

CARBONE et FORÊTS

REFLEXIONS et PROPOSITIONS

sur la DIVERSITE des

FILIERES CARBONEES FORESTIERES

**CONTRIBUTION ASSOCIATIVE à
la GESTION des ECOSYSTEMES FORESTIERS**

**FORÊTS
SAUVAGES**



**AGIR pour la
BIODIVERSITÉ**
RHÔNE-ALPES



Chêne pédonculé, bois des Allées de la Fondation Pierre Vérots (Dombes)

CARBONE et FORÊTS

REFLEXIONS et PROPOSITIONS

sur la DIVERSITE des

FILIERES CARBONEES FORESTIERES

**Contribution des APN
FS (Forêts Sauvages)
FRAPNA (Rhône-Alpes)
LPO (CoRA Rhône-Alpes)**

**Philippe LEBRETON
Rédacteur, février 2015**

CARBONE et FORETS

REFLEXIONS et PROPOSITIONS sur la DIVERSITE des FILIERES CARBONEES FORESTIERES

Résumé

Pendant plus d'une génération, dans le domaine forestier comme dans d'autres secteurs écologiques (l'énergie, l'eau, la pollution, la démographie...), les naturalistes (APN = Associations de Protection de la Nature) ont eu la nette impression de clamer dans le désert. Quelques frémissements se produisant de temps à autre, ils acceptent de (re)venir à une table de négociation et d'échanges, puisqu'il est parfois nécessaire d'espérer pour entreprendre.

1 / La complexité des forêts et de leur contexte actuel amène à considérer cinq filières-bois pour une approche rationnelle des problèmes : **La filière cellulose, la filière énergie, la filière matériau, la filière « aménités », la filière « carbonatée »**. Un dénominateur commun est celui de la structure biochimique du bois, de ses constituants et de ses dérivés (essentiellement cellulose et lignine), ainsi que de leur valeur énergétique appréciée par le degré d'oxydo-réduction de l'élément carbone.

2/ Un autre problème pratique est celui de **la conversion des volumes** ligneux estimés sur le terrain en **biomasse carbonée** (ou ses variantes massiques bois ou carbone), problème n'ayant reçu qu'assez récemment des réponses d'ailleurs plus techniques que scientifiques ; une distinction essentielle est à faire entre feuillus et résineux. Des coefficients de conversion sont disponibles, à partir desquels des **données volumiques, massiques et énergétiques du bois et de ses constituants** sont fournies pour les forêts de la Métropole.

3/ On aborde ensuite les notions et les réalités de **puits, stocks et flux de carbone**, aux deux niveaux mondial et français. Un compartiment essentiel de l'écosystème forestier a été jusqu'à présent sous-estimé, pour ne pas dire ignoré, celui du sol, **partie vivante hypogée** de la forêt, dont la masse peut atteindre les deux tiers de la biomasse totale : c'est la partie « inhumée de l'iceberg forestier » ! Les notions de fixation et de stockage doivent être bien appréhendées, car de **l'origine** (« noire, grise ou blanche ») et de **la durée d'immobilisation** du carbone utilisé par l'homme dépend la valeur des forêts vues comme moyen de lutte contre l'effet de serre.

4/ **Les services éco-systémiques** sont ensuite déclinés, avec quelques exemples significatifs. **Les aménités** globales sont diverses, aujourd'hui bien décrites mais loin d'être prises en compte : le rôle de fixation du gaz carbonique est essentiel, consécutivement celui de la régulation climatique avec celle du cycle de l'eau. **La biodiversité** est à mieux considérer, non seulement comme ressource, mais comme indicateur de notre propre ambiance. **La naturalité** est une préoccupation récente, plus immatérielle que la précédente en raison de sa dimension éthique ; elle est tout aussi voire plus importante encore pour notre espèce, si celle-ci veut, comme l'arbre, garder les pieds sur terre.

5/ Enfin, **critiques et propositions** sont faites, qui devraient permettre de voir les choses en face, en contournant « langue de bois » et « angélisme vert ». Les forêts françaises occupent aujourd'hui des surfaces appréciables ; nonobstant, leur volume sur pied est nettement inférieur à celui de nos voisins allemand ou suisse, ce qui devrait tempérer les illusions relatives à une large utilisation de notre biomasse ligneuse. **Une sectorisation réaliste des forêts** de France reste à définir, prélude à **une mutation forestière** dans les esprits et sur le terrain, public et

privé. De la sorte, des actions plus conformes à l'intérêt général à terme pourraient voir le jour par **un partage des informations et de moyens** entre les différents corps et secteurs de la société française. Mais l'exemple de l'agriculture (des agricultures...), gérée par le même ministère et le même corps d'Etat que la forêt (les forêts...), ne pousse guère à l'optimisme à ce propos ! Pourtant, de simple « usine à bois », la forêt est désormais à considérer, doublement, comme **un écosystème et comme un patrimoine**.

En conclusion, « la » forêt française est donc aujourd'hui placée devant l'alternative suivante : poursuivre une gestion relevant du XIX^{ème} siècle, lorsque le bois était un placement de père de famille et qu'il payait la forêt, ou **inventer et mettre en œuvre une forêt nouvelle** intégrant toutes les dimensions (économiques, sociétales et environnementales) indispensables au XXI^{ème} siècle ; tout ceci dans une optique d'utilisation et de **développement durable** des ressources naturelles.

Plan

Résumé	pp. 3-4
Considérations générales Manifeste. Introduction	pp. 5-6
I. Attendus préliminaires (les filières)	p. 7
II. Généralités quantitatives	
II.1. Validations énergétiques	p. 8
II.2. Eléments de biochimie forestière	p. 10
II.3. Valeurs massiques et énergétiques du bois et de ses constituants	p. 13
III. Stocks et mouvements du Carbone	
III.1. Puits et stocks forestiers	p. 16
III.2. Bois du dessus, carbone du dessous	p. 20
III.3. Mouvements du carbone	p. 22
III.4. Substitution carbonée	p. 25
IV. Services éco-systémiques	
IV.1. Aménités générales	p. 26
IV.2. Biodiversité	p. 31
IV.3. Naturalité	p. 37
V. Rationalités et Politiques forestières	
V.1. Les révolutions du carbone	p. 41
V.2. Pour une vision politique de la forêt	p. 48
VI. Propositions et Positions	p. 53
Références bibliographiques	p. 55
Remerciements	p. 57

Manifeste

Résumé

Pendant plus d'une génération, dans le domaine forestier comme dans d'autres secteurs écologiques (l'énergie, l'eau, la pollution, la démographie...), les naturalistes ont eu la nette impression de clamer dans le désert. Quelques frémissements se produisant de temps à autre, ils acceptent de (re)venir à une table de négociation et d'échanges, puisqu'il est parfois nécessaire d'espérer pour entreprendre.

Depuis plus d'une génération (humaine), les naturalistes proposent, ou demandent ; ils ont informé sur les pluies acides, sur l'éco-certification, sur le dérèglement climatique, la biodiversité, les aménités forestières, etc., documents et preuves à l'appui.

Depuis plus d'une génération aussi, les naturalistes ont participé à des réunions, des commissions, des symposiums, des congrès, des colloques, auxquels ont assisté des forestiers.

Depuis plus d'une génération encore, les naturalistes entendent les mêmes certitudes, les mêmes lieux communs ; *le bois doit payer la forêt, la trifonctionnalité de la forêt, l'équilibre agro-sylvo-cynégétique.*

Enfin, depuis plus d'une génération, les naturalistes informent, suggèrent, proposent que la forêt cesse d'être conjuguée au singulier, un singulier problème en tout cas ! La Loi Forêt en vigueur (2014), comme celles qui l'ont précédée, n'est pas encore une Loi Forêts ; il n'y a toujours qu'une Filière Bois, qu'un Conseil supérieur de la Forêt, qu'une Commission régionale de la forêt et des (!) produits forestiers. Pour autant, comme les anciennes Eaux-et-Forêts, l'ONF, Office national n'est pas de la Forêt. Comment s'y retrouver ?

Bref, une attitude monopolistique et figée, alors qu'au fil des ans, les naturalistes ont essayé toutes les tactiques de persuasion possibles, depuis le consensus à tout prix jusqu'au claquage de portes, mais sans beaucoup de résultats tangibles, si ce n'est la récupération de certaines idées dont la divine surprise de la biomasse (comme EdF découvrant, 30 ans après, que le chauffage électrique est la réponse à l'effet de serre...). Pourtant, quelques frémissements sont perceptibles, quelques jeunes esprits apparaissent (bien que tout cela ne soit pas seulement question d'âge...), qui nous laissent encore espérer, et même persévérer.

D'où les lignes et données qui suivent. Certains s'indigneront, d'autres hausseront les épaules, d'autres réfléchiront, d'autres trouveront matière à une délectation parfois morose. Qu'il y ait ici à boire et à manger, c'est certain ; et même à laisser, sans aucun doute ; mais peut-être aussi à prendre. Bonne lecture...

Introduction

Bien avant l'invention par l'homme des matières plastiques ou des matériaux composites, la nature avait fabriqué le bois, matériau doté de propriétés étonnantes : meilleur isolant et insonorisant que les métaux, il résiste aussi bien aux champignons ou aux insectes (s'il est convenablement entretenu) que le fer à la rouille ; en cas d'incendie, une (vraie) charpente en bois n'est pas plus sensible au feu que des poutrelles métalliques ; des poteaux téléphoniques en bois économisent devises et énergie par rapport aux poteaux en aluminium, et sans piéger les petits oiseaux nicheurs...

Outre ses usages traditionnels (chauffage, construction, papier), les emplois du bois peuvent encore s'étendre grâce aux moyens physiques et chimiques offerts par la science et par la technique ; et si les ordinateurs ont besoin de silice pour leurs composants électroniques, ils consomment encore du bois... pour le papier de leurs imprimantes.

Mais la marine à voile est loin, très loin derrière nous, même s'il y a peu de temps encore « la forêt payait le bois » et qu'il suffisait d'une coupe pour marier sa fille. Dans un contexte d'économie mondialisée, insuffisamment compensée aux plans social et environnemental, la matière première provenant du Canada ou de Russie est rendue moins cher au port de Rouen qu'il n'en coûte à acheminer, par les routes du Massif central, la production résineuse du F.F.N. jusqu'aux usines de Tarascon ! Les coûts et les prix ne laissent guère d'espoir à et égard, car les dépenses en main d'œuvre ou en mécanisation augmentent, tandis que la valeur du bois ne retrouvera sans doute jamais (en monnaie constante) ce qu'elle était il y a une génération humaine.

Ainsi, le rapport des opérations de dépressage compense au mieux celui des prestations correspondantes, tandis que les techniques de sciage « imposent » depuis l'aval une sélection économiquement - mais pas écologiquement - « rentable ». Tout ceci sans oublier de prendre en compte les conséquences d'évènements climatiques qui n'ont eux-mêmes guère de raison de s'apaiser, comme la baisse des cours résultant de la mise sur le marché, même étalée, de l'équivalent de trois années de récolte, après les tempêtes de décembre 1999. Bref, la mondialisation a délocalisé le placement de père de famille des trois millions de petits propriétaires que connaît (pour longtemps encore ?) la forêt française.

La forêt française est donc aujourd'hui placée devant l'alternative suivante : poursuivre une gestion relevant du XIX^{ème} siècle, lorsque le bois était un placement de père de famille et qu'il payait (encore) la forêt, ou inventer et mettre en oeuvre une forêt nouvelle intégrant toutes les dimensions (économiques, sociétales et environnementales) indispensables au XXI^{ème} siècle ; tout ceci dans une optique d'utilisation et de développement durables des ressources naturelles.

I. Attendus préliminaires

Résumé

La complexité des forêts et de leur contexte actuel amène à considérer cinq filières-bois pour une approche rationnelle des problèmes : **La filière cellulose, la filière énergie, la filière matériau, la filière « aménités », la filière « carbonatée ».**

La conséquence primordiale de l'obligatoire évolution de la gestion des forêts est l'explosion de la notion de « filière bois » en autant de « filières forêts », ou de « filières carbone », qu'il existe d'utilisations ou d'utilités du produit bois.

On distinguera ainsi :

1/ **La filière cellulose**, où l'industrie papetière privilégie l'un des polymères du biomatériau bois.

2/ **La filière énergie**, où l'autre macromolécule, la lignine, constituant de capacité calorifique un peu supérieure à celle de la cellulose, participe à la biomasse considérée comme matière première renouvelable.

3/ **La filière matériau**, où le bois, matériau « composite » au sens technique et industriel, garde toute sa valeur traditionnelle et vise de nouveaux emplois (comme le bois thermiquement rétififié de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne), même si nos charpentes privilégient désormais les poutrelles plus que les poutres. Les rémanents ligneux (ici, prosaïquement, les branches) constituent un matériau d'avenir (DODELIN *et al.*, 2008).

4/ **La filière « aménités »**, où le carbone CO₂ devient l'indicateur d'autres produits des « vieilles » forêts (= matures), avec des aménités allant des plus concrètes aux plus qualitatives : la lutte contre l'effet de serre (et ses conséquences sur les dérèglements climatiques et le cycle de l'eau), les produits non-ligneux (la faune, dont le gibier, coûteux ; la fonge et les micro-organismes, gratuits), la biodiversité / naturalité des sylvi-systèmes), les valeurs immatérielles (tourisme et récréation, éthique et psychisme humain).

5/ On peut même parler d'une **filière « carbonatée »** (carbonate de calcium), qui séquestre plus de la moitié du CO₂ anthropogénique, en voyant (poétiquement...) dans les coraux, survolés par des poissons, l'équivalent marin de taillis terrestres, animés par des oiseaux...

D'autres considérations découlent ce qui précède, qui permettent de développer le propos. Un minimum de connaissances, de notions et de vocabulaire doit être commun aux utilisateurs (= exploitants, gestionnaires, usagers, chercheurs, etc.) de la forêt, à commencer par la description et l'appréciation cohérentes des diverses formes carbonées en cause.

Ainsi, y a-t-il un fossé pratique entre des notions comme le volume de bois (exprimé par exemple comme Vm^3 / ha), un indicateur technique, et sa biomasse (exprimée en matière sèche MS ou, en « entrant dans l'arbre », en tonne de carbone, et même de cellulose, lignine, etc.), plus scientifique. Les deux ont leur valeur, mais il conviendrait de pouvoir, savoir et vouloir passer de l'un à l'autre, quand il le faut.

II. Généralités quantitatives

Résumé : Un dénominateur commun est celui de la **structure biochimique** du bois et de ses constituants (essentiellement cellulose et lignine), ainsi que de leur **valeur énergétique** appréciée par le degré d'oxydo-réduction de l'élément carbone. Un autre problème pratique est celui de la **conversion des volumes** ligneux estimés sur le terrain en **biomasse carbonée** (ou ses variantes massiques bois ou carbone), problème n'ayant reçu qu'assez récemment des réponses d'ailleurs plus techniques que scientifiques ; une distinction essentielle est celle à faire entre feuillus et résineux. Des coefficients de conversion sont disponibles, à partir desquels des **données volumiques, massiques et énergétiques du bois et de ses constituants** sont fournies pour nos forêts.

II.1. Validations énergétiques

A première vue, le forestier pourrait être tenté de privilégier le carbone comme source d'énergie dans le produit bois (bûches, plaquettes, sciure, etc.). Mais, sans le moindre traitement statistique, le tableau 1 joint, où figure notamment (dernière colonne) le pouvoir calorifique (= énergétique) des diverses formes carbonées, biologiques ou fossiles, dont s'abreuve ou que génère notre société développée, nous indique qu'il n'y a aucune corrélation entre valeur énergétique et teneur en carbone des molécules en cause : en bas du classement, le gaz carbonique est certes le moins riche en cet élément, mais le carbone-graphite est au milieu du classement, et le méthane, situé en tête, n'est qu'au quatrième rang en teneur carbonée sur les neuf molécules envisagées. Cette première approche omet en effet la présence d'un autre élément : l'hydrogène, plus dense en énergie ; le tout sans oublier l'élément pénalisant qu'est l'oxygène, comburant et non combustible, même si le total des trois éléments dans la biomasse sèche est très proche de 100 % (Tableau 1).

Substance	Formule	Masse M	C %	° RedOx	Kcal / g
méthane	CH ₄	16	75,0%	-4	12,05
octane	C ₈ H ₁₈	114	84,2%	-2,25	10,62
éthanol	C ₂ H ₆ O	46	52,2%	-2	7,10
β-pinene	C ₁₀ H ₁₆	136	88,2%	-1,60	10,90
carbone	C	12	100,0%	0	7,85
glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	180	40,0%	0	4,14
cellulose	C ₅ H ₁₀ O ₅	162	44,4%	0	3,74
monoxyde	CO	28	42,9%	2	2,41
dioxyde C	CO ₂	44	27,3%	4	0,00

Dans ces conditions, ne serait-il pas plus simple d'obtenir directement les valeurs énergétiques par le truchement en laboratoire de la bombe calorimétrique (comme « enthalpie standard de combustion ») ? Outre le fait que cette pratique n'a rien de très quotidien, tout résultat expérimental mérite d'être assis théoriquement. Pour cela, les formes moléculaires étant électriquement neutres (= dépourvues de charges), et les ions H⁺ et O²⁻ engagés ayant perdu dans leurs combinaisons leurs charges électriques respectives + 1 et - 2, il en résulte que, non seulement la molécule d'eau H₂O est effectivement neutre, mais que les deux formes extrêmes de l'atome de Carbone (toutes deux gazeuses), à savoir le méthane et le gaz carbonique, représentent respectivement le maximum et le minimum énergétique de cet élément. Le méthane CH₄ est la forme la plus réduite, donc la plus énergétique, avec un niveau d'oxydo-réduction

(° RedOx) égal à - 4 ; l'inverse évidemment pour le gaz carbonique CO₂ avec un niveau égal à + 4, le moins énergétique possible, égal à zéro. Ainsi, de même que l'eau est-elle la « cendre » de l'hydrogène, de même le gaz carbonique est-il celle du carbone, dont il n'y a plus rien à tirer (sauf quelques inconvénients, mais c'est là une autre histoire...).

Appliqué à sept autres molécules carbonées (dont le carbone lui-même), cet approche théorique permet de tracer la courbe la plus moyenne possible de la relation structure moléculaire / valeur énergétique de cet élément vital, industriel et écologique par excellence (ramenée à 1 g de matière et exprimée en kcal) (*). Si la droite obtenue (figure 1) traduit une relation de proportionnalité linéaire hautement significative (risque statistique inférieur à 1 p. mille), elle n'est pas parfaitement prédictive, car certaines espèces chimiques du carbone s'en écartent assez nettement, dont le Carbone lui-même, doté d'une enthalpie expérimentale égale à 7,85 kcal / g contre 5,85 kcal / g calculée à partir de la droite de régression (une sous-estimation de 25 %). S'il est vrai que le carbone est ici la seule molécule mono-atomique, l'écart est du même ordre de grandeur pour l'éthanol (28 %), mais en sens inverse (= sur-estimation) : calculé 9,1 kcal contre 7,1 expérimentalement.

(*) Le Joule J est l'unité légale de l'énergie mais, en raison de l'aspect « calorique » de celle-ci, familière aux biologistes (du diététicien à l'écologue de terrain), on lui préférera ici la calorie, reliée au Joule par le classique coefficient multiplicateur 4,185.

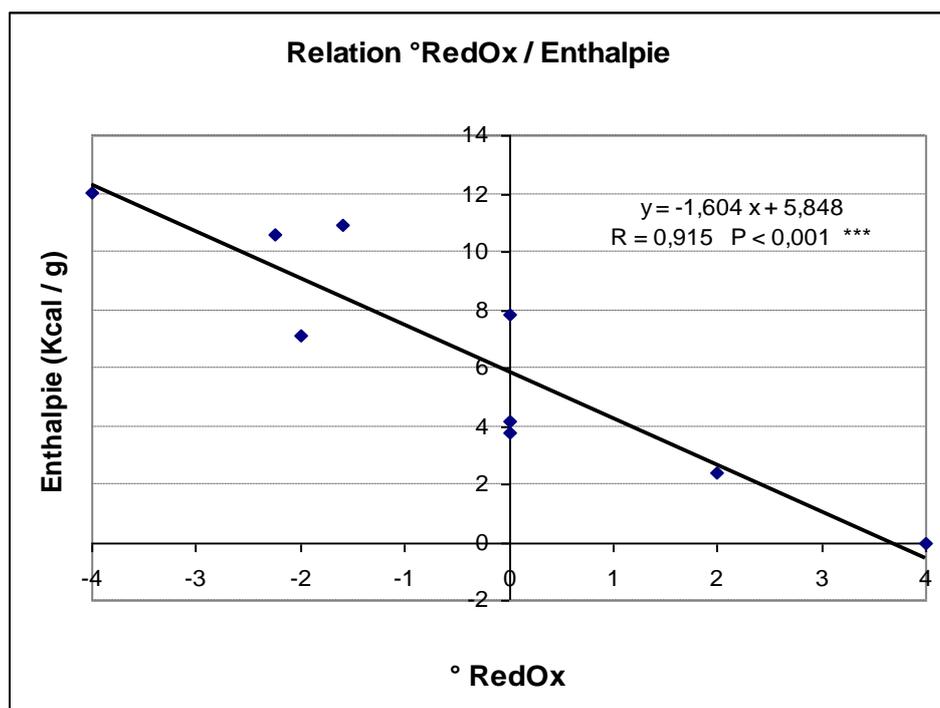


Figure 1 Relation linéaire entre niveau d'oxydo-réduction et pouvoir énergétique (voir tableau 1, colonnes 5 et 6, pour l'identification des points)

Quoi qu'il en soit, il n'y a pas d'inversion de signe dans le nuage des points carbonés (c'est-à-dire qu'aucune molécule ne franchit indûment le point médian (zéro) de l'échelle énergétique), et il y a fort à penser que les valeurs obtenues par calcul pour les « molécules » structurellement apparentées telles que polysides, lignine, bois et biomasse végétale seront comparables entre elles à des erreurs tout au plus de second ordre (voir ci-après). A noter qu'en fin de compte, c'est donc le surplus (ou le défaut) en hydrogène par rapport à la combinaison neutre H₂O qui

détermine le niveau RedOx du Carbone ; cet indice « intra-moléculaire » a donc l'avantage d'être indépendant de la teneur en eau de l'échantillon, à cela près cependant que celle-ci en abaisse d'autant la « densité » énergétique (= kcal / g) par rapport à celle du matériel anhydre. Le tableau 2 sera peut-être utile pour permettre de passer d'une unité à l'autre, avec une note facultative pour les puristes (ou pour les passionnés).

Tableau 2 **Quelques compléments sur les unités énergétiques, leurs conversions et leurs utilisations**

	kcal kilocalorie	kJ kilojoule	kWh kilowatt.heure	kep kilo-équivalent-pétrole
kcal	1	0,239	860	10 000
kJ	4,185	1	3 600	41 850
kWh	$11,63 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1	11,6
kep	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$0,239 \cdot 10^{-4}$	0,086 (*)	1

Mode d'emploi : pour convertir une unité en une autre, entrer (en haut) dans la colonne de la première choisie, puis lire à l'intersection avec la ligne de la seconde. Exemple : 1 kilocalorie = 4,185 kilojoule.

Remarque : pour éviter le piège des décimales, nous avons choisi un seul mode de conversion pour les petits nombres, à savoir le $10\ 000^{\text{ème}} = 10^{-4}$; les initiés pourront choisir d'autres expressions des exposants.

Note : les équivalences sont ici strictement thermiques (premier principe de la thermodynamique). Si l'on veut parler de kWh « électriques », il faut savoir que, dans une centrale thermique brûlant du bois (du pétrole ou de l'uranium), seul un tiers (environ) de l'énergie du combustible est converti en électricité, les deux autres tiers partant en chaleur dans la rivière ou dans les tours de refroidissement (second principe de la thermodynamique). Dans ce cas, 1 kep = 3,87 kWh(é) + 7,73 kWh(th) (= 6666 kcal de pollution thermique).

(*) Un kep (1 kilogramme de « pétrole ») correspond à *ca.* 1,20 litre de gazole, d'où l'équivalence approchée 1 litre de gazole = 10 kWh (utile à connaître pour mesurer la faible autonomie des voitures électriques).

Complément (pour les « caloristes ») : de même qu'un kep vaut 10 000 kilocalories, de même un kilogramme de glucose (et, par extension, de « sucre », de cellulose, de bois anhydre ou de matière végétale sèche = MS) vaut-il (en première approximation, *vide infra*) environ 4 000 kilocalories.

II.2. Éléments de biochimie forestière

La hiérarchie des relations, depuis la structure moléculaire des composés du carbone jusqu'à l'équilibre des espèces et des ensembles écologiques, sera peut-être l'idée dominante de l'avenir. Joseph NEEDHAM (Order and Life, 1936).

II.2.1. Un matériau exceptionnel. Pour le biochimiste et l'ingénieur, le bois présente une structure étonnamment moderne, véritable matériau composite fondé sur la réticulation tridimensionnelle de deux bio-polymères (macro-molécules), la cellulose et la lignine (mieux, des celluloses et des lignines). Les premières sont assez simples, directement dérivées de la photosynthèse par polymérisation linéaire du glucose : la cellulose « vraie », ou d'autres sucres de base, hexoses ou pentoses : les hémi-celluloses. Il s'agit de métabolisme primaire, de métabolisme secondaire pour les lignines, plus complexes, résultant de la polymérisation tridimensionnelle de précurseurs phénoliques, les alcools p-hydroxy-cinnamique, coniférylique et sinapique ; les deux derniers diffèrent du premier par l'adjonction d'un ou deux groupements méthoxyles, de grande signification systématique (*vide infra*). Les champignons dits lignivores

(« mangeurs de bois ») connaissent d'ailleurs cette dualité biochimique (osides *versus* polyphénols) puisqu'ils se rangent en deux catégories principales, traditionnellement dites de « pourriture blanche » et de « pourriture brun-rouge », voire « cubique ». L'extraction aqueuse des pourritures rouges est limpide ; celle des blanches est colorée en jaune. Dans tous les cas, tanins et / ou résines (*vide infra*), hostiles aux protéines enzymatiques des parasites, jouent le rôle de molécules naturelles de défense.

