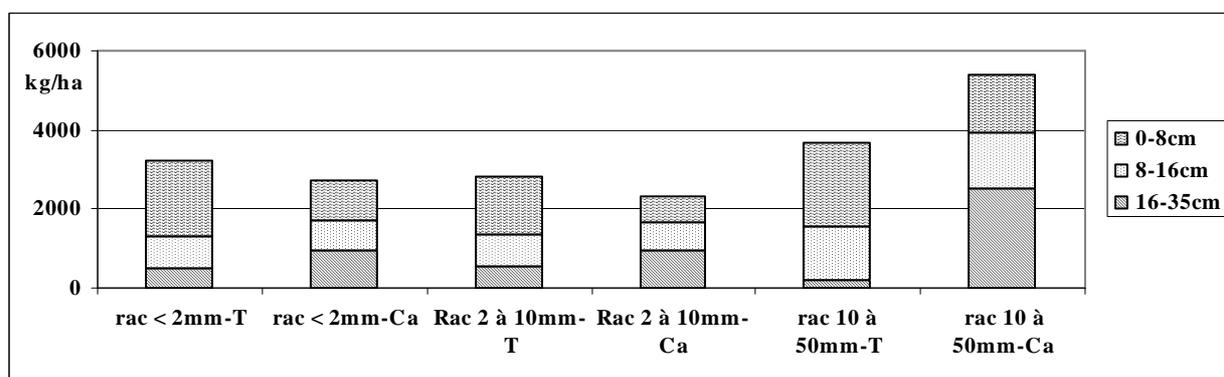


La relation entre la mesure du C₁₃₀, après transformation en logarithme, est bonne avec un R² de 0.99. L'application de l'inventaire donnera une estimation des racines dans le volume des souches (3 à 5m de rayon). Une estimation des racines "entre les arbres" est en cours par échantillonnage sur mini fosses.

A] -3.3.2 - les racines dans le sol : un exemple de biomasse racinaire dans l'espace inter-arbre

Dans les peuplements de 90 ans (Fou-30) et fertilisé (Fou V) une évaluation du système racinaire a été faite sur un prélèvement systématique (maille 4*4m) de mini fosse de 75*35cm. Les racines ont été prélevées pour les couches 0-8cm, 8-16cm et 16-35cm et triées par catégories. Le sol rhizosphérique a aussi été prélevé pour son aspect qualitatif (chimie, minéralisation de l'azote).

La figure ci-dessus illustre la répartition des racines par catégories. L'impact de l'amendement/fertilisation se traduit par une répartition différente dans la taille des racines (plus grosses pour le Ca) et dans la localisation (plus en profondeur pour le Ca). Ceci traduit une amélioration du système racinaire avec le niveau de fertilité.

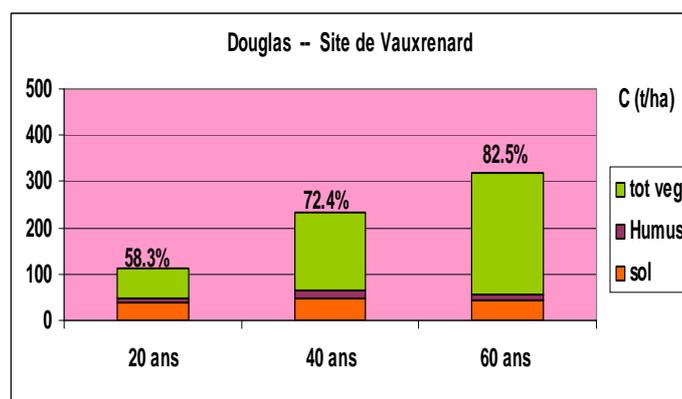
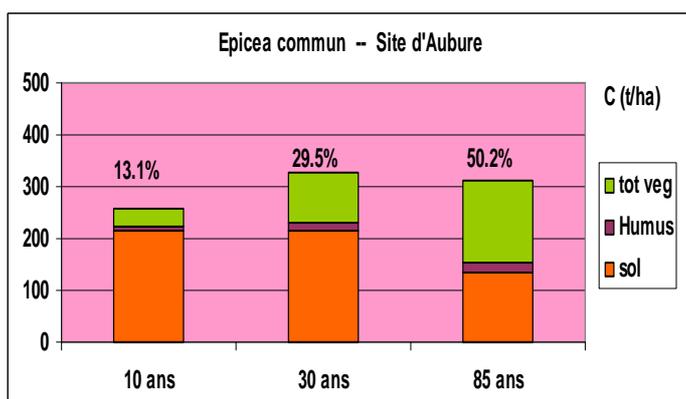


Cette opération d'évaluation a été renouvelée sur les 4 peuplements de la chronoséquence en mai 2001. Les échantillons récoltés sont en cours de traitement, soit 800 échantillons de sol et 360 de racines et sol rhizosphérique. Cet échantillonnage doit permettre de mieux connaître la variabilité à l'échelle décimétrique et à celle de la parcelle. Cette action a été menée en collaboration avec D. Epron (Université de Franche-Comté) pour des mesures de dégagement de CO₂ du sol (respiration racinaire, minéralisation).

A] -3.3.3 - les réserves dans l'écosystème : la chronoséquence, un outil de mesure de l'évolution des stocks avec l'âge.

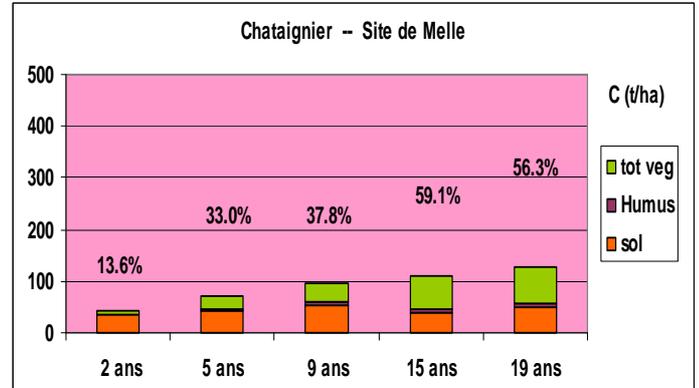
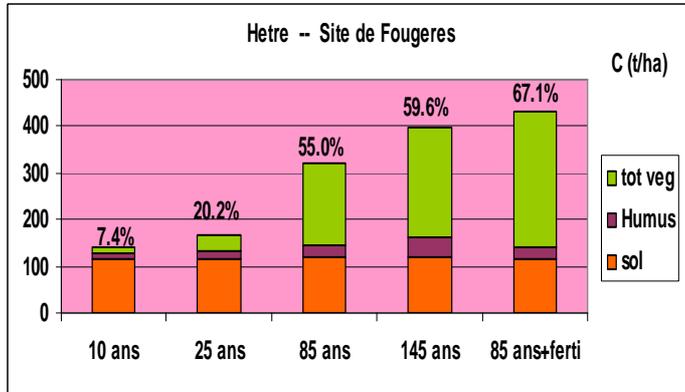
Les exemples de chronoséquences montrent qu'il n'y a pas de loi générale d'évolution des réserves de carbone du sol.

A Aubure, pour l'épicéa commun, le maximum se situe au début de la rotation, il est élevé (ancien pâturage) ; A Vauxrenard, pour le Douglas, le niveau reste constant mais il est faible (ancienne culture)



A Fougères, pour du hêtre, le stock est constant dans le sol mais augmente avec l'âge dans l'humus ; le niveau est moyen (ancienne forêt)

A Melle, pour du châtaignier, le niveau est constant et bas (ancienne culture)



Les études doivent être conduites au niveau de l'écosystème ; en considérant les sols, les peuplements et les échanges entre ces compartiments.

La chronoséquence permet de suivre l'évolution des réserves dans les différents compartiments du système en fonction du stade de développement du peuplement et de la sylviculture menée.

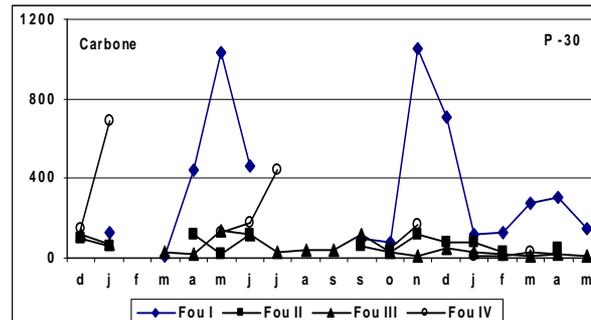
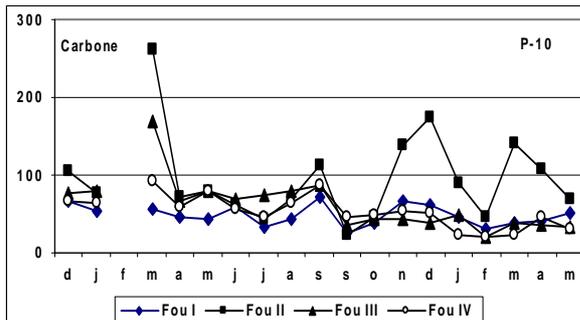
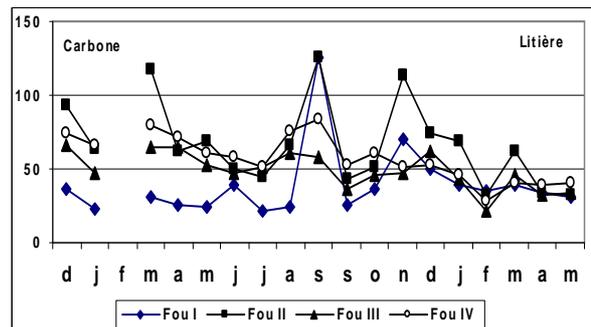
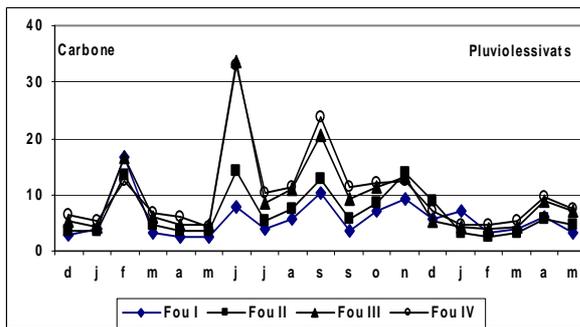
Cet outil de mesure (ou de récolte de données) permettra d'avancer dans la paramétrisation des modèles. Actuellement, ces données peuvent alimenter les "Modèles Sol" ou les "Modèles de croissance". Un large pas reste à faire pour intégrer les données à l'échelle de l'écosystème, zone de transfert "interne", continuum avec l'atmosphère.

A] - 4 - Evaluation des flux

A] - 4.1 - Les flux de carbone dans les solutions du sol

Les systèmes lysimétriques mis en place dans les sites ateliers permettent de mesurer les flux de carbone dans le sol et leur variation en fonction de la sylviculture et de l'âge (12, 25, 85 et 145 ans).

L'exemple donné ici est celui du site atelier "Hêtraie de plaine" de Fougères (35)



Les courbes montrent une forte variabilité saisonnière et des flux différents en fonction du niveau concerné : de faibles apports par les pluies incidentes, puis une augmentation depuis le niveau de la litière jusque vers -30cm de profondeur. Ceci est lié au type de pédogénèse.

L'effet âge est assez net, avec une augmentation des flux avec le vieillissement du peuplement dans le site de Fougères, Hêtre de plaine. Il y a une bonne liaison avec l'évolution du type d'humus, du mull au moder.

L'aspect quantitatif doit encore être développé. Il nécessite le développement d'un modèle hydrique, et fait l'objet d'un sujet de thèse.

A J - 4.2 - Les flux de carbone par les retombées de litière

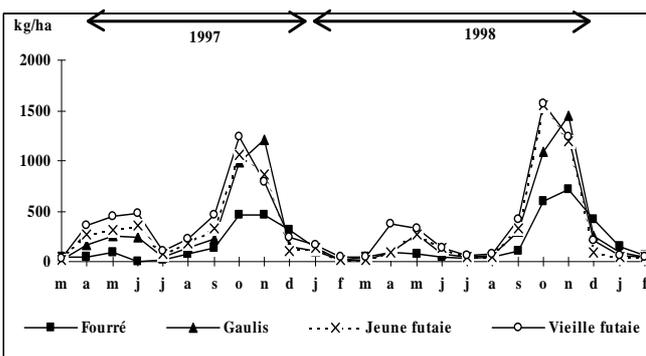
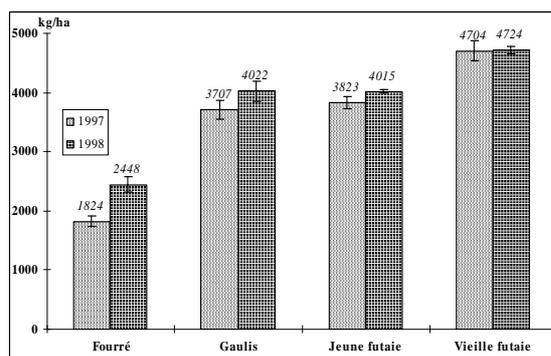
La qualité et la quantité de chute de litières sont reliées à la production primaire, plus les sols sont riches, plus la production de litière est importante. Les données sur la chute des litières sont nécessaires à l'établissement des flux, mais elles sont souvent limitées aux parties chlorophylliennes. Les autres compartiments, qui sont présents en quantité moindre, ont aussi leur importance car ils peuvent être à l'origine de la variabilité de composition chimique des litières, un facteur essentiel de l'activité biologique des sols, en particulier l'apport de carbone, source d'énergie.

Des changements de la composition floristique, ainsi que de la structure du peuplement sont observables facilement au cours de la révolution forestière. L'objectif de notre étude est de quantifier les retours en fonction de l'âge du peuplement. D'autres aspects de la chute des litières seront précisés : le niveau de variabilité spatiale des différents compartiments de la litière et des parcelles étudiées, la variabilité inter-annuelle, les décalages phénologiques entre les parcelles.

A J - 4.2.1 - Méthodes : Les quatre parcelles sont équipées de bacs à litière (surface de 0.5 m²) disposés de façon régulière. Dans la plus jeune parcelle, du fait de la densité des arbres, 41 bacs de 30 cm x 47 cm et de 15 cm de profondeur ont été placés à même le sol. Les litières sont récoltées mensuellement. Les données présentées sont les récoltes du 1^{er} avril 1997 au 1^{er} mars 1999, soit deux cycles de végétation.

Le tri est réalisé sur les échantillons secs. Une trentaine de catégories différentes ont été séparées regroupées en 3 catégories :

- i)- Les parties végétatives : les feuilles, le bois et les écaillures de bourgeons.
- ii)- Les parties reproductrices : les fleurs mâles du hêtre, les châtons du chêne, les faînes et cupules, les glands et leurs cupules, les mûres et les châtaignes.
- iii)- La catégorie divers : espèces épiphytes des troncs des arbres. L'espèce muscinale dominante est *Hypnum cupressiforme* var. *filiforme*. Les espèces lichéniques les plus représentées sont du genre *Parmelia*. Les herbacées sont les feuilles de lierre (*Hedera helix*) dans les futaies et la fougère-aigle (*Pteridium aquilinum*) et les ronces (*Rubus fruticosus*) dans le fourré.



a : Production de litière en 1997 et 1998 dans les 4 parcelles (kg/ha ± se).

b : Suivi de la production mensuelle de litière sur deux ans dans les 4 parcelles de la chronoséquence.

A J - 4.2.2 - Résultats : Les retombées les plus importantes sont dans la vieille futaie de 147 ans (fig.a). La production de litière est en moyenne sur les deux années de 4.7 t/ha/an. Le peuplement le plus jeune, 10 ans, a la plus faible production de litière : 2.1 t/ha/an. Le gaulis, 27 ans, et la jeune futaie, 83 ans, ont des retombées intermédiaires et ne sont pas significativement différentes : 3.85 t/ha/an ; 3.9 t/ha/an respectivement. Les retombées totales de litières augmentent donc au cours de la révolution forestière.

Le suivi mensuel des retours (fig. b) montre que globalement les quatre parcelles ont la même évolution saisonnière. Pour l'ensemble des parcelles, la production est plus importante en 1998 avec toutefois une différence qui s'amenuise avec l'âge de la parcelle.

Les feuilles de hêtre sont le constituant majeur des litières, 60-70 % des retombées pour les futaies et le gaulis et un peu plus de 50 % pour le fourré. La production augmente en 1998 de 0.98 t/ha à 1.34 t/ha soit une augmentation de 37 % pour le fourré, (environ 12 % pour les autres peuplements). La chute de bois est surtout importante dans le gaulis et la vieille futaie où elle atteint un pourcentage supérieur à 15 %. Les retombées de bois représentent 12 à 13 % des retombées totales de la jeune futaie et 8-9 % dans le stade fourré. Il existe une corrélation positive significativement entre le nombre de jours par mois où la force des vents est supérieure à 50 km/h et les retombées mensuelles de bois.

La variabilité totale intra peuplement, établie à l'aide du coefficient de variation, fluctue selon les âges de 10 % dans la jeune futaie à 33 % dans le fourré.

A] - 4.2.2 - conclusion : Les litières présentent différents niveaux d'hétérogénéité quantitative et spatiale sous l'effet de la biologie des espèces, du fonctionnement de l'écosystème et de la gestion humaine. Les variations observées dans les quantités des retombées de litière au cours de la chronoséquence affecte les processus pédogénétiques. La connaissance de la qualité des retours sera déterminante pour comprendre les processus de décomposition et d'humification avec des effets conséquents sur la disponibilité des nutriments, et cette disponibilité conditionne la croissance des arbres et la végétation du sous bois en étroites interactions eux-mêmes sous le contrôle des phénomènes climatiques. La suite de ce travail présentera les résultats qualitatifs et quantitatifs des retours des éléments minéraux, un flux important dans l'établissement du bilan de fertilité tout au long de la rotation forestière.

A] - 4.3 - Les flux de carbone dans la végétation de sous étage

La décomposition de la litière (masse végétale morte encore peu transformée) représente un flux de matières organique et minérale : carbone, azote, éléments minéraux, de la biomasse vers le sol. Cette partie consiste à suivre l'évolution de la décomposition de différents matériaux végétaux représentatifs de la végétation de sous-bois des différents peuplements.

A] - 4.3.1 - Matériel et méthodes : Les matériaux végétaux étudiés sont : feuilles de hêtre, écailles de bourgeon de hêtre, feuilles de lierre, feuilles de houx, une mousse : *Rhytidiadelphus triquetrus*, limbe de fougère aigle, pétiole de fougère aigle, feuilles de ronce, partie aérienne de la houlque molle, partie aérienne de la canche flexueuse, partie aérienne de l'agrostide vulgaire.

Le matériel végétal est prélevé soit mort soit vivant, et mis à sécher à l'air libre. Une quantité connue de matériel sec est mis dans des sacs à décomposition : sac en nylon de maille 2mm et de dimension 20cm x 14cm. Le matériel ainsi préparé est mis à décomposer dans le peuplement où il a été prélevé et dans une zone où il est naturellement présent. La durée du suivi et la fréquence des prélèvements est fonction du matériel végétal. A chaque date de prélèvement, 10 sacs sont prélevés et mis à sécher à l'air libre. Le matériel végétal est ensuite nettoyé, pesé et analysé chimiquement. Les mesures effectuées sont : poids sec, teneur en carbone, teneur en azote, teneur en différents minéraux. Des analyses chimiques supplémentaires sont envisagées.