II.2.2. Les constituants biochimiques du bois (voir tableau 3 sous II 2.4.)

Le constituant principal du bois, la cellulose, est aisément accessible à l'état pur et présente donc une structure et des propriétés parfaitement connues ; il en est presque de même pour les autres polyosides du bois, groupés sous le nom d'hémi-celluloses, polymérisés à partir d'autres hexoses que le glucose, dont le mannose, ou de pentoses comme le xylose. Par suite de la perte d'une molécule d'eau résultant de la polymérisation d'un hexose monomère (glucose + galactose ou mannose selon le cas), le pourcentage de carbone est de 11 % plus élevé (en valeur relative) dans la macromolécule obtenue (cellulose ou hémi-celluloses *pro parte*) chez les résineux ; chez les feuillus, où un pentose, le xylose, domine dans les hémi-celluloses, la « densification » carbonée augmente même de 16 % par rapport à l'ose initial.

La lignine (ou, plutôt, les lignines, car leur structure varie, certes au second ordre, selon qu'il s'agit de résineux = Conifères, Gymnospermes, ou de feuillus = Angiospermes, Dicotylédones ligneuses) est une macromolécule plus complexe que la cellulose. Difficilement isolable à l'état pur, elle est fondée sur la polymérisation oxydative de monomères dits « mono-lignols », porteurs d'un ou de deux groupements méthoxyles (-O-CH₃) (*). Les Résineux ne contiennent quasiment qu'un seul type de lignine, avec un seul méthoxyle, comme le gaiacol (un phénol simple) d'où le symbole G donné à leur lignine ; les Feuillus y ajoutent une part sensiblement égale de lignine avec deux méthoxyles, d'où le symbole S attaché à cette dernière (par référence à l'alcool syringique, synonyme sinapique, un homologue phénolique).

(*) Il s'agit d'alcools cinnamiques en C₆-C₃, formés d'une chaîne (insaturée) à trois atomes de carbone greffée sur un noyau benzénique hydroxylé en position para. On parle de structure phényl-propane C₆-C₃.

Autres constituants phénoliques, les tanins, qui relèvent de deux types structuraux : les tanins dits condensés, seuls présents chez les résineux, résultent de la polymérisation de substances flavaniques (pro-anthocyanes et catéchines) ; les tanins dits hydrolysables, dérivés de l'acide gallique et de son dimère, l'acide ellagique, liés à des sucres ; ils ne sont présents que chez des feuillus, à des teneurs très variables, et dans l'écorce plus que dans le bois. Mais, de même que les feuillus cumulent lignines G et S, ils peuvent posséder des tanins hydrolysables et condensés (p. ex. les Fagacées : chênes et châtaignier). A la mort des feuilles, tanins et fractions de lignine se combinent avec les protéines d'où des complexes résistant à la biodégradation (sauf par les vers anéciques et les champignons du genre *Collybia*) ; le carbone y est alors piégé sous forme d'humus dont les constituants (acides humiques, fulviques) sont difficilement biodégradables. Ainsi, plus l'humus est vieux, plus le sol est-il riche en carbone, inégalement réparti dans les strates (les « horizons ») pédologiques (cf. REFORA, 2015, p. 3 ; voir aussi pour schémas et précisions techniques : Wikipédia : « Horizon / Pédologie » et « Sol / Pédologie »).

Les résines se rapprochent des hydrocarbures, très pauvres en oxygène car fondées sur une chaîne partiellement insaturée à 4 atomes de carbone porteuse d'un groupement méthyle latéral sur le carbone n° 2 (motif isoprène C₅H₈, méthyl-C₄). La condensation très variée de ce motif donne naissance, avec ou sans oxygène, à la vaste famille des terpénoïdes, de 10 atomes de carbone (exemple, le β-pinène) à de nombreux atomes (exemple, le caoutchouc), propriété quasi exclusive des résineux (à l'exception de l'hévéa...). On ne confondra pas les résines, liposolubles, avec les gommes, hydrosolubles car de nature polyosidique (comme les mannanes

(*) La lignine est un peu plus abondante chez les Résineux (cf. tableau 3 *infra*), mais sa mono-méthoxylation la rend un peu moins énergétique que celle des Feuillus, ceci compensant sensiblement cela. De même la moindre teneur en pentosanes des Résineux est-elle compensée par leur forte teneur en hexosanes,, ainsi qu'en résines terpéniques plus énergétiques.

En pratique, les valeurs indiquées (surtout celles des lignines) ne sont pas précises à mieux que 1% (en valeur relative) et chaque cas particulier demandera une approche proportionnée aux exigences du propos. Certaines données strictement forestières sont entachées d'approximations ou de pertes d'information par agrégation nettement supérieures, car il existe autant de valeurs qu'il existe d'espèces d'arbres et, à l'intérieur de chacune, de conditions de croissance, de récolte et de conservation, sans parler de l'âge, ou de la texture (bois « durs » *versus* « bois tendres ») des échantillons. Pour autant, la variabilité biologique n'est en rien opposable à la rigueur du laboratoire, car il ne convient en aucun cas d'ajouter l'erreur à l'incertitude.

II. 3. Valeurs massiques et énergétiques du bois et de ses constituants

De diverses analyses (Laboratoires de Grenoble, Toulouse, Lausanne) découlent les teneurs en molécules organiques de bois secs (anhydres) de résineux et de feuillus (Tableau 3).

Molécules	RESINEUX	FEUILLUS	Tableau 3
Glucose			
Cellulose	30 %	34 %	
Xylose	11 %	29 %	
Arabinose	3 %	2 %	
Pentosanes	14 %	31 %	
Mannose	13 %	2 %	
Galactose	11 %	3 %	
Hexosanes	24 %	5 %	
Hémi-celluloses	38 %	36 %	
Lignine de type H	5 %	5 %	
Lignine de type G	95 %	45 %	
Lignine de type S	-	50 %	
Lignines	26 %	22 %	
TOTAL partiel	94 %	92 %	
Tanins	3 %	5 %	
Résines	3 %	-	
Minéraux	1-2 %	1-2 %	
TOTAL général	100 %	100 %	

Les différences significatives ont été portées en **gras** : richesse des feuillus en xylanes et en lignine syringique, richesse des résineux en hexosanes et en lignine (teneur absolue et lignine de type G). Pour la valeur énergétique, les teneurs sont à moduler par l'enthalpie de chaque forme moléculaire, exprimée en kcal / g. (Voir Tableau 4)

Valeurs énergétiques des formes moléculaires constitutives du bois		
(en kilocalories par gramme de matière anhydre)		
- Holosides :	Glucose = 3,74 kcal / g	Cellulose = 4,15 kcal / g
	Hexosanes = 4,15 kcal / g	Pentosanes = 4,25 kcal / g
- Tanins hydrolysables = 6,6 kcal / g		- Tanins condensés = 4,0 kcal / g
- Lignines = 6,3 kcal / g	- Terpénoïdes = 8,3 kcal / g	- Bois = 4,7 kcal / g

Compensations prises en compte et dispersions biologiques et analytiques considérées, il devient illusoire de distinguer entre elles les lignines ou les héli-celluloses de feuillus ou de résineux, si bien que parler « du » bois est une approximation parfaitement pragmatique (du moins en l'état actuel de nos connaissances scientifiques comme de nos exigences de terrain) (*). La valeur énergétique du « bois moyen » sec (= 12 % d'humidité résiduelle) est donc à multiplier par 0,89 pour passer au bois anhydre, alors plus directement comparable aux charbons et hydrocarbures.

(*) A noter (ce qui ne simplifie pas les choses) que le bois caulinaire (des tiges) et le bois raméal (des rameaux) ont des lignines très différentes, hautement polymérisées dans le premier cas, peu ou pas dans le second, donc plus facilement digestibles par les animaux et les champignons (TOUTAIN, 1981).

Un autre problème est de passer des valeurs « traditionnelles » d'estimation du volume (épigé) sur pied (et « sur écorce ») des arbres en forêts, à la masse de bois correspondante (et de là à ses expressions en énergie), en distinguant le cas morphologiquement, physiologiquement et écologiquement bien distinct des feuillus et des résineux. Mais *il est difficile d'établir des formules génériques de passage du volume de bois fort IFN (m³) à la quantité de carbone contenue dans l'arbre (t C) (L'IF, n° 27, 2011)*. Ce n'est qu'assez récemment que cette question préliminaire sous-jacente a commencé à recevoir des réponses scientifiquement mieux fondées. Si l'on compare les deux rapports français (LOUSTAU *et al.*, 2004) et suisse (TAVERNA, HOFNER *et al.*, 2007) disponibles, la démarche est quasi identique (allant au-delà du problème initial de la « séquestration », avec deux autres parties vouées au « stockage » et à la « substitution »), mais avec des coefficients de conversion des volumes ligneux (sur écorce) en masses ligneuses significativement différents, même de second ordre.

En ce qui concerne la prise en compte du bois « raméal » (DBH = diamètres à 1,30 m ≤ 7,5 cm non considérés), le rapport suisse se contente d'une fourchette (coefficient allant de 1,46 à 1,70) alors que le rapport français a l'avantage de distinguer bois feuillus et résineux, affectés d'une valeur particulière dite facteur d'expansion des branches (**FEB**). La moyenne de la fourchette suisse : 1,58 +/- 0,12, et celle des deux valeurs françaises : 1,511 (feuillus F) et 1,335 (résineux R), soit 1,47 +/- 0,14, se recoupent en partie, avec une zone 1,46 à 1,61 centrée sur 1,52. Nous privilégierons la distinction F / R, en majorant (très) légèrement les valeurs françaises, aboutissant à un coefficient égal à **1,62** pour les feuillus et **1,35** pour les résineux.

En ce qui concerne la conversion volume / masse, celle-ci définie comme du bois anhydre (alors que le bois « sec » contient autour de 12 % d'humidité résiduelle), elle revient à déterminer la masse spécifique, ou densité, dénommée « infra-densité **If** » dans le rapport français, où les valeurs proposées sont 0,546 t / m³ pour les feuillus (plus denses, donc) et 0,438 pour les résineux ; les valeurs suisses sont 0,556 (F) et 0,385 (R). On adoptera donc les valeurs (arrondies à 2 décimales) **0,55** (F) et **0,41** (R). A ce niveau, le coefficient multiplicateur du Volume à la Masse ligneuse ici retenu est donc égal à **0,89** pour les feuillus, et **0,55** pour les résineux. La différence est donc très importante entre feuillus et résineux (coefficient F / R = 1,6), découlant en grande partie de ce que la croissance des résineux, par ailleurs appréciée de bien des forestiers pour des raisons financières ou psychologiques, est plus rapide (toutes choses égales par ailleurs, dont le climat) que celle des feuillus ; il en résulte un bois moins « serré », donc moins dense. Exemple parmi d'autres de l'éternel dilemme quantité / qualité, notamment chez nous le Sapin de Vancouver *versus* le Sapin d'Europe ou le Chêne rouge d'Amérique *versus* le Chêne rouvre) (*).

(*) Il a évidemment une relation entre ces coefficients de conversion et les densités du bois des mêmes espèces. Pour les feuillus « denses » (chênes, charme, châtaignier, hêtre, etc.), ce dernier paramètre vaut en moyenne **0,71** + / - 0,10 t / m³ (mais seulement 0,46 + / - 0,05 pour des feuillus « légers » comme les peupliers hybrides ou le tilleul), contre **0,50** + / - 0,05 pour les résineux (moyennes d'une trentaine de valeurs issues de l'aval de la filière-bois).

En ce qui concerne la teneur en Carbone dans le bois anhydre, on adoptera la valeur **0,50** retenue (par facilité ?) par la plupart des auteurs ; nos propres estimations tombent dans la fourchette générale. En fin de compte, le coefficient de conversion **V** (m³) en **M** (tonne C) est égal à **0,445** pour les **Feuillus** et **0,275** pour les **Résineux**. Exprimés en biomasse végétale (matière sèche MS) assimilée à du glucose (cf. photosynthèse), ces coefficients respectifs deviennent respectivement (multiplication par 30 / 12 = 2,50) **1,11** et **0,69** ; en gaz carbonique (multiplication par 44 / 12 = 3,67), **1,63** et **1,01**.

Si l'on voulait exprimer de telles équivalences pour « le bois » considéré comme une seule et même entité biochimique, alors le coefficient moyen (pour des masses égales de bois feuillus et résineux) serait-il voisin de **0,36** : 1 m³ de bois = 0,36 tonne de Carbone = 1,32 tonne de gaz carbonique. On trouve en effet souvent l'équivalence 1 m³ de bois = 1 tonne de CO₂. En fait, si cette valeur commode est exacte pour les résineux (puisque 0,275 x 3,67 = 1,01 tonne de gaz carbonique), elle reste donc loin de la vérité pour les feuillus, en péjorisant leur pouvoir fixateur.

III. Stocks et mouvements du Carbone

Résumé : On aborde ici les notions et les réalités de **puits, stocks et flux de carbone**, aux deux niveaux mondial et français. Un compartiment essentiel de l'écosystème forestier a été jusqu'à présent sous-estimé, pour ne pas dire ignoré, celui du sol, **partie vivante hypogée** de la forêt, dont la masse peut atteindre les deux tiers de la biomasse totale : c'est « la partie inhumée de l'iceberg forestier » ! Les notions de fixation et de stockage doivent être bien appréhendées, car de **l'origine** (« noire, grise ou blanche ») et de **la durée d'immobilisation** du carbone utilisé par l'homme dépend la valeur des forêts comme moyen de lutte contre l'effet de serre.

III.1. Puits et stocks forestiers

Le bois mais aussi le sol et une partie de la nécro-masse végétale, animale, fongique et microbienne des forêts tempérées constituent le puits de carbone le plus important pour les terres émergées. De manière générale, les sols, plus encore que les végétaux (même en forêt), sont les premiers puits de carbone, tant qu'ils ne sont pas surexploités, érodés ou dégradés. (Wikipedia, Puits de carbone, 2014).

La profession forestière a comme légitime habitude d'estimer la production ligneuse des forêts à partir de données morphologiques accessibles sur le terrain. Que l'on passe par la hauteur et le diamètre, ou par la surface terrière, les densités de matière ligneuse s'expriment alors logiquement en unités de volume par unité de surface, puis en tonnage (de bois, de matière sèche, ou de carbone) ou **stock**. Si l'on prend en compte la durée de cette production (généralement l'année), on doit parler de productivité (= vitesse) pour estimer les **flux** de matière ; on parlera de densité de productivité pour qualifier ce que l'agriculteur appelle tout bonnement, mais improprement, le rendement (par exemple, 100 quintaux de maïs / ha / an).

Mais, dans la mesure où le « bois » ainsi considéré est un matériau multiforme et complexe, cette formulation volumique, si elle permet à la filière traditionnelle un fonctionnement empirique satisfaisant, n'est plus adaptée à répondre de manière adéquate à d'autres finalités ; la biomasse en est un exemple (même si le mot a été détourné de son sens initial). La matière sèche répond aux besoins des biologistes, la teneur en carbone à celle des énergéticiens, la teneur en CO₂ aux climatologues. Toutes ces expressions quantitatives nécessitent d'autres approches, heureusement convertibles de manière rigoureuse (cf. II.2.2.), contrairement aux valeurs forestières traditionnelles.

III.1.1. Au niveau du Monde

La forêt mondiale, stockeuse de carbone

A la fin des années 1970, la forêt couvrait dans le Monde quelque 48 millions de km² (WOODWELL, 1978), dont *ca* 35 % pour les forêts équatoriales humides, 15 % pour les forêts tropicales sèches, 25 % pour les forêts tempérées (feuillus et conifères) et 25 % pour les forêts boréales (conifères). Quelque 40 années plus tard (FAO, 2005), le total ne s'élève plus qu'à 39 millions de km², soit un peu plus du quart des terres émergées. La diminution annuelle moyenne sur cette longue période se serait donc élevée à 0,23 millions de km² (= 23 millions d'ha / an), dont on sait qu'elle a surtout frappé la forêt amazonienne et des forêts humides asiatiques (même si elle s'est quelque peu ralentie dans la dernière décennie), tandis que les forêts

tempérées sont plutôt en progression en Europe, en densités et / ou en surfaces. *Les taux bruts de déforestation tropicale (*) varient du simple au double selon les sources. Selon DeFries et al. (2002), ce taux serait pour la décennie 1990 de 8,0 Mha / an, selon Achard et al. (2002 et 2004) de 9,6 Mha / an. En revanche, selon la FAO (2001), le taux de déforestation tropicale serait de 15,2 Mha /an (MAZAS, 2007, p. 56) ; moyenne des trois valeurs : ca 12 Mha / an. On reviendra sur le sujet (voir III.3., p. 25).*

(*) Nomenclature anglo-saxonne. En toute rigueur biogéographique, ces forêts humides et chaudes sont inter-tropicales ; il vaudrait donc mieux les qualifier d'équatoriales, surtout en Afrique et en Asie.

Tableau 5

Stock moyen de carbone (en t C / ha)
(d'après MAZAS, 2007. Fig. 10, p. 24)

	<u>Végétation</u>	<u>Sols</u>	<u>Total</u>	<u>Sol / Total</u>
Forêts tropicales	120-194	122-123	243-316	39 / 51 %
Forêts tempérées	57-134	96-147	153-281	52 / 63 %
Forêts boréales	42-64	247-364	289-408	84 / 85 %

La biomasse mondiale est terrestre pour l'essentiel (98 %) ; à son tour la biomasse végétale est largement majoritaire (95 %) par rapport à la biomasse animale. En considérant l'ensemble de la biosphère, les stocks se répartissent comme suit (en Gt C) : 1/ Une biomasse épigée de l'ordre de 800 Gt (en diminution, éventuellement ralentie, depuis plusieurs décennies). 2/ Une biomasse hypogée (= le sol, au sens large) de valeur plus importante, pour un total de 2000 Gt. 3 / Un réservoir atmosphérique frôlant les 850 Gt (*). Dans le total de la biomasse, les forêts - qui n'occupent qu'un peu plus du quart des terres, on l'a dit - participent pour les 9 / 10^{èmes} à la biomasse, en raison d'une productivité, donc d'une masse, nettement supérieures à celles des autres milieux, peu productifs (brousses, steppes, déserts chauds ou froids, etc.) ou de faibles surfaces (dont les cultures et les zones humides).

(*) Quelles que soient ici les imprécisions (de second ordre), on peut affirmer que l'atmosphère contient aujourd'hui plus de carbone que la végétation, alors que c'était l'inverse il y a trente ans, au début de la manifestation du réchauffement climatique. En 1978, WOODWELL donnait 828 Gt C pour la masse de la biosphère.

La question des relations entre biosphère et atmosphère, longtemps triviale ou académique selon les cas, a pris depuis peu une signification très particulière mais majeure, puisqu'en dépend l'accumulation atmosphérique d'un gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone, principal générateur des dérèglements climatiques constatés partout dans le Monde (surtout depuis une génération humaine, à partir de 1985 : 30 ans). Selon les compartiments considérés, on distinguera donc le carbone blanc, innocent puisque fixé par la végétation actuelle et son sol ; le carbone noir, libéré à partir de ses formes fossilisées à l'ère primaire (charbons), ou plus récemment au sens géologique de l'adverbe (pétroles, gaz) ; le carbone gris, qui n'est autre qu'un carbone blanc trop vite utilisé comme source énergétique : son bilan à moyen et à long terme est donc nul (mais c'est mieux que rien...).

III.1.2. Au niveau de la France (métropolitaine)

La forêt française, stockeuse de carbone

Vers 1825, après 30 années de désordres ou de guerres, la forêt française ne comptait plus que 9,4 millions d'hectares, situation dont elle mit longtemps à se relever : 9 Mha en 1840, à peine 10 en 1885 encore (source IFN). Puis la régénération s'est amorcée et n'a depuis cessé. Ainsi, pour les 10 départements du Massif Central, entre 1878 et 1986, le taux moyen de boisement est-il passé de 13,2 +/- 4,1 % à 31,6 +/- 7,3 %, soit une multiplication par 2,4. Aujourd'hui, on atteint les 16 Mha (en Métropole), soit un taux de boisement approchant 30 % du territoire. Un paramètre géographique et écologique important est celui du caractère chimique de la roche-mère, acide (substrats siliceux) ou basique (substrats calcaires). Certaines espèces, résineuses ou feuillues, sont indifférentes : Pin sylvestre et Chêne vert, d'autres calcicoles : Pin de Salzman et Chêne pubescent, d'autres silicicoles : Pin laricio de Corse et Chêne-liège.

En 2004 (*in LOUSTAU et al.*, Rapport final du projet CARBOFOR. Résumé, juin 2004), on pouvait lire : *Le stock de carbone dans la biomasse forestière (aérienne et souterraine) est évalué à 71 t C / ha à l'occasion du dernier inventaire réalisé en moyenne en 1996, le volume sur pied étant de 154 m³ / ha. Si on extrapole ce stock à la totalité de la surface boisée, soit 14,86 millions d'ha, on obtient une estimation globale de 1059 Mt C en 1996 et 830 Mt C en 1984. L'exploitation de ces deux inventaires permet d'évaluer, par différence de stocks, l'incrément net annuel en carbone dans la biomasse des forêts à 15,6 Mt C / an si on se limite aux formations boisées de production et à 18,7 Mt C / an si on extrapole à l'ensemble des forêts (hors tempête) contre 10.5 Mt C / an en 1979-1991 estimé précédemment.*

D'après de plus récentes données de l'I.F.N. (Inventaire Forestier National, couvrant la période 2006-2011), le volume sur pied de la forêt française métropolitaine ressortit à **2,5 Gm³**, se décomposant en **1,59 Gm³** pour les feuillus (= 64 %) et **0,88 Gm³** pour les résineux (= 36 %). Exprimée par ailleurs, la « ressource » en volume de bois était en 2011 (mais *avec une certaine incertitude*, sic !) de 2,63 Gm³ de « bois fort » sur pied (moyenne nationale 183 m³ / ha), avec une surface terrière totale de 32,4 Mm² (moyenne locale 22,4 m² / ha) et 924 millions de tiges (moyenne 643 tiges / ha, soit 4,0 m de distance moyenne inter-tiges, supposée en répartition quadrillée régulière). *En France, à l'heure actuelle, l'accroissement annuel de la forêt est de 100-120 Mm³ / an, supérieur aux prélèvements forestiers, de l'ordre de 60-70 Mm³ / an. De la sorte, le stock de carbone dans les forêts progresse d'environ 19 Mt C / an, ce qui correspond à une fixation annuelle nette de quelque 70 Mt CO₂ (*in MAZAS, 2007*).*

Tableau 6

Comparaison entre Feuillus et Résineux en France

	Feuillus	Résineux (*)	Total	Rapport
<u>Volumes épiés</u>	1590 Mm ³	880 Mm ³	2470 Mm ³	64 / 36 %
<u>Tonnages épiés</u>	708 Mt C	242 Mt C	950 Mt C	75 / 25 %

(*) Catégorie hétérogène, compte-tenu des boisements médio-européens de l'étage subalpin (pin à crochet, pin arôle), homologue de la taïga boréale, et des boisements méditerranéens (pin d'Alep, pin de Salzman), sans oublier le pin maritime, moins « naturel » en France (Aquitaine) que les autres résineux. À un moindre degré pour les chênes, sessile et pédonculé (médio-européens) *versus* chêne vert (méditerranéen) ; le chêne pubescent est en situation intermédiaire.

Si l'on fait intervenir maintenant les coefficients de conversion permettant d'exprimer les volumes ligneux (épiés) en masses carbonées (cf. II.2.3), les responsabilités respectives passent

à quelque **710 et 240 Mt C**, soit un total de **0,95 Gt C**, dans la proportion trois quarts / un quart seulement. Mais le carbone hypogé n'est pas ici considéré. Ramenée à 15 millions d'hectares boisés, cette masse de carbone épigé ressortit à 63 t C / ha en moyenne, plus faible que celle avancée par d'autres auteurs : 76 t C / ha pour les feuillus et 62 pour les résineux, soit 70 t C / ha en moyenne et en tenant compte des surfaces respectives des deux types de peuplements. (Tableau 6, *vide supra*). Avec le carbone hypogé (partiellement pris en compte dans les chiffres officiels), le total s'élèverait en moyenne à 170 t C / ha (*vide infra*, III.2.2., p. 21).

III.1.3. Durée de stockage d'un matériau carboné

Apprécier la durée de stockage d'un matériau carboné paraît a priori facile, par exemple une quinzaine de jours pour du papier journal, 1000 fois moins que le bois d'une commode Louis XIV d'époque (mais on achète plus souvent un quotidien qu'une commode Louis XIV...). On connaît des chiffres apparemment démonstratifs : 75 ans pour une charpente, 20 ans pour un meuble, 1 à 8 ans pour le coffrage ou une palette. Une analyse « intelligente » (intel-ligent = reliant les choses entre elles, de l'amont à l'aval d'un processus ; cf. aussi « com-préhension ») montre que les choses sont plus compliquées, comme l'indique VALLET (2005), car « *seule cette référence mentionne des durées de vie qui incluent à la fois le rendement et le recyclage en plus du temps de vie en œuvre des produits finis* » (REFORA, 2015, p. 26).

Dans ces conditions, cet auteur accorde une durée de vie (= de stockage effectif) de 1,6 ans au bois énergie, de 2,4 ans aux papiers et cartons, de 3,9 ans au bois emballage, de 8,5 ans au bois de menuiserie et de 9,1 ans (seulement...) au bois de charpente. Une manière d'augmenter la durée de stockage du carbone d'origine forestière est en effet de recycler ses produits à courte vie, au premier chef le papier : *La France recycle environ 60 % de sa production de papier /.../ soit 5,2 millions de tonnes de papier en 2013. Le recyclage du papier a l'avantage de conserver le stock de CO₂ que contiennent les cartons et le papier, et de ne pas le libérer dans l'atmosphère tout en préservant les arbres de la coupe* (Planétoscope-Statistiques, 2014).

Tableau 7 **Une « aide » de la Région Midi-Pyrénées à la filière bois**

Sous le titre *Dynamiser les éclaircies des forêts résineuses de montagne* (AFOCEL, Informations-Forêt n°2, 1997), on pouvait lire, il y a près de vingt ans il est vrai : *Il s'agit de permettre aux propriétaires de réaliser des éclaircies là où la productivité est insuffisante pour assurer une opération financièrement équilibrée. Ces massifs résineux, essentiellement constitués d'épicéa, de douglas, pin laricio, pin sylvestre et pin noir (soit 4 essences allochtones sur 5) proviennent pour la plupart d'entre eux de reboisements des années 60 dus à une libération forte des terres et au soutien financier du F.F.N. (Fonds Forestier National).*

Ainsi, de telles opérations d'éclaircie, homologables aux plantations à courte révolution, aujourd'hui prônées par certains forestiers, n'étaient-elles nécessaires qu'à l'équilibre d'opérations d'enrésinement déficitaires et préjudiciables à l'environnement, dont le seul débouché était alors la pâte à papier. On comprend mieux pourquoi une partie du monde forestier s'était vivement élevée contre le principe même de la récupération du papier, voyant en elle une concurrence sans doute trop loyale... Il ne restait alors plus qu'à brûler cet encombrant papier, raccourcissant d'autant sa durée de stockage ...

Adapté de LEBRETON, 2002, pp. 95-96.

Autre information, plus récente : *En France, 7,5 Mt de papier et cartons sont collectés et recyclés chaque année pour un taux passé de 40 à 72 % au cours des deux dernières décennies.*

Au cœur de la production hexagonale, ces matières représentaient en 2009 60 % des fibres utilisées dans la fabrication du papier (PAPREC Group, 2010).

III.2. Bois du dessus, carbone du dessous

L'aspect tridimensionnel de la forêt n'échappe à personne, car la présence de trouées, de clairières, de lisières, constitue autant d'éléments de diversification retenant volontiers l'attention du promeneur. Les relations entre densité des peuplements végétaux et biodiversité (végétale : plantes d'ombre *versus* plantes de lumière ; animale : oiseaux nicheurs) sont intuitivement ressenties par notre propre espèce, très sensible au facteur « éclaircissement ». Lorsque l'on passe de l'ombre à la lumière dans un cheminement, on parlera de dimension horizontale, verticale lorsque nos regards se portent vers les frondaisons ou vers le sol. Une quatrième dimension – celle du temps – est immatérielle ; elle ne saurait être omise pour autant (cf. ANDRE et DARMON, 2014).

III.2.1. Irrégularité des peuplements

Mais la régularité (ou l'irrégularité...) avec laquelle ces éléments apparaissent, ou disparaissent, apporte une autre information, humainement subjective : certains préféreront « l'ordre et la beauté » des jardins de Versailles, d'autres « le charme et la fantaisie » des jardins à l'Anglaise. Et comme « des goûts et des couleurs » on ne discute pas, le débat serait clos si l'on ne faisait appel aux oiseaux pour disposer d'un autre témoignage, nettement en faveur de boisements « aérés » et irréguliers (*vide infra*, IV.1, figures 4 et 5).

III.2.2. Ni vu... ni connu...

La dimension verticale présente la particularité supplémentaire de ne pas s'arrêter au pied des arbres. De même que l'éleveur bovin du Charollais ignore généralement que la biomasse des lombrics de sa prairie permanente peut dépasser celle de son troupeau d'embouche, de même le forestier – y compris celui vantant la fonction de stockage carboné de ses boisements – semble plus marqué par ce qu'il voit au dessus du sol. Quant à ceux qui y songent, ils ne creusent pas beaucoup l'idée, car limiter la profondeur du sol à 30 cm fait rester à la surface des choses.

Même un écologue aussi estimé que Paul DUVIGNEAUD (1913-1991), lorsqu'il décortiqua, en 1974, le contenu massique et énergétique d'une forêt feuillue belge de 120 ans, fit quasiment l'impasse sur « le bois du sol » puisque, d'après ses relevés, la somme des constituants hypogés recensés n'atteignait que 50 tonnes (en matière végétale sèche), contre 264 pour la partie épigée (tronc, branches, litière, etc...), soit 16 % / 84 %. A l'opposé, on peut lire que *le carbone biosphérique terrestre se répartit pour 25 % dans la biomasse aérienne (au niveau des plantes) et pour 75 % dans la biomasse souterraine (racines, matières en décomposition (in MAZAS, 2007, p. 6). Ces chiffres sont sans doute incertains, car les deux plus grandes formations forestières mondiales, la forêt amazonienne et la taïga circum-boréale, sont insuffisamment connues en surfaces ou en structuration. Il y a là deux écosystèmes très différents, le premier doté d'une productivité et d'une biodiversité foisonnantes, mais avec un faible compartiment hypogé (moins de la moitié du C total), le second quali-quantitativement pauvre, en raison d'un facteur écologique limitant, le froid, d'où une biomasse hypogée très importante (85 % du total).*

Définie par la FAO, la biomasse souterraine concerne *le carbone présent dans toute la biomasse de racines vivantes ; les radicelles de moins de 2 mm de diamètre sont exclues ; s'y ajoute le carbone organique dans les sols minéraux et organiques ; les exsudats racinaires sont en général omis de la comptabilité des apports au sol, négligeant ainsi le rôle régulateur de la rhizosphère. Le mutisme à son sujet est donc important : micro-organismes, échanges entre lithosphère et biosphère ; même silence sur la fonge (les champignons) et la micro-faune des mêmes horizons.*

Du « compartiment sol », on donnera donc ici une définition fonctionnelle : est **épigée**, la partie **autotrophe** (= photo-autotrophe) de l'écosystème, **hypogée** sa partie **hétérotrophe**, englobant donc dans celle-ci le bois mort (même debout), la litière, les racines, etc., bref, tout ce qui n'intéresse pas directement le ligniculteur.

Un document assez récent (ANR, 2010) confirme la sous-estimation généralisée de la dimension hypogée de l'écosystème : *Nous examinerons l'importance fonctionnelle des racines profondes au regard des racines superficielles, zone où les connaissances sont limitées, laissant supposer que les services sont très sous-estimés. Dans la plupart des études, les traits racinaires sont mesurés sur les 20 premiers cm sous la surface du sol, alors que dans la plupart des écosystèmes du monde, on trouve moins de 30 % de la biomasse racinaire à moins de 0,3 m*, ce qui laisse entendre qu'il faudrait multiplier par 2,3 au moins (70 / 30) les chiffres ainsi obtenus pour s'approcher de la réalité biologique. L'inventaire pourrait être poussé jusqu'à 1 m de profondeur, malgré la variabilité des humus et les difficultés expérimentales. On envisagera les milieux holarctiques de latitude et altitude moyennes (= forêts tempérées, plus utiles au propos). (Tableau 8).

Tableau 8		Quelques cas de répartition des carbones épigé (E) et hypogé (H)	
<u>Source</u>	<u>Type forestier</u>	<u>Données</u>	<u>Rapport E / H</u>
1. D. G. Energie-Climat Gouv. Fr., 2009, p. 8	France métropolitaine	en t / C / ha	37 / 63 %
2. Dupouey <i>et al.</i> , 2009	France métropolitaine	en %	34 / 66 %
3. Fahey <i>et al.</i> , 2004 (sol ≤ 20 cm !)	New Hampshire (USA)	en t / C / ha	35 / 65 %
4. FAO, 2005	Europe	en t / C / ha	33 / 67 %
5. Greenfact, nov. 2014	Europe	en t / C / ha (bois mort = épigé)	35 / 65 %
6. Hofer <i>et al.</i> , 2010	Suisse	en Mt CO ₂ (bois mort = épigé)	43 / 57 %
7. IPCC Special Report Watson <i>et al.</i>	Forêt tempérée Forêt boréale Mix Temp. / Bor. 4 / 1	en t CO ₂ / ha	38 / 62 % 25 / 75 % 33 / 67 %

- En ce qui concerne le bois mort, il paraîtrait logique de rattacher au compartiment épigé le bois mort estant (= debout), au compartiment hypogé le bois gisant (= couché, au sol). En pratique, la partie « bois mort » de la forêt n'est pas toujours documentée, encore moins la distinction bois morts debout et couché. Nous avons ici rattaché le bois mort à la partie épigée (assimilant pourtant ainsi **nécromasse** et **biomasse**...) de crainte de paraître privilégier le « sol ». En fait, il serait plus réaliste de distinguer "bois" (au sens professionnel du terme) et "non-bois" (= les nouvelles fonctions) ; les disparités en seraient d'autant accentuées.

- En ce qui concerne la « forêt tempérée » (n°7, dont relèvent Europe moyenne et France), pour tenir compte des massifs montagneux, du moins pour l'étage subalpin, homologue de la taïga, a été incluse dans le calcul une « correction boréale » égale au cinquième de la valeur totale (épicéa *pro parte*, pins à crochet et pin arole). En revanche, pas de correction pour l'étage montagnard (où le sapin est accompagné du hêtre, en ubac, et où le pin sylvestre, pourtant constitutif de la taïga, peuple les adrets).

La moyenne des sept données disponibles, très variées, ressort donc à 36 %, avec un écart-type égal à 4 % ; dans ces conditions, les valeurs épiquées (masses, ou volumes convertis) seront à multiplier par 2,8 pour obtenir le total des masses carbonées forestières, épiquées + hypogées, ou par 1,8 pour obtenir la seule masse hypogée. Le stock français épiqué estimé à **0,95 Gt C** (*vide supra* III.1.2) devient donc au total 2,65 Gt C, dont **1,63 Gt** pour la partie hypogée ; au total encore, ca 170 t C / ha, dont 112 pour les feuillus et 58 pour les résineux (respectivement, 64 % et 36 % des peuplements). En admettant (*a minima*) que les sols de feuillus et de résineux ont des teneurs carbonées voisines, et en considérant les quatre catégories Habitus (F / R) et Situation (E / H), les contributions à la masse carbonée totale sont : FE = 26,6 % ; FH = 47,3 % ; RH = 16,7 % ; RE = 9,4 % . (Figure 2, ordres de grandeur. *Vide infra*)

Atmosphère, vous avez dit gaz carbonique, mon cher cousin ? Comme c'est bizarre !

- Comment calculer la masse (en Gt) de gaz carbonique présent dans l'atmosphère : tout simplement en cherchant sur Internet sa teneur volumique mesurée par le célèbre Observatoire de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) implanté depuis 1958 à Mauna Loa dans l'île de Hawaï (USA), puis en la multipliant par 2,12. Mais d'où sort ce coefficient ?

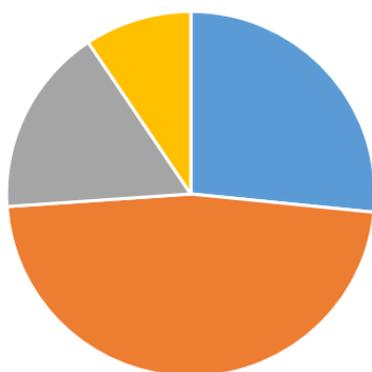
- Partons de la masse de l'atmosphère, en multipliant la surface de la Terre (5,13 millions de km²) par la pression exercée par l'air par unité de surface, exemple 1 kg / cm² ; il s'en déduit une masse atmosphérique de 5,13 millions de Gt (Gt = milliard de tonnes). Puis calculons l'équivalent molaire de l'air considéré comme une espèce chimique, moyenne de ses trois constituants principaux (di-azote, M = 28 (80 %) ; di-oxygène, M = 32 (19 %) ; argon, M = 40 (1 %), soit 28,9 ; vérifions en multipliant la densité de l'air (d = 1,293 g / litre) par le volume d'une mole (22,4 litre), soit 28,96. D'où le coefficient couramment retenu, **29** (M = 29 d).

- Partons maintenant de l'autre bout du problème, en considérant la teneur volumique du gaz carbonique dans l'air, par exemple pour l'année 2013, 395 parties pour millions, abrégée en 395 ppm(v). Puisque la masse molaire du CO₂ = 44, sa teneur massique dans l'air = 395 x (44 / 29) = 599 ppm(w), et celle exprimée en carbone à 395 x (12 / 29) = 163 ppm(w) ; il ne reste alors plus qu'à multiplier par la surface terrestre pour trouver le stock, carbonique ou carboné, de l'atmosphère : 3073 Gt ou 838 Gt respectivement.

- Mais il est désormais plus simple, une bonne fois pour toutes, de multiplier la surface de la Terre par le rapport 12 / 29 = 0,414, soit 5,13 x 0,414 = **2,12**. C.Q.F.D. Dans le cas présent (2013), 395 x 2,12 = **839 Gt C**, derechef. En 1975, à la fin des Trente Glorieuses, lorsque V ppm(v) valait 330 ppm, il s'agissait de **700 Gt C.**, soit + 20 % en 45 ans ; en 1850, au début de l'ère industrielle, V CO₂ valait 280 ppm(v), teneur dite « historique », et son tonnage atmosphérique n'atteignait pas **600 Gt**, soit 71 % de la valeur actuelle.

 Au printemps 2014, l'Observatoire de la NOAA a relevé que, pour la première fois pour un mois d'avril, la teneur atmosphérique en CO₂ a atteint le chiffre symbolique des 400 ppm(v). Compte-tenu des taux de croissance carbonée actuels, le seuil annuel de 400 ppm (v) sera dépassé en 2016 / 2017.

Stock de C dans les forêts françaises



Masses carbonées, épiquées et hypogées, chez les Feuillus et chez les Résineux (France métropolitaine)

Figure 2

Valeurs arrondies, chiffres plus précis en haut de page

- 27 % Feuillus (partie épiquée) ■ 47 % Feuillus (partie hypogée)
- 17 % Résineux (partie hypogée) ■ 9 % Résineux (partie épiquée)

III.3. Mouvements du Carbone

A l'échelle globale, le « cycle du Carbone » est aujourd'hui une banalité qualitative dont on ne rappellera que les grands traits chiffrés : à notre échelle, entre les quatre compartiments de « l'écosphère » (*) constituant la planète Terre, c'est la biosphère qui joue le rôle de « pompe », aspirante et refoulante, pour mobiliser (= rendre mobile) les différentes formes de l'élément Carbone. On estime ainsi les mouvements d'origine végétale à quelque 125 Gt C « bruts » par an (dont 3 Gt C / an par le plancton marin), avec 60 Gt relâchés par les mêmes végétaux et 60 par les sols ; les stocks correspondants sont : végétation : 560 Gt ; litières : 300 Gt ; sols proprement dit : 1200 Gt (*in* MAZAS, fig. 2 et 3, pp. 16-17).

(*) Ecosphère = écosystème Terre, somme interpénétrée et interactive des quatre compartiments de notre planète : Lithosphère, Hydrosphère, Atmosphère et Biosphère.

Le carbone annuellement défossilisé ne se retrouve pas aujourd'hui intégralement dans l'atmosphère, étant absorbé soit dans des « puits » terrestres (au premier chef, les forêts), soit dans le puits océanique, ce dont témoigne l'acidification des eaux marines dont le pH pré-industriel légèrement basique (= alcalin), égal à 8,25, est passé à 8,14 au début du présent siècle. La différence peut paraître faible mais, l'échelle étant logarithmique, elle correspond à une augmentation de 25 % de la teneur en bicarbonates des eaux marines. Une baisse de 0,3-0,4 unités pH est envisagée pour la fin du présent siècle, soit 2,2-2,5 fois plus de bicarbonates qu'aujourd'hui. Une moindre efficacité est pourtant prévisible, les eaux acidifiées devenant progressivement moins aptes à fixer le gaz carbonique en raison des équilibres chimiques ; de plus, le réchauffement des eaux jouera également contre la fixation carbonée, car les gaz, contrairement aux solides, se dissolvent d'autant mieux que le solvant est froid.

Tableau 9	Décennie 1991-2000 Gt C / an	Décennie 2004-2013 Gt C / an	Année 2013 Gt C / an
Carbone émis			
Carbone défossilisé	6,5	8,9 +/- 0,4	9,9
Sources terrestres	1,5	0,9 +/- 0,5	0,9
<u>Total</u>	<u>8,0 Gt</u>	<u>9,1 Gt</u>	<u>10,8 Gt</u>
Carbone absorbé			
Atmosphère	3,1	4,3 +/- 0,1	5,4
Puits océanique	2,2	2,6 +/- 0,5	2,9
Puits terrestres	2,6	2,9 +/- 0,8	2,5
Total	<u>7,9 Gt</u>	<u>9,8 Gt</u>	<u>10,8 Gt</u>

Source : d'après Global Carbon Budget 2010 et 2014.

Commentaires : la première décennie est antérieure à la crise financière de 2008-2009, alors que la seconde l'englobe. On constate que les sources terrestres ont régressé (ralentissement de la déforestation, meilleur usages des sols ?) mais que la consommation d'énergie fossile ne s'est nullement calmée, avec elle, corrélativement, les émissions de gaz carbonique. Le puits océanique s'est donc accru (même si son efficacité se ralentit) ; quant aux puits terrestres, calculés d'ailleurs par différence par rapport au total, les incertitudes sont telles que rien de sûr ne peut être tiré de leur estimation. Pour 2014, on attend une consommation carbonée égale à 10,1 Gt (LE QUERE, 2013, 2014). Experts économistes et financiers s'en réjouissent par avance, qualifiant de « production » ce qui est en fait une « destruction » de ressources fossiles.

Ainsi, en ouvrant le XIX^{ème} siècle, notre espèce avait-elle réussi la prouesse de défossiliser en une année une quantité de carbone équivalant au centième du contenu atmosphérique, quantité annuelle dont la moitié reste dans l'atmosphère. De plus, on constate que l'efficacité de fixation des puits océanique, et terrestre (= forestier pour l'essentiel), diminue rapidement au fil des ans : 60 % du gaz carbonique produit pour la dernière décennie du XX^{ème} siècle, 56 % de 2004 à 2013, et seulement 50 % pour cette dernière année (cf. tableau 9, carbone absorbé). Dans ces bilans, un problème majeur est celui de la déforestation. En effet, si la destruction de forêts par des accidents ou des catastrophes aléatoires est un phénomène naturel (glaciations, incendies, météorites), destructeur mais ré-arrangeur de biodiversité (ANDRE & DARMON, 2014), la déforestation anthropique est d'une tout autre échelle temporelle ; c'est donc un phénomène pénalisant à plusieurs titres la biosphère et l'écosphère :

1/ Impactant la fonction photosynthétisante locale (énergie gratuite pour la vie terrestre, y compris humaine), elle supprime la fonction de « puits de carbone » où les forêts tiennent un rôle local et mondial majeur.

2/ Elle déstocke du carbone tôt ou tard transformé en gaz carbonique, sans oublier celui émanant définitivement à son tour des sols stérilisés (latérisation de terres africaines). D'où le danger de grandes coupes rases, évitable par une « micro-gestion » parcellaire créant de petites ouvertures, avec des « effets de lisière » générateurs de biodiversité au sein même des peuplements.

3/ Il est rare que les terrains ainsi dénudés retrouvent leur rôle fixateur antérieur : implantation de zones urbanisées ou industrielles, voire agricoles car l'agriculture moderne est consommatrice d'énergie fossile (mécanisation, engrais) et très génératrice de divers gaz à effet de serre. Le reboisement n'est qu'un pis-aller, puisque *les forêts primaires tropicales stockent plus de carbone que les plantations susceptibles de les remplacer : la perte lors de la conversion de la forêt primaire en forêt secondaire est de 30 à 50 % du stock de carbone initial de carbone* (selon HOUGHTON, 2005, in MAZAS, 2007, p. 55).

Tableau 10	Surface boisée	Catégorie (*)	Reboisement (**)
1. Russie (Fédération)	8,09 Mkm ²	C	22 %
2. Brésil	4,78 Mkm ²	Z	13 %
3. Canada	3,10 Mkm ²	-	-
4. USA	3,03 Mkm ²	B	-
5. Chine (R.P.)	1,97 Mkm ²	A	18 %
6. Australie	1,64 Mkm ²	Z	-
7. Congo (R.D.)	1,34 Mkm ²	Y	-
8. Indonésie	0,88 Mkm ²	Z	7 %
9. Pérou	0,69 Mkm ²	-	-
10. Inde	0,68 Mkm ²	C	3 %
Sous-Total	26,20 Mkm ²		
Monde	39,50 Mkm²		

(*) Variations nettes de surfaces boisées (= défriché – reboisé) entre 2005 et 2010, selon une échelle semi-quantitative constituée comme suit. (Note : la surface totale du département du Rhône est égale à 2715 km²).
Gains : A = plus de 5000 km² / an. B = entre 5000 et 2500 km² /an. C = entre 2500 et 500 km² /an.
Pertes : X = entre 500 et 2500 km² /an. Y = entre 2500 et 5000 km² /an. Z = plus de 5000 km² /an.
(**) Pourcentage des surfaces reboisées par rapport au total des surfaces déboisées + reboisées.

La déforestation est certes un phénomène « remontant à la plus haute Antiquité » - comme aurait pu l'écrire Alexandre VIALATTE - mais c'est surtout l'Homme blanc colonisant les continents vierges d'Afrique, d'Asie et d'Amérique qui lui a donné toute son ampleur. Plus récemment, les pays émergents ont pris le relai en copiant les moeurs consommatrices de l'Occident, dont le Brésil, possesseur de 63 % de la forêt amazonienne qui couvrait à l'origine historique plus de 5,5 millions de km², le tiers de la surface forestière des 28 pays de l'Union européenne (1,60 Mkm² en 2012). Actuellement, dix pays possèdent à eux seuls près des deux tiers des surfaces boisées mondiales (D'après ONF, sources FAO 2005 et 2010) (Tableau 10).

La situation, on le voit, présente à priori peu de logique générale : le premier reboiseur est pourtant riche d'un capital sibérien considérable (la Russie) ; un autre (la Chine) a hérité d'une situation séculairement pauvre, avec de graves problèmes d'érosion. Mais c'est bien la forêt dite tropicale qui a subi les plus rudes assauts car, *en termes absolus, plus de forêt tropicale a été perdu pendant la décennie 90 par rapport à la précédente. On ne peut donc pas parler d'un ralentissement de la déforestation, sauf à la considérer au niveau mondial* (en agrégeant régions tropicales et tempérées, ainsi que forêts naturelles et plantations (MAZAS, 2007, p. 58).

Entre 2000 et 2005, environ 4,3 millions d'hectares (= 43 000 km²) ont disparu en Amérique du Sud, mais aussi 4 millions en Afrique Noire (République démocratique du Congo, Nigéria, Tanzanie, Zimbabwe). Pour des raisons symboliques et médiatiques, le Brésil est le pays le plus impliqué : l'Amazonie brésilienne a en effet perdu 70 Mha sur les 410 qu'elle possédait initialement, soit 18 % dans les 30 dernières années (Wikipédia), dont pas moins de 27 000 km² en 2004. Peut-on réellement parler de progrès lorsque, dans la période couvrant d'août 2011 à juillet 2012, 4570 km² ont été perdus, puis 5840 pour 2012 / 2013 et 4850 pour 2013 / 2014 (chiffres du Gouvernement brésilien, dans *Le Monde*, 27 nov. 2014, contestés par des ONG) ?

Plus globalement, dans l'espace comme dans le temps, entre 1990 et 2005, l'Amérique du Sud et l'Afrique sub-saharienne ont perdu chacune environ 80 Mha, passant de 900 à 820 pour la première et de 700 à 620 pour la seconde ; l'Europe a connu une très légère croissance autour de 1000 Mha. Ailleurs il s'agit d'une légère décroissance : Amérique du Nord et Centrale, autour de 720 Mha ; Asie, autour de 580 Mha ; Océanie, autour de 210 Mha. Au total, la surface boisée mondiale est passée de 4150 à 3950 Mha en 15 années, cette perte de 2 Mha correspondant à une baisse annuelle moyenne de quelque 13 000 km² (adapté de MAZAS, 2007, Fig. 46, p. 58).

III.4. Substitution carbonée

On entend par là l'utilisation du bois en tant que matériau à la place d'un autre (métaux, ciments et béton, matières plastiques), ce qui permet d'éviter des émissions de gaz carbonique, au niveau de la matière première (le carbonate de calcium pour le ciment...) mais non de la fabrication si elle fait appel à de l'énergie fossile. Cette remarque renvoie à la nécessité de « bilans énergétiques », quantitatifs et qualitatifs, « du berceau à la tombe », comme pour tout processus industriel (cf. III.1.3, p. 19). Le Plan Bois 2001 du ministère de l'Ecologie et du Développement durable annonce que l'utilisation de 1 m³ de bois matériau évite l'émission de 0,8 tonne de gaz carbonique. Cette équivalence permet d'estimer l'équivalence de toute substitution (ou non-substitution) de bois à un autre matériau, même si l'élaboration d'une dalle de béton n'a pas le même bilan carboné et énergétique que la fabrication d'un mobilier de jardin en plastique blanc.

La substitution carbonée peut être quasi permanente, car éviter l'utilisation d'une poutre en béton pour la construction d'une maison est un investissement de long terme. En revanche, quand elle sera démontée et reconstruite, il conviendra de faire un choix analogue pour perpétuer réellement la substitution, en évitant même de brûler les poutres récupérées (sauf si un incendie est passé par là...).