Espèce végétale	Matériel végétal	Peuplements expérimentaux			Durée du suivi	Fréquence des prélèvements	Nombre de répétitions	Poids sec par sac
		Fourré (Bosquet)	Gaulis	Vieille futaie				
<i>Fagus sylvatica</i> (Hêtre)	Feuilles		x	x	24 mois	3 mois	10	5 g
<i>Fagus sylvatica</i> (Hêtre)	Écailles de bourgeon			x	24 mois	3 mois	10	1 g
<i>Hedera helix</i> (Lierre)	Feuilles		x	x	24 mois	3 mois	10	3 g
<i>Ilex aquifolium</i> (Houx)	Feuilles			x	24 mois	3 mois	10	3 g
<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> (une mousse)	Ensemble			x	24 mois	3 mois	10	5 g
<i>Pteridium aquilinum</i> (Fougère aigle)	Fronde	x		x	13 mois	1 mois	10	5 g

<i>Pteridium aquilinum</i> (Fougère aigle)	Rachis	x		x	13 mois	1 mois	10	5 g
<i>Rubus fruticosus</i> (Ronce)	Feuilles	x		x	13 mois	1 mois	10	5 g
<i>Agrostis capillaris</i> (Agrostide vulgaire)	Partie aérienne			x	13 mois	1 mois	10	5 g
<i>Deschampsia flexuosa</i> (Canche flexueuse)	Partie aérienne			x	13 mois	1 mois	10	4 g
<i>Holcus mollis</i> (Houlque molle)	Partie aérienne		x	x	10 mois	15 jours / 3 mois puis 1 mois	10	3 g

A] - 4.3.2 - Résultats : Seuls les premiers résultats pondéraux sont disponibles actuellement.

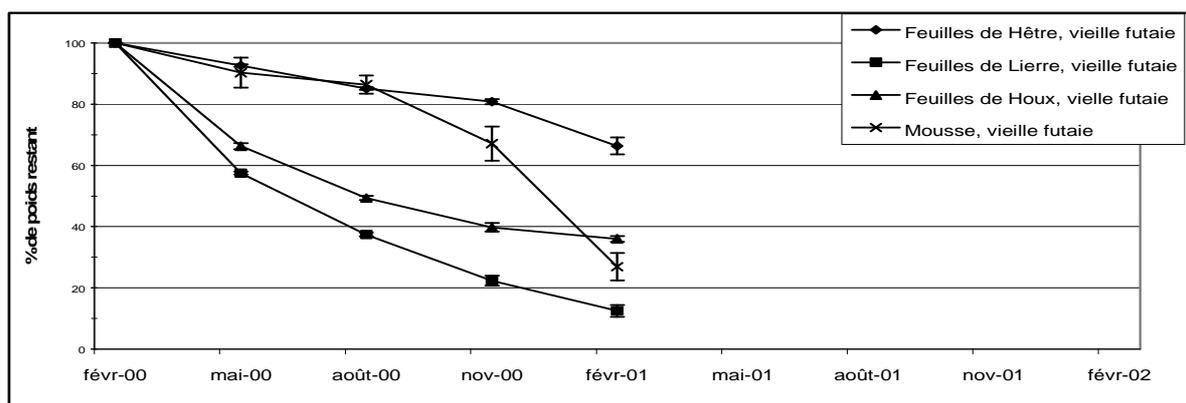


Figure : Suivi de la décomposition en % de poids restant des feuilles de hêtre, de hou, de lierre et de la mousse en vieille futaie

Parmi les espèces ligneuses étudiées à long terme, les feuilles de lierre et de houx présentent une décomposition rapide par rapport aux feuilles de hêtre dans le gaulis et en vieille futaie. A six mois de décomposition, ces premiers matériaux ont perdu au moins 50% de leur poids initial. En revanche, à douze mois, la perte de poids des feuilles de hêtre en vieille futaie et dans le gaulis est respectivement de 65% et 55%.

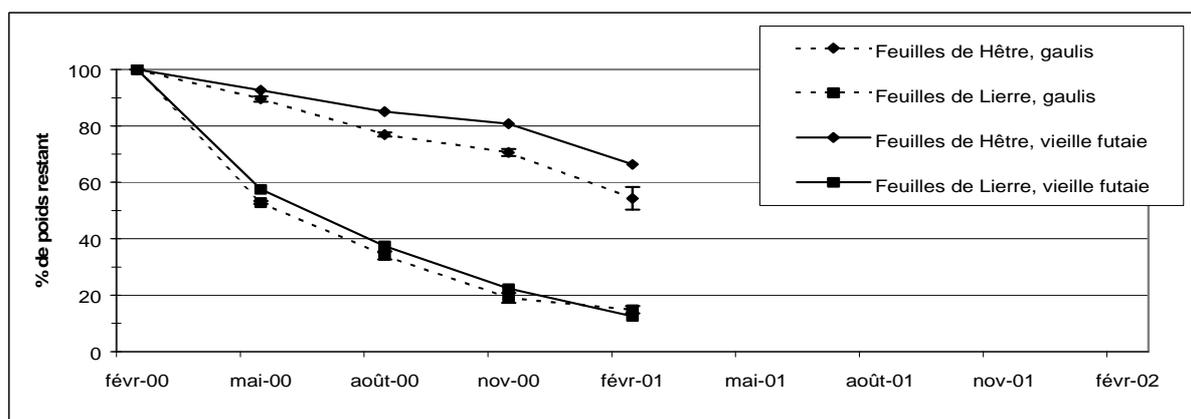


Figure : Suivi de la décomposition en % de poids restant des feuilles de hêtre, de lierre dans le gaulis et en vieille futaie

A trois mois de décomposition en vieille futaie, la perte de poids est hétérogène selon le type de matériel végétal. Les feuilles de hêtre et la mousse ont perdu moins de 20% de leur poids initial. Les feuilles de ronce et la partie aérienne de la canche flexueuse ont perdu plus de 50% de leur poids initial.

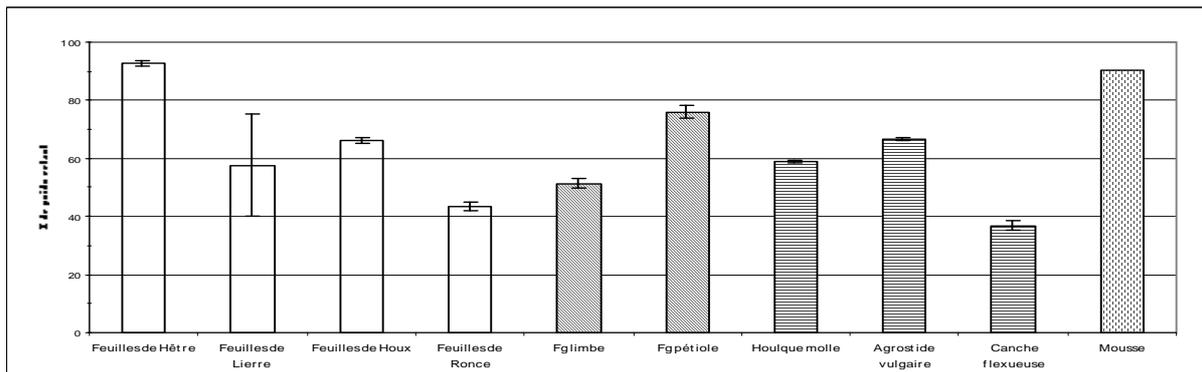


Figure : % de poids restant à trois mois de décomposition pour l'ensemble des matériaux végétaux étudiés en vieille futaie

L'évolution de la perte de poids des feuilles de lierre est peu différente selon si l'espèce se décompose dans le gaulis ou en vieille futaie. La même tendance est observée pour les feuilles de ronce et les pétioles de fougère aigle dans le bosquet et la vieille futaie. En revanche, les feuilles de hêtre semblent se décomposer plus rapidement dans le gaulis qu'en vieille futaie. Le limbe de fougère aigle se décompose plus vite en vieille futaie que dans le bosquet. A noter que le limbe de fougère aigle prélevé dans le fourré présentait une texture sèche tandis que celui en vieille futaie était souple.

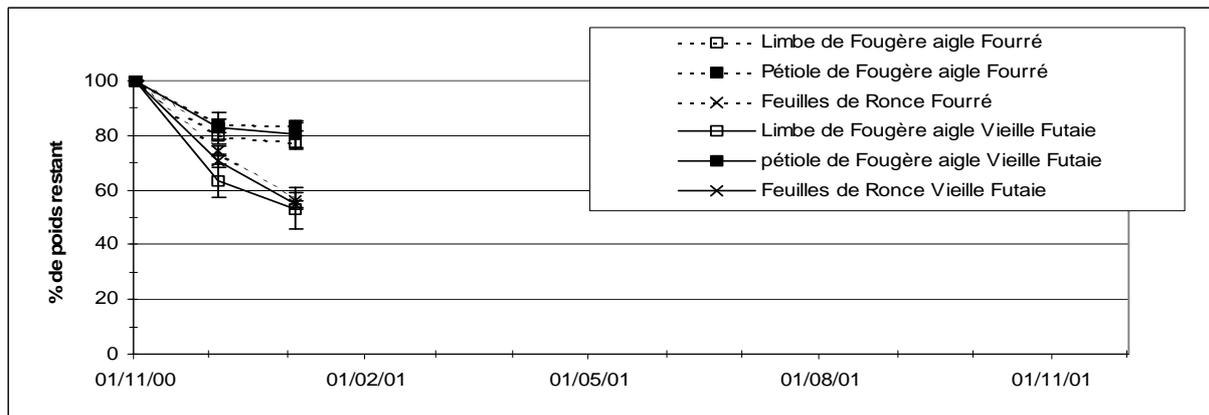


Figure : Suivi de la décomposition en % de poids restant du limbe et du pétiole de fougère aigle, et des feuilles de ronce dans le bosquet et en vieille futaie

A] - 4.3.2 - Conclusion : Des premières tendances apparaissent. Dans une peuplement donné, la perte de poids au cours du temps est variable selon le matériel végétal qu'il soit ligneux ou herbacé. En revanche, l'effet peuplement sur la vitesse de perte de poids est peu à fortement influençable selon le type de matériel végétal. Les analyses de carbone, en cours, préciseront son évolution, parallèle à celle de la matière sèche.

L'analyse future sur l'ensemble des suivis permettra d'apprécier réellement le caractère améliorant, neutre ou acidifiant des différents matériaux végétaux. Des données supplémentaires, telles que les teneurs en carbone, azote, lignine et autres, les conditions environnementales (température, humidité) sous le couvert et dans le sol des peuplements, et des analyses de densité, diversité et activité microbiennes du sol dans les différents peuplements et sous différents faciès végétaux, permettront de comprendre et d'expliquer les effets espèces et peuplements observés ou pas.

B] Effets d'un apport d'amendement et de fertilisants sur les variations des stocks de carbone.

B] 1 Définition des amendements et fertilisants :

Les amendements (en particulier les carbonates de Ca et Mg) sont utilisés en forêt pour lutter contre l'acidification des sols (naturelles pour le prélèvement, anthropiques par les exploitations et les apports exogènes liés à la pollution). L'amendement joue par un changement de la dynamique du cycle des éléments en accélérant en particulier la minéralisation, c'est-à-dire la décomposition de la matière organique et sa transformation, et son transfert par les organismes (animaux) et les végétaux (racines, mycélium,...).

L'amendement a une action directe et indirecte : par son effet stimulant sur la disponibilité des cations basiques ou par l'atténuation des problèmes de toxicité en Al (Black et Cameron 1984, Persson et Ahlström 1990/91, Derome 1991, Hüttl et Zöttl 1993, Clemensson-Lindell et Persson 1993). L'amélioration de l'état sanitaire (jaunissement, pertes d'aiguilles) est observée (Derome, 1990 ; Weissen & Nys, 1993) et celle de la productivité mesurée (Belkacem & Nys, 1993 ; Toutain *et al.*, 1993 ; Nys, 1989 ; Mohamed, 1992 ; Bonneau, 1993).

Les déséquilibres nutritionnels liés sont atténués (Heilman et Ekman 1973, Hüttl 1989, Joslin et Wolfe 1989, Derome 1991, Marschner *et al.* 1992, Fehlen et Picard 1994, Belkacem 1993, Ranger *et al.* 1994).

L'effet net sur l'activité biologique paraît parfois négatif. Cependant, le nombre de lombrics (Schierl et Kreutzer 1989, Robinson *et al.* 1996) et la décomposition augmentent après amendement (Czerney 1968, Smolander *et al.* 1996).

Les effets d'un amendement sur le développement des racines sont souvent positifs (Safford 1974, Rost-Siebert 1985, Murach et Schünemann 1985, Matzner *et al.* 1986, Glatzel *et al.* 1986, Persson et Ahlström 1990/91, Schüler et Zwick 1992, Raspe 1992, Hagen 1992, Gobran *et al.* 1993), quelque fois négatifs, notamment en Scandinavie (Black et Cameron 1984, Persson et Ahlström 1990/91, Clemensson-Lindell et Persson 1993, Hüttl et Zöttl 1993, Persson *et al.* 1995). L'effet bénéfique est souvent lié à la correction de la phytotoxicité de l'Al sur les racines (Rost-Siebert 1985, Noble *et al.* 1988, Kruger et Sucoff 1989, Keltjens et Dijkstra 1991, Cronan et Grigal 1995). L'amendement peut augmenter le taux de mycorhization jusqu'à un pH de 5, tandis qu'au-delà l'effet serait négatif. Néanmoins, les effets sont souvent négatifs sur le terrain (Lehto 1994, Staaf *et al.* 1996). Les résultats sont différents selon les espèces ou morphotypes de mycorhizes (Antibus et Linkins 1992) : certains groupes morphologiques disparaissent, tandis que d'autres profitent de cet amendement.

Toutes ces actions et interactions jouent donc sur le bilan de carbone dans l'écosystème et son compartiment sol en particulier.

Il y a-t-il réduction réelle des stocks de carbone dans les couches organiques avec réduction concomitante des réserves pour le profil de sol, c'est-à-dire que le sol serait « source de carbone » ; ou bien il y-a-t'il incorporation du carbone minéralisé dans les horizons organo-minéraux du profil (transfert par solution ou par la faune et immobilisation secondaire) et ou immobilisation dans la biomasse en particulier racinaire (Bakker, 1998).

Notre équipe réalise depuis quelques années un bilan des effets des amendements sur le fonctionnement des écosystèmes en s'intéressant en particulier à l'effet secondaire sur le sol, la végétation, la biologie. L'aspect qualitatif est marqué par des résultats significatifs et le projet Vosges avec l'ONF va permettre de progresser rapidement dans l'évaluation des effets à moyen terme. Nous disposerons donc d'une base de données dans lequel le carbone n'est pas pris en compte d'une manière systématique, car ce n'est pas un élément déterminant comme indicateur de la fertilité de la station.

Nous proposons donc d'utiliser ce travail en cours et de compléter l'étude par un bilan quantitatif comparatif (Témoin – amendé) des stocks de carbone dans le sol et d'une évaluation grossière du stockage dans la biomasse.

Le but attendu sera la base de donnée permettant de calculer la valeur (ou la fonction) du paramètre fertilité/fertilisation du modèle Arrouays *et al.* .

B] 1 - Objectif : A partir du bilan des éléments, réalisé dans des essais amendement/fertilisation de l'Est de la France, nous évaluons les modifications de stock de carbone liées à cette action sylvicole.

L'apport d'amendement et de fertilisants modifie la dynamique du cycle biologique et biogéochimique des écosystèmes forestiers. L'accélération de la décomposition de la matière organique des humus se traduit elle par un déstockage de carbone du sol ou bien par un transfert vers les horizons minéraux ?

B] 2 - Matériel et méthodes :

B] 2.1 - Sites et traitements :

Le dispositif expérimental comporte 22 sites, dans des peuplements d'Epicéa ou de Sapin, dont l'âge varie entre 30 et 120 ans. Ces peuplements sont situés sur des sols bruns acides, et possèdent des humus variant du mull acide au dysmoder

Pour chaque site, les traitements ont été appliqués par couple de placettes (une placette traitée et une placette témoin) à raison de 1 à 3 répétitions par site. Le traitement a été appliqué par hélicoptère (sites 3, 4 bloc2, 6 à 9, 13,14) ou par soufflerie (sites 4 bloc1, 20, 21) à l'échelle de la parcelle. La dose du traitement appliqué a varié légèrement d'un site à l'autre, mais représente généralement une application de 2.5 tonnes de carbonates de calcium et d'oxyde de magnésium par hectare. Les traitements ont été appliqués en une seule fois, entre 1981 et 1991, selon les sites (Tableau ci-dessous).

Tableau : Description des sites et des traitements appliqués en fonction des types de roche mère.

	Peuplement		Roche mère		Texture***	Traitements (Kg/ha)				
	Site	Essence*	Age	Type		Classe**	0-5 cm	Année	Rép.****	CaO
Croix-Scaille*****	1	Pa	60	Schiste	1	LL	81	2	1170	295
Croix-Scaille	2	Pa	60	Schiste	1	LL	90	2	1170	295
Croix-Scaille	3	Pa	30	Schiste	1	LAS	92	2	1170	295
Croix-Scaille	4	Pa	30	Schiste	1	LAS	92	2	1170	295
Remiremont	5	Aa	100	Grès vosgien	1	LSA	85	3	1170	295
Humont	7	Aa; Pa	35	Grès vosgien	1	SA	91	2	757	380
Donon	9	Pa	75	Grès vosgien	1	SL	91	2	631	317
Grendelbruch	10	Aa	103	Granite du Kagenfels	1	SL	85	2	1170	295
Grossmann	12	Pa	75	Grès vosgien	1	SL	85	2	1170	295
Mortagne	17	Aa	120	Grès vosgien	1	SA	85	2	1170	295
Grand Fossard	6	Aa; Pa	60	Leptinite	2	SA	91	2	757	380
Hospices	13	Pa	35	Granite du Valtin	2	SA	91	3	716	360
Fraize	14	Aa	115	Granite du Valtin	2	SA	91	3	631	317
Bonhomme	15	Pa	60	Granite du Valtin	2	LSA	91	2	631	317
Vologne	16	Aa	105	Grès permien	2	LSA	85	2	1170	295
Louchbach	18	Pa	75	Granite du Valtin	2	SA	85	1	1170	295
Bonhomme (cies)	19	Pa	50	Granite du Valtin	2	LSA	91	3	1170	295
Vagney	8	Aa	70	Granite de Remiremont	3	SA	91	2	757	380
Russ	11	Aa	104	Granite de Waldersbach	3	LS	85	2	1170	295
Aumontzey	20	Pa	30	Mignatite de Gerbepal	3	SA	89	1	700	375
Grange	21	Pa	30	Mignatite de Gerbepal	3	LSA	89	1	700	375
Rouffach	22	Aa	90	Granite à biotite	3	SL	85	1	1170	295

* Aa: Abies alba (sapin pectiné); Pa: Picea abies (Epicéa commun).

** Les roches mères ont été regroupées en 3 classes de fertilité.

*** Texture de l'horizon superficiel. Sableuse= SA, SL ; Limono-sableuse= LAS, LS, LSA ; Limoneuse=LL

**** Nombre de répétitions des traitements par site.

***** A la Croix-Scaille, un traitement supplémentaire (Ca) a été effectué à raison de 1400 Kg/ha de CaO.

B] 2.2 - Caractérisation du sol :

B] 2.2.1 - Les humus : Les humus des différentes placettes sont de type mull acide à dismoder. La litière a été récoltée à raison de 5 prélèvements par placette. Les échantillons ont été rassemblés au moment de l'analyse et séchés à 65°C. La matière sèche a été déterminée, puis les échantillons ont été broyés. La détermination du pH_{eau} et du pH_{KCl} a été réalisé selon la méthode standard.

B] 2.2.2 -Le sol : Les profondeurs suivantes ont été échantillonnées: 0 – 5 cm, 5 – 20 cm, 20 – 35 cm et 35 – 50 cm. 10 prélèvements ont été réalisés à l'aide de cylindres métalliques. La densité apparente de la terre fine a été calculée, après séchage à 105 °C, en corrigeant pour la teneur en cailloux.

Les analyses chimiques suivantes ont été effectuées par le laboratoire d'analyse des sols de la station INRA à Arras sur la terre fine (<2mm):

- pH_{eau} et pH_{KCl}. Le pH est mesuré dans de l'eau déminéralisée et dans une solution saline (KCl) à 1 mole/litre.
- La teneur en carbone organique et en azote total, au CHN par combustion à haute température.
- La teneur en phosphore P₂O₅ (méthode Duchaufour) ; les cations Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺, Mn⁺⁺, H⁺ et Al⁺⁺⁺ ont été extraits dans une solution de chlorure d'ammonium (NH₄Cl) à 1 mole/litre, au pH du sol. Ils ont été dosés par

la suite par ICP (Inductively Couple Plasma), sauf pour le H⁺ et Al⁺ qui ont été déterminés par titration ; la capacité d'échange cationique (CEC) est la somme de tous les cations échangeables (Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺, Mn⁺, H⁺ et Al⁺⁺⁺).

Estimation des réserves en minéraux nutritifs du sol (mesures quantitatives) : Les réserves ont été estimées, horizon par horizon, à partir des valeurs moyennes des concentrations en minéraux et des mesures moyennes de la densité apparente.

B] 2.3 - Méthodes statistiques

Pour chacune des variables mesurées, une analyse de variance a été effectuée à l'aide de la procédure GLM, de SAS (SAS, 1990). L'effet des sites, de l'amendement et l'interaction 'sites-amendement' a été analysé. Des comparaisons de moyennes ont été effectuées à l'aide du test de Duncan-Waller à un seuil de signification de 0.05.

B] 3 - Résultats :

B] 3.1 – Humus :

La quantité de matière sèche de l'humus, le pH_{eau}, ainsi que le pH_{KCl} ont été mesurés dans les différents sites. En général, on observe une plus grande quantité de matière sèche des humus ainsi que des pH inférieurs pour les pessières (14 sites) comparativement aux sapinières (10 sites).

L'effet global de l'amendement a été de diminuer la quantité de matière sèche et d'accroître le pH de l'humus (Tableau 5). Cette tendance est générale, bien qu'elle ne soit pas statistiquement significative (test de Duncan-Waller, à un seuil de 0.05) pour 5 pessières (sites 4, 7, 9, 18 et 19) et 6 sapinières (sites 6, 8, 10, 11, 17, 22).

Tableau : Effet du de l'amendement sur la matière sèche et le pH de l'humus.

Espèce	Traitement	Matière sèche (tonne/ha)	pH _{eau}	pH _{KCl}
Epicéa	Témoin	33	3.7	2.9
	Amendé	20	4.2	3.5
Sapin	Témoin	13	4.1	3.3
	Amendé	8	4.5	3.9

B] 3.2 - Sols

Les analyses de variance effectuées pour les 2 types de peuplements et les différentes profondeurs de sols étudiées indiquent un interaction entre les sites et l'amendement.

B] 3.2.1 - Analyses qualitatives de la terre fine du sol

B] 3.2.1.1 -Peuplements d'Epicéa

Pour les peuplements d'Epicéa, l'amendement a provoqué une augmentation des valeurs de pH dans les premiers horizons de sol, allant jusqu'à 35 cm de profondeur dans le cas du pH_{eau}. Cette tendance est générale, bien qu'elle ne soit pas statistiquement significative (test de Duncan-Waller, à un seuil de 0.05) pour un nombre variable de placettes en fonction de la profondeur examinée. Pour l'horizon 0-5cm l'effet est statistiquement significatif pour 6 sites (1, 6, 13, 15, 20 et 21) sur 14. Pour l'horizon 5-20cm, cet effet est significatif pour 3 sites (1, 15 et 21). La Figure 1 illustre, pour les différentes profondeurs étudiées, les effets de l'amendement sur le pH_{eau} des peuplements d'Epicéa et de Sapin.

Tableau : Effet de l'amendement dans les peuplements d'Epicéa pour les différentes profondeurs de sols étudiées.

Horizon	Peuplement	Traitement	Densité g/g	pH _{eau}	pH _{KCl}	C		N	C/N	P ₂ O ₅ g/Kg	H ⁺	Al ³⁺	Ca		Mg	K	CEC	S/T %
						g/Kg	g/Kg						cmolc/Kg	cmolc/Kg				
0 - 5 cm	Epicéa	Témoin	0.6	3.6	2.8	94	4.9	19	0.20	2.1	6.2	0.47	0.26	0.3	9.4	12		
		Amendé	0.6	4.1	3.2	118	6.1	19	0.21	1.3	3.3	5.51	2.40	0.3	13.0	60		
5 - 20 cm	Epicéa	Témoin	0.9	4.0	3.3	32	1.8	18	0.13	0.7	6.4	0.08	0.07	0.1	7.4	5		
		Amendé	0.9	4.1	3.4	33	1.8	18	0.15	0.6	5.7	0.34	0.27	0.1	7.1	13		
20 - 35 cm	Epicéa	Témoin	1.0	4.2	3.7	20	1.2	18	0.15	0.2	5.0	0.06	0.03	0.1	5.4	4		
		Amendé	1.0	4.3	3.7	18	1.1	18	0.17	0.3	4.3	0.09	0.08	0.1	4.8	7		
35 - 50 cm	Epicéa	Témoin	1.1	4.3	3.9	14	0.9	17	0.17	0.2	3.7	0.05	0.02	0.1	4.0	4		
		Amendé	1.1	4.4	3.9	13	0.8	16	0.20	0.2	3.5	0.07	0.05	0.1	3.9	6		

N.B. Les moyennes en vert indique un effet significatif du traitement à un seuil de 0.05.

B] 3.2.1.2 -Peuplements de Sapin

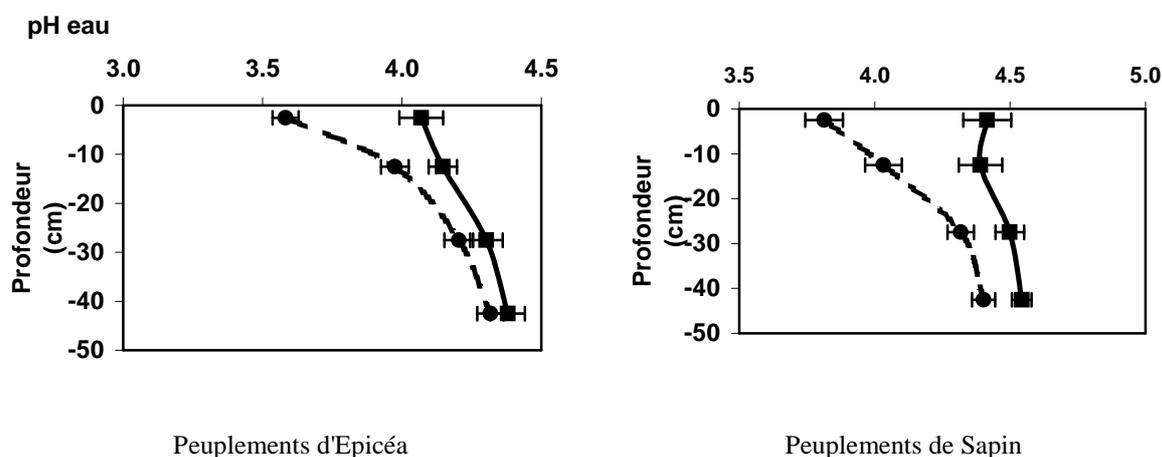
Pour les peuplements de Sapin, l'amendement a provoqué une augmentation des valeurs de pH dans les premiers horizons de sol, allant cependant en profondeur (50 cm) dans le cas du pH_{eau}.

Tableau : Effet de l'amendement dans les peuplements de Sapin pour les différentes profondeurs de sols étudiées.

Horizon	Peuplement	Traitement	Densité g/g	pH _{eau}	pH _{KCl}	C		N	C/N	P ₂ O ₅ g/Kg	H ⁺	Al ³⁺	Ca		Mg	K	CEC	S/T %
						g/Kg	g/Kg						cmolc/Kg	cmolc/Kg				
0 - 5 cm	Sapin	Témoin	0.6	3.8	2.9	93.0	5.0	19	0.20	1.8	6.2	0.56	0.30	0.3	9.4	14		
		Amendé	0.5	4.4	3.6	89.3	4.9	18	0.23	0.6	1.8	6.50	2.22	0.3	11.9	77		
5 - 20 cm	Sapin	Témoin	0.8	4.0	3.3	36.5	1.9	20	0.15	0.8	6.4	0.10	0.09	0.1	7.6	6		
		Amendé	0.8	4.4	3.5	38.5	2.1	19	0.20	0.6	4.7	1.28	0.59	0.1	7.4	30		
20 - 35 cm	Sapin	Témoin	0.9	4.3	3.7	24.5	1.3	20	0.21	0.3	4.8	0.07	0.05	0.1	5.4	5		
		Amendé	0.9	4.5	3.8	24.9	1.2	20	0.27	0.3	4.7	0.38	0.20	0.1	5.7	13		
35 - 50 cm	Sapin	Témoin	1.1	4.4	3.9	17.6	1.0	18	0.24	0.2	3.8	0.07	0.03	0.1	4.2	6		
		Amendé	1.1	4.5	3.9	17.1	0.9	19	0.27	0.2	3.5	0.19	0.10	0.1	4.1	11		

N.B. Les moyennes en vert indique un effet significatif du traitement à un seuil de 0.05.

Figure : Effets moyens de l'amendement sur le pH_{eau} pour les peuplements d'Epicéa et de Sapin.



B] 3.2.2 - Analyses quantitatives de la terre fine du sol

B] 3.2.2.1 - Peuplements d'Epicéa

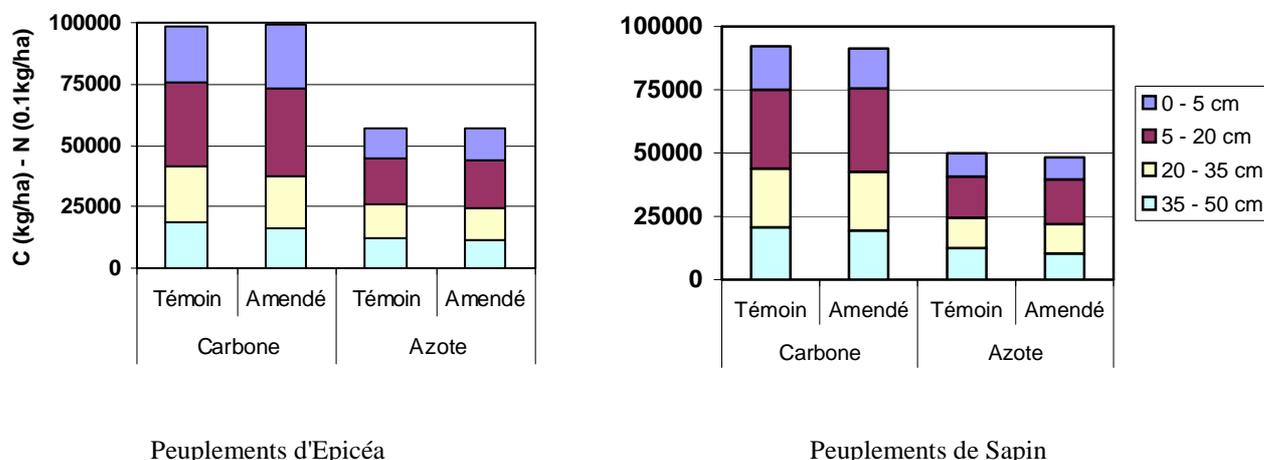
Pour les peuplements d'Epicéa, les stocks moyens de carbone et d'azote ne sont pas affectés par l'amendement. Ils sont respectivement de 99 et 6 tC/ha.

La majeure partie de ces stocks sont localisés dans les horizons superficiels. (Figure 2).

B] 3.2.2.2 - Peuplements de Sapin

Pour les peuplements de Sapin également, les stocks moyens de carbone et d'azote ne sont pas affectés par l'amendement. Ils sont respectivement de 92 et 5 tC/ha. Ces valeurs sont sensiblement inférieures à celles obtenues pour les peuplements d'Epicéa.

Figure : Effets moyens de l'amendement sur les stocks en carbone et azote pour les peuplements d'Epicéa et de Sapin.



B] 3.2.3 - Impact de l'amendement en fonction des normes de fertilité des sols

Le Tableau ci-dessous indique les résultats moyens des analyses de terre fine pour les peuplements d'Epicéa et de Sapin en fonction des normes de fertilité des sols. On note que la CEC est très faible pour tous les peuplements. Elle oscille entre 8 et 9 cmol+/kg. L'amendement a eu peu d'effet sur cette variable. Le taux de saturation en bases (S/T) était également très faibles pour les 2 types de peuplements (7-8%). L'amendement a permis d'atteindre un seuil moyen de fertilité en termes de S/T. Suite à l'amendement, l'accroissement a été plus marqué pour les peuplements de Sapin (S/T de 42%) que pour les peuplements d'Epicéa (S/T de 24%).

L'effet majeur de l'amendement a été d'accroître de façon marquée les réserves de calcium et de magnésium du sol. L'accroissement des réserves en CaO et MgO a été plus marqué pour les peuplements de Sapin (passant de 97 à 785 kg/ha pour le CaO et de 60 à 308 kg/ha pour le MgO) comparativement aux peuplements d'Epicéa.

Tableau : Résultats moyens des analyses de terre fine pour les peuplements d'Epicéa et de Sapin .

		CEC	K	Ca	Mg	P ₂ O ₅	pH _{eau}	C/N	S/T	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	
		cmol+/kg				g/kg		%		kg/ha				
<i>Norme</i>		Qualitative							Quantitative					
	<i>Sol riche</i>	25	0.13	1.00	0.40	0.07	>5.0	<19	>70	>500	>1300	>300	>600	
	<i>Sol pauvre</i>	10	0.08	0.20	0.15	0.04	<4.2	>23	<20	250	350	150	250	
Epicéa	Témoin	8	0.16	0.18	0.12	0.15	3.9	19	7	178	97	54	568	
	Amendé	9	0.17	1.63	0.80	0.16	4.1	19	24	173	503	250	612	
Sapin	Témoin	8	0.19	0.22	0.15	0.16	4.0	19	8	181	97	60	688	
	Amendé	9	0.18	2.59	1.00	0.20	4.4	19	42	167	785	308	781	

N.B. Les valeurs en jaune sont en-dessous du seuil de pauvreté.

Les normes qualitatives et quantitatives sont établies pour les premiers 20 cm et 50 cm de sol, respectivement.

B] - 4- Conclusion

Les teneurs en C et N du sol n'ont pas été affectées par l'amendement. Le ratio C/N est demeuré stable, entre 16 et 20. Selon les normes décrites précédemment, ces valeurs sont relativement bonnes et ne dénotent pas de problème particulier concernant la matière organique de ces sols. Ainsi l'amendement aurait peu d'effet sur les réserves en C et en N dans le sol, ce qui est conforme aux résultats obtenus par Matzner *et al.* (1985). Cependant d'autres auteurs (Marshner et Wilezynski, 1991 ; Belkacem et Nys, 1995) ont également observé une diminution du rapport C/N dans des essais d'amendement. Ces résultats apparemment contradictoires semblent

liés aux différentes conditions expérimentales (e.g. type de peuplement, type d'humus, durée de l'amendement) et soulignent ainsi la subsistance de plusieurs incertitudes concernant l'effet de l'amendement sur le contenu en C et N du sol.

L'amendement a cependant permis une accélération de la minéralisation de la matière organique des horizons holorganiques. Pour les peuplements d'Epicéa et de Sapin, la masse de ces horizons était respectivement de 16 et 6 tC/ha dans les placettes témoins et de 10 et 4 tC/ha dans les placettes amendées (diminution de près de 40%). Ainsi l'amendement a eu des répercussions sur le cycle des éléments, favorisant une décomposition plus rapide de la litière. Il a déjà été observé qu'une amélioration du taux de saturation en bases et du pH du sol permettent à la microflore d'être plus active (Toutain *et al.*, 1988).

Dans le cadre de ce contrat, les résultats sont limités régionalement aux massifs forestiers acides Vosgiens et Ardennais. Des études comparables, menées par les mêmes équipes, montrent que les conclusions peuvent être généralisées, à conditions de station comparable, aux autres régions françaises (Massif-Central, Bretagne, Normandie) et pour des espèces non résineuses (Hêtre, Chêne).

A court terme (10 à 15 ans), l'effet mesurable est limité aux couches holorganiques. Dans les essais les plus anciens (ex. du Hêtre à Fougères, 35) il semble qu'il y ait un transfert de matière organique vers l'horizon A1 organo-minéral et cela sous l'action des vers de terre qui réapparaissent lorsque les conditions de vie biologique s'améliorent.

Ces évolutions sont très lentes, d'où l'intérêt du suivi à long terme d'observatoires.

Références bibliographiques

- Augusto, L. 1999. Etude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimique et la végétation de sols acides. Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Bonneau, M. 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, bases du diagnostique, conseil pratiques, réalisations expérimentales. ENGREF-Nancy. 367p.
- Bonneau, M., G. Landmann, J. Ranger, E. Dreyer et C. Nys. 1995. Fertilization of declining conifers in the Vosges and the Ardennes: Effects on soil, nutrient cycling, and tree health, growth and physiology. Dans: G. Landmann et M. Bonneau (éd.), Forest decline and atmospheric deposition effects in the Frech mountains. Springer-Verlag, N.Y. pp. 300-330.
- Nys, C. 1989. Fertilisation, dépérissement et production de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans les Ardennes. Rev. For. Fr. 41(4): 336-347.
- SAS. 1990. Sas/Stat user's guide version 6, fourth edition, vol. 1 et 2. Sas Institute Inc. Cary, N.C., USA.

C] Effets du traitement sylvicole sur les variations des stocks de carbone et d'azote du sol.

C] 1 – Le traitement sylvicole

En forêt tempérée, les structures forestières peuvent varier soit horizontalement (densité et régularité des peuplements et composition en espèces de la strate arborescente), soit verticalement (nombre et composition des strates, hauteur - et donc structure d'âge - des peuplements). Ces structures sont très fortement contrôlées par la sylviculture. Rappelons qu'en France les deux principaux régimes en forêt feuillue sont le taillis-sous-futaie (encore plus de 4 millions d'hectares) et la futaie régulière (aux environs de 2 millions d'hectares).

Le rôle de la structure des peuplements forestiers dans les variations de la diversité spécifique n'a souvent été étudié que de façon ponctuelle et, surtout, en ne travaillant qu'à partir d'un très faible nombre de répétitions statistiques, le plus souvent une seule. Un certain nombre de résultats intéressants existent cependant. Becker (1985), en hêtraie, a observé des différences significatives de végétation entre taillis-sous-futaie et futaie ce qui implique une dynamique du carbone différente.

De nombreuses études ont porté sur le rôle de l'âge des peuplements et des coupes à blanc sur les stocks de carbone. La plupart mettent en avant un rôle important de la coupe, montrant de fortes pertes en carbone dans les quelques années ou dizaines d'années qui suivent, le stock se reconstituant ensuite progressivement. L'étude de Covington (1981), l'une des plus complètes sur feuillu, indique une perte en 15 ans d'environ 14 tC/ha dans les couches holorganiques, soit plus de 50% du stock initial. Ces données sont couramment intégrées dans les modèles actuels de simulation de la dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers (Maser *et al.*, 2001).

Cependant, très peu d'études ont porté sur les effets d'itinéraires techniques plus proches de ceux pratiqués dans les forêts feuillues européennes, où les coupes sont souvent plus limitées, progressives dans les

régénérations, ou partielles dans les systèmes de taillis sous futaie. De plus, très peu d'informations existent sur les effets de la conversion sur les caractéristiques physico-chimiques des sols. Slak et Suran (1981), comparant un TSF et une futaie de chêne à l'Ouest d'Orléans observent une densité du sol plus faible et un taux de matière organique plus élevés de 10% environ dans la futaie (après mesure de 40 échantillons dans chacun des 2 sites).

C] 2 – Objectif

Il s'agit ici d'étudier le rôle du stade sylvicole sur les variations des stocks de carbone dans le sol.

En effet, la sylviculture peut jouer un rôle important sur les variations des stocks de carbone. Elle joue bien entendu sur le stock de carbone de la matière ligneuse, en réglant la densité des peuplements et leur vitesse de croissance. Mais elle pourrait aussi jouer un rôle indirect sur le stock de carbone du sol. En effet, des régimes sylvicoles différents impliquent des flux de litière variables, en liaison avec la biomasse des houppiers, ainsi que des vitesses de décomposition de la matière organique variables, selon la qualité de cette matière et selon les conditions pédo-climatiques. Deux facteurs majeurs sont étudiés ici : le rôle de la conversion des taillis sous futaie en futaie d'une part, et le rôle de l'âge d'exploitation d'autre part.

Nous avons choisi comme modèle la chênaie en raison de son importance économique, écologique et patrimoniale en France. De plus, la diversité des structures y est particulièrement importante, en raison de la conversion du régime de taillis-sous-futaie en futaie entrepris depuis un peu plus de 150 ans en France.