IV. Services écosystémiques

Résumé : Les services éco-systémiques sont ici déclinés, avec quelques exemples significatifs. Les aménités globales sont diverses, aujourd'hui bien décrites mais loin d'être prises en compte : le rôle de fixation du gaz carbonique est essentiel, consécutivement celui de la régulation climatique et celle du cycle de l'eau. La biodiversité est à mieux considérer, non seulement comme ressource, mais comme « sentinelle » de notre propre ambiance. La naturalité est une préoccupation plus récente, plus immatérielle que la précédente en raison de sa dimension éthique ; elle est tout aussi voire plus importante encore pour notre espèce, si celle-ci, comme l'arbre, veut garder les pieds sur terre.

Les aménités écologiques, c'est ce que l'on découvre une fois qu'on en est privé, et qu'il faut en payer la note. Exemples : lâcher des faisans pour aller chasser, voir des lynx dans un zoo pour s'amuser, ou le squelette du Dodo dans un musée pour réfléchir. (Prof. MOLLO-MOLLO)

Il n'est pas question de développer ici tous les aspects des services éco-systémiques, même si cette notion, curieusement très ancienne, n'a été que récemment redécouverte dans un secteur éclairé du monde agro-forestier, plus tardivement par une partie enfin intéressée des forestiers de terrain. De même, en ce qui concerne les notions (heureusement) moins quantitatives, mais pas davantage aisées à exprimer pour autant, de biodiversité et de naturalité, nous n'explorerons pas exhaustivement ces concepts (surtout le premier, tellement médiatisé qu'il s'en est vu quelque peu galvaudé...), réservant le propos à des aspects mieux documentés.

IV.1. Aménités générales

Le mot « aménité » n'est pas dépourvu de charme, d'autant qu'il provient de l'Anglais, à partir d'un adjectif bien français, bien qu'un peu désuet : « amène ». Néanmoins, peut-être pour paraître plus sérieux, a été créé le terme un peu technocratique de « services éco-systémiques ». Mais le préfixe « éco- » est devenu péjoratif, donc gênant, à divers titres : pour des raisons dont les « écolos » portent sans aucun doute une part de responsabilité ; pour des raisons politiques, où l'affaire de l'éco-taxe et de ses portiques a fait un peu mauvais genre, elle aussi ; pour des raisons plus sociétales encore, où l'économie (« l'économisme » ?) est devenue de plus en plus suspecte aux yeux du citoyen ordinaire. On proposera donc d'emprunter aux Conseil(s) national et régionaux économiques et sociaux, désormais environnementaux de surcroît, le terme de « services économiques, sociaux et environnementaux », ce qui est certes un peu long (en abréviation : SESE), mais moins compromettant.

De même que les vendeurs d'engrais phosphatés doivent extraire leur matière première de gisements (guano du Chili ou minette de Lorraine, selon les lieux ou les époques) puis la traiter, de même les fabricants d'engrais azotés (le nitrate d'ammonium, ou ammonitrate), comme A.Z.F. à Toulouse, payent-ils une partie de leur matière première, l'hydrogène, issu de produits pétroliers. Pour autant, n'est-il pas curieux, voire scandaleux, qu'ils n'acquittent pas un centime pour l'autre partie, l'azote, présent dans l'air et comme tel propriété commune de tous les humains ? Là non plus l'idée n'est pas neuve, puisque Bertrand de JOUVENEL, dès 1958, dans le rapport sur la forêt remis (dit-on) au président de la République, avait suggéré (au second degré, éventuellement) que l'on versât une indemnité aux ayant-droits générateurs d'oxygène, gaz indispensable à tous les humains (à pied, à cheval et, surtout en voiture...). Ironique valorisation avant la lettre d'une évidente aménité, largement forestière !

Autre aménité de la nature, posthume celle-ci, le piégeage du gaz carbonique dans les massifs calcaires de bien des montagnes du Monde (*). Pour les « optimistes du progrès » qui songent à fixer le gaz carbonique de l'air en le faisant barboter dans du lait de chaux ou dans de la lessive de soude, rappelons que produire de la chaux (à partir de CaCO_3 , sic !) ou de la soude (à partir du sel marin) revient à consommer de l'énergie (fossile ou non), donc à produire du gaz carbonique en quantité égale, et même supérieure, puisque rien ne se fait en ce bas monde avec un rendement égal à l'unité. Les ingénieurs n'ignorent pourtant pas le second principe de la thermodynamique puisque le polytechnicien CHRISTOPHE avait inventé le personnage du sapeur CAMENBERT creusant un trou pour se débarrasser de la terre du précédent.

(*) On mesurera l'ampleur du problème en évoquant un site célèbre de l'histoire de l'alpinisme français, le Mont-Aiguille, gravi pour la première fois en 1492, dans le massif calcaire du Vercors. La masse de ce « chicot » (base non comprise) est de quelque 75 millions de tonnes de carbonate de calcium, séquestrant donc 9 millions de tonnes de carbone, ce qui ne représente que le millième de ce que l'Homme a défossilisé en 2013 (voir aussi Note, p. 40 *in fine*). Ce qui laisse planer quelques doutes sur le réalisme du piégeage du gaz carbonique au niveau de centrales électrogènes consommant du lignite (ou du bois).

C'est à Jean-Luc PEYRON, chercheur au Laboratoire d'Economie forestière à l'ENGREF de Nancy, au tournant des 20^{ème} et 21^{ème} siècles (voir bibliographie), que l'on doit l'importation en France d'un concept relevant en quelque sorte d'une « économétrie de la nature ». Jean-Luc PEYRON rappelait pourtant que le problème, dans sa généralité, n'est pas nouveau puisque, dès 1844, Jules DUPUIT s'interrogeait sur la *mesure de l'utilité des travaux publics*, tout en relevant – de manière singulièrement moderne – *que les questions d'économie politique, pour être maniées d'une manière habile et sûre dans la pratique, ont d'autant plus besoins de s'appuyer sur les principes rigoureux de la science, que les données dont on dispose sont plus incomplètes ou plus incertaines*, ce qui semble bien être aujourd'hui le cas à plusieurs titres (Repris dans *Si la forêt m'était comptée*, LEBRETON & VALLAURI, 2004, p. 10).

Dans sa *Méthode d'évaluation des biens et services non marchands* appliqués à la forêt (1998), PEYRON signale et commente *deux grands types d'évaluation envisageables* :

- *une méthode directe, tendant à constituer un marché fictif et à faire exprimer leurs préférences aux individus ; c'est la méthode d'évaluation contingente ;*

- *des méthodes indirectes, fondées sur l'observation de marchés connexes ; elles sont multiples /.../, méthode des prix hédonistes, méthode des dépenses de protection, méthode de la fonction de dommage, méthode des coûts de maintenance.*

On ne saurait oublier le contexte de la démarche, ni ses difficultés pratiques. Ainsi, certains arguments économiques peuvent se retourner contre leurs auteurs, si l'on admet comme règle comptable celle d'un P.I.B. ajoutant arithmétiquement dépenses positives (= productives) et négatives (= correctives), car l'Etat encaisse deux fois la TVA à chaque tour. Deux exemples : les mouvements financiers induits par les accidents de la route, de la dépanneuse à la morgue, ne sont-ils pas créateurs de valeur ajoutée et d'emplois ? Lorsqu'en Bretagne, le consommateur achète de l'eau minérale pour éviter les nitrates de l'eau du robinet, le chiffre d'affaires de Vittel doit-il être portée au crédit (sic !) ou au débit (re-sic !) des porcheries du Landerneau ?

Plus l'on s'approche des valeurs esthétiques et éthiques, plus la difficulté s'accroît : si l'on peut admettre que l'oiseau forestier (la bécasse) puisse être converti en termes économiques via le rapport de la chasse (du locataire à l'armurier ?), comment évaluer le ver de terre consommé (et recyclé) par l'oiseau vermivore ? Pour la diversité des paysages, on peut aller plus loin en assimilant la valeur d'une RBI à un tableau de maître ; mais la valeur de certains Picasso montre bien la difficulté et la relativité de la démarche ! Se soumettre à l'exercice peut même paraître à bien des écologues comme un piège, intellectuel et réel, pour la protection de la nature (GENOT,

2003) : puisque telle ou telle zone humide n'abrite pas de plante portée sur liste rouge, pourquoi ne pas l'envoyer au profit de maïsiculteurs victimes d'échauffement climatique ?

Néanmoins, dès 2003, PEYRON a tenté de synthétiser (très prudemment) les estimations disponibles en France sur la forêt : *Le bois ne compterait que pour 44 % du total (284 € / ha / an) en considérant aussi la récolte potentielle future que représente l'excédent, aujourd'hui constaté, de la production ligneuse sur la récolte et la mortalité.* En fait, des 125 € ainsi portés au crédit du bois, seulement 69 sont commercialisés, le reste relevant de l'autoconsommation (17 €) et de la capitalisation sur pied (39 €). *Par ailleurs, la récréation d'une part (31€), les services écologiques de protection des eaux, sols, air, faune et flore, d'autre part (24 %) s'avèreraient du même ordre de grandeur que la récolte du bois (30 %). Encore ce récapitulatif a-t-il vraisemblablement du mal à intégrer complètement certains services environnementaux tels que /... / la protection du paysage.*

A une autre échelle, le même chercheur signale que COSTANZA *et al.* (1997) se sont livrés à un travail ambitieux consistant à mesurer la valeur des biens et services d'environnement de l'ensemble de la planète /.../. *Pour les forêts tempérées et boréales, la valeur moyenne globale du bois, avec 25 US \$ / ha / an ne représenterait que 8 % de la valeur forestière totale, loin derrière la régulation du climat (88 US \$), le recyclage des déchets (87 US \$), la production alimentaire (50 US \$) et la récréation (36 US \$).* En Suisse (proche de nous à tous égards, (écologiques ou sociétaux), ALFTER (1998) estime que la seule production de bois ne représente que 8 % de la valeur totale des forêts, chiffre avancé dès 1993 par sa collègue Thea RAUCH.

La FRAPNA et le WWF, sur la base des données fournies en 2000 par la D.E.R.F., avaient chiffré (trop prudemment ?) en 2004 à 3,3 Md € les revenus annuels de la forêt française, dont la moitié pour le bois commercialisé. *Au total, il n'est pas déraisonnable de dire qu'entre les deux pôles constitués en France par les forêts d'altitude d'une part (où le bois ne représente vraisemblablement qu'à peine le dixième des valeurs forestières) et, d'autre part, quelques massifs forestiers comme les plantations de pin maritime des Landes où la production ligneuse commercialisée dépasse probablement la moitié de la valeur totale des biens et services de la forêt, le bois commercialisé représente en moyenne en France entre le quart et le tiers seulement des valeurs forestières globales Si l'on ajoute qu'une partie du bois produit n'est pas commercialisée (ou l'est sous le manteau), il ressort clairement que le bilan socio-économique de la forêt française est non seulement incomplet, mais fortement biaisé* (LEBRETON & VALLAURI, 2004, pp. 13-15).

Depuis, une importante synthèse commanditée par le Premier Ministre a mis fin au débat... du moins sur le plan intellectuel. Il s'agit du Rapport rendu en avril 2009 par Bernard CHEVASSUS-AU-LOUIS (ancien président du M.N.H.N. de Paris en 2002-2005, tout en ayant fait l'essentiel de sa carrière à l'INRA), aujourd'hui inspecteur général de l'Agriculture et membre du CGAER (Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces ruraux). Ce rapport a été rédigé avec l'aide de Jean-Michel SALLES (vice-président) et Jean-Luc PUJOL (rapporteur général), sous l'égide du Centre d'Analyse Stratégique, avec le titre : *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique.* Plutôt que de se livrer à la moindre analyse d'un document de 376 pages, accessible à tous, il nous a paru intéressant d'en livrer l'image récemment donnée, en trois pages (*), par le C.R.P.F. de Rhône-Alpes, à l'intention de ses adhérents, propriétaires forestiers privés de la région.

(*) Le Cahier technique n° 41, in « *Le Forestier Privé* » Rhône-Alpes, organe du CRPF Rhône-Alpes, N° 58, octobre 2014.

Sous le titre « Valeurs des services écosystémiques », on peut lire : *Le sylviculteur participe au maintien de la biodiversité, à la présence d'une eau de qualité ou encore à la séquestration du CO₂. Autant de services rendus aujourd'hui sans valorisation financière. Mais de quoi parle-t-on ? Une des définitions de la notion de services écosystémiques est la suivante : « les services écosystémiques correspondent aux bénéfices retirés par l'homme des processus biologiques » (Conseil Général du Développement Durable, 2010). Dès lors, peut-on approcher leur valeur monétaire ? /.../. Les économistes ont plusieurs approches : le coût de remplacement, les dommages évités, des méthodes plus indirectes basées sur les préférences des consommateurs.*

Sur une valeur globale estimée à quelque 970 € (avec de fortes marges d'incertitudes liées surtout aux services dits culturels, comme la promenade), le « Rapport CHEVASSUS-AU-LOUIS » estime que « la production de bois, quasiment le seul service rémunéré, ne compte que pour 10 % de la valeur totale » d'une forêt (*). Suivent des informations sur les champignons forestiers (la valeur annuelle de la ressource en Chartreuse est estimée à 2,3 millions d'€), la protection contre les chutes de blocs (la forêt coûte 20 fois moins cher que les filets de protection), la biodiversité (un contrat Natura 2000 a été passé pour développer la plantation de 1200 boutures d'origine génétique locale (saules, peupliers, ormes) dans l'île de la Platière, sur la rive gauche du Rhône en Isère), la chasse (ce sont plus de 25 millions d'€ que la location de la chasse a rapporté annuellement (pour l'ensemble de la France) à la forêt privée, et même 55 millions à la forêt publique ». On pourrait d'ailleurs développer le dernier point, car une forêt sans véritable équilibre agro-sylvo-cynégétique, privée de cervidés et de prédateurs, n'est pas un écosystème complet, et ne relève donc plus du concept scientifique de biodiversité.

(*) Le chiffre de 10 % ainsi crédibilisé par le Rapport CHEVASSUS-AU-LOUIS justifie bien à posteriori les valeurs à l'époque surprenantes de COSTANZA et des forestiers suisses ; mais si les naturalistes se sont ainsi « trompés » par excès en 2004 à la suite de PEYRON, au moins cela devrait leur valoir de n'être plus catalogués comme « catastrophistes », ou autres prophètes de malheur...

On pourrait évidemment parler de bien d'autres choses encore en matière de SESE (Services Economiques, Sociaux et Environnementaux, selon notre jargon), mais la contribution des forêts à la préservation du cycle de l'eau mérite d'être citée en raison de son caractère éminemment systémique. Dans un premier temps, l'échauffement mondial (+ 4°C dès 2050 ?) va se traduire par une augmentation de l'évapo-transpiration (forestière) et une accélération du cycle de l'eau. Mais les précipitations consécutives vont subir des modifications d'ordre géographique et saisonnier difficiles à prévoir, plus encore à maîtriser : certaines régions vont être desséchées, d'autres inondées ; des climats risquent alors de se dérégler. En fin de compte, les surfaces forestières participant au cycle de l'eau verront leur expression et leurs rôles modifiés, avec des pluies torrentielles en milieu méditerranéen, ou des périodes de sécheresse en milieu continental.

A propos de la biomasse à fins énergétiques, on envisagera la possible contribution des forêts de notre pays pour tempérer nos importations d'hydrocarbures, luttant ainsi de surcroît contre la fossilité de ceux-ci. Dans un premier temps, on calculera l'énergie contenue dans un m³ de bois, puis on estimera les potentialités des surfaces forestières métropolitaines. Enfin, on affrontera ces données à celles de la consommation pétrolière française, notamment celle liée à la circulation automobile thermique (véhicules particuliers et publics, camions, tracteurs). Des chiffres fournis par l'encart figurant à la suite, on peut objectivement estimer quelle pourrait être la contribution de la forêt française à l'étanchement de notre potomanie pétrolière. Tout d'abord, il est bien évident que nos calculs théoriques ne sont rien moins que platoniques. Pour un tel processus, on doit en effet prendre en compte, « du berceau à la tombe », toutes les dépenses et pertes en ligne, depuis l'énergie (fossile) pour couper puis transporter le bois de la forêt à l'usine, jusqu'à celle nécessaire à transformer la biomasse sèche en hydrocarbures ou autres combustibles, puis en assurer la redistribution pour utilisation publique.

En proposant (provisoirement) 50 % de « pertes » (= 50 % de rendement global pour le processus), les forêts métropolitaines représentent un gisement égal à 18 Mtep, alors que la consommation annuelle des transports est de 40 Mtep, sur un total de quelque 75 Mtep importés : on voit la disproportion ! Plus concrètement, si l'on veut que la biomasse ligneuse participe de manière significative à la consommation énergétique dite « finale » de notre pays (166 Mtep en 2012), une contribution de 10 % concernerait la quasi intégralité de nos forêts, publiques et privées. Inversement, la mise à contribution de 10 % de nos boisements ne répondrait que pour *ca* 1 % au budget énergétique national (D'après *Chiffres clés de l'énergie. Repères* - Commissariat général du Développement Durable, février 2014, p. 9). Voir en fin de ce chapitre IV (p. 40) une note apportant des nuances pratiques sur l'aménité « bois énergie ».

De quelle masse de bois faut-il disposer pour économiser un million de tonnes de pétrole ?

- La valeur énergétique du pétrole (gazole pour simplifier), exprimée en kilocalories, est aisée à définir, et à mémoriser : 10 000 kcal / kep (cf. tableau 2), soit encore 10^7 kcal / tonne. Celle du « bois » est plus délicate à déterminer, même si nous en possédons ici tous les paramètres reconnus (cf. II.3.).

- Nous connaissons la productivité moyenne des forêts métropolitaines, égale à $6,7 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$ (*) en « bois fort », qu'il convient ici de majorer de 50 % pour tenir compte des arbustes (DBH inférieure à 7,5 cm) et autre bois raméal ; valeur consécutive arrondie à $10 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$. En fait, on s'inspire ici de la notion de **FEB** (Facteur d'Expansion des Branches), dont la valeur moyenne feuillus / résineux est plus que proche de la même valeur. Ensuite, on utilise le concept forestier d'Infra-densité **If** qui permet de passer des volumes de bois aux masses ligneuses anhydres ; la valeur moyenne en dérive, encore différente entre feuillus et résineux, mais avec une moyenne égale à $0,48 + / - 0,07$. On passe alors du Volume en bois fort des forestiers à la biomasse ligneuse anhydre **BLA** des énergéticiens.

- Reste à traduire cette dernière grâce à la valeur énergétique attribuée au bois anhydre (à ne pas confondre avec le bois « sec », qui contient environ 12 % d'eau résiduelle), soit 4,7 kcal / g (cf. tableau 4). Dès lors, 1 m^3 de bois = 0,48 tonne = 480 000 g = $2,26 \cdot 10^6$ kcal, d'où l'on tire l'équivalence : 1 tonne de pétrole = 10^7 kcal = $4,4 \text{ m}^3$ de bois fort, soit encore 1 m^3 de bois fort = 0,23 tep. Un hectare de forêt pourrait donc fournir annuellement l'équivalent énergétique de 2,3 tonnes de pétrole, et la forêt française, dont la surface approche les 16 millions d'ha, constituerait (sur le papier...) un gisement pérenne de quelque 36 Mtep. Un rendement global réel de 50 % abaisserait la ressource à **18 Mtep** annuels.

(*) Moyenne pondérée entre les futaies résineuses ($9,0 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$) et les futaies feuillues ($5,9 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$), les divers « taillis » cubant de 3,6 à $5,6 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$ (d'après I.F.N., 1999).

A ce propos (voir F.C.B.A., 2014) une rubrique assez énigmatique couvre quelque 21 Mm^3 de bois relevant d'une « auto-consommation » annuelle, à côté d'une « récolte » de 64 Mm^3 et d'une « commercialisation » de 35 Mm^3 seulement. Qu'il s'agisse d'auto-consommation ou d'un manteau sociétal pudique auquel Bercy n'aurait pas accès, deux remarques s'imposent : la filière énergie n'est-elle pas ainsi déjà bien sollicitée en France ? l'utilisation de cette biomasse ligneuse ne risque-t-elle pas de se faire en majorité dans des conditions où la maîtrise d'émission des particules fines resterait hors de tout contrôle environnemental (cf. GARRIC, 2011) ?

Néanmoins, ne dédaignons pas cette « ressource solaire différée » : la biomasse ligneuse, par exemple les déchets de scierie, opportune pour l'utilisation semi-collective (réseau de chaleur pour le collège, la mairie, la maison de retraite, le pôle médical, et des immeubles locatifs) ; pour les transports, suivons les conseils de l'ADEME : la révision et une conduite apaisée de nos voitures permettraient sans trop d'efforts d'économiser 25 % de notre consommation, soit 10 Mtep, plus de la moitié de notre potentiel ligneux (sans parler de notre porte-monnaie, ou de

notre santé...). De même, avant de chauffer, veillons à bien isoler nos combles, par exemple avec de l'ouate de cellulose, assurant ainsi à nos vieux papiers journaux une durée de vie égale à celle d'une génération humaine.

IV. 2. Biodiversité

Aux frontons de nos mairies figure le tryptique « Liberté / Egalité / Fraternité ». Peut-être lira-t-on un jour, à l'orée de certains bois : Aménités / Biodiversité / Naturalité ?

IV.2.1. Biodiversité ornithologique

Avifaune et successions forestières

Longtemps en retard sur l'ornithologie anglo-saxonne et allemande, l'ornithologie française (qui n'avait alors aucune place dans nos universités) s'est placée en pointe lorsque l'école dijonnaise du C.E.O.B. (Centre d'Etudes Ornithologiques de Bourgogne ; Camille Ferry, Bernard Frochot, Jacques Blondel) a conduit, il y a un demi-siècle, des travaux pionniers en matière d'ornithologie forestière. Dans un premier temps, une méthodologie a été établie, pour définir des protocoles d'observation à même de fonder des inventaires utilisables en recherche appliquée (FERRY & FROCHOT, 1958. FERRY, 1959). Suivirent d'autres travaux, dont *L'avifaune nidificatrice d'une forêt de chênes pédonculés en Bourgogne : Etude de deux successions écologiques* (FERRY & FROCHOT, 1970), concernant une futaie domaniale soumise à un cycle sylvicole de 200 ans. Utilisant comme indicateur la « biomasse consommante », qui traduit l'intensité de la relation énergétique de l'avifaune avec son milieu, les auteurs fournissent (p. 230) une courbe très intéressante (Figure 3) illustrant, pour diverses espèces ou familles, l'évolution temporelle de l'avifaune (= peuplement avien) en fonction des stades forestiers.

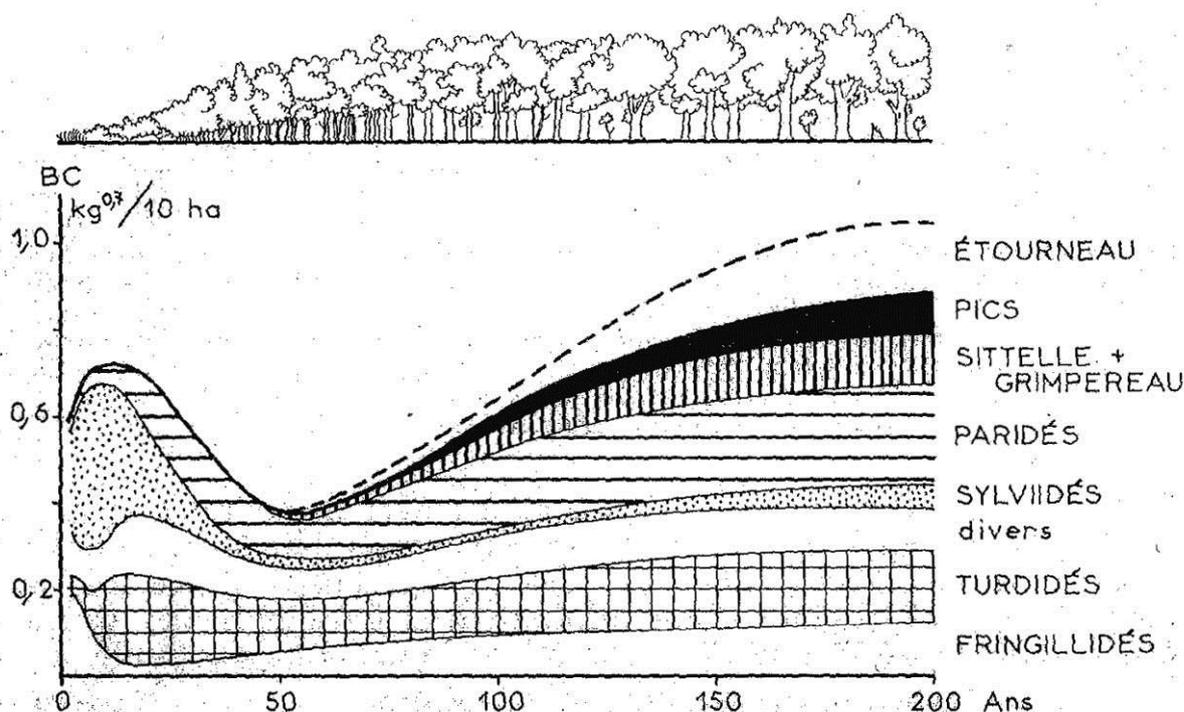


Figure 3

Evolution séculaire de la **biomasse avienne** consommante d'une chênaie de Bourgogne (FERRY et FROCHOT, 1970)

Le point marquant est sans conteste le partage de la succession écologique en trois phases : une phase initiale « euphorique », avec un maximum autour de 15 ans ; une phase intermédiaire « dépressive », vers la cinquantaine, avec une baisse d'un facteur 2 de la biomasse avienne ; une longue phase de maturation (« la force tranquille ») triplant sensiblement en plus d'un siècle la valeur du stade précédent (on s'approche asymptotiquement du climax forestier). Les auteurs commentent : *On voit que l'Etourneau, les Pics, la Sittelle et le Grimpereau* (cavernicoles pour nidifier ; les deux derniers, corticoles pour se nourrir) *n'habitent que les stades arborescents de la forêt et que leur abondance n'est forte que dans les plus âgés : elle est étroitement liée à l'importance des troncs et des branches*. Et encore : *La famille des Sylviidés* (Fauvettes, Pouillots) *apparaît comme une habitante des stades buissonnants, avec des exceptions /... /*. *Quant aux Fringillidés, ils montrent une courbe évolutive en creux, avec un premier sommet dans les très jeunes stades, du type lande* (Bruants, Linotte), *et un sommet terminal dû au Grosbec et au Pinson dont l'optimum est au climax*. Tout récemment, l'un des élèves du docteur FERRY, Bernard FROCHOT, a traduit en termes plus modernes les mêmes phénomènes, faisant appel à la notion de « biodiversité » (FROCHOT, 2012) (Figure 4).