C] 3 – Site et Méthodes

Nous proposons de prendre en compte sept états de base parfaitement définis correspondant à 2 régimes différents, (taillis-sous-futaie, et futaie régulière) et à un régime transitoire, taillis-sous-futaie en conversion par vieillissement. Dans le régime de la futaie régulière nous proposons d'établir une chronoséquence basée sur cinq états couvrant la révolution complète. Chaque état ou "traitement" sera répété cinq fois.

Les prélèvements utiliseront la méthodologie mise au point dans le cadre de l'évaluation des stocks de carbone des sols forestiers (Nys, 1998). Les résultats attendus permettront de vérifier la sensibilité du paramètre « Etat du peuplement » du modèle « carbone ».

C] 3.1 – Caractéristiques générales du site :

Le massif de Champenoux est situé dans la petite région naturelle du Plateau Lorrain. Sa surface est de 829 ha. Il repose sur les marnes à Amalthées du Lias inférieur (Domérien), recouvertes d'une couche limoneuse n'excédant pas 2 mètres d'épaisseur. Les sols sont des sols bruns plus ou moins lessivés, ou, lorsque la couverture limoneuse devient peu épaisse, des pélosols-pseudogleys. Le pH de surface est de 4,9 en moyenne.

C] 3.2 – Plan d'échantillonnage :

Nous avons établi une chronoséquence représentant l'évolution classique des chênaies de la région Nord-Est :
Taillis sous futaie ; Taillis sous futaie en conversion par vieillissement depuis 50 ans ; Régénération avant coupe définitive ; Fourré de 10 à 20 ans ; Gaulis de 30 à 40 ans ; Perchis de 50 à 60 ans et Futaie adulte de 120 ans.

Dans chacun de ces 7 stades sylvicoles, 5 placettes de 20 x 20 m ont été installées, soit un total de 35 placettes. Chaque placette a été géoréférencée par positionnement GPS. Les placettes ont toutes été choisies en conditions topographiques identiques (plateau) et sur un substrat le plus homogène possible (limons entre 30 et 60 cm d'épaisseur), et représentent donc des répétitions statistiques au sein de chaque stade sylvicole.

C] 3.3 – Prélèvements de litière :

Les prélèvements ont été faits à raison de 5 carrés de 33 cm x 33 cm par placette. Les carrés sont placés de façon systématique (au centre et aux 4 angles de la placette). Dans les stades où des cloisonnements (ouvertures) ont été installés par le forestier (régénération et fourré), ces zones ouvertes ont été évitées et les carrés placés au centre des bandes de végétation.

Les prélèvements ont été répétés deux années, afin de d'estimer leur variabilité inter-annuelle et parce que le premier prélèvement avait été effectué un peu tard en saison, et aurait pu présenter des valeurs trop faibles des stocks de carbone. En 1999, les prélèvements ont eu lieu du 11 mars au 30 avril. En 2001, les prélèvements ont eu lieu du 1^{ier} au 20 février, plus tôt et sur une période plus courte. L'humus est de type dysmull ou oligomull, caractérisé par la succession des couches Oln, Olv et, de façon sporadique, OF. Dans tous les cas, on a prélevé tout le matériel végétal mort présent, en séparant d'une part le bois mort jusqu'au diamètre moyen de 2 cm maximum et, d'autre part, les feuilles plus ou moins décomposées des couches OI et OF. En 1999, les couches OI et OF ont été séparées.

C] 3.4 – Densité du sol :

Celle-ci a été mesurée par prélèvements au cylindre. Deux cylindres en acier de 10 cm de haut et 6 cm de diamètre sont enfoncés verticalement par percussion dans chacun des carrés précédents, soit 10 cylindres par placette. On a prélevé successivement dans l'horizon 0-5 cm puis 5-10 cm. La densité mesurée varie entre 0,72 et 1,16. Une étude précédente ayant montré que la densité au cylindre sous-estime la densité réelle (Dupouey et al., 1997). Nous avons donc corrigé nos mesures selon l'équation suivante :

densité corrigée = 1,040 x densité mesurée - 0,017

ce qui amène à augmenter la densité initiale de 0,10 en moyenne. Cette correction linéaire ne change pas l'ordre de classement des sites. De plus, le terme constant de l'équation est faible (-0,017). En valeurs relatives, il n'y a donc pas non plus de changement entre sites. Par contre, cette correction entraîne une augmentation systématique de 10% des stocks d'éléments calculés.

C] 3.5 – Concentration en carbone et azote :

Les analyses de litière ont été effectuées par le Laboratoire d'Analyse de l'INRA de Bordeaux. Les analyses des horizons minéraux ont été effectuées par le Laboratoire d'Analyse des Sols INRA d'Arras, par la méthode Anne pour le carbone, et par la méthode Kjeldhal pour l'azote.

Les stocks ont été calculés, dans chaque placette et chaque couche de sol, comme le produit de son épaisseur, de sa densité et de sa concentration en carbone.

C] 3.6 – Analyse statistique :

Pour les variables pour lesquelles on disposait de deux années de mesure (masse de litière de feuilles, masse de petit bois mort), on a utilisé le modèle d'analyse de variance suivant :

$Y_{ijk} = \text{constante} + \text{année } i + \text{stade } j + (\text{année} \times \text{stade})_{ij} + \text{erreur } ijk$

Sinon, on a utilisé le modèle simple suivant :

$Y_{ij} = \text{constante} + \text{stade } j + \text{erreur } ij$

C] 4 - Résultats et discussion

C] 4.1 - Effet de l'année sur la quantité de litière

On constate un effet faiblement significatif ($P=0,09$) de l'année de récolte sur la masse de la couche OI+OF : en 1999, celle-ci fait 2,9 t/ha sur l'ensemble des 35 points, alors qu'elle n'est plus que de 2,6 t/ha en 2001, soit une baisse de 10% entre les deux années. Ce résultat est contraire à l'hypothèse initiale, qui supposait une quantité de litière plus importante en 2001, année où les prélèvements ont eu lieu plus tôt en saison. Il est probable qu'en 1999, la séparation des deux couches OI et OF ait amené les opérateurs de terrain à prélever un peu plus de matériel qu'en 2001, où une seule couche était prélevée. Il n'y a pas d'interaction entre année de récolte et stade sylvicole pour la masse de la couche OI+OF, et il n'y a aucun effet de l'année pour la quantité et la proportion de

bois, ni pour la masse totale bois et feuilles. La couche OF ne représente que 20% en masse de l'ensemble OI+OF, et c'est donc principalement la masse de la couche OI qui varie entre stades sylvicoles.

	R2 (%)	TSF	TSFv	régé	fourré	gaulis	perchis	futaie	Total
OI+OF (tMS/ha)	56***	2,0	3,1	1,8	2,1	3,1	3,5	3,8	2,8
OI+OF+bois (tMS/ha)	51***	3,5	5,2	2,9	4,1	5,2	5,3	5,8	4,6
OI+OF / total(%)	31*	56	59	64	52	61	66	64	60
[C] feuilles (%)	35*	42,4	42,6	39,8	42,1	41,9	42,0	43,5	42,0
[C] total (%)	40*	44,5	44,5	42,5	44,8	44,2	43,9	45,5	44,3
C tC/ha	54***	1,5	2,3	1,2	1,8	2,3	2,3	2,7	2,0
C feuilles/ Ctotal (%)	33(*)	53	56	59	49	58	63	62	57
[N] feuilles (%)	26ns	1,3	1,4	1,2	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3
[N] total (%)	16ns	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
N kgN/ha	49**	39	64	32	47	59	59	72	53
N feuilles / N total (%)	42*	64	67	70	64	73	76	72	70
C/N bois	45**	52,6	48,8	51,3	57,0	63,6	61,0	51,9	55,2
C/N feuilles	29ns	33,0	31,0	32,0	29,7	30,9	33,0	31,7	31,6

Tableau : masse de litière par stade sylvicole. La première colonne indique le R2 du modèle d'analyse de variance présenté dans la partie 'Méthodes', ainsi que le niveau de signification de l'effet stade sylvicole (ns : P>0.1, (*) : P<0.1, * : P<0.05, ** : P<0.01, * : P<0.001).**

C] 4.2 - Masse de carbone dans la litière :

On constate un effet très net du stade sylvicole sur le stock de carbone dans la litière. La quantité de carbone stockée dans la biomasse passe progressivement de 1,2 tC/ha dans les régénérations à 2,7 tC/ha dans les jeunes futaies, soit à peu près un doublement du stock. Ces valeurs sont parmi les plus faibles observées dans les chênaies françaises (Ponette *et al.*, 1997). Les taillis sous futaie présentent des valeurs faibles, intermédiaires entre celles de la régénération et celles du fourré, alors que les taillis sous futaie vieillis présentent au contraire des valeurs élevées, égales à celles des gaulis et perchis. Cet effet du stade sylvicole est dû principalement à des variations de la biomasse de la litière ($r=1,00^{***}$ entre le stock de carbone total et la biomasse totale, $n=35$), les variations de la concentration en carbone étant plus faible ($r=0,60^{***}$ entre le stock de carbone total et la concentration en carbone moyenne, $n=35$). Les concentrations en carbone dans les feuilles et le bois varient de façon faiblement significative entre stades sylvicoles. Ce résultat indique qu'à notre échelle d'étude (une essence, un massif, des structures et stades variés), il est possible d'utiliser une valeur constante de la concentration en carbone (42% dans les feuilles, 47% dans le petit bois, 44% en moyenne) pour évaluer les variations de stock dans la litière. Ces résultats sont aussi valides pour l'azote (1,3% dans les feuilles, 0,9% dans le petit bois et 1,1% en moyenne).

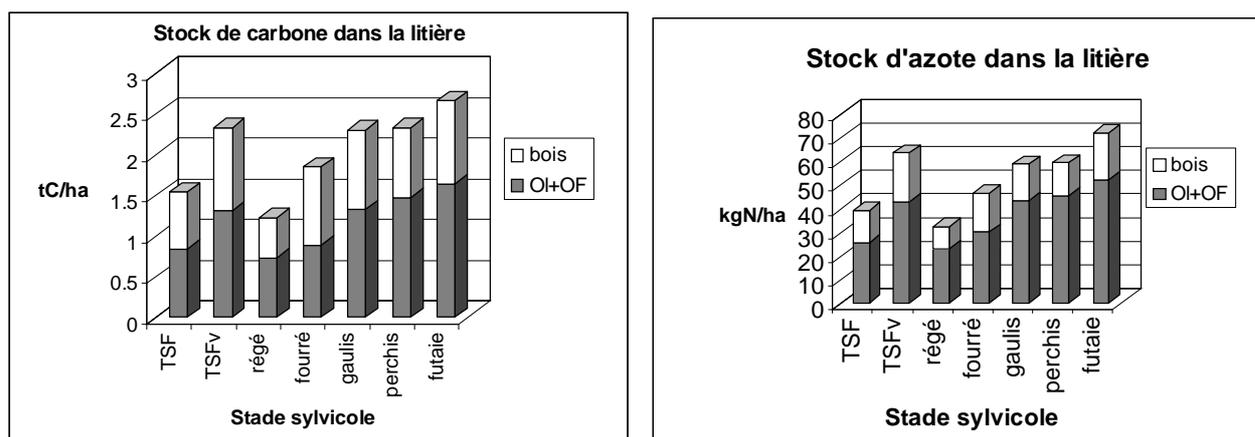
L'accumulation de litière au cours de la succession peut être due à deux causes principales : (1) un plus grand flux de litière arrivant au sol, en raison d'une augmentation progressive de la masse des houppiers entre les stades taillis sous futaie et taillis sous futaie vieilli et entre les stades régénération et futaie adulte, ou (2) une diminution de l'activité minéralisatrice entre ces différents stades.

Lorsqu'on intègre les variations de ces stocks dans la litière sur l'ensemble d'une révolution de 140 ans, on obtient un stock moyen dans la futaie de 2,3 tC/ha et de 61 kgN/ha. Ces valeurs sont sensiblement égales à celles observées dans le taillis sous futaie vieilli. Ainsi, le régime de la futaie, malgré des pertes en début de révolution, maintient finalement un stock moyen de carbone et d'azote élevé dans la litière, plus élevé que dans un taillis sous futaie encore géré (1,5 tC/ha et 39 kgN/ha).

On constate que les variations de la biomasse et de sa concentration en carbone sont parallèles. Ces deux facteurs jouent ici dans le même sens : les litières les plus abondantes sont aussi celles qui présentent les taux de carbone les plus élevés. On observe d'ailleurs une corrélation significative ($r=0,54^{***}$, $n=35$) entre ces deux paramètres, pour les feuilles du moins. Ceci pourrait s'expliquer par une vitesse de décomposition de la matière

organique d'autant plus rapide que sa quantité est faible, ou, de façon moins probable, par un lien entre la production de feuilles des arbres et leur concentration en carbone. On n'observe d'ailleurs pas de variation significative du rapport C/N des feuilles. Le rapport C/N du bois montre par contre des variations significatives selon le stade sylvicole, avec un maximum dans le gaulis et des valeurs décroissantes dans les stades précédents et suivants. Les taillis sous futaie ont des valeurs faibles.

Ces faibles variations du rapport C/N font que les stocks d'azote montrent les mêmes tendances que ceux de carbone. La corrélation entre les variations du stock d'azote et celles du stock de carbone est forte ($r=0,98^{***}$ pour le stock total, $n=35$), alors qu'elle est plus faible avec le rapport C/N de la matière organique ($r=-0,45^{**}$, $n=35$).



La contribution des petits débris ligneux aux stocks totaux n'est pas négligeable, puisqu'elle représente 40% de la biomasse, 43% de la carbomasse (car la concentration en carbone y est plus élevée que dans les feuilles), et 30% de la masse totale d'azote.

C] 4.3 - Masse de carbone des horizons minéraux (A1 – 0 à 10 cm)

La densité ne varie pas significativement selon le stade sylvicole, que ce soit dans l'horizon 5-10 cm ou dans l'horizon 0-5 cm. Par contre, elle varie très significativement selon la profondeur, avec une valeur moyenne de 0,96 dans l'horizon 0-5 cm et de 1,14 dans l'horizon 5-10 cm. L'interaction entre profondeur et stade sylvicole ne joue pas de rôle significatif sur les variations de densité.

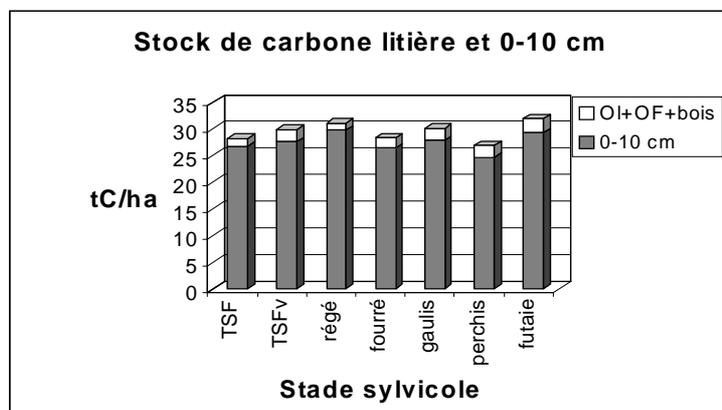
La densité du sol est fortement liée à la concentration en carbone ($r=-0,78^{***}$, $n=70$ pour les deux horizons étudiés). Il est à noter que le modèle de densité de sol établi par Dupouey *et al.* (1997) pour les hêtraies du Nord-Est de la France s'applique ici de façon correcte : la corrélation entre les estimations de ce modèle et les valeurs mesurées ici est de 0,78 ($P<0,001$, $n=70$) et le biais entre les deux est de 0,08. Les valeurs mesurées ici restent plus faibles que celles prédites par le modèle, malgré la correction appliquée (voir méthode).

La concentration en carbone varie fortement en fonction de la profondeur (3,2% dans la couche 0-5 cm, 2,2% dans la couche 5-10 cm en moyenne, $P<0,001$), et plus faiblement en fonction du stade sylvicole ($P=0,02$). L'interaction est non significative. Toutefois, la variation en fonction du stade sylvicole ne semble pas obéir à une quelconque logique : on mesure par exemple la valeur minimale (2,5%) dans les fourrés et la valeur maximale dans les régénérations (3,0%). La concentration en azote montre elle-aussi aussi une variation significative avec la profondeur (0,24% dans la couche 0-5 cm, 0,17% dans la couche 5-10 cm en moyenne, $P<0,001$). Par contre, il n'y a pas de variation significative avec le stade sylvicole ($P=0,13$). Les stocks de carbone et d'azote présentent exactement le même mode de variation. On observe d'ailleurs bien une corrélation nettement plus forte des stocks avec les concentrations en élément ($r=0,92^{***}$ pour le carbone et $r=0,84^{***}$ pour l'azote, $n=70$) qu'avec la densité ($r=-0,48^{***}$ pour le carbone et $r=-0,36^{**}$ pour l'azote, $n=70$), qui, rappelons-le, ne varie pas significativement entre stades.

Le stock total des horizons minéraux de surface (0-10 cm) est de 27,5 tC/ha pour le carbone et de 2,11 tN/ha pour l'azote en moyenne pour tous les stade sylvicoles. Ces valeurs sont très proches des valeurs moyennes

observées pour le carbone dans les chênaies françaises (Ponette *et al.*, 1997). Par contre, elles sont relativement élevées pour l'azote, en raison du C/N relativement bas de ces horizons (13,4 en moyenne dans l'horizon 0-5 cm, et 12,6 dans l'horizon 5-10 cm).

Finalement, le stock total de carbone incluant la litière et les horizons de surface ne varie que faiblement en fonction du stade sylvicole ($P=0,09$), et sans ordre apparent autour de la valeur moyenne de 29,6 tC/ha. Les variations du stock d'azote, quant à elle, ne sont pas significatives (moyenne de 2,17 tC/ha).



	R2 (%)	TSF	TSFv	régé	fourré	gaulis	perchis	futaie	Total
Densité du sol	ns	1,07	1,05	1,04	1,09	1,05	1,01	1,04	1,05
[C] moyen 0-10 cm (%)	*	2,6	2,7	3,0	2,5	2,7	2,5	2,9	2,7
[N] moyen 0-10 cm (%)	ns	0,21	0,21	0,21	0,19	0,21	0,20	0,22	0,20
stock C total 0-10 cm (tC/ha)	(*)	26,8	27,7	29,9	26,5	27,9	24,7	29,3	27,5
stock N total 0-10 cm (tN/ha)	ns	2,15	2,15	2,13	2,05	2,15	1,97	2,21	2,11
stock C total 0-10 cm et litière (tC/ha)	(*)	28,3	30,0	31,1	28,4	30,2	27,0	32,0	29,6
stock N total 0-10 cm et litière (tN/ha)	ns	2,19	2,21	2,16	2,09	2,21	2,03	2,28	2,17

Les résultats de Slak et Suran (1981) indiquent des stocks de 28,2 tC/ha dans le taillis sous futaie et de 32,8 tC/ha en futaie adulte, pour l'ensemble litière et horizon A1 (jusqu'à 8 cm environ). Leurs résultats vont donc dans le même sens que les nôtres, à savoir une accumulation, faible, de carbone dans la futaie adulte par rapport au taillis sous futaie.

C] 5 – Conclusion

En conclusion, on constate que, dans ces chênaies sur limons peu acides, le stock de carbone de la litière est faible, et le stock d'azote très faible. Le stock de carbone des horizons de surface montre quant à lui des valeurs standards, et le stock d'azote des valeurs assez élevées. Même si le stock de carbone de la litière montre une évolution très nette en fonction du stade sylvicole, liée principalement aux variations de masse et non à celles de la concentration en carbone (augmentation lors du vieillissement du taillis sous futaie, forte diminution lors des coupes de régénération, puis reconstitution à un niveau élevé, plus élevé qu'en taillis sous futaie, dans les jeunes futaies), il ne représente qu'une part trop faible du stock total (7% du total étudié ici jusqu'à 10 cm de profondeur) pour qu'une variation significative du stock de carbone total en fonction du stade sylvicole soit discernable.