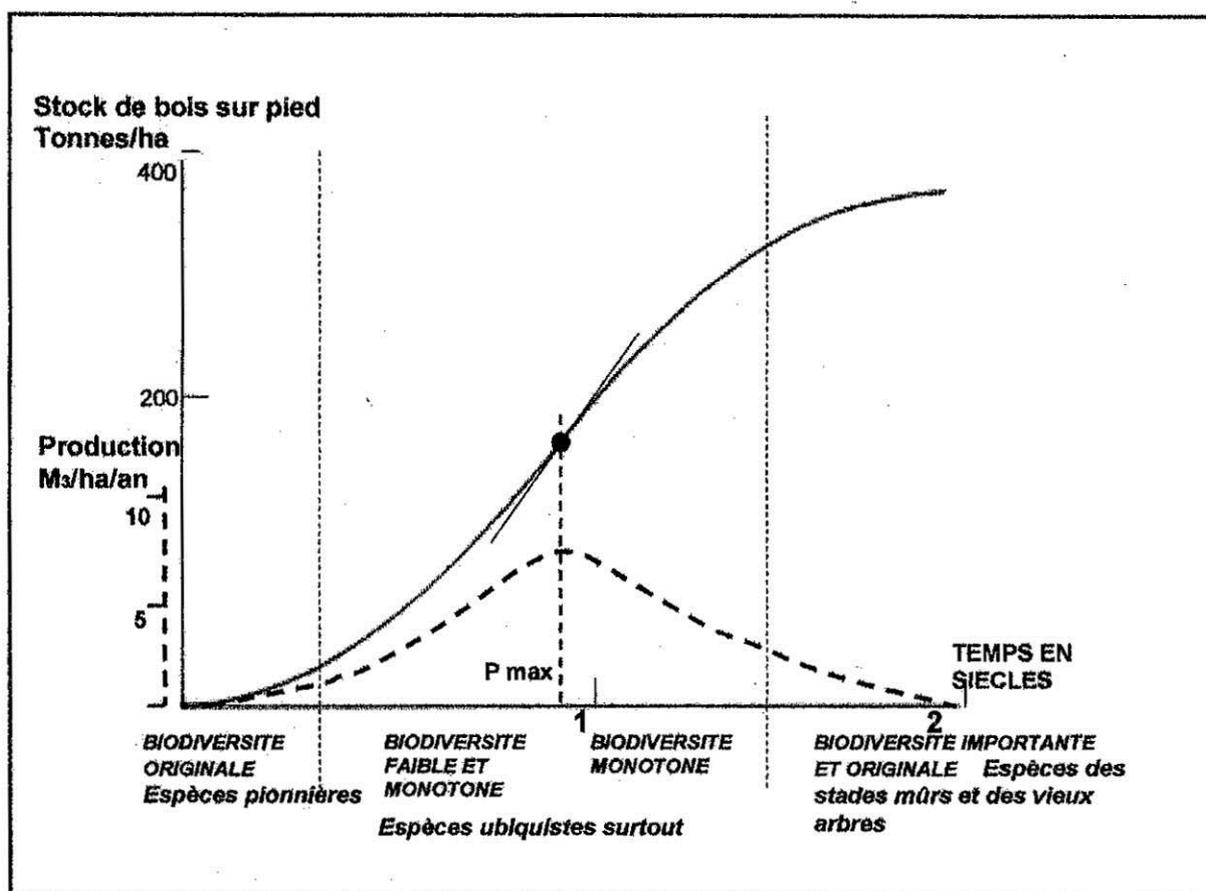


Figure 4

Evolution de la **biodiversité avienne** au long d'un cycle forestier (FROCHOT, 2012)

Qualitativement, l'auteur parle de *biodiversité originale* pour les stades pionniers, de *biodiversité importante et originale* pour les stades mûrs et des vieux arbres. Autour du centre de la courbe en cloche correspondant au maximum de la productivité (brute) ligneuse, il est question de *biodiversité faible* et / ou *monotone*, due surtout à des espèces ubiquistes (= passe-partout), donc banales.

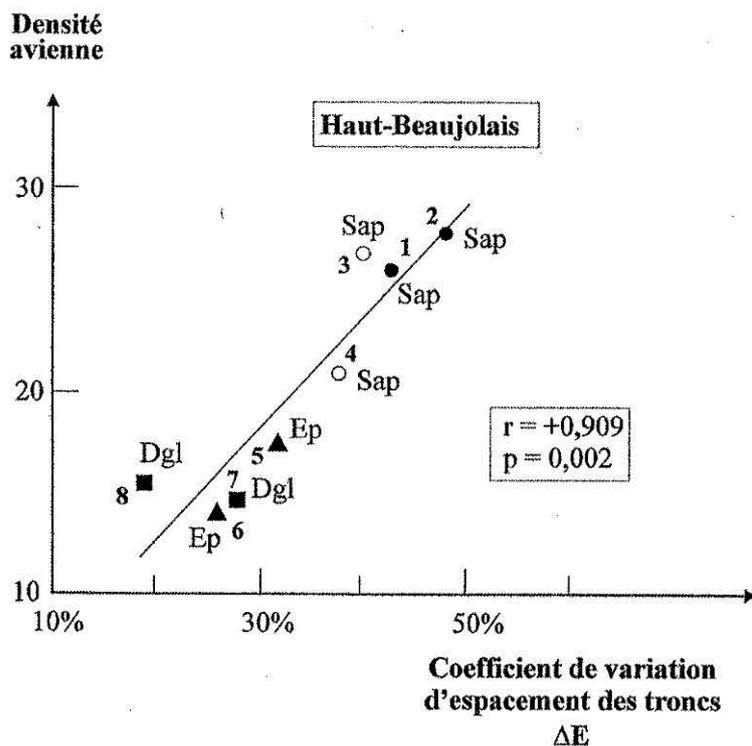
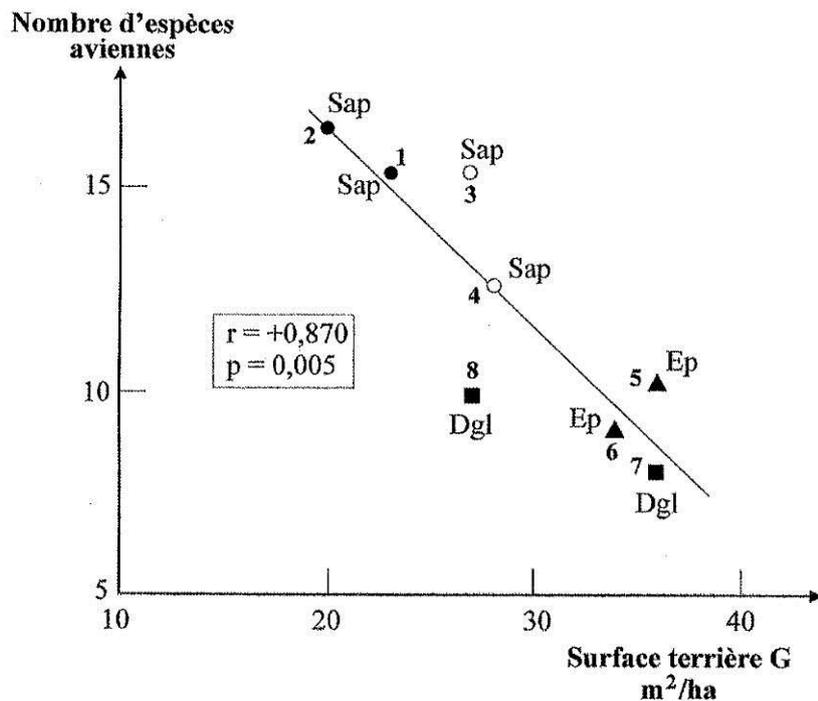
Dans la décennie 1980, empruntant et adaptant ce savoir, la FRAPNA approfondit le propos en envisageant les paramètres déterminant les relations écologiques de l'avifaune avec son biotope forestier : indigénat des essences, modes de sylviculture (densité et régularité des peuplements, naturels ou résultant de plantations), notamment dans le cadre d'une étude (FRAPNA, 1988 - *Avifaune et altérations forestières*) commanditée par le ministère de l'Environnement.

Dans un premier temps (LEBRETON & PONT, 1987), deux effets ont été mis en évidence : la nature des espèces (sapin, indigène *versus* douglas, introduit) ; l'âge des peuplements (jeunes, autour de 30 ans *versus* âgés, autour de 80 ans). En cumulant les deux handicaps (sapinières irrégulières, gros bois *versus* jeunes douglasières, régulières), l'impact sur l'avifaune est sévère : la richesse (= nombre d'espèces) passe de 15,3 à 9,9 (- 35 %) ; l'abondance (= nombre d'individus pour 10 ha) de 26,1 à 15,5 (- 40 %) ; la diversité (calculée selon Shannon et Weaver) de 4,12 à 3,44 bits. Si la Grive draine, le Rougegorge et le Pinson résistent bien, le Grimpereau des jardins régresse de 90 % et le Pic épeiche disparaît.

Dans un second temps (LEBRETON, BROYER & PONT, 1987), plus que la stratification de la couverture forestière, privilégiée par les ornithologues dijonnais, ce sont deux paramètres de structuration « horizontale » qui apparaissent déterminants : l'espacement moyen des arbres (= densité du peuplement, appréciée par la surface terrière, un indicateur de base emprunté aux forestiers), la variabilité de cet espacement (= régularité spatiale du peuplement, appréciée par le coefficient de variation de la distance entre arbres proximes). Le premier descripteur est bien corrélé, négativement, aux trois valeurs ornithologiques de richesse, abondance et diversité, surtout le second. Un examen plus attentif permet de déceler le même seuil critique dans chaque cas : pour la surface terrière, l'abondance avienne tombe en dessous de 20 individus / 10 ha lorsque la densité du boisement dépasse 30 m² / ha ; pour la variation des distances entre arbres (l'irrégularité du peuplement), la valeur-seuil est égale 0,35 (*vide infra*, figures 5 et 6).

On peut alors expliquer les relations entre peuplements forestiers et biodiversité avienne, qui dépend en effet des modes de sylviculture choisis sur des critères d'efficacité et / ou de rentabilité dits économiques : *En ce qui concerne l'hétérogénéité (spatiale) des peuplements, le seuil de densité avienne fixé à 20 individus permet de distinguer deux quadrants du graphe : au dessus de la valeur seuil 0,35, on trouve la quasi-totalité des sapinières, en dessous les peuplements réguliers et monotones, exogènes et artificiels (quasiment dépourvus de sous-bois) d'épicéas et de Douglas.* Le déterminisme du phénomène est peut-être d'ordre comportemental : lorsque les mêmes arbres, de même âge, de même aspect se présentent en outre en ordre régulier dans les deux dimensions d'un plan faiblement éclairé, comment l'oiseau peut-il aisément reconnaître l'arbre supportant son nid ? Cela ne rappellerait-il pas nos difficultés à trouver la bonne adresse dans une banlieue pavillonnaire aux maisons bâties selon le même plan, et sur des parcelles iso-géométriques ?

Une autre étude conduite en Rhône-Alpes, dans l'étage collinéo-montagnard du Diois (LEBRETON & CHOISY, 2000), a permis d'envisager la trajectoire temporelle d'une autre essence, le Pin sylvestre (localement confronté au Pin noir, introduit, et au Chêne pubescent, indigène). Les résultats confirment amplement ceux des chênaies de Bourgogne, depuis les deux stades pionniers, herbacés et buissonnants (Alouettes des champs et lulu, Bruants jaune et ortolan, Pie-grièche écorcheur) jusqu'aux deux stades ligneux, arbustif et arboré, plus aptes au présent propos. *Un schéma général se dégage de ces observations, marqué essentiellement par l'existence d'une « dépression transitoire » de la qualité de l'avifaune, dépression encadrée par une « embellie buissonnante », et par une « maturité arboricole ». « Un tel constat n'a rien de fondamentalement nouveau, et des phénomènes évolutifs analogues ont déjà été décrits ; mais il s'agissait surtout de successions forestières dirigées par l'homme, alors que la reprise est ici due au dynamisme végétal faisant spontanément suite à l'abandon anthropique.*



Figures 5 et 6

Influence de deux **paramètres sylvicoles** (boisements résineux) sur l'**avifaune nidificatrice** dans le Haut-Beaujolais (Rhône)

- En haut, influence de la **densité ligneuse** sur la richesse avienne (= nombre d'espèces d'oiseaux nicheurs)
- En bas, influence de la **régularité ligneuse** sur la densité avienne (couples /10 ha) (In LEBRETON, 2002, p. 68)

Les résultats de ces divers travaux n'ont pas dormi dans la sphère académique, présentés lors de diverses réunions ou colloques tenus dans la décennie 1990 dans le sud-est de la France, en relation avec la profession forestière : *La forêt dans l'espace montagnard. Vers un nouvel équilibre ?* (Rencontres européennes, Grenoble, avril 1994) ; *Forêt méditerranéenne et Faune sauvage* (Forêt méditerranéenne, La Sainte-Baume, novembre 1994) ; *Exploitation forestière et Protection de l'Environnement* (FIBOIS et CCI, Valence, mai 1995). Cette « communication » est hélas restée de peu d'effets, sinon dans certains esprits, du moins sur le terrain. De plus, devant ce que certains (dont des naturalistes) ont pu qualifier « d'impérialisme ornithologique », on est en droit de se demander si les oiseaux peuvent en effet prétendre (avec eux les ornithologues...) à rendre compte de toute la biodiversité d'un écosystème !

Que l'avifaune soit accessible et d'un bon « rapport qualité / prix » est indéniable, d'autant que chaque relevé intègre une surface de détection de l'ordre de plusieurs hectares ; avec une cinquantaine d'espèces (32 au total dans le Haut-Beaujolais, 50 dans le Diois), l'échantillonnage est à la fois commode, sans difficultés d'identification particulières, et statistiquement suffisant. Enfin - et surtout sans doute - l'oiseau est un indicateur de la majorité de l'écosystème, placé qu'il est entre le végétal, qui le loge et le sustente (et dont il assure parfois la dissémination des graines) et l'entomofaune, qui le nourrit (dans le feuillage ou au sol). Cette justification n'écarterait évidemment pas l'utilité d'autres études, comme celle des mammifères (moins nombreux et plus discrets), herbivores ou prédateurs, de la fonge ou de l'entomofaune (plus saisonnières). Mais, dans la mesure où l'oiseau utilise les mêmes sens (la vue, l'ouïe) que notre propre espèce pour apprécier son environnement paysager, il constitue pour nous une « sentinelle » fiable des changements écosystémiques, dans une perspective où la science peut d'ailleurs rejoindre la culture. Est-ce donc un hasard si la protection de la nature (la « bioconservation »...) a si souvent recruté parmi les ornithologues ?

La sylviculture devra désormais s'inspirer davantage de tels paramètres et de leurs contextes, qu'il s'agisse de futaie équienne (ne faisant alors appel qu'à des essences indigènes) ou jardinée ; au delà, nous l'avons dit, il s'agira d'objectifs particuliers, à « caractère industriel et commercial ». Une partie du monde forestier y est d'ores et déjà ouverte, se donnant comme objectif de « *valoriser les fonctions multiples de la forêt* » (A.F.I., 2009) (cf. aussi l'association *Pro Silva*, reconnue en France d'utilité publique depuis mars 2013).

IV.2.2. Biodiversité fongique et microbienne

Après avoir considéré ce qui vit dans l'espace épigé forestier, on peut examiner ce que nous foulons du pied, lors de nos visites, tout en nous restreignant à quelques champignons dits supérieurs, appartenant à la classe des Basidiomycètes.

La fonge,
c'est-à-dire les champignons, désormais considérés
comme un groupe autonome, à l'égal de la flore et de la faune.

D'un point de vue très pragmatique, on peut distinguer champignons cachés (essentiellement exprimés dans le sol) et apparents (soit sur le sol, où les comestibles retiennent plutôt notre attention, soit sur les arbres, où ils sont alors mangeurs, et non mangés). Dans le sol, les champignons microscopiques participent à la constitution des humus, stade intermédiaire de la minéralisation de la matière organique, quantifiable par l'évolution du rapport C / N (= rapport pondéral des éléments carbone et azote). Le feuillage des résineux et celui des feuillus ne conduisent pas aux mêmes humus, en général plus acides dans le premier cas (mor), moins dans le second (mull) ; il y a bien entendu des situations intermédiaires (moder) ou plus complexes.

Certains champignons macroscopiques sont nettement inféodés à certaines espèces arborées, et l'on retrouve la dualité feuillus / résineux. Ainsi, chez les Bolets (pris au sens large), le Bolet satan « *ne se rencontre guère que sur sols calcaires ou neutres, sous les hêtres, les charmes, tilleuls, etc.* » tandis que le Bolet jaune (parfois nommé Nonnette voilée) « *pousse sous diverses espèces de pins* » ; plusieurs Bolets sont spécifiques du mélèze, y compris dans ses aires d'introduction : *Boletus elegans*, *Boletus viscidus*, *Boletus cavipes*. Le Bolet le plus apprécié des mycophages, le cèpe de Bordeaux, vient sous feuillus ou sous conifères, bien que « *moins communément dans les bois feuillus de la plaine que dans les sapinières de montagne* » (ROMAGNESI, 1971). Le traitement forestier peut affecter sévèrement la diversité et l'abondance fongiques, et une pessière intensive ne connaît guère plus de champignons que d'oiseaux, même si ce n'est pas pour les mêmes raisons, sinon l'éclairement transmis au sol.

D'autres champignons, apparemment moins utiles, n'en sont pas moins essentiels pour la forêt, entretenant avec l'arbre de subtiles relations nutritives au niveau de la rhizosphère. Il s'agit de la mycorrhization : « *Le développement normal des arbres est souvent lié à la présence de mycorhizes ; elles agissent comme organes d'absorption plus efficaces que les racines elles-mêmes en assimilant des composés azotés (et en synthétisant souvent des molécules particulières) que l'arbre serait incapable d'absorber par ses propres moyens. En paiement de ce service, l'hôte fournit au champignon (hétérotrophe, rappelons-le) les sucres qui lui manquent* » (ROMAGNESI, 1971). Le phénomène peut même être reproduit *in vitro*, par exemple pour le Pin maritime et l'Hébelome *Hebelomus cylindrosporum*. Il s'agit donc d'une symbiose arbre / champignon et l'échec de certains reboisements conduits à partir de plans issus de pépinières peut s'expliquer par le caractère « aseptique » des plants ainsi produits. Inversement, on trouve dans le commerce des plants de chênes mycorrhizés permettant ou facilitant la présence et la croissance des truffes ; le rapport financier de la fonge est alors supérieur à celui du bois (surtout sous le manteau...) (LEBRETON, 2002, pp. 72-74).

Quant aux champignons lignivores, poussant sur les souches ou sur les troncs, ils connaissent deux types de « pourritures », appellation provenant de la décomposition du bois sous l'action d'enzymes fongiques. Dans le cas des « pourritures blanches », le plus souvent des Agaricales (exemple : *Pleurotus ostratus*, le Pleurote en huître), le champignon attaque et détruit préférentiellement la lignine par le jeu de polyphénol-oxydases, respectant la cellulose, blanche ; dans celui des « pourritures rouges », le plus souvent des Polyporacées (exemple : *Daedalea quercina*, le Dédale du chêne), le champignon dégrade la cellulose grâce à ses osidases, la lignine résiduelle prenant une coloration brun-rougeâtre due à des processus de quinonisation de substances phénoliques. Même si ces attaques ne conduisent pas toujours, ou très rapidement à la mort de l'arbre, la valeur marchande de celui-ci s'en trouve évidemment affectée. Certaines espèces n'attaquent que des arbres vivants (amoindris ou non par l'âge, d'autres parasites ou par des blessures mécaniques) ; d'autres se régalent du bois des charpentes, à l'abri de la lumière ou favorisés par l'humidité (ARMAND-FRAYSSE & LEBRETON, 1976).

Une manière de protéger la biodiversité d'une forêt, ce qui permet de mieux connaître les mécanismes de son évolution, est de la laisser maîtresse de son destin (un forestier traditionnel dirait peut-être de « l'abandonner » à son destin, en la privant du bénéfice du régime forestier). Pour les forêts domaniales, l'ONF a créé et mis en oeuvre la formule des RBI, Réserves Biologiques Intégrales, d'où toute intervention humaine est en principe bannie. En janvier 2015, les RBI sont en Rhône-Alpes au nombre de 12, pour une surface totale de 5275 ha.

Pour les forêts privées, la formule « FRENE » est aujourd'hui présente en Rhône-Alpes (voir site refora.online.fr). Adoptée le 27 mars 2009 par le CRFPF (Conseil régional de la Forêt et des Produits forestiers) après proposition au SERFOBE (Service forestier de la Préfecture de Région) par l'association « Forêts Sauvages », elle a été signée le 25 mars 2010 lors d'une réunion tenue dans les monts de la Madeleine (Loire) en présence du Préfet de Région, par les représentants des trois collèges de la Forêt privée, de la Forêt publique et des APN. A côté des RBI de l'ONF, 300 hectares bénéficient en Rhône-Alpes à l'heure actuelle de cette formule originale, localisés pour l'essentiel en Dombes (Ain), dans la chênaie pédonculée à bouleau de la Fondation Pierre Vérots, sans exploitation notable depuis plus d'une cinquantaine d'années.

Forêts en libre évolution : le point de vue d'un forestier « évolutif »

Extrait de : *Les forêts en évolution naturelle, des forêts pour tous.*

F.-X. Nicot, 2014 - *Lettre de la Fondation Pierre Vérots* n° 26, octobre 2014, pp. 2-3.

L'épicéa peut vivre jusqu'à 300 ans en montagne, tandis que la sylviculture y prévoit son prélèvement à 150-180 ans. En effet, à cet âge, l'épicéa atteint généralement un diamètre optimal pour son exploitation : possibilité de l'abattre, de le transporter, de le scier. Ces étapes à venir dans sa valorisation anthropique sont nécessairement prises en compte par le forestier qui, de génération en génération, adapte ses pratiques sylvicoles en fonction des besoins en bois et des techniques de transformation. Mais dans le cas de l'épicéa, le cycle de l'arbre est raccourci de 150 ans. C'est près de la moitié du cycle qui est tronqué. Par conséquent, les phases de vieillissement et d'écroulement sont souvent absentes dans les forêts exploitées. Les arbres sur-matures, sénescents et morts sont sous-représentés ou absents. Or ces stades regorgent d'une diversité spécifique très importante et de liens interspécifiques très nombreux.

La biodiversité associée à ces stades forestiers est plus riche. Parmi les espèces animales ou végétales les plus caractéristiques, les insectes saproxyliques (= qui mangent le bois mort) sont nécessairement inféodés à des arbres sénescents ou morts. Leur biologie ne leur permet d'entrer en action dans les écosystèmes qu'à la condition de rencontrer des imperfections dans le bois (creux, décollement d'écorce, coulure de sève, carie, cavités) pour s'y installer. Ces imperfections ne sont pas suffisamment présentes dans les jeunes arbres et seuls les arbres sénescents ou morts présentent de tels biotopes favorables à ces espèces. Ainsi, on estime que la biodiversité liée aux stades matures, sénescents ou morts des peuplements forestiers est bien plus riche que dans les forêts jeunes ou économiquement optimales.

Note : les noms de quelques coléoptères des vieux stades ligneux sont ajoutés comme exemples à cet encart : Scarabée Pique-Prune *Osmoderma eremita*. Vergers anciens, à l'étage planitiaire-collinéen. Lucane cerf-volant *Lucanus cervus*. Chênes, à l'étage planitiaire / collinéen. Rosalie des Alpes *Rosalia alpina*. Hêtre, à l'étage montagnard).

IV.3. Naturalité

« La nature est sans questionnement, elle s'épanouit parce qu'elle s'épanouit, elle ne préoccupe pas d'elle-même, elle ne s'interroge pas, même si on la regarde ».

Adaptation libre de : « *Die Rose ist ohne Warum, sie blüht weil sie blüht. Si acht nicht ihrer selbst, fragt nicht, ob man sie siehet* » (poème de Angelus Sibelius. Le pèlerin chérubinique, 1657).

Scientifiquement, on peut définir comme suit la naturalité forestière : une forêt (comme tout autre milieu vivant) est naturelle lorsque son peuplement (ensemble interactif de ses espèces, végétales et animales) est en harmonie écologique et évolutive avec son milieu (vivant et non-vivant). Sauf à piétiner les concepts, on ne saurait donc « améliorer » la biodiversité d'une forêt médio-européenne par l'introduction de l'Epicéa de Sitka ou du Tulipier de Virginie, historiquement et biologiquement déconnectés de l'écosystème forestier ambiant. Cette harmonie se décline à plusieurs niveaux d'organisation biologique, dont le respect simultané permet seul de qualifier la forêt de ce point de vue. Le premier niveau est d'ordre biogéographique (dans une perspective historique) : les essences présentes sont-elles vraiment indigènes, à une échelle de temps prenant les dernières glaciations européennes comme référence ? C'est bien le problème des introductions (volontaires ou accidentelles) d'espèces dues à l'Homme, parfois avec succès productif (le Douglas), souvent en vain (le pin Weymouth),

le plus souvent avec dommages (l'Eucalyptus). Ainsi, l'Epicéa, éliminé il y a quelque 10 000 ans par les glaciers, n'est-il plus aujourd'hui indigène, donc naturel, à l'ouest de la vallée du Rhône. Cette notion s'applique également aux entités infra-spécifiques, c'est à dire que le Pin laricio de Corse (l'une des sous-espèces du Pin noir) ne saurait remplacer le Pin de Salzmann dans les boisements cévenols : il y a donc aussi un fondement génétique à la naturalité.

Le protocole « Forêt de montagne » de la Convention alpine

En 2008, la FRAPNA (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature) a obtenu que l'arrêté préfectoral régional sur « *l'utilisation des matériels forestiers de reproduction (= plants) éligibles aux aides de l'Etat dans les projets de boisement et de reboisement* » soit mis en accord avec l'article 1^{er} du protocole « Forêt de Montagne » (Communiqué FNE), document approuvé par la France le 31 janvier 2006 : *Article 1^{er}. 1. L'objet du présent protocole est la conservation de la forêt de montagne en tant qu'écosystème proche de la nature. 2. Les Parties contractantes s'engagent notamment d'assurer avant tout – la régénération naturelle de la forêt, – des peuplements étagés et bien structurés, composés d'essences adaptées à la station – l'utilisation de plants forestiers de provenance autochtone.*

Cette démarche a ainsi permis d'écarter de la partie alpestre de Rhône-Alpes, entre autres espèces, le Pin noir d'Autriche, le Douglas et le Tulipier de Virginie, nonobstant une circulaire du ministère de l'Agriculture ayant autorisé l'octroi de subventions « *au titre de la biodiversité* » (sic !).

Le deuxième niveau est d'ordre écologique : les essences présentes sont-elles en accord avec le climat et le sol « indigènes » ? Peut-on planter du Pin sylvestre en forêt de Tronçais, en contradiction avec la notion d'étage bioclimatique ? D'une manière générale, il n'y a plus naturalité lorsqu'il y a transgression de biotope. De même les arbres doivent être en accord avec les autres êtres vivants du biotope, non seulement avec la flore d'accompagnement et les vertébrés, mais avec les microorganismes du sol, fréquents partenaires symbiotiques des essences ligneuses. De plus, une forêt n'est pas naturelle si elle n'abrite pas tous les partenaires de la communauté forestière, dont les brouteurs et les prédateurs. Dans cette optique fonctionnelle, la présence de bois mort et de cavités est aussi un bon indice. Le troisième niveau est d'ordre paysager : la nature ignore la ligne droite et le sentiment quasi esthétique que l'on peut avoir de la naturalité passe justement par une hétérogénéité et une "spontanéité" du milieu (la remarque vaut également pour l'architecture humaine). Les alignements de plantations monospécifiques sont à même de défigurer un paysage à des kilomètres de distance car, comme disait le poète, *l'ennui naquit un jour de l'uniformité* (dans l'espace, mais aussi dans les classes d'âge et la diversité des essences). Il est vrai que le goût « cartésien » de l'ordre géométrique est bien français, les jardins de Versailles relevant de la nature pour nombre de nos concitoyens...

Pragmatiquement, on peut dresser une échelle de naturalité sensiblement inverse de celle que l'on obtiendrait en prenant en compte le degré d'intervention humaine (= naturalité *versus* artificialité). Plus fondamentalement, il y a ici compétition entre **l'information biologique** (qui résulte de la mise en oeuvre des génomes par les phénomènes de co-évolution) et **l'information humaine** (qui résulte de l'injection d'énergie externe et de connaissances dans les écosystèmes) :

Degré 0 : artificiel, intervention humaine totale, nature exclue

Degré 1 : sub-artificiel, intervention humaine forte, nature "objet" ou "outil"

Degré 2 : pseudo-naturel, intervention humaine moyenne, nature "modèle"

Degré 3 : semi-naturel, intervention humaine discrète, dans l'espace et dans le temps

Degré 4 : sub-naturel, intervention humaine faible et / ou ancienne

Degré 5 : naturel, intervention humaine nulle, nature ancestralement libre et spontanée

Le degré 0 est de type "quartier de la Défense". Le degré 1 est celui des plantations de production, alignées et denses, où toutes les fonctions de l'écosystème sont subordonnées à la production ligneuse : c'est la ligniculture, homologue de la maïsiculture. Le degré 2 est toujours voué majoritairement à la production ligneuse, mais l'information humaine injectée est moins "primaire", imitant la nature pour mieux la commander (la futaie jardinée est un exemple de boisement "pseudo-naturel"), bien qu'il y ait trop souvent appel massif à des essences exogènes (douglas ou épicéa *versus* sapin). Le degré 3 se traduit par une influence plus discrète encore de l'homme, qui non seulement n'utilise que des essences indigènes mais accepte leur régénération spontanée ; une sélection des essences et des individus est néanmoins effectuée par la sylviculture, et l'équilibre des espèces peut être modulé, même au second ordre, par l'affouage, la cueillette, la chasse, la promenade sécurisée, etc. Le degré 4 correspond en fait à ce que les naturalistes considèrent comme "naturel", car la main de l'Homme n'a fait ici qu'effleurer le fonctionnement spontané de l'écosystème forestier ; la présence d'arbres morts ou sénescents en est un indice. Quant au degré 5, celui des forêts primaires (= originelles ou "vierges"), il est évidemment rarissime sous nos latitudes, où il ne couvre en Europe que quelques surfaces résiduelles et "muséologiques".

Pour conclure là dessus, conformément à leur propres règles et aux définitions du ministère de l'Agriculture chargé de la Forêt, les naturalistes demandent que le terme scientifique de biodiversité soit strictement réservé aux forêts "naturelles" et "semi-naturelles", d'où les xénophytes sont exclues. Pour les boisements à "aspect semi-naturel", on pourra employer les termes (pourtant un peu ambigus dans le langage courant) de diversité ou de variété, assortis le cas échéant de qualificatifs comme « productif » ou « paysager ». Pour les autres boisements (les deux tiers des forêts françaises), il vaudra mieux ne rien dire du tout pour ne pas accroître la confusion sémantique.

L'importance de la naturalité dans les paysages forestiers

Résumé du chapitre 8 écrit par Nigel DUDLEY dans le *Livre blanc sur la protection des forêts naturelles en France*, édité en 2003 par le WWF France.

Au même titre que la notion de biodiversité, la naturalité est l'un des piliers modernes de la conservation des forêts. Une haute naturalité des forêts est indispensable à soutenir la survie de certaines espèces spécialisées et, ainsi, justifie la création de grandes réserves intégrales où l'ensemble de l'écosystème et les réseaux trophiques présentent une évolution libre. Toutefois, la question de la naturalité des forêts est aujourd'hui matière de degré, des forêts non influencées par l'homme aux champs d'arbres. Ainsi, retrouver partiellement dans les forêts productives semi-naturelles ou artificielles certains éléments de naturalité est tout aussi primordial (exemple du bois mort, des îlots de vieillissement, de l'irrégularité ou du mélange des essences).

Officiellement, le ministère de l'Agriculture (DERF, Rapport *Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises*, 2000, p. 46) considère comme « forêts naturelles » celles estimées par la présence d'une futaie depuis un temps immémorial, exclusivement constituées d'essences localement indigènes et sans intervention humaine depuis au moins 50 ans. Les « forêts anciennes semi-naturelles » (sont) estimées par la présence d'une futaie exclusivement constituée d'essences indigènes, non issue de plantation, en état de forêt constituée depuis au moins 80 ans. En France métropolitaine, les surfaces des premières sont estimées à quelque 30 000 ha (= 300 km², soit 2 p. mille des surfaces boisées), les secondes à quelque 1 500 000 ha (= 15 000 km², soit 10 % des surfaces boisées) ; il existe aussi les *formations boisées à aspect semi-naturel* qui occupent désormais plus de 3 millions d'hectares, soit 47 % des surfaces de futaie, soit 20 % des surfaces boisées.

Dans une autre nomenclature officielle, employée par l'ONF pour qualifier ses « réserves biologiques », les RBI (réserves biologiques intégrales) correspondent (sensiblement) au présent degré 4 ; elles ne concernent que des forêts dites soumises, qui couvrent moins du tiers des surfaces boisées métropolitaines. Concrètement, notre propos (forêts privées, forêts communales) s'attache aux degrés 3 et 4, tendant vers le degré référentiel 5, qui correspond en outre au niveau I de protection défini par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature). Voir aussi : ROSSI et VALLAURI, 2013.

Note sur l'intérêt énergétique comparé des différentes formes et sources carbonées

D'après REFORA (2015, p. 19, s'appuyant sur LETURCQ, 2011 et GUINARD, 2012), la comparaison de quatre sources énergétiques carbonées dont deux **fossiles**, et deux **actuelles** car d'origine forestière, amène à tempérer ici la dimension temporelle de la notion de « ressource renouvelable » du bois énergie. En faisant le bilan complet des deux filières, fossile : charbon et fioul d'une part, et actuelle : plaquettes et déchets ligneux d'autre part, on constate que ces deux types de ressource présentent des valeurs assez proches d'efficacité environnementale, exprimée par la « *quantité de GES (= Gaz à Effet de Serre) émise (exprimée en tonne de C) pour la production d'un mégajoule* » : 23 +/- 3 dans le premier cas, contre 27 +/- 1 dans le second.

On ne chipotera pas sur le léger avantage que semblent présenter fioul et charbon (dû notamment au fait que le pétrole - sinon les gaz de schistes... - est d'extraction et de distribution relativement peu énergivore, comparé au bois), car il y a bien plus grave : en fait, lorsque qu'une forêt vient d'être coupée, son pouvoir fixateur du gaz carbonique est évidemment annihilé : l'utilisation à court terme du bois énergie est alors aussi « noire » que celle du fioul ou du charbon ! Ce n'est donc qu'à moyen ou long terme (de 35 à 60 ans au minimum selon les peuplements) que la fixation compensatrice du CO₂ pourra restaurer la situation (et d'autant moins si on la coupe précocement).

De toute manière, à l'équilibre entre émission et ré-absorption, au mieux le bilan sera-t-il qualifiable de « gris », car seule l'immobilisation définitive de la biomasse ligneuse permettrait de qualifier cette ressource énergétique de « blanche » (comme l'est en partie l'hydro-électricité, dite d'ailleurs « houille blanche », gratuitement fournie par le cycle de l'eau, d'origine énergétique solaire...). Enfin, merise sur le gâteau, les forêts ne ré-absorbent de toute manière que la moitié de ce que relâche l'utilisation du bois énergie, puisque les océans se chargent (cf. II.3., tableau 9, p. 23) de l'autre moitié du travail, de manière surtout physico-chimique ; ceci du moins dans un premier temps, puis par voie biologique, par **les coraux** et par **les mollusques**, dont les Ammonites, autrefois très actives mais disparues à la fin du Crétacé. C'est la « filière carbonatée », où le carbone est totalement entropisé (= dégradé en énergie). La photosynthèse algale, de turn-over très rapide, n'entre pas en compte à ces échelles de temps. (*)

D'autres fixations ont été intenses (et plus intéressantes pour l'Homme, à court terme du moins...), lorsque la teneur en gaz carbonique, supérieure à celle aujourd'hui connue, entretenait une ambiance de serre chaude : les Gymnospermes (dont des Conifères) existaient déjà et, avec les Fougères géantes, furent à l'origine des charbons (le Carbonifère) Mais les Angiospermes (dont les espèces ligneuses, d'où procèdent les Feuillus actuels) durent attendre le Tertiaire, à l'articulation entre Jurassique et Crétacé, pour constituer les premières forêts feuillues et mixtes, aujourd'hui présentes sur tous les continents.

(*) Mais cette photosynthèse absorbe également la moitié du gaz carbonique issu des combustibles fossiles.

V. Rationalités et politiques forestières

Résumé : Critiques et propositions sont ici faites, qui devraient permettre de voir les choses en face, en contournant « langue de bois » et « angélisme vert ». Les forêts françaises occupent aujourd'hui des surfaces appréciables ; nonobstant, leur volume sur pied est nettement inférieur à celui de nos voisins allemand ou suisse, ce qui devrait tempérer les illusions relatives à une large utilisation de notre biomasse ligneuse. **Une sectorisation réaliste des forêts** de France reste à définir, prélude à **une mutation forestière** dans les esprits et sur le terrain, public et privé. De la sorte, des actions plus conformes à l'intérêt général à terme pourraient voir le jour par **un partage des responsabilités et des moyens** entre les différents corps et secteurs de la société française. Mais l'exemple de l'agriculture (des agricultures...), gérée par le même ministère et le même corps d'Etat que la forêt (les forêts...), ne pousse guère à l'optimisme à ce propos ! Pourtant, de simple « usine à bois », la forêt est désormais à considérer, doublement, comme **un écosystème** et comme **un patrimoine**.

V.1. Les révolutions du carbone

La courbe de Gauss, dite aussi « courbe en cloche » (*), fournit une excellente illustration du phénomène de croissance auto-alimentée, plus précisément de l'évolution temporelle de la vitesse de croissance d'un individu, d'une population ou d'un peuplement forestier (ou d'autre nature). Jusqu'à cinq phases peuvent être distinguées : 1. Une phase initiale, où la plantule issue de la graine doit s'adapter à un milieu et à des conditions de vie insolites (chez l'espèce humaine, le nouveau-né met une à deux semaines pour regagner son poids de naissance). 2. Une phase de croissance accélérée puis linéaire, correspondant chez l'Homme à l'enfance. 3. Une zone maximale, où la vitesse de croissance atteint des records : l'adolescence en quelque sorte (des ados peuvent gagner 12 cm en une année !). 4. Un ralentissement progressif, conduisant à une croissance nulle, où l'adulte acquiert la maturité. 5. La sénescence peut survenir (si ouragans et incendies laissent ses chances à l'individu), car les rhumatismes existent aussi chez les arbres, sous forme de cavités, décollements d'écorce, etc., qui font le bonheur de la biodiversité (coléoptères ; oiseaux comme pics, mésanges et grimpeaux). Pour plus de développements (notamment sylvicoles), voir p. ex. ANDRE et DARMON (2014).

(*) En toute rigueur, la courbe de Gauss ne connaît ni début ni fin, étant asymptotique à son minimum et à son maximum, alors que la courbe en cloche a les deux pieds sur terre, comme les croissances matérielles.

Mais là ne s'arrête pas la « modélisation » de la croissance arborée. Revenons pour cela à la phase de croissance la plus active, de 25 à 50 ans selon les contextes. Dans le cas d'un arbuste, on admettra volontiers que l'activité photosynthétique, c'est-à-dire la capacité à produire de nouvelles feuilles, soit proportionnelle au nombre de feuilles à chaque instant présentes. Soit N ce nombre de feuilles, génératrices de dN nouvelles feuilles chaque année dt . La croissance foliaire obéit donc à l'équation élémentaire $dN / dt = k.N$, transformable en $dN / N = k.dt$, où dN / dt est la vitesse de croissance, traduite par la courbe en cloche. La séparation des variables puis l'intégration débouchent alors sur la fonction dite exponentielle $N = N_0.e^{-kt}$, où la constante k traduit le « potentiel biotique » du système vivant considéré.

Mais survient un moment où, indépendamment d'autres paramètres, notamment écologiques, les feuilles, de plus en plus nombreuses, se portent mutuellement ombrage (c'est le cas de le dire), ou entrent en compétition mutuelle pour l'accès au gaz carbonique, à l'eau ou aux sels minéraux. Un « terme de freinage » doit alors être introduit dans l'équation précédente, que l'on peut représenter par le terme $(1 - N / K)$, où K représente la capacité-limite du milieu. L'équation élémentaire devient alors : $dN / N = k.N (1 - N / K)$. Sans aller plus loin, relevons

que pour N faible le terme de freinage tend vers l'unité, si bien que l'équation revient à la précédente. Au contraire, plus N se rapproche de K , plus le terme de freinage tend lui-même vers zéro ; et lorsque N / K est devenu égal à l'unité, dN / dt tend lui-même vers zéro, son intégration de même. En effet, lorsque la vitesse de croissance est nulle, alors la croissance est-elle stabilisée : c'est la croissance-zéro, honnie des économistes et des politiciens !

La courbe de croissance connaît en fait un point d'inflexion lorsque la courbe en cloche (= la vitesse de croissance) passe par son maximum ; en ce sens l'on peut dire que la courbe obtenue – un S majuscule étiré dans le sens du temps – est l'intégrale de la courbe en cloche ; elle présente alors un profil lui valant le nom de **sigmoïde** (on dit aussi « courbe logistique »). Superposons maintenant nos deux courbes, dans leurs formes le plus « idéales » : puisque le point d'inflexion de la sigmoïde correspond exactement au maximum de la courbe en cloche et que celle-ci est symétrique, la sigmoïde l'est alors aussi. Du coup, non seulement le point d'inflexion se situe à mi-hauteur de la capacité-limite du contexte (c'est l'asymptote horizontale de la sigmoïde), mais l'abscisse-temps correspondant à cette demi-limite est-elle-même située à mi-parcours de la sigmoïde (si l'on peut dire pour des courbes asymptotiques...). Tout le monde suit ? Sinon, voir le schéma joint (Figure 7) !

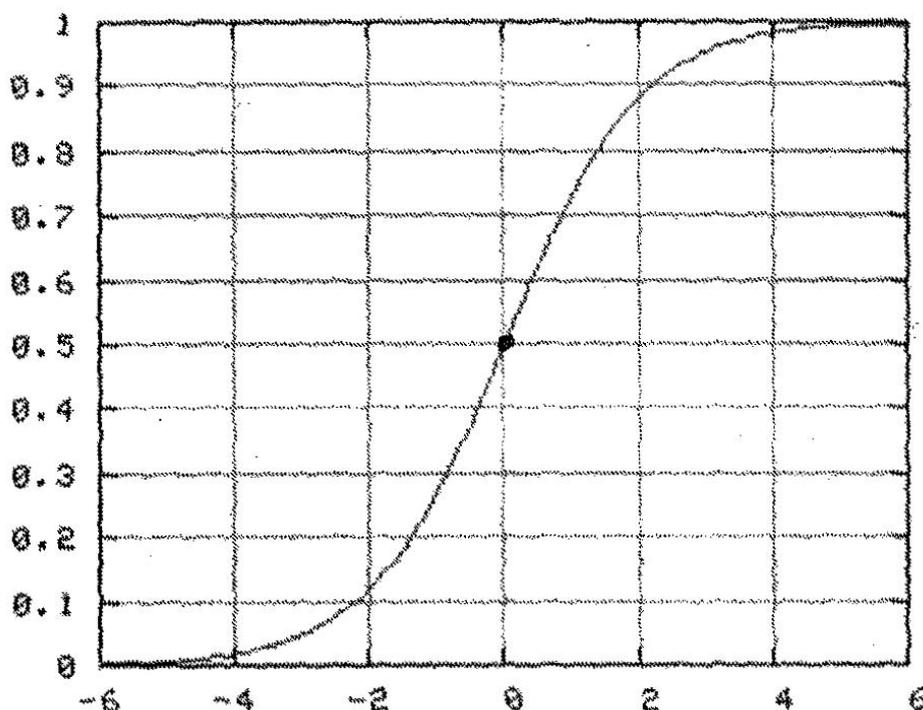


Figure 7

Sigmoïde théorique

On notera la symétrie de la courbe autour du point « abscisse 0 » / « ordonnée 0,5 »
 En d'autres termes, la moitié de la capitalisation est atteinte à la moitié du processus

Dans la pratique, les courbes en cloche et sigmoïde sont plus ou moins déformées par rapport à la théorie graphique, comme en Haute-Loire à la fin du siècle dernier (d'après les données départementales du deuxième Inventaire Forestier National) pour le Pin sylvestre, espèce à croissance très rapide dans le contexte ; on notera un maximum précoce (sols squelettiques ?) et un « supplément de croissance » en fin de cycle (probable atteinte de nouveaux horizons, pédologiques ou géologiques) (Figure 8).

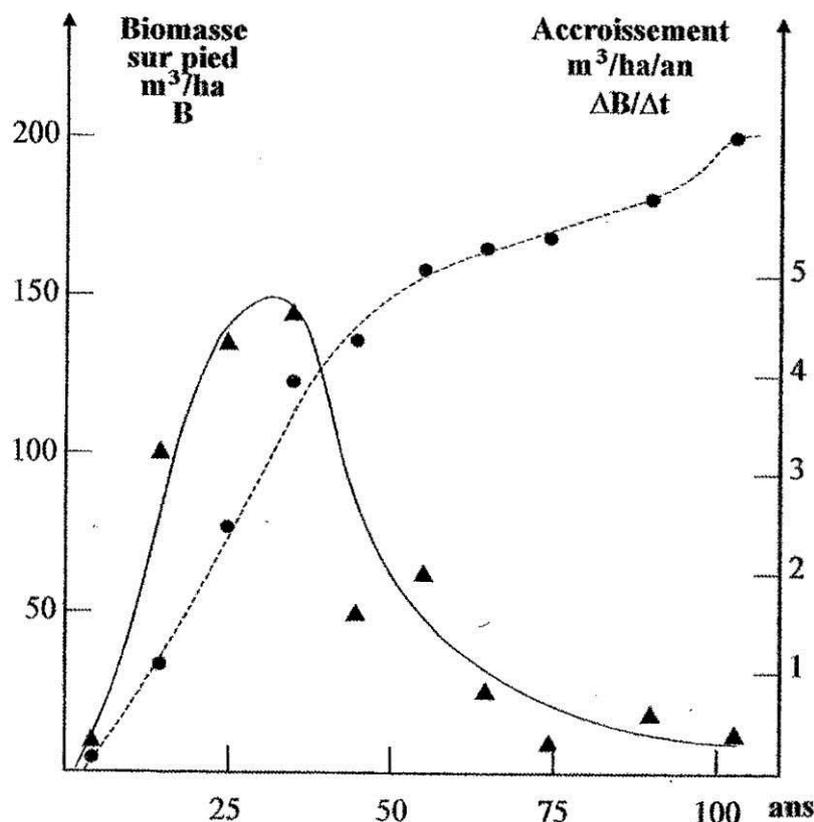


Figure 8

Sigmoïde « pratique »

- Evolution chronologique de la croissance du Pin sylvestre en Haute-Loire
- Courbe « **en cloche** » (triangles noirs) : **vitesse annuelle de la croissance**
Echelle de droite (volume ligneux : m³ / ha / an)
 - Courbe « **en sigma** » (points noirs) : **accumulation séculaire de la croissance**
Echelle de gauche (densité ligneuse : m³ / ha) (LEBRETON, 2002, p. 54)

Aux deux bouts de la révolution forestière, l'incertitude est ainsi la règle. Pour les plantations faites sur terrain travaillé pour une exploitation précoce (40 ans, pour dire quelque chose), des durées allant de quelques années à une décennie ont été avancées, pendant lesquelles le bilan carbone peut rester négatif (*). A l'autre bout (160 ans et plus), on a longtemps estimé qu'une limite était atteinte, où carbones fixé et respiré par l'arbre et dans son sol conduisaient à un bilan net égal à zéro, voire déficitaire. Aujourd'hui, on pense plutôt que le chevelu de racelles n'a aucune raison de stopper sa croissance dans un sol mature, avec lui celle de sa rhizosphère, source nutritionnelle pour les microorganismes et les microbes (microscopiques certes, mais en tel nombre que masse et contenus carbonés ne sont pas à négliger). Chez les très vieux arbres, un facteur limitant est probablement l'affaiblissement progressif de la nutrition hydrominérale des rameaux et feuilles les plus éloignés (verticalement, et horizontalement dans un « arbre en boule »), phénomène auquel les parties souterraines sont certainement moins soumises.

(*) La force du puits de carbone varie considérablement avec l'âge d'une forêt. Elle est généralement négative au début du cycle de vie, une jeune régénération étant une source nette de carbone (INRA, Unité de recherche EPHYSE, Villenave d'Ornon (Gironde), mise à jour 12 juin 2009). Dans le massif du Pilat, la matière organique présente dans un sol de sapinière a été estimé à 700 ans, par analyse du carbone 14.

En tout cas, lorsque l'on parle de « fixation », il est crucial de ne pas confondre, comme certains le font, vitesse de fixation avec son intégrale, l'accumulation (ou « séquestration »), elle aussi qualifiée parfois de fixation ! La question est donc posée : à quel moment du cycle est-il plus « rentable » (mais pour quelles utilisations, pour qui, et selon quels critères ?) de récolter des individus : à leur maturité ou dès que leur croissance commence à faiblir ? Si l'on envisage une coupe au maximum de la vitesse de croissance, soit à mi-hauteur théorique, la réponse est neutre, puisque la répétition du traitement dans un second laps de temps sera ni plus ni moins productif que le premier : tout n'est alors qu'affaire d'actualisation financière, à cet égard du moins. Pourtant, bien d'autres arguments plaident pour une prolongation de la croissance sans heurts écologiquement rapides.

1/ Cinétique générale. Au début ou à la fin de la croissance, il peut y avoir du retard à l'allumage, ou des pertes en ligne, ou l'inverse, comme pour le Pin sylvestre, à la fois espèce pionnière à démarrage rapide et accumulatrice en fin de cycle (cf. figure 8). Le plus décevant serait le cas d'une espèce à forte croissance initiale et à sénescence précoce et accélérée : *Les essences pionnières à croissance rapide, par exemple Peuplier ou Bouleau, n'absorbent généralement que peu de carbone et le relarguent vite et facilement. Au contraire, les bois durs et denses en contiennent beaucoup plus, et pour plus longtemps, mais ils croissent généralement bien plus lentement. Une très jeune forêt plantée sur coupe rase peut avoir un bilan-carbone négatif les 10 ou 12 premières années, perdant plus de carbone qu'elle n'en stocke. La coupe rase favorise en outre souvent l'érosion des sols et la perte du carbone qu'ils contenaient* (Wikipedia, Puits de carbone, 2014). D'un point de vue cinétique, on admettra volontiers – même qualitativement – que l'accumulation hypogée du carbone ne peut précéder la fixation épigée : plus courte est la phase de fixation et plus nombreuses seront ces phases, plus seront donc élevés les pertes et manques à gagner ainsi cumulés !