La perte de carbone dans la litière de la régénération (1,1 t C/ha par rapport au taillis sous futaie vieilli antérieur, ou 1,5 tC/ha par rapport à la jeune futaie à venir) est d'ailleurs probablement largement compensée par l'installation dans la régénération d'un tapis herbacé relativement dense, que nous n'avons pas étudié ici. Saly *et al.* (1991) observent par exemple les valeurs suivantes dans une hêtraie-sapinière de Slovaquie, quelques années après une coupe d'éclaircie :

	Peuplement âgé	Coupe
Litière (tMS/ha)	9,1	7,1
Biomasse herbacée aérienne (tMS/ha)	0,4	3,8
Estimation C total (tC/ha) ⁽¹⁾	3,8	4,7

(1) : concentration en carbone de 50% dans biomasse et de 40% dans la litière

Les pertes en carbone de la litière sont plus que compensées par l'installation d'un tapis herbacé dense, et en conséquence, le stock de carbone total augmente probablement dans les coupes !

C] 6 – Références bibliographiques

- Covington W.W., 1981, Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods, *Ecology*, 62 (1), 41-48.
- Dupouey J.L., Thimonier A., Behr P., 1997, Variations de la densité des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques, *Etude et Gestion des Sols*, 4 (1), 43-52.
- Dupouey J.L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S., Nys C., 2000, Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises, *Revue forestière française*, 52, 139-154.
- Masera O., Garza-Caligaris J.F., Kanninen M., Karjalainen T., Nabuurs G.J., Pussinen A., de Jong B.J., 2001, Modeling Carbon sequestration in afforestation and forest management projects: The CO2FIX V 2.0 approach, in prep.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M., Lanier M., 1997, RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, ONF – Département des Recherches Techniques, Fontainebleau, 427 p.
- Saly R., Krizova E., petrik M., Mihalik A., 1991, Ecosystem study of the fir-beech stand in the Mlacik state nature reserve, *vedecké a pedagogické aktuality*, 1, 1-162.
- Slak M.F., Suran J.C., 1981, Influence du traitement sylvicole "Futaie ou TSF" sur la richesse minérale du sol, *Mémoire ENGREF-INRA*, Nancy, 17 p. + ann.

5) – Conclusion

L'objectif initial de ce contrat était l'étude de cas d'impact de la sylviculture sur l'évolution des stocks et des flux de carbone afin de fournir des données pour la définition des valeurs de paramètres du modèle d'évolution des stocks de matière organique des sols (Arrouays et al., GICC, MATE).

Trois types d'impact avaient été retenus : effet âge du peuplement, effet amendement/fertilité et effet du traitement sylvicole.

Ces trois actions ont été menées et les principaux résultats ont été résumés dans les chapitres A, B et C de ce rapport. Les données correspondantes encodées ont été transmises aux équipes de la modélisation.

Les mesures réalisées dans le cadre des sites ateliers ou expérimentaux montrent que les stocks de carbone du sol (incluant les couches organiques) sont dépendants des caractéristiques des stations (sol, climat) et de l'espèce. La forte variabilité observée peut-être explicitée par des études intégrées à l'échelle de l'écosystème (la parcelle, taille de l'hectare) et sur la durée. Ceci n'est possible que dans le suivi sur le long terme d'observatoires des écosystèmes forestiers.

Les travaux menés dans les chronoséquences montrent que le carbone est immobilisé temporairement dans des compartiments de l'écosystème (sol, humus, branches, feuilles, tronc ou racines de l'arbre, ...) et que des flux, solide - liquide - gazeux, modifient perpétuellement les équilibres entre ces compartiments. Les actions anthropiques (sylviculture, pollution) ou les modifications climatiques déplacent ces équilibres.

Les résultats de travaux en cours, montrent que le changement d'aménagement sylvicole (passage du taillis à la futaie, rythme des éclaircies) modifie la dynamique de l'écosystème (changement du microclimat pour l'eau, la lumière, la température). Le carbone, une source d'énergie pour les micro-organismes du sol, va être mis à contribution et être transformé d'un état à un autre, transféré d'un compartiment à un autre. Par exemple, après une éclaircie, l'activité microbienne est accélérée sur les sols les plus acides, en particulier. La matière organique des humus et des couches holo-organiques du sol va être minéralisée. Le carbone, alors immobilisé dans le sol, va être libéré, une partie consommée par les micro-organismes, l'autre partie dégazée sous forme de CO₂ vers l'atmosphère. Mais cette minéralisation de la matière organique va conjointement libéré ses nutriments et l'éclaircie ayant réduit la compétition intra-arbre pour l'eau, la résultante sera une augmentation du niveau de fertilité du système. En conséquence, l'arbre va augmenter sa croissance et immobiliser dans sa biomasse du carbone supplémentaire. Cet effet a été clairement montré lorsque nous avons manipulé des écosystèmes forestiers par des amendements.

Des transferts sont observés, mais globalement nous n'avons pas mesuré de différences significatives sur les stocks.

Une autre leçon qui peut être tirée de nos travaux sur l'aménagement sylvicole et les chronoséquences est que sur les sols "riches" (sol à pH supérieur à 5.5; taux de saturation > 75%), l'activité biologiques est "naturellement" élevée et les stocks de carbone des humus sont faibles car la matière organique est incorporée rapidement au sol minéral par l'activité biologique. Les changements de sylviculture ont alors peu d'effet. Par contre, sur sol de faible fertilité, une forte proportion de la matière organique est concentrée dans les humus. Ces humus s'épaississent avec le vieillissement du peuplement mais le transfert vers le sol est faible, du fait de l'absence d'activité biologique efficace. Au moment d'une crise comme la coupe définitive ou d'une tempête comme celle subit en 1999, la forte minéralisation correspond à une perte de carbone hors de l'écosystème.

En résumé, l'effet âge se caractérise par le fait que le « SOL » n'est qu'une boîte (ou compartiment) d'un système. Il ne faut donc pas isoler cette « boîte » et par conséquent mener les études à l'échelle de l'écosystème. Elles doivent inclure les échelles temporelles (cycles saisonniers et annuels), en particulier celle de la rotation du peuplement, si l'on souhaite considérer des évolutions à long terme. La décennie est du court terme pour la forêt.

Pour les strates du peuplement (arbre, végétations arbustives ou herbacées) des modèles de stockage du carbone peuvent être établis en couplant le carbone aux modèles de croissance des arbres, et parallèlement calculer ceux nécessaires pour les strates herbacées ou arbustives (presque toujours ignorées !).

Pour le sol, la variabilité intra est forte et masque les mesures qui ont été réalisées. L'histoire ancienne des forêts semble être un facteur important de la caractérisation actuelle des stocks de carbone. Des études fines de caractérisations de la matière organique et de l'évaluation de son temps de résidence pourra, seule, permettre de progresser dans ce domaine.

L'effet sylviculture vient compliquer les règles précédemment établies en ajoutant une couche supplémentaire de complexité (de variabilité). Seule la mesure de nombreuses situations par la méthode de l'enquête, comparable à celle entreprise dans le cadre d'AGRIGES pour le sol, permettra d'accumuler des données que les statistiques modernes permettent d'interpréter. Mais c'est un travail fastidieux d'analyse pour peu d'intérêts scientifiques à court terme.

L'effet amendement/fertilité mesuré dans le cadre de ce contrat semble vérifié pour les autres sites du territoire français (travaux en cours entre Inra et ONF). Les seules modifications mesurables sur le court terme (10 à 20 ans) sont celles des couches organiques (humus). Aux niveaux des couches du sol (minérales), la variabilité masque à nouveau les évolutions. Mais ce sont des phénomènes lents que seul le suivi dans des observatoires permettra de définir.

Les travaux conduits par notre groupe restent à l'échelle du peuplement forestier c'est-à-dire à l'échelle dimensionnelle de l'hectare. La modélisation envisagée dans le cadre du contrat 2001 CARBOFOR considère les échelles régionales et nationales. Un gros travail de validation restera à faire et des outils de mesure des stocks et flux "réels" doivent être mis au point pour ces échelles avant même de pouvoir envisager la troisième dimension que représente le temps donc l'évolution des stocks de carbone.

Publications

AUGUSTO, L., RANGER, J., PONETTE, Q. & RAPP, M. (2000) : Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. *Ann. Sci. for.*, 57, 4 : 313-324. - 73 réf.

- KOERNER, W., CINOTTI, B., JUSSY, J.H. & BENOIT, M.** (2000) : Évolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX^e siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Rev. for. fr.*, LII, 3 : 249-269. - 42 réf.
- BONNEAU, M., BELKACEM, S., NYS, C., RANGER, J., GELHAYE, D., LEFÈVRE, Y. & HUMBERT, D.** (2000) : Évolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans. (Observatoire de la Qualité des Sols du Donon). *Etud. Gest. Sols*, 7, 2 : 99-118. - 29 réf.
- RANGER, J., BADEAU, V., DAMBRINE, E., DUPOUEY, J.L., NYS, C., PARTY, J.P., TURPAULT, M.P. & ULRICH, E.** (2000) : Évolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies. *Rev. for. fr.*, LII, n° Spéc. : "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture" : 49-70. - 52 réf.
- DUPOUEY, J.L., PIGNARD, G., BADEAU, V., THIMONIER, A., DHÔTE, J.F., NEPVEU, G., BERGÈS, L., AUGUSTO, L., BELKACEM, S. & NYS, C.** (2000) : Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises *Rev. for. fr.*, LII, n° Spéc. : "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture" : 139-154. - 33 réf
- MOARES DOMÍNGUEZ, C., SCIAMA, D., DAMBRINE, E., DUPOUEY, J.L., GÉGOUT, J.C. & BRÉCHET, C.** (2001) : Évolution des stocks de carbone et de la disponibilité de l'azote lors de la dynamique de recolonisation des prairies abandonnées du Jura. *Etud. Gest. Sols*, 8, 2 : 119-134. - 38 réf. (= CG173)
- NYS, C., DUPOUEY, J.L., ULRICH, E., BADEAU, V., JAMES, I., DIDIER, S. & GELHAYE, L.**, (2001 ?) : Stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers. *Rev. for. fr.*, (**soumis**)
- LEBRET, M., NYS, C. & FORGEARD, F.** (2001) : Litter production in an Atlantic beech (*Fagus silvatica*) time sequence. *Ann. for. Sci.*, 58,755-768.
- AUGUSTO, L., RANGER, J., DUPOUEY, J.L., TURPAULT, M.P.** (2000) : Le choix de l'essence par le gestionnaire : impact sur la fertilité chimique des sols. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy.(6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France). [Communication orale].
- BADEAU, V., DAMBRINE, E. & WALTER, C.** (2000) : Effets comparés de l'agriculture et de la forêt sur les propriétés des sols. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy . (6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France). [Communication orale & résumé].
- BELKACEM, S., DUPOUEY, J.L., BADEAU, V., NYS, C. & ULRICH, E.** (2000) : Evaluation du stock de carbone organique dans les écosystèmes forestiers : Impact de la sylviculture et des facteurs du milieu sur la variabilité. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy . (6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France). [Communication orale].
- COZZI, S.** (1999) : Comparaison de deux méthodes d'analyse de carbone. Étude du taux de carbone dans le peuplement. Rapport de maîtrise de l'Université de Nancy I : 30 p. + annexes
- DAMBRINE, E., DUPOUEY, J.L., MOARES, C. & LAFITTE, J.D.** (2000) : Effets de l'usage antique des sols sur l'écologie des forêts actuelles. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy . (6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France).: 5 p. [Texte & livret excursion].
- DUPOUEY, J.L., KOERNER, W. & DAMBRINE, E.** (2001) : Ancienneté et Naturalité des forêts : des critères déterminants pour la végétation forestière. Journées scientifiques et techniques "Gestion de la végétation forestière : enjeux et évolution" des 20, 21 & 22/06/2001 organisées par le +conseil Scientifique de l'INRA. (20-22/06/2001 ; Nancy, France). [Communication orale].
- GUILLAUME, N.** (2001) : Effets à moyen terme des apports en éléments fertilisants majeurs (N, P, K) et en calcium sur le sol expérience de Darney : une hêtraie des basses-Vosges. Rapport de stage BTS (50p).
- HAUBOIS, C.** (1999) : Effet de la sylviculture sur le stockage du carbone dans les sols forestiers et sur la diversité floristique en forêt de Champenoux (54). DS de Biologie Forestière, Univ. H. Poincaré Nancy I, 26 p.
- HUET, S., ÉPRON, D., TURPAULT, M.P., FORGEARD, F. & NYS, C.** (2001) : Contribution de la respiration du sol dans une Hêtraie de plaine. 3^{ème} Colloque Rhizosphère, Dijon 26-28 novembre 2001 [résumé, poster].
- JUSSY, J.H., KOERNER, W., MOARES, C., DAMBRINE, E., DUPOUEY, J.L., ZELLER, B. & BENOIT, M.** (2000) : Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy . (6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France). [Communication orale & résumé].

- MOARES, C., SCIAMA, D. , DAMBRINE, E., DUPOUEY, J.L. & ZELLER, B.** (2000) : Etude synchronique des propriétés des sols sur substrats calcaires au cours de l'évolution Terre cultivée-Forêt. "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 25-28 avril 2000, Nancy . (6 ; 25-28 avril 2000 ; Nancy, France). [Communication orale].
- NYS, C., RICHTER, C., PICARD, J.F. & RENAUD, J.P.** (2001) : Restauration des sols forestiers acides par un amendement calco-magnésien. Massif vosgien et Ardennes. Les cahiers du DSF, 4-2000 (La santé des forêts [France] en 1999) : 67-73. – 13 réf.
- NYS, C., RICHTER, C., PICARD, J.F. & RENAUD, J.P.** (2000) : Restoration of acidic forest soils in the Ardennes and Vosges mountains using lime. Its effects on ecosystem fertility. "Eurosoil 2000 Conference [Organized by the British Society of soil Science, held at University of Reading] (04-06 september 2000, Reading (United Kingdom)) : 2 p. [Poster & résumé].
- NYS, J., C.** (2001) : Expérience de chaulage sous forêt : bilan et perspectives. Colloque AFES "Acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise" des 04 & 05/04/2001 Ministère de l'Environnement. . (04 & 05/04/2001 ; Versailles, France). [Communication orale].

Disponibilité des données :

Les données restent la propriété des organismes qui en sont à l'origine.

Ils n'y a pas de base de données structurées en terme propre de "base de données". Il existe des fichiers (souvent au format EXCEL).

Ces données serviront pour la modélisation entreprise dans le contrat Carbofor.

Une base de données structurelle est prévue dans le cadre des ORE.

Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique GICC

APR 1999

3/99 - Effets de la Sylviculture sur le Stockage de Carbone dans les Sols Forestiers - Validation des Paramètres du Modèle d'Evolution des Stocks de Carbone

Coordinateurs : C. Nys

L'objectif initial de ce contrat était l'étude de cas d'impact de la sylviculture sur l'évolution des stocks et des flux de carbone afin de fournir des données pour la définition des valeurs de paramètres du modèle d'évolution des stocks de matière organique des sols (Arrouays et al., GICC, MATE). Trois types d'impact avaient été retenus : effet âge du peuplement, effet amendement/fertilité et effet du traitement sylvicole. Ces trois actions ont été menées et les principaux résultats ont été résumés dans les chapitres A, B et C de ce rapport. Les données correspondantes encodées ont été transmises aux équipes de la modélisation.

Les mesures réalisées dans le cadre des sites ateliers ou expérimentaux montrent que les stocks de carbone du sol (incluant les couches organiques) sont dépendants des caractéristiques des stations (sol, climat) et de l'espèce. La forte variabilité observée peut-être explicitée par des études intégrées à l'échelle de l'écosystème (la parcelle, taille de l'hectare) et sur la durée. Ceci n'est possible que dans le suivi sur le long terme d'observatoires des écosystèmes forestiers.

Les travaux menés dans les chronoséquences montrent que le carbone est immobilisé temporairement dans des compartiments de l'écosystème (sol, humus, branches, feuilles, tronc ou racines de l'arbre, ...) et que des flux, solide -

liquide - gazeux, modifient perpétuellement les équilibres entre ces compartiments. Les actions anthropiques (sylviculture, pollution) ou les modifications climatiques déplacent ces équilibres.

Les résultats de travaux en cours, montrent que le changement d'aménagement sylvicole (passage du taillis à la futaie, rythme des éclaircies) modifie la dynamique de l'écosystème (changement du microclimat pour l'eau, la lumière, la température). Le carbone, une source d'énergie pour les micro-organismes du sol, va être mis à contribution et être transformé d'un état à un autre, transféré d'un compartiment à un autre. Par exemple, après une éclaircie, l'activité microbienne est accélérée sur les sols les plus acides, en particulier. La matière organique des humus et des couches holo-organiques du sol va être minéralisée. Le carbone, alors immobilisé dans le sol, va être libéré, une partie consommée par les micro-organismes, l'autre partie dégazée sous forme de CO₂ vers l'atmosphère. Mais cette minéralisation de la matière organique va conjointement libéré ses nutriments et l'éclaircie ayant réduit la compétition intra-arbre pour l'eau, la résultante sera une augmentation du niveau de fertilité du système. En conséquence, l'arbre va augmenter sa croissance et immobiliser dans sa biomasse du carbone supplémentaire. Cet effet a été clairement montré lorsque nous avons manipulé des écosystèmes forestiers par des amendements.

Des transferts sont observés, mais globalement nous n'avons pas mesuré de différences significatives sur les stocks. Une autre leçon qui peut être tirée de nos travaux sur l'aménagement sylvicole et les chronoséquences est que sur les sols "riches" (sol à pH supérieur à 5.5; taux de saturation > 75%), l'activité biologiques est "naturellement" élevée et les stocks de carbone des humus sont faibles car la matière organique est incorporée rapidement au sol minéral par l'activité biologique. Les changements de sylviculture ont alors peu d'effet. Par contre, sur sol de faible fertilité, une forte proportion de la matière organique est concentrée dans les humus. Ces humus s'épaississent avec le vieillissement du peuplement mais le transfert vers le sol est faible, du fait de l'absence d'activité biologique efficace. Au moment d'une crise comme la coupe définitive ou d'une tempête comme celle

subit en 1999, la forte minéralisation correspond à une perte de carbone hors de l'écosystème.

En résumé, l'effet âge se caractérise par le fait que le "SOL" n'est qu'une boîte (ou compartiment) d'un système. Il ne faut donc pas isoler cette "boîte" et par conséquent mener les études à l'échelle de l'écosystème. Elles doivent inclure les échelles temporelles (cycles saisonniers et annuels), en particulier celle de la rotation du peuplement, si l'on souhaite considérer des évolutions à long terme. La décennie est du court terme pour la forêt.

Pour les strates du peuplement (arbre, végétations arbustives ou herbacées) des modèles de stockage du carbone peuvent être établis en couplant le carbone aux modèles de croissance des arbres, et parallèlement calculer ceux nécessaires pour les strates herbacées ou arbustives (presque toujours ignorées !).

Pour le sol, la variabilité intra est forte et masque les mesures qui ont été réalisées. L'histoire ancienne des forêts semble être un facteur important de la caractérisation actuelle des stocks de carbone. Des études fines de caractérisations de la matière organique et de l'évaluation de son temps de résidence pourra, seule, permettre de progresser dans ce domaine.

L'effet sylviculture vient compliquer les règles précédemment établies en ajoutant une couche supplémentaire de complexité (de variabilité). Seule la mesure de nombreuses situations par la méthode de l'enquête, comparable à celle entreprise dans le cadre d'AGRIGES pour le sol, permettra d'accumuler des données que les statistiques modernes permettent d'interpréter. Mais c'est un travail fastidieux d'analyse pour peu d'intérêts scientifiques à court terme. L'effet amendement/fertilité mesuré dans le cadre de ce contrat semble vérifié pour les autres sites du territoire français (travaux en cours entre Inra et ONF). Les seules modifications mesurables sur le court terme (10 à 20 ans) sont celles des couches organiques (humus). Aux niveaux des couches du sol (minérales), la variabilité masque à nouveau les évolutions. Mais ce sont des phénomènes lents que seul le suivi dans des observatoires permettra de définir.

Les travaux conduits par notre groupe restent à l'échelle du peuplement forestier c'est-à-dire à l'échelle dimensionnelle de l'hectare. La modélisation envisagée dans le cadre du contrat 2001 CARBOFOR considère les échelles régionales et nationales. Un gros travail de validation restera à faire et des outils de mesure des stocks et flux "réels" doivent être mis au point pour ces échelles avant même de pouvoir envisager la troisième dimension que représente le temps donc l'évolution des stocks de carbone.

Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers.

Données pour une validation des paramètres du modèle d'évolution des stocks de carbone.

C. Nys, D. Arrouays, JL. Dupouey, F. Forgeard, L. Gelhaye, C Hossann, S. Huet, M. Lebret, F. Le Tacon , JP. Renaud, C. Richter

Objectif : Fournir des données sur l'impact des changements d'aménagement sylvicole pour aider à la validation des paramètres du modèle d'évolution des réserves carbonées des sols forestiers.

Les facteurs pris en compte :

Effet Espèce
Effet du Traitement sylvicole
Effet Age du peuplement
Effet Fertilité

Contexte : Bilan et Gestion des Gaz à Effet de Serre dans l'espace rural

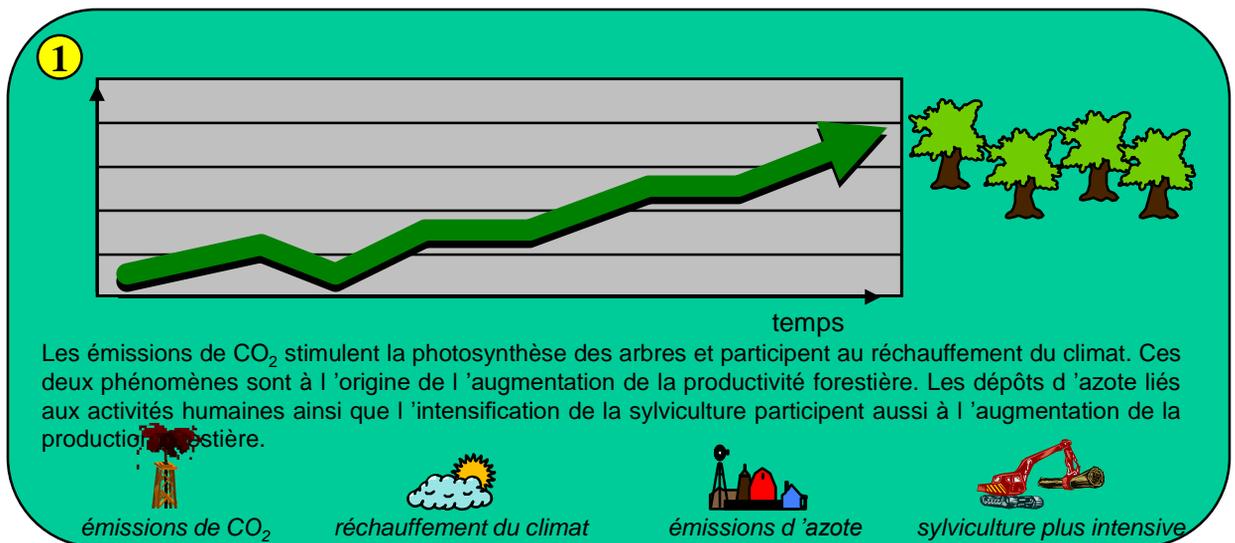
Evaluation des gaz à effet de serre

2 – Absorptions ou Emissions de CO₂ liées aux activités de boisement, de reboisement et de déboisement.

Question de Recherches :

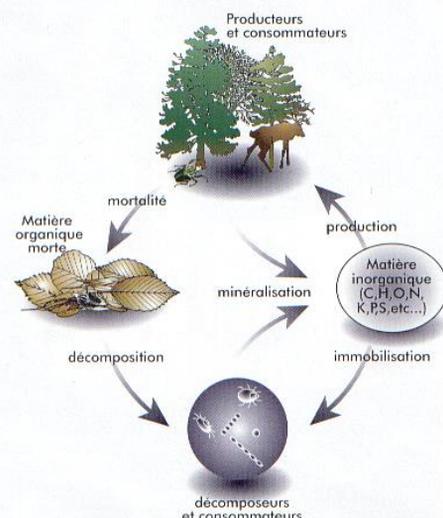
Les Ecosystèmes Forestiers peuvent-ils stocker plus de carbone ?
Quelle sylviculture peut favoriser cette dynamique de stockage ?
Les effets du stockage sont t'ils durables ?

OUI == Dans la biomasse aérienne ou souterraine
Par un gain de productivité



OUI == Dans la biomasse aérienne ou souterraine
Par une politique de Reboisement

« **OUI - MAIS** » car l'immobilisation ne sera que temporelle



? == Dans la matière organique des sols forestiers

Par une transformation des composés carbonés

Matériel et méthodes

Echantillonnage des couches organiques (Ol, Of, Oh) et des horizons du sol. 0 à 70 cm, répétitions par placette selon les études
Détermination de la densité apparente ou utilisation d'un modèle (Belkacem et al., 2000)
Analyses du carbone

Calcul des réserves

Effet ESPECE

→ Base de données « Carbone des sols forestiers » [AGRIGES]

Statistiques moyennes par ESPECES FORESTIERES

Effet TRAITEMENT SYLVICOLE

→ Site de Champenoux (Dupouey et al.) – conversion en 1856

Traitements sylvicoles :

Taillis-sous-Futaie

Taillis-sous-Futaie en conversion

Régénération avant coupe définitive

Fourré de 10 à 20 ans

Gaulis de 30 à 40 ans

Perchis de 50 à 60 ans

Futaie adulte de 120 ans

5 répétitions

Mesures :

Carbone, Lumière et LAI

Effet AGE du peuplement

Utilisation de la méthode de la chronoséquence

- ➔ Site d'Aubure : Epicéa commun – Région des Vosges – 3 âges : 10 ans, 30 ans et 85 ans (Dambrine et al.)
- ➔ Site de Vauxrenard : Douglas – Région du Beaujolais – 3 âges : 20 ans, 40 ans et 60 ans (Ranger et al.)
- ➔ Site de Melle : Châtaignier – Région Poitou – 5 âges : 2 ans, 5 ans, 9 ans, 15 ans et 19 ans (Ranger & Nys)
- ➔ Site de Fougères : Hêtre – Région Bretagne – 4 âges : 10 ans, 25 ans, 85 ans, 85 ans fertilisé et 145 ans (Nys et al.)

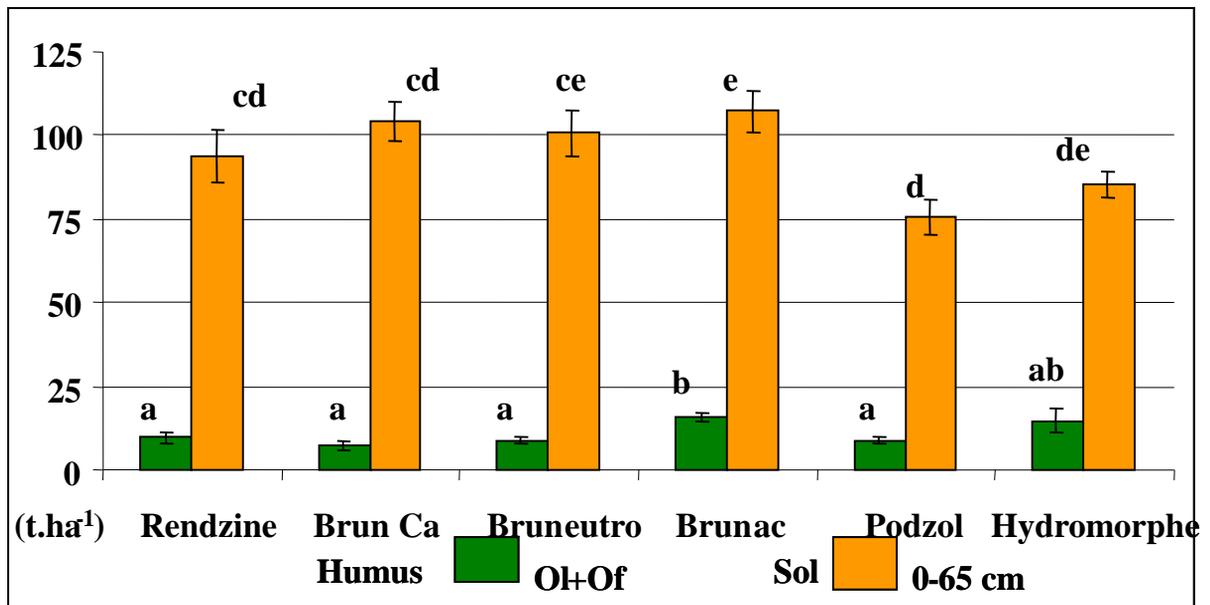
Effet AMENDEMENT / FERTILITE

Evaluation des réserves de carbone dans les traitements « Témoin » et « Amendé » des essais mis en place par l'ONF ou par l'INRA à l'occasion du programme DEFORPA (Pluies acides) dans les années 85.

- ➔ Traitement CaMg : Carbonate de Ca + MgO, ou dolomie
Tonnage variant de 1.5t/ha à 3 t/ha
40 Peuplements d'Epicéa commun ou de Sapin
Région des Vosges et des Ardennes

En prévision : ensemble des essais feuillus et résineux du territoire français sur feuillus et résineux épargnés par la tempête de 99 – Mise en place par M Bonneau puis C Nys depuis 1960.

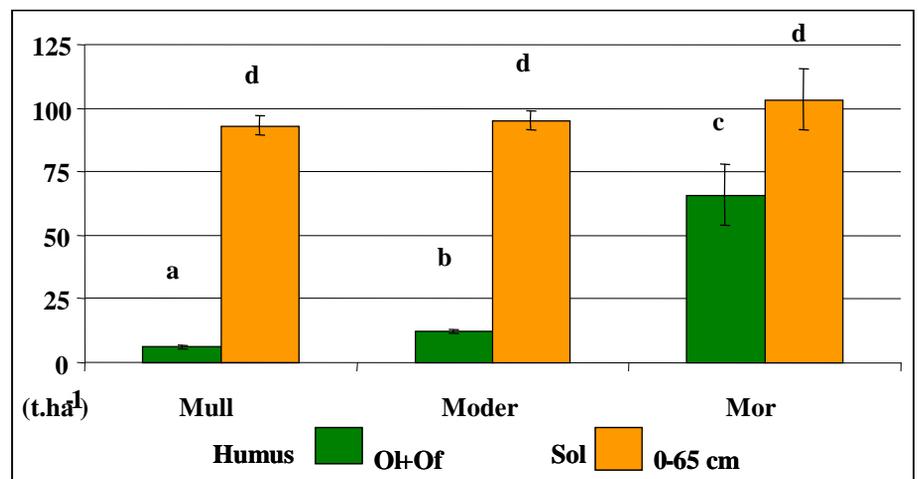
Rappel sur les réserves de carbone organique dans les sols forestiers



La réserve du sol est d'environ **90 tonnes de C / ha**. Les coefficients de variation vont de 30% pour les sols Bruns Acides à plus de 75% pour les sols saturés.

Les couches organiques représentent environ **20% (5 à 60 tonnes de C / ha)** des réserves.

Formes d'Humus



L'acidification des sols forestiers, par la dégradation des humus, joue le rôle de puits de carbone.

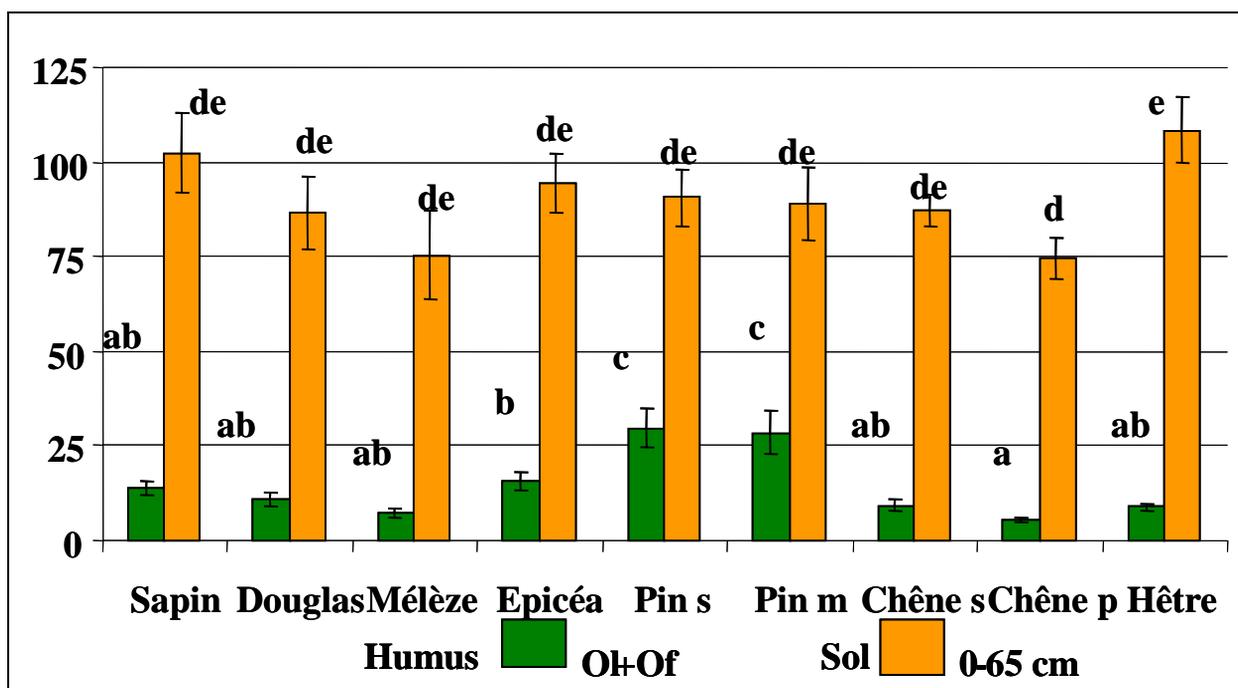
L'activation biologique, par un climat plus chaud et humide, jouera comme source de carbone.

Qui l'emportera ?

Effet de l'espèce sur les réserves de carbone organique dans les sols forestiers

L'effet de l'espèce (souvent l'action d'une seule rotation pour les espèces de reboisement Douglas, Mélèze, Epicéa) se caractérise par un **faible impact sur les couches minérales** (0 à 65 cm).

S'il y a effet, il est limité aux premiers horizons organo-minéraux (0 – 20 cm)



L'impact sur l'immobilisation dans les **couches organiques** est **hautement significatif**. Ceci est lié à la qualité intrinsèque des retombées de litières.

Environ **de 5 t/ha** pour les **CHÊNES**
 à **30 t/ha** pour les **PINS**

Modèle carbone : vers un outil d'estimation d'évolution des stocks de carbone sous les contraintes climatiques et humaines

Arrouays et al. ont été chargé d'une étude pour la Mission Inter-Ministérielle de l'Effet de Serre de la « Construction d'un modèle d'évolution des stocks de carbone organique des sols et évaluation des données disponibles pour sa validation ».

Ce modèle doit simuler la **dynamique à moyen et long terme du carbone des sols**.

Les entrées du modèle seront celles du climat, de la nature de la végétation, du type d'usage (définies à chaque pas de temps) et les caractéristiques permanentes des sols.

Les sorties seront les réserves de carbone et d'azote du sol à chaque pas de temps, les flux de carbone.

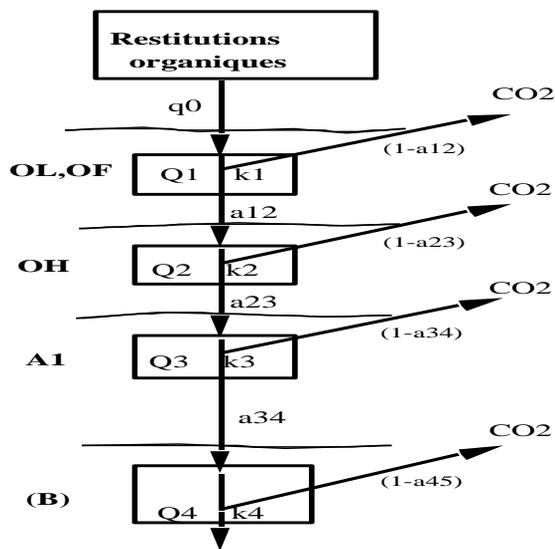


Schéma adaptatif aux sols forestiers du modèle MORGANE pour les sols agricoles (Balesdent et al.)

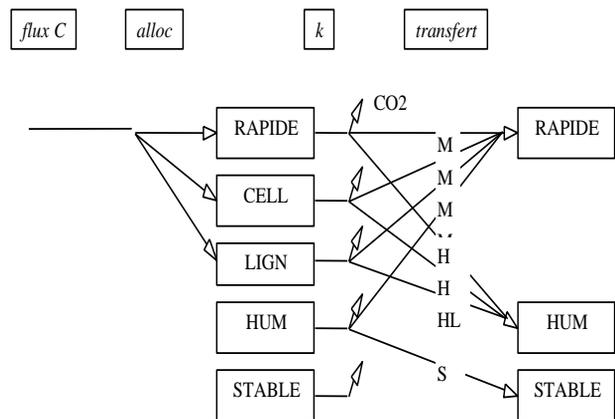


Figure : (a) Compartiments et flux dans un sol forestier et (b) détail pour un horizon

Equation Générale : elle est du type

$$DC_i/dt = \text{fluxC} * \text{alloc}_i - k_i * C_i + \sum_j \text{transfert}_{ij} * k_j * C_j$$

où "ki" = constante de vitesse de biodégradation du compartiment i.

C'est une fonction de : Humidité du sol ; Température de l'air ; Teneur en argiles du sol ; Type de sol ; **Usage du sol** (travail du sol, ...) ; **Fertilité** du sol

Effet du traitement sylvicole sur les variations des réserves de carbone organique dans les sols forestiers

Les structures forestières sont très fortement contrôlées par la sylviculture.

En forêt tempérée, les structures varient **horizontalement** (densité et régularité des peuplements et composition en espèces de la strate arborescente), **verticalement** (nombre et composition des strates, hauteur - et donc structure d'âge - des peuplements).

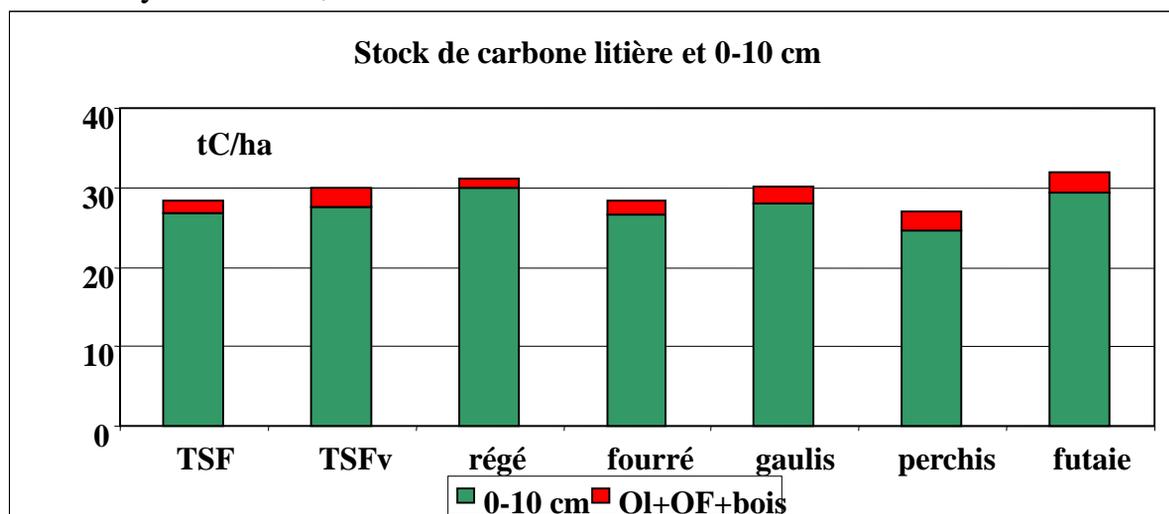
En France : deux principaux régimes en forêt feuillue sont le **taillis-sous-futaie** (> 4 millions d'hectares) et la **futaie régulière** (~ 2 millions d'hectares).