2/ Bilan carbone. Sous réserve des inconvénients ci-dessus mentionnés, que le bois d'une forêt soit consommé trois fois par siècle ou tous les trois siècles revient donc au même pour le bilan carboné épigé, car les phases positives (fixation) ou négatives (utilisation) qui se succèdent se compensent de même, phénomène auquel la fréquence des interventions ne change rien à terme. Dans les deux cas, le bilan carbone est neutre, qualifiable de « gris » : tout carbone défossilisé (comme celui du charbon et des hydrocarbures) est « noir », puisque émetteur intégral de gaz carbonique ; du carbone immobilisé définitivement sous forme de billes stockées au Sahara serait « blanc ». Du bois jeune définitivement fixé vaudrait certes mieux que du vieux carbone immédiatement brûlé, mais l'inverse est encore plus vrai.

De plus, l'idée même de « forêts jeunes » fait l'impasse sur une dimension très souvent sous-estimée, voire même ignorée, de la ligniculture de terrain, celle des sols. On a vu (cf. III.2.2.) que certains bilans carbone oublient le double voire le triple des stocks, ce qui diminue d'autant le réalisme et la crédibilité de certains récents mouvements de menton officiellement médiatisés : *le raccourcissement des cycles /.../ de production (forestière) favorise la séquestration de gaz carbonique* (22 septembre 2014). En effet, s'il est vrai que la partie épigée (le feuillage) d'une forêt proche de son asymptote de fixation ne fixe apparemment pas plus de carbone qu'elle n'en dégage, elle peut continuer à l'exporter dans le sol, où il s'accumule dans la rhizosphère ; là, il se voit fixé sous forme de racines ou relargué dans le sol pour augmenter la biomasse microbienne et fongique, ainsi que les humus résultant de ce métabolisme hypogé.

En outre, pour le métabolisme minéral (métalloïdes, dont le phosphore ; métaux, dont le calcium, le magnésium et le potassium), faire succéder trop rapidement des stades jeunes fait courir le risque d'épuiser les sols, l'exportation des éléments n'étant plus compensée par une extraction par la rhizosphère d'horizons pédologiques plus profonds, dont la roche-mère elle-même. Pour répondre à ce problème, ne sera-t-il pas alors tentant de recourir à des « fertilisants » ?

3/ Bilan énergie. La succession répétée sur le même terrain de la plantation de forêts à courte révolution dépense plus d'énergie (fossile) que celle d'une forêt plus âgée (à condition que celle-ci ait été plantée ou régénérée à des densités telles que l'élagage et le dépressage y soient réduits au minimum nécessaire). Autre argument, même s'il est ici de second ordre, le rapport déchets / bois est plus élevé pour une forêt jeune que pour une forêt âgée, ce qui n'en facilite ni la gestion ni l'utilisation. Au total, le bois précocement retiré de la forêt n'est certainement pas un « blanc de blanc » exempt de tout reproche...

La Forêt idéale

(au sens durable du terme)

Claude ROY

Cahier thématique /.../ Vol. XIV, tome 2, déc. 2011, p. 6

Plus une forêt vieillit, plus elle est fragile.

La séquestration nette de carbone est /.../ d'autant plus élevée que la croissance est forte et la biomasse présente est faible ». «La séquestration devient forte puis maximale au stade intermédiaire de croissance (phase 2).

Un raccourcissement du cycle de production /.../ présenterait de nombreux avantages /.../ par exemple en réduisant de 10 cm les diamètres des arbres exploités et de 10-15 ans les rotations

CAR (*)

la production de grumes plus petites est en général mieux adaptée (donc mieux valorisée) aux standards actuels de débardage, de l'écorçage et du sciage qui cherchent de plus en plus des bois moyens ». « Une forêt idéale (au double sens du terme) est donc une forêt saine, productive, cultivée et exploitée efficacement, générant des revenus qui garantissent son entretien et sa protection ».

Elle est probablement plus jeune que la moyenne de la forêt française actuelle.

(*) CAR = seul mot ajouté par nous au texte cité. Partie **en gras** soulignée par nous.

4/ Bilan biodiversité

Quant à la biodiversité, autre valeur d'intérêt général à considérer, celle d'une forêt de 150 ans est incontestablement supérieure à celle d'une forêt de 50 ans, quels que soient les critères employés pour la définir et la mesurer. C'est aussi l'avis de certains forestiers, et pas seulement de ceux qui s'intéressent aux oiseaux (cf IV.2. *in fine*) : il y a bien une « crise » dans les peuplements forestiers immatures : à ce stade, l'allocation des ressources du biosystème se fait majoritairement vers la carbo-fixation ligneuse, d'où un déficit énergétique transitoire vers un autre produit du système, « l'information biologique » (= la « biodiversité ») (LEBRETON, 1998). L'ONF (site, 30 oct. 2007) confirme le propos : *Les différents types de sylviculture connaissent des stades forestiers successifs, caractérisés par une avifaune particulière. Les stades jeunes sont riches en Sylviidés (Fauvettes, Pouillots), Bruants et Pie-Grièche. Ils durent généralement une dizaine d'années. Les stades intermédiaires sont les plus pauvres ; ils durent quelques dizaines d'années. Vient enfin la forêt mature ; avec ses gros arbres et sa futaie à sous-bois plus ouvert, c'est le domaine d'élection des espèces arboricoles telles que pics, sittelles, grimpereaux, mésanges. C'est un stade nettement plus riche en espèces que le précédent.*

En fin de compte, nous nous accorderons (au moins sur ce point) avec l'une des remarques de M. Claude ROY, selon laquelle la forêt (dite) idéale est probablement plus jeune en moyenne que la moyenne de la forêt française actuelle. Mais comme la densité moyenne de la forêt française est égale à quelque 175 m³ / ha, et que la proportion des « petits bois » y dépasse le quart des peuplements, on se demande où s'arrêtera ce « jaunisme lignicole » ! Pour citer deux

pays voisins du nôtre, le volume forestier s'élève à 350 m³ / ha (le double !) en Suisse et à plus de 200 m³ / ha en Allemagne. En France, les petits bois sont déjà bien plus abondants que les gros bois, surtout en forêts privées (27,5 % contre 19,5 % dans les forêts domaniales et 20,5 % dans les forêts publiques, surtout communales).

Tableau 10
Constitution des boisements métropolitains en fonction du diamètre des troncs
 mesurés sur écorce à 1,30 m de hauteur. Source : Inventaire forestier national, 2007

Forêts	Petit Bois	Moyen Bois	Gros Bois	Très Gros Bois	Total	
	≥ 7,5 à < 22,5	≥ 22,5 à < 47,5	≥ 47,5 à < 67,5	≥ 67,5 cm	(en Mm ³)	en %
- Domaniales	52	131	61	22	266	11,1 %
- Publiques	87	214	94	31	425	17,8 %
- Privées	467	898	264	72	1701	71,1 %
Total	606	1243	419	125	2392	
	25,3 %	52,0 %	17,5 %	5,2 %		100 %

Commentaires : 1/ Alors que les TGB (Très Gros Bois) sont présents sur plus de 8 % des surfaces des forêts domaniales, ils n'occupent que 4,2 p. mille des surfaces privées, soit 20 fois moins.

2/ Sur l'ensemble des peuplements, les MB constituent plus de la moitié des effectifs arborés, les PB un quart, contre 5 % seulement pour les TGB. Il s'agit donc de forêts jeunes, ce que confirme une densité moyenne de 170 m³ / ha, bien inférieure à celle de la Suisse (comparable à Rhône-Alpes par ses paysages de montagne), égale au double (350 m³ / ha). La forêt suisse ne comporte que 15 % de futaies âgées de moins de 40 ans.

Conclusion (et proposition...). D'une manière générale, penser trouver dans la biomasse ou dans le petit bois d'œuvre **la** solution aux problèmes économiques de la forêt serait condamner ses autres fonctions, plus qualitatives (biodiversité, cycle de l'eau, santé, loisirs, etc.) mais tout aussi importantes dans l'intérêt général et à terme, fonctions dont il conviendrait aussi d'envisager plus sérieusement l'utilité, la comptabilité, voire la rétribution (LEBRETON & VALLAURI, 2004).

Plus modestement, mieux vaudrait donc laisser calmement les vieilles forêts jouer gratuitement leurs rôles, bien plus larges que ceux d'une jeune forêt. A moins que *faire ou défaire* soit pour certains *toujours travailler*, ou que les véritables motifs se situent plutôt en aval de la filière, pour des motifs techniques et « économiques » à court terme. Car le forestier et le profane ont de la forêt une perception chronologique totalement différente : doit-on assimiler forêts « dynamiques » et forêts « immatures » ? Doit-on opposer « activisme » et « contemplation » ?

A ce point, on sera peut-être surpris d'entendre les naturalistes répondre « *les deux, mon* (ingénieur) *général* », sur le principe de filières distinctes mais complémentaires : **oui**, au nom des impératifs économiques, acceptons des forêts assujetties à la demande industrielle (même s'il y a quelques risques de les voir s'implanter sur des terres à potentialités agricoles ou naturalistes non négligeables) ; **oui mais**, dans le même temps, au nom des aménités sociétales et immatérielles, mettons en libre évolution une surface égale de forêts, prises dans la masse des quelque 30 % des espaces forestiers impropres ou réfractaires à toute utilisation « rationnelle et rentable » (altitude et pente, submersion ou sécheresse, etc.) : 10 % dans chaque cas, cela serait-il impensable, et infaisable ? En revanche, ce qui est dommage, c'est de voir certains dogmes fondés sur des approximations dont on ne sait trop si elles sont volontaires, irréfléchies voire même inconscientes, aux plus hauts niveaux parfois de la hiérarchie professionnelle et / ou officielle.

Un rapport officiel et récent sur l'utilité carbonée de plantations à courte révolution

Le 22 septembre 2014, en présence de M. Stéphane LE FOLL (ministre de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Forêt, et porte-parole du Gouvernement), Mme Marie-Laurence MADIGNIER a présenté le résumé d'un rapport de mission interministérielle, rédigé avec ses deux collègues MM. Guillaume BENOÎT et Claude ROY, sous la référence N° 14056 CGAAER. Entre autres propositions, ce rapport préconise un *raccourcissement des cycles /.../ de production (forestière) favorisant la séquestration de gaz carbonique.*

Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique

Enjeux. L'agriculture et la forêt sont réputées contribuer au quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). Elles devraient, en outre, être fortement impactées par le changement climatique à venir, risquant en cela ne plus pouvoir nourrir les 9 milliards d'habitants attendus en 2050 sur la planète, ni participer à la nécessaire substitution des matières premières non renouvelables qui fondent encore aujourd'hui notre modèle de développement. Deux fronts sont ouverts pour répondre à ces inquiétudes : atténuer le changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et adapter les modes de productions agricole et forestière aux évolutions du climat.

La mission était composée de douze membres du CGAAER. Marie-Laurence Madignier, Guillaume Benoit et Claude Roy en assuraient la coordination. Les chiffres contenus dans le rapport sont issus d'études existantes ou ont été établis à dire d'experts. A ce titre, le rapport constitue la première étape d'un travail amené à être poursuivi par le CGAAER.

Résumé. La mission a identifié les leviers et potentiels dont disposent l'agriculture et la forêt pour lutter contre le changement climatique. La politique engagée par la France en faveur de l'agroécologie s'avère une entreprise tout à fait indiquée. La production de bio-produits (biomatériaux, bioénergies, chimie verte...) venant se substituer à des produits non renouvelables, la limitation de l'artificialisation des sols, le maintien des prairies permanentes et la lutte contre le gaspillage alimentaire figurent également parmi les solutions proposées. À l'avenir et face au changement climatique, une gestion plus exigeante des territoires, comme une mobilisation et un stockage plus importants de l'eau devraient être nécessaires.

Le rapport insiste également sur les atouts de la forêt. Une exploitation sylvicole dynamique, opérée, par exemple, par un accroissement de l'exploitation des bois produits annuellement, un raccourcissement des cycles de production et une relance du reboisement, favoriserait la séquestration de gaz carbonique. L'augmentation induite de la production de bois venant se substituer à des matériaux ou matières premières non renouvelables (bois d'œuvre pour la construction, **bois-énergie**...) aurait aussi un impact très favorable sur le bilan carbone. (Note : mise **en gras** par nos soins).

Sur un plan plus méthodologique, le rapport démontre que les méthodes de calcul internationales actuellement en vigueur pour mesurer les émissions de GES pénalisent les performances du secteur agricole et forestier, et qu'elles nécessitent d'être adaptées. En outre, la contribution de l'agriculture et de la forêt sont optimales en raisonnant conjointement sur les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture ainsi que sur la séquestration et le stockage de CO₂ dans la forêt et les sols, c'est à dire en raisonnant « secteur des terres » comme le préconise le dernier rapport du GIEC. Il convient alors de prendre en considération, dans le même temps, l'importante substitution des produits et énergies fossiles par les bioproduits. Enfin, au plan international, le rapport recommande de bien coordonner la lutte contre le changement climatique et la sécurité alimentaire de la planète, au cours des prochaines négociations internationales qui réuniront les Etats du Nord et du Sud.

Comment concilier ce qui précède et ce qui suit, deux documents pourtant issus du même ministère (CGAAER, Inventaire Forestier National) ? (parties en **gras** soulignées par nous)

Comment augmenter le stockage biologique du carbone en France ?

Deux stratégies sont envisageables pour permettre aux forêts d'augmenter leur capacité de lutte contre le changement climatique :

- le boisement de terres agricoles ;
- **l'augmentation de l'âge d'exploitabilité des forêts** (ce qui **accroît le niveau de stock dans la biomasse ligneuse**).

Il apparaît plus efficace de stocker le carbone sur pied dans les forêts situées sur les stations les moins productives ou qui capitalisent déjà des stocks importants.

L'IF n° 7 (Inventaire Forestier National), mars 2005, p. 8

Dans cette optique, où la fixation carbonée est certes intensive mais transitoire (= carbone gris), l'optimum technique serait en fait constitué non par des boisements mais par des prairies permanentes pâturées rationnellement (= sans surcharge pastorale) : toute la biomasse annuellement fixée, sur un sol riche, est annuellement broutée, rien de moins mais rien de plus, si bien que le stock carboné épigé (biomasse animale et végétale) et hypogé (lombrics) demeure constant (jusqu'à ce que la prairie soit un jour retournée, pour bénéficier de primes ?).

V.2. Pour une vision politique de la forêt

Résumé. Une sectorisation réaliste des forêts de France reste à définir, prélude à **une mutation forestière** dans les esprits et sur le terrain, public et privé. De la sorte, des actions plus conformes à l'intérêt général à terme pourraient voir le jour par **un partage des informations et de moyens** entre les différents corps et secteurs de la société française. Mais l'exemple de l'agriculture (des agricultures...), gérée par le même ministère et le même corps d'Etat que la forêt (les forêts...), ne pousse guère à l'optimisme à ce propos !

V.2.1. Le paradoxe rural

Une remarque préalable s'impose, qui étonne beaucoup le microcosme naturaliste, d'autant que l'opinion publique française n'en a jusqu'à présent guère conscience (cf. les triomphalistes Salons de l'Agriculture annuellement tenus à Paris) : comment se fait-il que puissent être placés sous la même houlette administrative deux corps de métier implantés dans le même milieu rural, souvent imbriqués mais néanmoins totalement distincts aux yeux du pouvoir politique ? (*).

(*). On pourrait y ajouter le monde cynégétique, lui aussi en partie co-extensif des deux précédents sous-ensembles ruraux. Mais ceci est une autre histoire...

Aux premiers – les agriculteurs – tout et même davantage a été accordé, à trois niveaux :

1/ L'encouragement à externaliser les fonctions « secondaires » de l'agriculture traditionnelle, ce que nous appelons aujourd'hui les aménités, du bleuet à la perdrix (**).

2/ L'encouragement à des pratiques mécaniques et chimiques à l'origine de multiples nuisances

(**) Du coup on regrette de voir le président d'une Fédération départementale des Chasseurs épauler publiquement les maïsiculteurs pour s'opposer à la création d'un PNR. Dégâts de sangliers obligent ?

et pollutions (du paysage à l'aliment), d'où autant d'atteintes aux droits de millions d'autres citoyens et usagers (surtout citadins, consommateurs ou touristes).

3/ L'instauration de systèmes d'aides et de subventions massives (au moins le tiers du revenu agricole en 2012, mais très inégalement réparties au sein d'une profession très hétérogène). Mais alors qu'il existe depuis longtemps une PAC, rien ne préfigure l'ébauche d'une Politique Forestière Commune de l'Europe communautaire...

Les APN s'étonnent aussi de voir à quel point le monde forestier semble s'accommoder de cette inégalité de traitement officiel (dont sont également victimes des « marginaux agricoles » comme les pisciculteurs, les collecteurs de petits fruits et les apiculteurs, voire une partie des viticulteurs), accommodement ayant connu son acmé avec le front commun conduit au tournant des deux siècles contre Natura 2000 par la « Bande des Neufs ». Les causes en sont sans aucun doute multiples. Outre le fait que le même individu peut être agriculteur, forestier et chasseur, nous n'ignorons pas qu'il existe aussi des aides, directes ou indirectes à la propriété forestière : avantages fiscaux, ou subventions pour des pistes forestières dont certains intérêts locaux, y compris électoralistes, peuvent tirer avantage. Mais c'est sans doute ainsi que le pouvoir politique entend et sait entretenir la paix dans les chaumières.

V.2.2. L'interface Forestiers / Naturalistes

Certains d'entre nous regrettent que ce qui est qualifié (socialement ?) d'élite de la chasse et de la forêt n'ait pas cherché ou entretenu plus de contacts, voire de liens, avec ses homologues du monde « naturaliste » (pour éviter de dire « écologiste » sinon « écologue »). Une autre dimension du problème, presque culturelle, aurait pu rapprocher ces positions : contrairement à l'agriculteur, dont la vision temporelle du monde vivant est annuelle (ou pauci-annuelle), le forestier et le naturaliste en ont une perception et une sensibilité pluri-décennales, quasi séculaires. Or, par essence, le long terme va plus dans le sens de l'intérêt général, le court terme vers les intérêts particuliers (dont on sait que la somme ne fait pas toujours l'intérêt général). Du coup, les APN déplorent de n'avoir pu – sauf exception – accorder leur confiance à la totalité du mésoscome forestier. Ils ont même eu l'impression, à quelques reprises, d'avoir été floués, par exemple lors de la rédaction finale du protocole régional de PEFC, sans aucun renvoi d'ascenseur (gestion des grands mammifères, proprement expulsés) ; l'éco-certification demandait certes aux adhérents d'accepter quelques contraintes, largement compensées pourtant par l'argument de vente du produit bois. Ceci pour la partie privée de la forêt, avec des contacts individuels néanmoins souvent entretenus.

La partie publique de même, mais avec des hauts et des bas assez intéressants du point de vue psycho-sociologique, vu certaines personnalités. Là aussi nous avons été déçus, voire même choqués, de constater que des forestiers détenteurs et représentants de la puissance publique dans des espaces protégés (parc national, site classé) aient pu y tolérer ou commettre eux-mêmes des infractions qu'ils auraient sans doute sanctionnées s'il s'était agi d'individus lambda. Ceci n'est en rien anecdotique et ne relève pas davantage d'une rancune, dans la mesure où se voit ainsi soulevée une question de fond : les agents à qui l'Etat confie des missions de protection de la nature (et pas seulement de « gestion environnementale ») possèdent-ils le minimum de connaissances et de motivation les rendant vraiment aptes à de telles fonctions ?

Pour l'instant, la réponse est encore majoritairement négative, car ces personnels peuvent être influencés par certains intérêts ou modes de pensée locaux, comme par leurs propres parcours, passés ou à venir. Des mesures de formation (en interne mais aussi en externe) doivent être donc prises pour remédier à de tels problèmes, d'autant que la fusion récente de deux corps d'Etat en un seul, celui des IPEF, inquiète plus qu'il ne rassure à cet égard.

V.2.3. Vers une autre vision des forêts

Si l'idée de filières carbonées (cf. nos « Attendus préliminaires », p. 7) n'a pas convaincu, procédons par analogie en reprenant le cas de l'agriculture ou, plutôt, des agricultures. Il y a bien une agriculture de plaine et une de montagne (des forêts de montagne aussi d'ailleurs, même dans l'organigramme forestier), une agriculture intensive et des agricultures de qualité, avec des spécialisations bien ciblées, même dans l'élevage (ovin ou bovin, viande ou produits laitiers). Et toutes ne sont pas traitées de la même manière, à tort ou à raison.

Faut-il pour cela compter sur une évolution du cadre juridique, d'autant que la Loi suit plus la société qu'elle ne la précède (du moins des juristes l'affirment) ? Mais qu'ont vraiment apporté aux problèmes récurrents de la forêt les lois du 9 juillet 2001 (*loi d'orientation sur la forêt*), la quatrième depuis la Libération : 1946, 1963, 1985) et du 13 octobre 2014 (*loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt*) ? A lire ce dernier intitulé, la forêt se verrait-elle subordonnée plus que jamais à l'agriculture dans les priorités politiques ? D'ailleurs, du boisement pérenne au maïs estival, en passant par la prairie permanente et la prairie artificielle, les subventions européennes et nationales évoluent en sens inverse de la logique de fixation carbonée : est-ce bien ainsi que l'Europe et la France entendent lutter, sincèrement et efficacement, contre l'effet de serre et l'échauffement climatique ?

Dans les mentalités comme dans les pratiques, la mutation qui s'impose est de considérer la forêt comme un écosystème soit, dans le cas particulier, un « sylvisystème », voire un anthroposylvisystème, dont la caractéristique fondamentale est d'être un gros capteur et stockeur de carbone. Ce qu'il convient désormais de comprendre, pour maîtriser la compréhension puis la gestion de ce biosystème particulier, est donc de dessiner puis de mesurer les flux qu'emprunte le carbone à partir du CO₂ atmosphérique, pour se transformer en feuilles puis en bois, mais sans s'arrêter à celui-ci en ignorant le reste : les végétivores, les carnivores, mais aussi les plantes de sous-bois et, surtout, les décomposeurs humblement cachés mais très actifs et « massiques » dans les sols.

Du coup, de même que jusqu'à présent les forestiers établissaient des « plans d'aménagement » régissant pour un quart de siècle le sort de chaque forêt, de même devront-ils désormais intégrer (et de manière évolutive) d'autres dimensions du sylvisystème, pour en définir la vocation principale parmi les nouvelles filières-bois, et leur permettre de s'exprimer. D'une manière générale, quel que soit le type de forêt, l'impact des modes de sylviculture sur les fonctions non-bois de la forêt devra être davantage pris en considération. N'est-ce pas d'ailleurs de la sorte que, dès le siècle avant-dernier, avaient été officiellement distinguées deux fonctions majeures des forêts, celle de **production**, celle de **protection**, même si la seconde catégorie était à comprendre comme protection (du milieu) par la forêt (une aménité...) plutôt qu'une protection de la forêt, pour les hommes et pour elle-même.

Une sectorisation réaliste des forêts de France reste donc à définir, pour une mutation forestière dans les esprits et sur le terrain, public et privé. De la sorte, des actions plus conformes à l'intérêt général à terme pourraient voir le jour, avec un partage des responsabilités et des moyens entre les différents corps et secteurs de la société française concernée. Naguère encore simple « usine à bois », la forêt est désormais à considérer, doublement, comme **un écosystème**, mais aussi comme **un patrimoine** commun de la société. Pour mettre en œuvre de telles démarches, nous demandons aux forestiers officiels (en pesant soigneusement nos termes) plus de « convivialité », aux forestiers privés moins de « frilosité » ; ce qui permettra aux naturalistes de manifester moins d'agressivité, sinon de sévérité !

On trouvera à la suite une ébauche (universitaire et associative) de telles idées, sans doute trop insolites pour l'époque de leur rédaction.

LEBRETON Ph. & M. BARBERO, 1993 - La forêt française : naturelle ou aménagée ?
Courrier Nature (S.N.P.N.), N° 137, p. 25 (*).

Devant la pression croissante – justifiée ou non – du monde extérieur, le « ghetto forestier » devra s'ouvrir, pour se diversifier. A lire les récentes déclarations officielles : *En France, la sagesse de la politique forestière consiste à demander aux sylviculteurs de poursuivre simultanément, partout où c'est possible, trois objectifs : la protection régulière de bois, la protection de la nature et le respect de l'environnement*, nous ne serions pas loin de penser, avec Bertrand de Jouvenel, que *la formule des trois fonctions est agaçante, parce qu'inexacte. La forêt a d'abord une fonction essentiellement patrimoniale ; partant de là, on s'aperçoit qu'il existe des forêts ayant une vocation particulière de protection, ce qui exclu qu'elles aient toute autre fonction, notamment de production.*

Quoi qu'il en soit, face aux 2 millions d'hectares en déprise à boiser d'ici le siècle prochain, devant le *doublent de la production totale et un quintuplement de la production de bois d'œuvre* dans les prochaines décennies, face à l'évolution de la demande sociale, on assistera inéluctablement à une modification des responsabilités forestières : sans aller jusqu'à la notion de « forêt duale » (= une forêt intensifiée, une forêt « abandonnée »), un éventail va se constituer, avec certes des forêts de production ligneuse, mais aussi des forêts de production cynégétique, des forêts d'accueil touristique (et non seulement d'accueil péri-urbain), des forêts de protection des sols, des forêts de véritable protection biologique (écologique, génétique, etc.).