	TSF	TSFv	régé	fourré	gaulis	perchis	futaie
OI+OF (tMS/ha)	2,0	3,1	1,8	2,1	3,1	3,5	3,8
OI+OF+bois (tMS/ha)	3,5	5,2	2,9	4,1	5,2	5,3	5,8
[C] feuilles (%)	42,4	42,6	39,8	42,1	41,9	42,0	43,5
[C] total (%)	44,5	44,5	42,5	44,8	44,2	43,9	45,5
C tC/ha	1,5	2,3	1,2	1,8	2,3	2,3	2,7
C/N feuilles	33,0	31,0	32,0	29,7	30,9	33,0	31,7

Variations intégrées des stocks dans la litière sur l'ensemble d'une **révolution de 140 ans** = un stock moyen dans la **futaie de 2,3 tC/ha** ; = au **taillis-sous-futaie vieilli**.

Le régime en futaie, malgré des pertes en début de révolution, maintient un stock moyen de carbone, plus élevé que dans un **taillis-sous-futaie géré (1,5 tC/ha)**.

Le stock total de carbone incluant la litière et les horizons de surface ne varie que faiblement en fonction du stade sylvicole (P=0,09), et sans ordre apparent autour de la valeur moyenne de 29,6 tC/ha



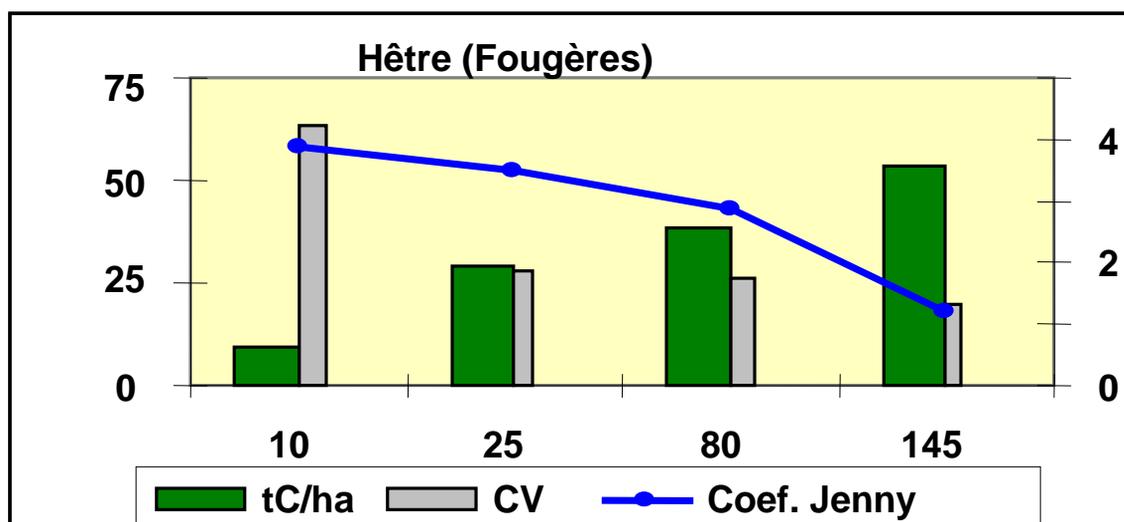
Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les sols forestiers

L'exemple du site atelier Hêtraie de plaine de Fougères (Bretagne) montre un stockage de matière organique tout au long de la rotation forestière : de 10 t de Matière Organique 10 ans après la coupe définitive, à 100 t/ha dans la vieille futaie (150 ans). [de 4 à 40 t de C/ha]

Soit un **puits de Carbone croissant avec l'âge du peuplement** conduit en sylviculture traditionnelle (Douce)

Mais

Une **source importante** de carbone au moment de la **régénération** puisque cela représente **90 %** de l'immobilisation dans les couches organiques.

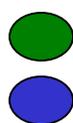
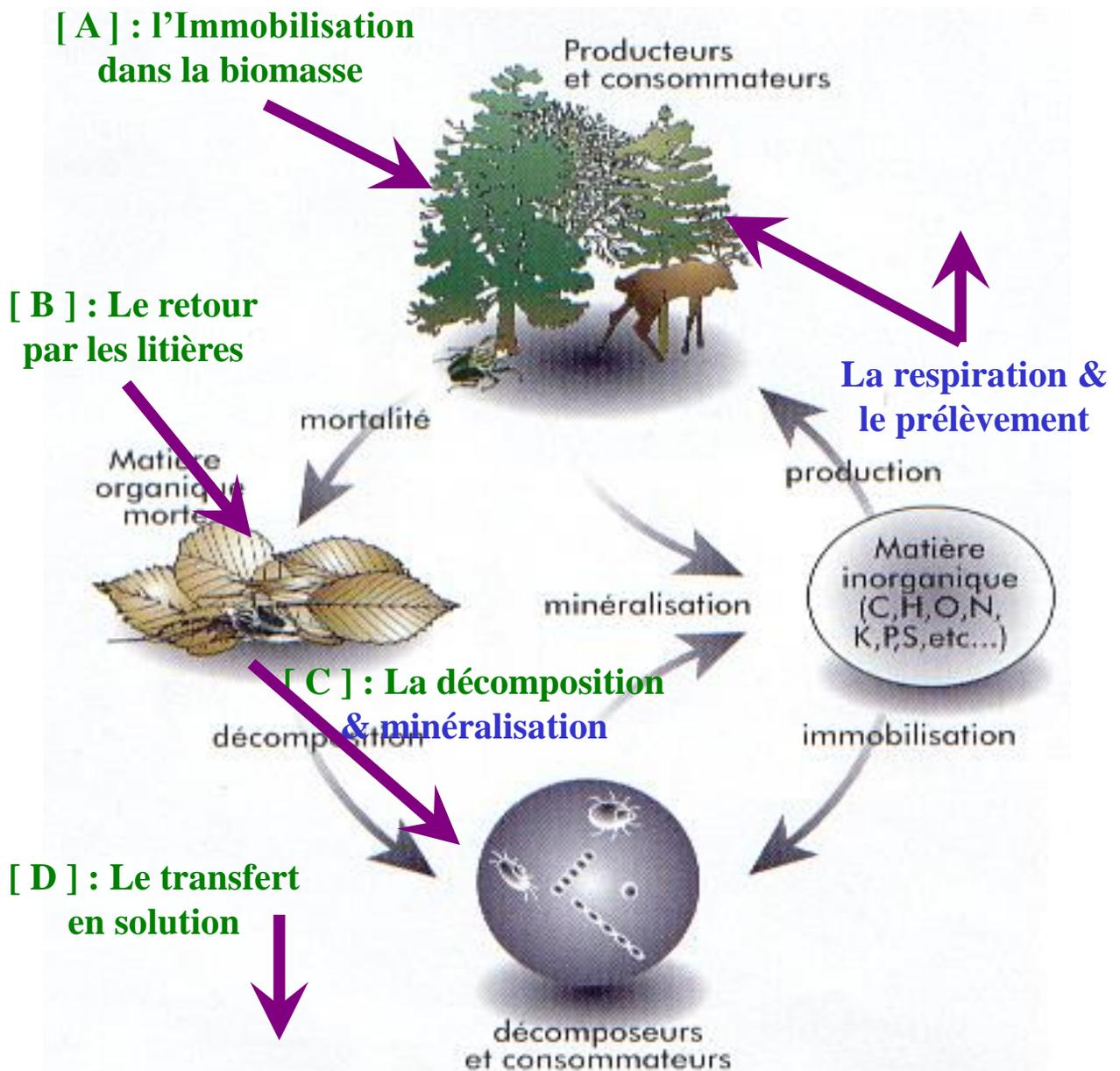


Le sol n'est qu'une des « boîtes » et l'accumulation dans les humus ne s'explique que par les flux d'échange

Il faut donc considérer l'écosystème « forêt » dans son entier

Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

Evaluation des variations dues à l'âge sur :



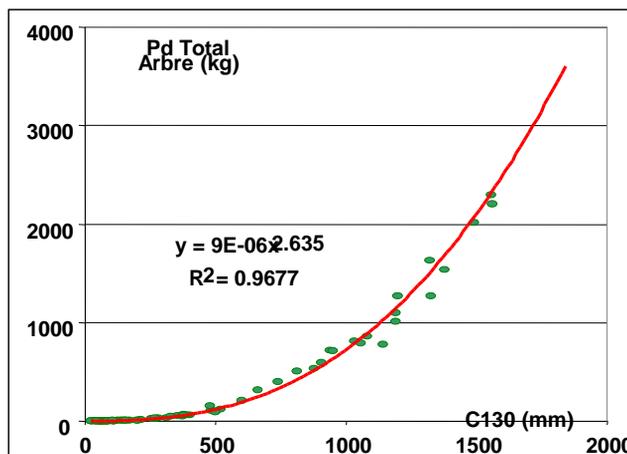
[x] contrat GICC

[x] contrat GEOSOL

Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

[A] : l'Immobilisation dans la biomasse

Dans la chronoséquence de Fougères, les biomasses compartimentées (Tronc, branches, feuilles ou bourgeons et pour des découpes 1, 4 et 7 cm) ont été évaluées. Des peuplements de 3, 8, 12, 25, 30, 81 et 145 ans ont été échantillonnés, de 6 à 16 arbres par peuplement. Matière sèche, carbone et nutriments ont été analysés.



Biomasse aérienne

liaison entre le C130 de l'arbre et sa masse totale de matière sèche : le modèle général appliqué est une fonction puissance, son R^2 est élevé :

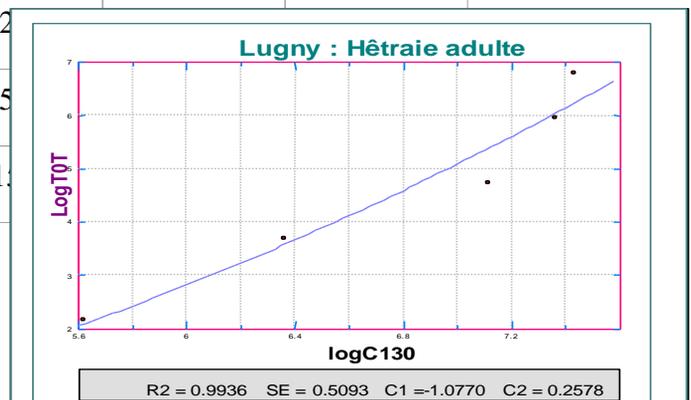
$$\text{Masse de l'arbre} = 9E-06 * (\text{C130})^{2.635} \quad [R^2 = 0.97]$$

Biomasse racinaire

(Merci la tempête)

C130 (mm)	Poids sec (kg) total racine	Poids sec (kg) Rac. Diam >7	Poids sec (kg) Rac. 4 à 7cm	Poids sec (kg) rac 1 à 4 cm	Poids sec (kg) rac < à 1 cm
275	8.6	5.5	1.6	0.9	0.6
578	40.2	31.6	1.2	5.7	1.7
1230	112.7	46.9	22		
1571	385.2	272.0	25		
1682	883.2	511.8	11		

Des données et des équations lourdes à acquérir

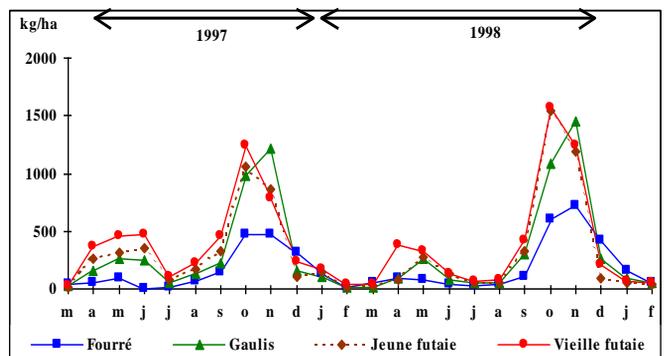
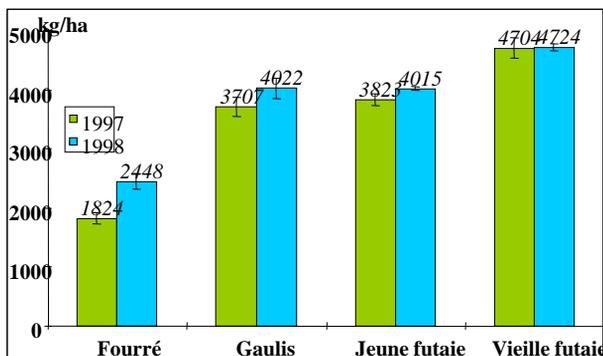


Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

[B] : Le retour par les litières

Le tri = >30 de catégories regroupées en 3 groupes :

- Les parties **végétatives** : les feuilles, le bois et les écaillés de bourgeons.
- ii)- Les parties **reproductrices** : les fleurs mâles du hêtre, les châtons du chêne, les fâines et cupules, les glands et leurs cupules, les mûres et les châtaignes.
- iii)- La catégorie **divers** : espèces muscinales, lichéniques et herbacées

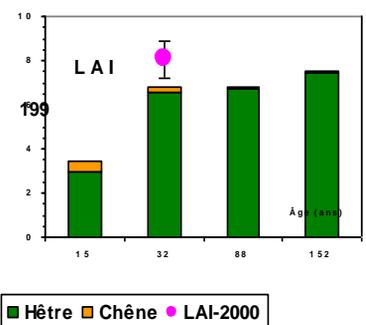


a : Production de litière Mat sèche (kg/ha ± se)

b : Suivi de la production mensuelle de litière

Retour + important = **vieille futaie** de **2.4 tC/ha/an**.
 Jeune futaie, 83 ans = 1.95 tC/ha/an
 Gaulis, 27 ans = 1.85 tC/ha/an
Fourré, 10 ans, Retour - important = **1.1 tC/ha/an**.

Les retombées de litières augmentent au cours de la révolution forestière.



Les feuilles de hêtre = 60-70 % des retombées pour les futaies et le gaulis
 ~ 50 % pour le fourré.

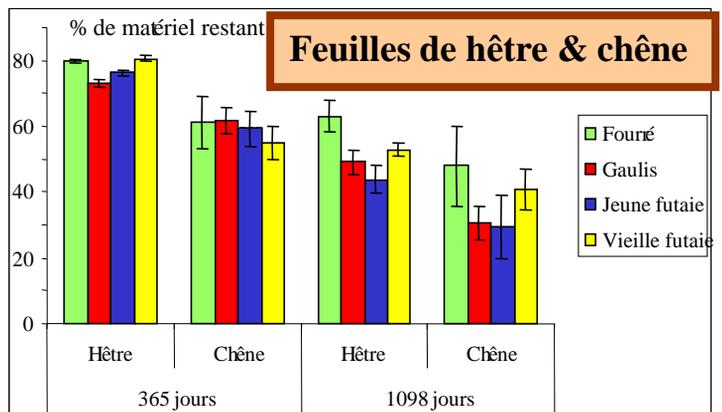
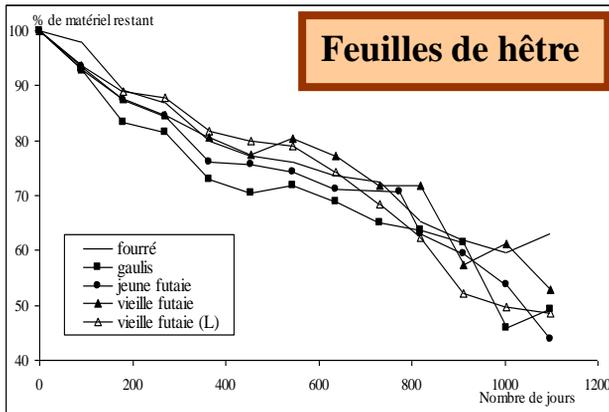
Les retombées de **bois** = 12 à 13 % de la jeune futaie à 8-9 % dans le fourré.
 force des **vents** supérieure à 50 km/h <==> les retombées de bois.

La **variabilité** intra peuplement == de **10 %** dans la jeune futaie à **33 %** dans le fourré.

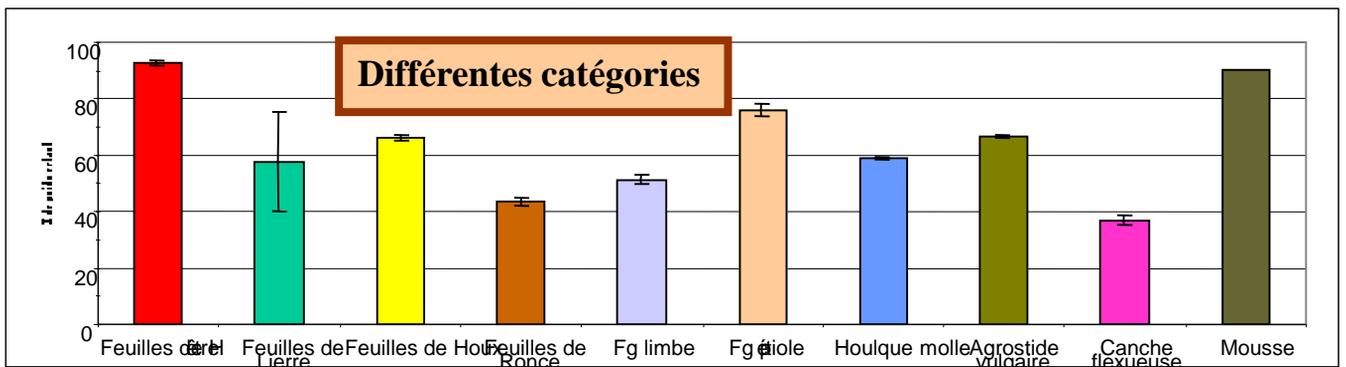
Bon indicateur pour le LAI

Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

[C] : La décomposition & minéralisation



Suivi de la décomposition en % de poids restant des feuilles de hêtre et de chêne.



Feuilles de hêtre

	Modèle linéaire		Modèle polynomial		Modèle de Olson	
	Equation de la droite	r ²	Equation de la droite	r ²	Equation de la droite	r ²
Fourré	y = 0,0411x	0,9239	y = -0,000016x ² + 0,0542x	0,9302	y = - 0,0817x	0,8779
Gaulis	y = 0,0492x	0,947	y = -0,000021x ² + 0,0674x	0,9555	y = - 0,10414x	0,8794
Jeune futaie	y = 0,0466x	0,9524	y = -0,0000085x ² + 0,0537x	0,9539	y = - 0,09572x	0,9173
Vieille futaie	y = 0,0411x	0,958	y = -0,0000059x ² + 0,0460x	0,959	y = - 0,08099x	0,9413
V. futaie Liège	y = 0,0471x	0,9558	y = -0,000085x ² + 0,0399x	0,9573	y = - 0,09905x	0,9026

Effet catégories > effet âge peuplement

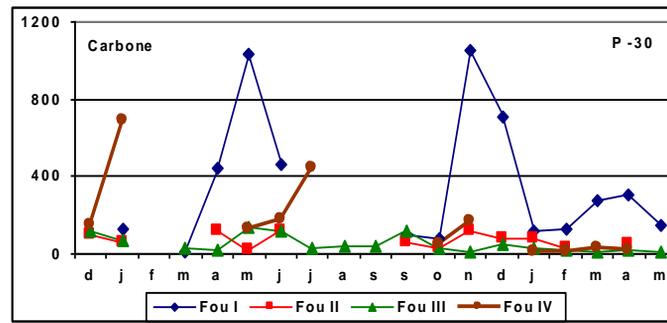
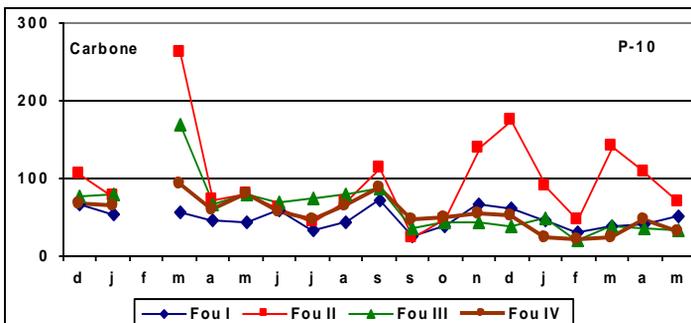
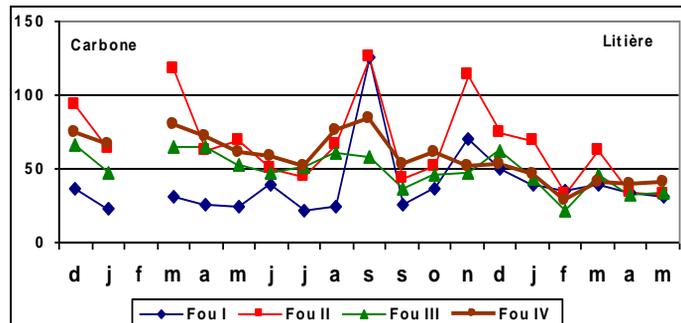
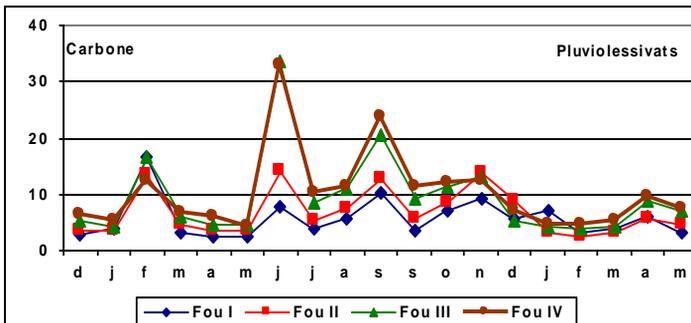
- ➔ Des données carbone par catégories
- ➔ Des équations de vitesse de décomposition par catégories

Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

[D] : Le transfert en solution

Les systèmes lysimétriques → mesurer les flux de carbone dans le sol + leur variation en fonction de la sylviculture.