S'il veut et sait se reconvertir à temps, ce qui implique une « dé-monopolisation » en amont (prospective, recherche, formation, information), comme c'est souvent le cas à l'étranger, le forestier français pourra conserver toutes responsabilités en ce qui concerne la gestion de cette « nouvelle forêt ». Inversement, tout « raidissement corporatiste » risquerait de conduire à un éclatement fonctionnel : à l'Environnement les forêts de protection et les forêts cynégétiques ; au Tourisme et aux Affaires sociales, les forêts d'accueil ; à l'Industrie les forêts de production intensive (d'après certains professionnels, deux millions d'hectares pourraient satisfaire cette « ligniculture »), chaque ministère utilisateur employant alors des forestiers au sens le plus technique du terme.

Souhaitons plutôt que la responsabilité des forêts reste entre les mains de forestiers réellement pluridisciplinaires, au service de la collectivité : dans telle forêt, le gestionnaire admettra que le chevreuil est plus rentable que le douglas ; dans telle autre que la protection du paysage est la clé de la réussite touristique ; dans telle autre enfin que la qualité de bois d'œuvre est à même d'alimenter une filière professionnelle localement génératrice de valeur ajoutée et d'emplois. Bien entendu – et il faudrait appuyer là ceux qui accepteraient cette mutation – la collectivité ne saurait exiger gratuitement de tels services. Car l'on doit aussi dénoncer l'ambiguïté dont est victime la forêt : oui, la protection et l'accueil coûtent cher ; oui, la présence du gibier peut être une contrainte technique et économique dont il n'est pas question, comme c'est un peu hypocritement le cas aujourd'hui, de vouloir charger le prix du bois.

Oui, les forestiers, publics et privés, doivent recevoir les moyens matériels et humains leur permettant de remplir les fonctions diversifiées dont la réalité forestière et sociale les rend désormais comptables devant la collectivité. Bref, la forêt et le forestier du XXI^e siècle devront réconcilier l'économie et l'écologie, car telle est bien la seule issue possible, compte tenu des contradictions et des impasses de la politique actuelle.

(*) Paru en 1993 dans la revue *Le Courrier de la Nature* de la S.N.P.N. (Société nationale de Protection de la Nature, fondée en 1854 par Isidore Geoffroy de Saint-Hilaire), l'article d'où sont extraites ces lignes avait été en fait écrit en 1991 pour être présenté au 10^{ème} Congrès forestier mondial, tenu à Paris du 17 au 26 septembre 1991, sur le thème *La Forêt, patrimoine pour l'avenir*, Sujet n°15.3, *Exploitation forestière et sauvegarde de l'environnement*. Philippe Lebreton devait présenter la communication, mais celle-ci fut refusée par le comité de lecture du Congrès.

Au tournant des deux siècles, Sébastien GENEST (alors responsable du Réseau Forêts de FNE, France Nature Environnement) allait écrire : *Le temps des forêts gérées par une partie minime de la société spécialisée dans cet exercice est révolu*. Et pour confirmer que la sclérose politique et donc l'immobilisme ont continué à prévaloir, on ne saurait mieux faire que d'extraire les lignes qui suivent du résumé d'un rapport plus récemment produit par le WWF France (NEYROUMANDE et VALLAURI, 2011), en toute modération contenue : *Lorsque la gestion de la forêt devenait officiellement multifonctionnelle (loi de 2001), les moyens pour l'y inciter n'étaient pas en place, voire réduits. Le rôle social et environnemental de la forêt, unanimement reconnu, a été délégué aux choix du rédacteur du plan d'aménagement, considéré « garantie de gestion durable », et aux schémas de certification volontaire. Récolter plus de bois est resté constamment la priorité, prétendument pour « diminuer le déficit de la balance commerciale » de la filière forêts-bois, de « payer » la gestion et les autres fonctions, aujourd'hui pour « lutter contre les changements climatiques ». Or les connaissances scientifiques et les expériences de terrain de gestionnaires innovants montrent qu'il est au contraire urgent de rénover cette vision erronée (*), et de fonder les modes de gestion sur la résilience écologique et la plasticité économique des forêts, dont diversité, naturalité et économie en travaux sont des éléments clef.*

(*) Souligné par nous.

VI. Propositions et Positions

Rien de fondamentalement nouveau dans ces lignes conclusives, mais des idées regroupées et ordonnées, réduites à l'essentiel puisque l'argumentation documentaire et scientifique vient d'en être fournie aussi sérieusement que possible. Ce qu'expriment et / ou souhaitent aujourd'hui les APN (Associations de Protection de la Nature), dont ses membres « naturalistes forestiers » (si le second qualificatif leur est concédé...), c'est ce qui suit :

1/ Les APN comprennent parfaitement – tout en le regrettant – que le contexte économique international puisse amener certains forestiers à privilégier, promouvoir ou mettre en œuvre des pratiques sylvicoles à même de satisfaire les contraintes financières provenant de l'aval de la filière-bois (notamment le diamètre des grumes, donc l'âge des plantations).

2/ Mais, dans le même temps, les APN ne peuvent enregistrer passivement de récentes prises de position officielles, dont le caractère myope voire orienté, et l'insoutenable légèreté de l'argumentation scientifique (*), surprennent à de tels niveaux administratifs, voire politiques ; et ceci sans réellement répondre aux inquiétudes fondées que soulève aujourd'hui – et depuis des années - le statut des forêts de notre pays. Mais bien des témoignages proviennent d'autres représentants de la forêt française, officiels ou privés, prouvant que ces postures réductionnistes ne sont heureusement pas partagées par tous.

(*) Notamment la méconnaissance du compartiment hypogé du carbone forestier, et de son importance pour le stockage de cet élément, donc pour la réduction proclamée de l'effet de serre.

3/ Consécutivement, le dogme de « la trifonctionnalité harmonieuse de la forêt française » vole en éclats, constat qui débouche sur la nécessité d'une restructuration interne de celle-ci en autant d'axes, ou de « nouvelles filières », s'appuyant notamment sur la place et le rôle de l'élément Carbone dans les procédures techniques et économiques. L'inquiétude est tout à fait légitime en ce qui concerne l'échauffement climatique (**), encore ne faudrait-il pas lui opposer de fausses bonnes solutions, même pour rassurer (transitoirement) l'opinion publique !

(**) En Dombes (près de Lyon), entre les deux périodes 1981-1986 (10,7 +/- 0,6°C) et 2009-2014 (12,5 +/- 0,8°C), l'échauffement moyen pendant cet intervalle de 28 ans a été de 1,8°C, écart-type 0,4°C ; p=1 p. mille. L'extrapolation en 2050 (dans 36 ans), laisse prévoir un échauffement supplémentaire de 2,3°C, au total 4°C environ par rapport aux références du XX^{ème} siècle. Or l'objectif officiel est de maintenir l'échauffement sous la barre des 2°C à la fin du présent siècle : où sont les erreurs ?

4/ Consécutivement encore, une filière autonome émerge, celle des aménités forestières, soupçonnées depuis plus d'une décennie, mais dont un récent rapport officiel (le rapport « CHEVASSUS-AU-LOUIS ») prouve la tangibilité, à défaut de la prise « en compte ». Cette approche intègre (enfin) toutes les dimensions « économiques, sociétales et environnementales » qui devraient s'imposer à tous, dans l'intérêt même des acteurs forestiers, publics et privés, à qui l'on demande encore que le bois paie toute la forêt, alors qu'il n'est plus toute la forêt. Le décalage par rapport à l'agriculture est flagrant, ce qui étonne d'autant plus que ces deux activités rurales sont placées sous la même houlette administrative et politique.

5/ Par voie de conséquence enfin, les forêts des espaces protégés, les RBI, les forêts domaniales et celles des collectivités ou personnes privées qui voudraient adhérer à la formule innovante de « forêts en libre évolution », peuvent constituer un pôle d'équilibre et de compensation des opérations forestières semi-intensives (*) qu'une partie de la profession serait amenée à conduire par ailleurs.

(*) On définit ici comme « intensives » les pratiques culturelles qui impliqueraient l'utilisation de fertilisants et de produits phytosanitaires (= engrais et pesticides) ainsi que d'OGM, exclues par principe même de la sylviculture traditionnelle.

6/ Dans les espaces statutairement (et fortement ?) protégés (parcs nationaux, sites classés, réserves naturelles, etc.), les forestiers doivent posséder le minimum de motivation et de connaissances leur permettant d'assumer correctement les fonctions correspondantes. Non seulement leur statut et leur « pouvoir » ne placent pas ces agents de l'Etat à côté de la Loi et au dessus des citoyens ordinaires, mais ils leur confèrent au contraire des devoirs de rigueur et de discipline personnelles, garants de leur crédibilité (*), voire de leur autorité (**).

(*) *Des problèmes peuvent apparaître quand les compétences (techniques) ne sont plus à la hauteur de la compétence (administrative) (Second Principe de PETER, 1970).*

(**) A notre époque (les universitaires le savent depuis la fin des années 1960), la meilleure manière de garder le pouvoir (quand on y est attaché...), c'est de le partager, avec toutes les compétences nécessaires à la démarche.

7/ Pour l'ensemble des forêts, les APN souhaitent une forêt « globale », pour que le mot de « sylviculture » prenne tout son sens, trop souvent restreint à une simple « ligniculture », même si la biodiversité ne peut être pleinement exprimée dans certains contextes. Les APN exigent aussi une forêt « complète », englobant depuis les tréfonds du sol, avec ses micro-organismes, jusqu'à l'extrémité des rameaux (sans oublier les oiseaux qui s'y perchent...). Bref, un écosystème forestier, même si sous nos latitudes, il s'agit d'un anthropo-écosystème (sauf cas particuliers : montagne, littoral, zones humides).

8/ Pour la totalité des « plans d'aménagement » forestiers, les APN demandent que des bilans (matière, énergie, biodiversité, pollutions...) soient intégrés à l'égal des objectifs ligneux, afin d'améliorer le « rendement » du système de gestion ainsi constitué. Car la thermodynamique nous apprend que l'ignorance d'éléments constitutifs et fonctionnels d'un système ne peut que dégrader celui-ci : des « nuisances » comme la pullulation littorale des algues, la disparition du petit gibier campagnard, la dégradation des paysages ruraux, etc., ne sont en fait que des déclinaisons particulières de l'entropie. Le cas de l'agriculture intensive nous montre ainsi le chemin à proscrire ; qu'il ne soit pas emprunté par la sylviculture !

9/ Mais, répétons-le, toutes les considérations précédentes souffriraient encore d'une lacune, celle de continuer à parler de la forêt alors qu'il désormais indispensable de traiter des forêts, dans une approche intégrant aussi bien les obligations de l'amont (celles de l'écologie scientifique) que les contraintes de l'aval (celles du marché).

En trois mots : une **mutation**, mais **pas** (encore) la **révolution**...

En conclusion, « la » forêt française est aujourd'hui placée devant l'alternative suivante : poursuivre une gestion relevant du XIX^{ème} siècle, lorsque le bois était un placement de père de famille et qu'il payait la forêt, ou **inventer et mettre en oeuvre une forêt nouvelle** intégrant toutes les dimensions (économiques, sociétales et environnementales) indispensables au XXI^{ème} siècle ; tout ceci une optique d'utilisation et de **développement durable** des ressources naturelles.

VI. Références bibliographiques (*)

- A.F.I. (Association Futaie Irrégulière), 2009 – Le traitement des futaies irrégulières. Valoriser les fonctions multiples de la forêt. *Convention France Bois Forêts* Edit., 144 p.
- ANDRE J. & G. DARMON, 2014 - Dynamique forestière, perturbations et biodiversité. *Le Bièvre*, Tome 26, N° spécial : la forêt, pp. 68-75.
- ANDRIOT J., 2014 – Que devient, avec le temps, le gaz carbonique que nous déversons dans l’atmosphère en brûlant les combustibles fossiles ? *Cahiers Fondation Pierre Vérots*, N°4, 12 p.
- ANONYME, 1998 - Prix du bois résineux destiné aux usines de pâte chimique : une comparaison internationale. 2. Comment expliquer les différences de prix entre pays ? *Information-Forêt AFOCEL*. Fiche n° 569, N°2, 6 p.
- ANR PROGRAMME STRA. Projet Ecosfix. Edition 2010.
- ARMAND-FRAYSSE D. & Ph. LEBRETON, 1976 – Données nouvelles d’ordre analytique concernant les champignons lignivores. *Bull. mens. Soc. Linn. Lyon*, 45, N° 9, pp. 308-320.
- DODELIN B., EYNARD-MACHET R., ATHANAZE P. & J. ANDRE, 2008 – Les Rémanents en foresterie et agriculture – Les Branches, matériau d’avenir ! Edit. TEC & DOC, 386 p.
- DUPOUEY J.-L. *et al.*, 1999 – Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, Vol. 85, n°6. Repris 2000 dans *Rev. For. Fr.* LII, n° spéc. , pp. 139-154.
- DUVIGNEAUD P., 1974. *La synthèse écologique*. Edit. Doin, 296 p.
- F.C.B.A., 2014 – Institut technologique Forêt / Cellulose / Bois-construction / Ameublement ; *Mémento*, 59 p.
- FERRY C. & B. FROCHOT, 1958 - Une méthode pour dénombrer les oiseaux nicheurs. *La Terre et la Vie*, pp. 85-102.
- FERRY C., 1959 - Etudes quantitatives sur les oiseaux forestiers. *Rev. Forest. Fr.*, 31, pp. 631-632.
- FERRY C. & B. FROCHOT, 1970 - L’avifaune nidificatrice d’une forêt de chênes pédonculés en Bourgogne : Etude de deux successions écologiques. *La Terre et la Vie*, pp. 153-250.
- FRAPNA, 1988 - *Avifaune et Altérations forestières*. Compte-rendu final d’activités, administratif et technique - SRETIE (ministère de l’Environnement), n° 85-182, 32 p.
- FROCHOT B., 2012 - Biodiversité et gestion forestière - *RDV techniques ONF*, 2012, n° 6 hors-série, pp. 17-27.
- GARRIC A., 2011 – L’énergie tirée des forêts polluerait plus que le charbon. *Le blog de Audrey Garric* (journaliste au Monde). 4 nov. 2011.
- GENOT J.-Cl., 2003. *Quelle éthique pour la nature ?* Edisud, 191 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 2005 – La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques. *L’IF*, n° 7, p. 8.
- LEBRETON Ph. & B. PONT., 1987 - I. L’avifaune des boisements résineux du Haut-Beaujolais ; considérations générales. *Acta Oecologica. Oecol. Gener.*, Vol. 8, pp. 227-235.
- LEBRETON Ph., BROYER J. & B. PONT, 1987 – II. L’avifaune des boisements résineux du Haut-Beaujolais ; relations structurales végétation-avifaune. *Rev. Ecol. (Terre & Vie)*, Suppl. 4, pp. 71-81.
- LEBRETON *et al.*, 1990 - Variabilité polyphénolique et Systématique du Pin sylvestre *Pinus sylvestris* L. *Ann. Sci. For.*, 47, pp. 117-130.
- LEBRETON Ph. & M. BARBERO, 1993 - La forêt française : naturelle ou aménagée ? *Courrier Nature* (S.N.P.N.), N° 137, pp. 20-25.
- LEBRETON Ph., 1995 - Quelle gestion forestière dans les parcs nationaux ? *Rapport de mission à la D.N.P. du ministère de l’Environnement*. Septembre 1995. 45 p. + annexes.
- LEBRETON Ph., 1998 - Biodiversité et Ecologie : quelques réflexions théoriques et pratiques. *Bull. mens. Soc. Linn. Lyon*, 67, pp. 86-94.
- LEBRETON Ph. & J.-P. CHOISY, 2000 - Déprise rurale et évolution avifaunistique. *Le Bièvre*, N° 17, pp. 25-34).
- LEBRETON Ph., 2002 - *L’Homme et les Résineux*. ARPPAM-Editions, Lyon, 143 p.

- LEBRETON Ph., 2004 - Si la forêt m'était comptée. La valeur patrimoniale composite de la forêt. In *"Le Droit de la Forêt au XXI^e siècle. Aspects internationaux"*, pp. 95-117 (Actes Colloque S.F.D.E., 5-6 déc. 2002, Paris).
- LEBRETON Ph. & D. VALLAURI, 2004 – Si la forêt m'était comptée. *WWF et FRAPNA*, 24 p.
- LE QUERE C. *et al.* (59 indiv.), 2014 – Global Carbon Budget (2013). *ESSD Discuss.* Vol. 7, pp. 521-610 (www.globalcarbonproject.org/carbonbudget).
- LOUSTAU D. *et al.*, 2004. Résumé du *Rapport final du projet CARBOFOR*, juin 2004, 138 p.).
- LUYSSAERT S., 2008 – Old-growth forests as global sinks. *Nature*, Vol. 455, pp. 213-215.
- MADIGNIER M.-L., BENOÎT G. & Cl. ROY, 2014 – La contribution possible de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique. *Rapport N° 14056 CGAAER* (ministère chargé de la forêt), 22 sept. 2014, 56 p.
- MAZAS C., 2007 – *Changement climatique et usages des terres : vers le modèle Nexus Land Use*. Rapport Stage Master Recherche EDDDE., mars-sept. 2006, 172 p.
- NEYROUMANDE E. & D. VALLAURI, 2011 – Regard sur la politique des forêts en France. WWF – Rapport 2011, 40 p.
- PEYRON J.-L., 1998 – Elaboration d'un système de comptes économiques articulés de la forêt au niveau national. Chap. V. Méthodes d'évaluation des biens et services non marchands, pp. 195-216. *ENGREF-INRA*, Nancy.
- PEYRON J.-L. & O. COLNARD, 2002 – Vers des comptes de la forêt ? In *Forêt, Economie et Environnement*. Rapport de la Commission des Comptes et de l'Economie de l'Environnement sur la Forêt, pp. 160-190, *I.F.N. (Institut français de l'Environnement)* Edit.
- PEYRON J.-L., 2003 - Enjeux économiques de la protection des forêts. In VALLAURI D. (coord.), 2003 (*vide infra*).
- REFORA (Réseau Ecologique Forestier Rhône-Alpes), 2015 – *Le Carbone en Forêt*. Rédaction Magali Rossi, Jean André, mars 2015, 31 p.
- ROSSI M. & D. VALLAURI, 2013 – Evaluer la naturalité. Guide pratique version 1.2. *WWF-France Marseille*, 154 p.
- TAVERNA R., HOFER P., WERNER F., & E. THÜRIG, 2007 – The CO₂ Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry (Scenarios of future potential for climate-change mitigation). *Environ. Studies n° 07 39 – FOEN* (Federal Office Environment, Bern), 102 p.
- THIVEND S. & Ph. LEBRETON, 1969 – Champignons lignivores. Contribution à l'étude de la dégradation de la lignine. *Revue A.T.I.P.* (Assoc. Techn. Ind. Papet.), Vol 23, N° 5, pp. 313-324.
- TOUTAIN F., 1981 – Les humus forestiers, structure et modes de fonctionnement. *Rev. Forest. Fr.*, 6, pp. 449-464.
- VALLAURI D. (coord.), 2003 - *Livre blanc sur la protection des forêts naturelles en France. Forêts métropolitaines*. W.W.F. France, Edit. *Lavoisier*. TEC & DOC, 261 p.
- VALLAURI D., PONCET L. & C. HANCOCK, 2004 - *Mémento de la protection des forêts*. W.W.F. France, 40 p.
- VALLAURI D. (coord.), 2005 - *Bois mort et à cavités. Une clé pour des forêts vivantes*. W.W.F. France, Edit. *Lavoisier*. TEC & DOC, 405 p.
- VALLAURI D., 2007 – *Biodiversité, Naturalité, Humanité. Application à l'évaluation des forêts et de la qualité de la gestion*. W.W.F. France, 84 p.
- VALLAURI D. (coord.), 2010 – *Biodiversité, naturalité, humanité. Pour inspirer la gestion des forêts*. WWF-France, Edit. *Lavoisier*. TEC & DOC, 474 p.
- VALLET, 2005 – Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. *Thèse ENGREF*, 190 p.
- WOODWELL G. M., 1978 – Le problème du gaz carbonique. *Pour la Science*, N° 5, pp. 12-22.

(*) Références plus générales, brèves ou de seconde main portées dans le texte au moment de leur emploi.

Remerciements à :

- M. Jean ANDRE, animateur infatigable du REFORA (pour tout son dévouement à la forêt et pour la lecture critique de ce manuscrit).
 - M. Jean ANDRIOT, Ingénieur du Corps des Mines, président d'honneur de la Fondation Pierre Vérots (pour de fructueuses discussions sur des thèmes variés).
 - M. Pierre ATHANAZE, membre de l'Association « Forêts Sauvages » (pour sa promotion de la notion de « Forêts en libre évolution »).
 - M. Rémi BOGEY, permanent « Biodiversité » à la FRAPNA-Région (pour sa compétence et son engagement permanent dans le Réseau Forêt de celle-ci).
 - M. Gilbert COCHET, président de l'Association « Forêts Sauvages », professeur agrégé de sciences naturelles (pour des précisions scientifiques aimablement fournies).
 - M. Philippe COCHET, membre de l'Association « Forêts Sauvages » (pour sa compétence et sa passion du terrain forestier).
 - M. Luc HOFFMANN, président d'honneur du WWF-France (pour son soutien moral et matériel à de multiples causes naturalistes).
 - Mme Camille MAZAS, ingénieur des ponts, eaux et forêts (pour la fourniture d'une précieuse documentation forestière).
 - M. François-Xavier NICOT, Adjoint au Délégué territorial de l'ONF en Rhône-Alpes (pour sa présence active au sein du CA et du CS de la Fondation Pierre Vérots).
 - Mme Magali ROSSI (pour son aide documentaire et critique dans la réalisation de ce texte).
 - M. Daniel VALLAURI, chargé de missions « Forêts » au WWF-France (pour ses compétences scientifiques et son attachement aux forêts, notamment dans le cadre des Colloques de Chambéry).
-

Crédits photographiques (Philippe Lebreton)

- page 2 de couverture : chênaie pédonculée dans le bois des Allées, domaine de la Fondation Pierre Vérots, Saint-Jean-de-Thurigneux, Dombes (Ain). Carbone « gris ».
 - page 4 de couverture : le « totem », arbre mort dans le bois de Bramafans, Montluel (Ain). Carbone « gris clair ».
 - page 4 de couverture : charpente séculaire, en bois brut de peuplier noir, Beynost (Ain). Carbone « gris très clair ».
-

Référence à utiliser pour citer le présent document

Collectif APN, 2015 – Carbone et Forêts (Réflexions et propositions sur la diversité des filières carbonées). *FS, FRAPNA, LPO-CoRA*. Rédaction Philippe Lebreton, février 2015, 58 p.

Adresses des APN co-signataires :

- FORÊTS SAUVAGES

4 rue André Laplace. 43000 Le Puy-en-Velay

Courriel : nature.haute-loire@orange.fr

Site : www.forets-sauvages.fr

- FRAPNA (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature)

77 rue Jean-Claude Vivant. 69100 Villeurbanne

Standard : 04 78 85 97 07

Courriel : coordination@frapna.org

Site : www.frapna.org

- LPO / CoRA (Coordination Rhône-Alpes)

Maison Rhodanienne de l'Environnement. 32 rue Sainte-Hélène. 69002 Lyon

Standard : 04 72 77 19 84

Courriel ; rhone-alpes@lpo.fr

Site : rhone-alpes.lpo.fr

Avec la participation de :

- REFORA (Réseau Ecologique Forestier Rhône-Alpes)

Maison des Associations. Case V3. 67 rue Saint-François de Sales. 73000 Chambéry

Téléphone : 04 79 62 70 74 (Mobile 06 08 91 40 02)

Courriel : je.andre@free.fr

Site : refora.online.fr



Le "totem", vieil arbre mort dans le bois de Bramafans (Montluel)



Charpente séculaire, en bois brut de peuplier noir (Beynost)

Plan

Résumé	p. 3-4
Considérations générales	
Manifeste. Introduction	pp. 5-6
I. Attendus préliminaires (les filières)	p. 7
II. Généralités quantitatives	
II.1. <u>Validations énergétiques</u>	p. 8
II.2. <u>Eléments de biochimie forestière</u>	p. 10
II.2.1. Un matériau exceptionnel	p. 10
II.2.2. Les constituants biochimiques du bois	p. 11
II.2.3. Analyse des constituants du bois	p. 12
II.3. <u>Valeurs massiques et énergétiques du bois et de ses constituants</u>	p. 13
III. Stocks et mouvements du Carbone	
III.1. <u>Puits et stocks forestiers</u>	p. 16
III.1.1. Au niveau du Monde	p. 16
III.1.2. Au niveau de la France	p. 18
III.1.3. Durée de stockage d'un matériau carboné	p. 19
III.2. <u>Bois du dessus, carbone du dessous</u>	p. 20
III.2.1. Irrégularités des peuplements	p. 20
III.2.2. Ni vu... ni connu	p. 20
III.3. <u>Mouvements du carbone</u>	p. 22
III.4. <u>Substitution carbonée</u>	p. 25
IV. Services éco-systémiques	
IV.1. <u>Aménités générales</u>	p. 26
IV.2. <u>Biodiversité</u>	p. 31
IV.2.1. Biodiversité ornithologique	p. 31
IV.2.2. Biodiversité fongique et microbienne	p. 35
IV.3. <u>Naturalité</u>	p. 37
V. Rationalités et Politiques forestières	
V.1. <u>Les révolutions du carbone</u>	p. 41
V.2. <u>Pour une vision politique de la forêt</u>	p. 48
V.2.1. Le paradoxe rural	p. 48
V.2.2. L'interface Forestiers / Naturalistes	p. 49
V.2.3. Vers une autre vision des forêts	p. 50
VI. Propositions et Positions	p. 52
Références bibliographiques	p. 54
Remerciements	p. 55