Exemple : du site atelier "Hêtraie de plaine" de Fougères (35)

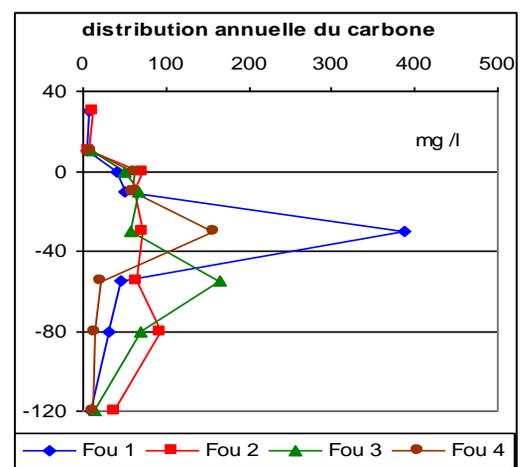


Forte **variabilité saisonnière** et des flux différents en fonction du niveau :

- faibles apports par les pluies incidentes,
- une augmentation depuis le niveau de la litière jusque vers -30cm de profondeur.

L'effet âge = **fonctionnement différencié** ; lié à la pédogénèse.

L'aspect quantitatif doit être développé : par un modèle hydrique (thèse).



Une faible part du carbone migre en solution, mais il s'immobilise dans le sol = stockage lent

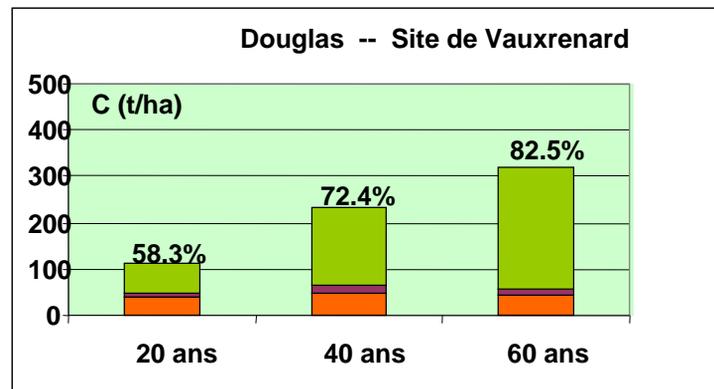
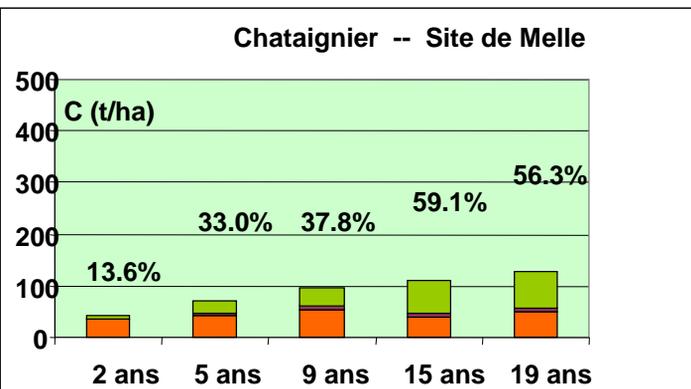
Gestion sylvicole (Histoire) et Effet de l'Age du peuplement sur les réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

les réserves dans l'écosystème : **la chronoséquence = un outil de mesure de l'évolution des stocks avec l'âge.**

→ il n'y a **pas de loi générale** d'évolution des réserves de carbone du sol et dans l'écosystème.

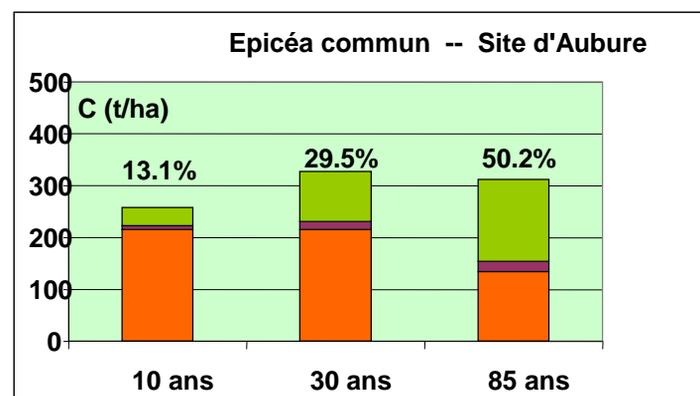
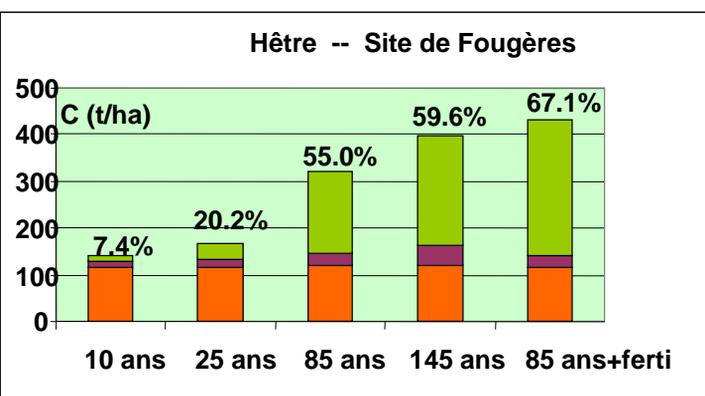
A Melle, pour du **châtaignier**, le stock est
A Vauxrenard, pour le **Douglas**, le stock est

faible → ancienne culture.
faible → ancienne culture.



sol Humus tot veg

% = rapport biomasse / sol



A Fougères, pour du **hêtre**, le stock constant dans le sol augmente avec l'âge dans l'humus ;
le stock est

moyen → ancienne forêt ;

A Aubure, pour l'**épicéa commun**, le stock est

élevé → ancien pâturage.

L'Histoire de la parcelle est déterminante

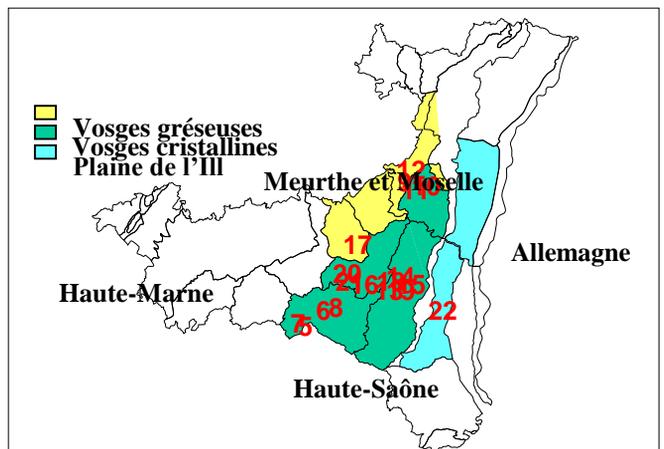
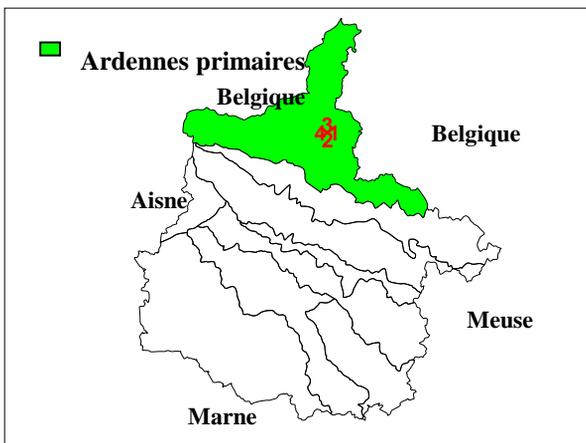
Manipulation de la FERTILITE et réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

Définition des amendements et fertilisants :

Les amendements (en particulier les carbonates de Ca et Mg) sont utilisés en forêt pour **lutter contre l'acidification des sols** (naturelles pour le prélèvement, anthropiques par les exploitations et les apports exogènes liés à la pollution). L'amendement joue par un **changement de la dynamique du cycle des éléments** en accélérant en particulier la minéralisation, c'est-à-dire la décomposition de la matière organique et sa transformation, et son transfert par les organismes (animaux) et les végétaux (racines, mycélium,...).

L'accélération de la décomposition de la matière organique des humus se traduit elle par un déstockage de carbone du sol ou bien par un transfert vers les horizons minéraux ?

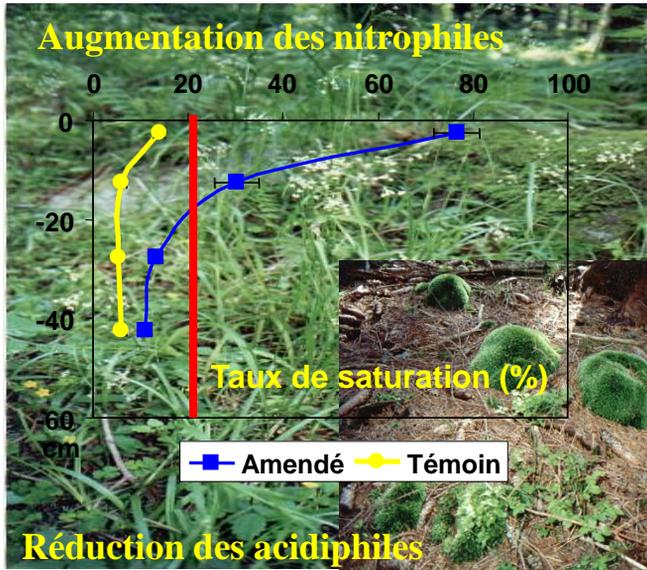
Secteur d'étude



45 couples Témoin -- Amendé ; ~2500kg/ha de $\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$

Manipulation de la FERTILITE et réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

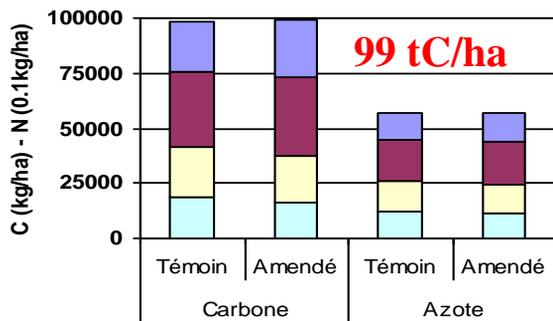
Les réserves dans l'humus



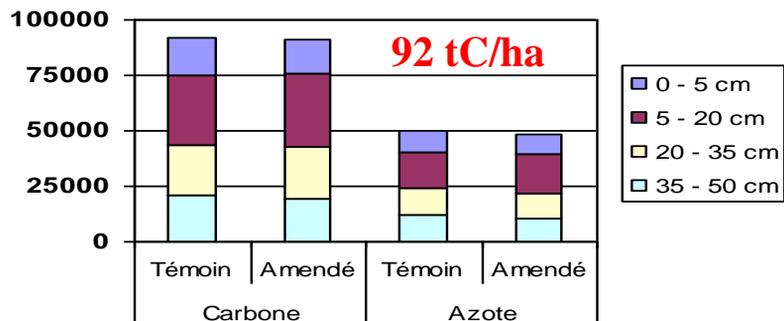
Espèce	Traitement	Carbone (tonne/ha)
Epicéa	Témoin	16
	Amendé	-40 % 10
Sapin	Témoin	6
	Amendé	-38 % 4



Les réserves du sol



Peuplements d'Epicéa



Peuplements de Sapin

Stocks moyens de carbone et d'azote du sol = pas affectés par l'amendement.

Effets **généralisables**, à conditions de station comparable, aux autres régions françaises (Massif-Central, Bretagne, Normandie) et pour des espèces non résineuses (Hêtre, Chêne).

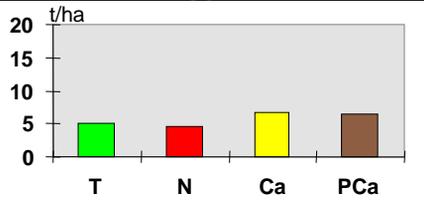
Transfert de matière organique vers l'horizon A1 sous l'action des **vers de terre** qui réapparaissent lorsque les conditions de **vie biologique s'améliore**.

Ces **évolutions** sont **très lentes**, d'où l'intérêt du suivi à long terme d'**observatoires**.

Manipulation de la FERTILITE et réserves de carbone organique dans les ECOSYSTEMES forestiers

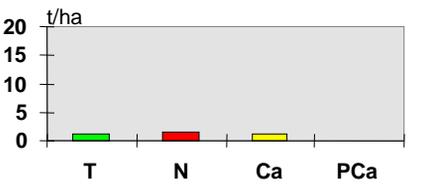
Bilan de carbone dans une pessière amendée

Aiguilles



$$\text{Ca} - \text{T} = +1.4 \text{ tC/ha}$$

Retour litière



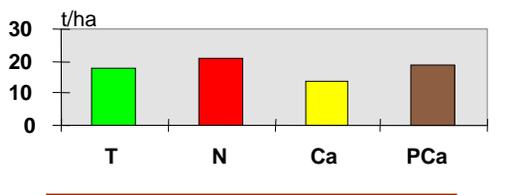
$$\text{Ca} - \text{T} = 0 \text{ tC/ha}$$

Sol

$$\text{Ca} - \text{T} = 0 \text{ tC/ha}$$

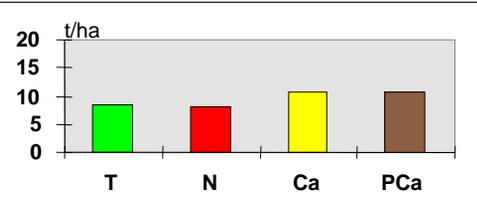


Humus



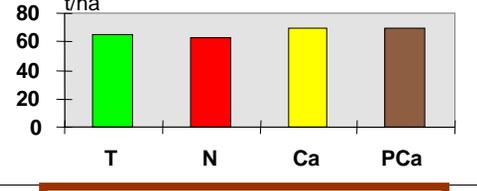
$$\text{Ca} - \text{T} = - 6.6 \text{ tC/ha}$$

Branches



$$\text{Ca} - \text{T} = +2.4 \text{ tC/ha}$$

Tronc



$$\text{Ca} - \text{T} = +4.9 \text{ tC/ha}$$

**Bilan Ca - T = +2.1 tC/ha après 7 ans
+5 tC/ha après 10 ans**

Protocole : Croix-Scaille (Ardennes)

- T : témoin sans engrais
- N : 2 * 100 kg/ha d'azote (ammonitrate)
- Ca : 2500 kg/ha de CaCO₃
- PCa : 150 kg/ha P₂O₅ + 1600 Kg/ha de CaCO₃

Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers.
Données pour une validation des paramètres du modèle d'évolution des stocks de carbone.

CONCLUSION

Dans les sols forestiers les changements de sylviculture semblent entraîner des modifications. Ces changements sont significatifs **uniquement** dans les **couches organiques et organo-minérales**.

Il y a des **transferts** de carbone entre le sol et la biomasse se traduisant par un **déplacement du compartiment de stockage** au cours de la rotation forestière. Les fonctions « Source ou Puits » ne peuvent être évalués que par des études à **l'échelle globale de l'écosystème**.

Le **passé historique** de la parcelle forestière est déterminant pour le niveau du stock et la stabilité de la matière organique de cette réserve.

La **stabilité de la matière organique** est très mal connue, c'est pourtant une caractéristique fondamentale pour une fonction de puits de carbone.

Besoin d'une **base de données** « Sol Forestier » sur un support de qualité !

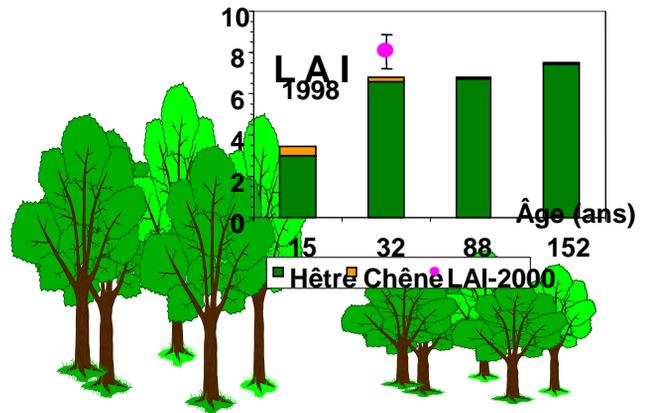
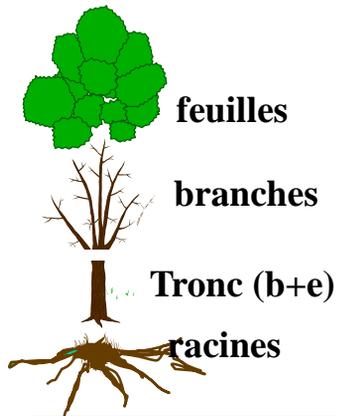
L'**outil modélisation** de l'évolution de la matière organique des sols sera un critère dans le **choix des écosystèmes et des sylvicultures** qui devront compléter notre échantillonnage.

Le nombre d'études est trop peu nombreux pour pouvoir généraliser.

Les sols forestiers :: un puits de carbone ?

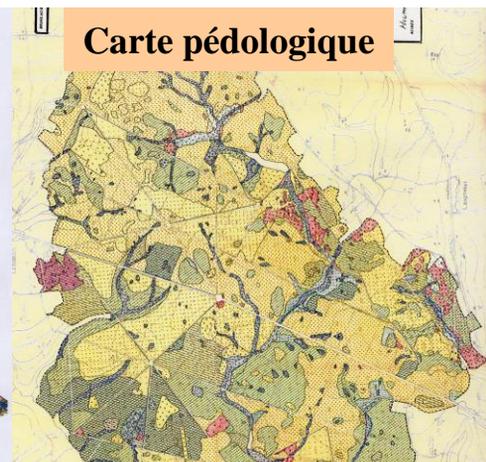
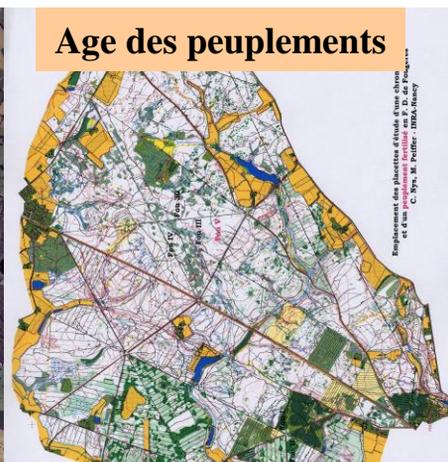
Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers.

Prospective :: Le changement d'échelle ::
De l'arbre → au peuplement → au massif forestier



De l'arbre au peuplement : on sait (presque) faire

Du peuplement au massif :
on essaye de modéliser [CARBOFOR],
mais il faudrait que l'on valide



De l'information cartographique existe, le SIG est un outil

Une étape indispensable pour la validation des observations
satellitaires au niveau national.

