



**HAL**  
open science

## Sylviculture et protection des sols

Jacques Ranger, Laurent Augusto, Alain Berthelot, Jean Bouchon, Emmanuel Cacot, Étienne Dambrine, André Gavaland, Jean-Paul Laclau, Arnaud Legout, Manuel Nicolas, et al.

► **To cite this version:**

Jacques Ranger, Laurent Augusto, Alain Berthelot, Jean Bouchon, Emmanuel Cacot, et al.. Sylviculture et protection des sols. *Revue forestière française*, 2011, 63 (2), pp.245-264. 10.4267/2042/45211 . hal-03449602

**HAL Id: hal-03449602**

**<https://hal.science/hal-03449602v1>**

Submitted on 25 Nov 2021

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

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

---

## **SYLVICULTURE ET PROTECTION DES SOLS**

---

**JACQUES RANGER – LAURENT AUGUSTO – ALAIN BERTHELOT – JEAN BOUCHON  
EMMANUEL CACOT – ÉTIENNE DAMBRINE – ANDRÉ GAVALAND – JEAN-PAUL LACLAU  
ARNAUD LEGOUT – MANUEL NICOLAS – CLAUDE NYS – QUENTIN PONETTE  
JEAN-MARC OTTORINI – LAURENT SAINT-ANDRÉ**

---

Le sol est une ressource non renouvelable pour de très nombreux caractères, en particulier sa qualité chimique. Le contexte des sols forestiers français, majoritairement acides et pauvres (62 % ont un pH inférieur à 5,5) (Badeau *et al.*, 1999) doit donc inciter à acquérir les connaissances de base pour étayer au plus juste les recommandations pour leur gestion durable.

Les écosystèmes forestiers sont parfaitement adaptés à cette pénurie d'éléments. Le mécanisme général des cycles biogéochimiques exploite de manière performante et très généralement de manière efficiente l'ensemble des ressources disponibles (Ranger et Turpault, 1999). Cela ne signifie pas que les écosystèmes peuvent tout tolérer. La résilience (c'est-à-dire la capacité de retour à un état initial) est forte, mais il existe des seuils critiques qui bornent la tolérance des systèmes et correspondent aux limites de changement d'état.

Les actions sylvicoles en milieu tempéré font peser plusieurs types de contraintes sur les sols, variant évidemment avec l'intensité de la sylviculture :

- un risque d'appauvrissement chimique associé aux exportations de biomasse, participant à l'acidification des sols,
- un risque de dégradation physique par compaction en cas de recours à la mécanisation,
- une augmentation du risque d'érosion mécanique par les eaux de ruissellement en relief pentu, en cas de préparation inappropriée des sites.

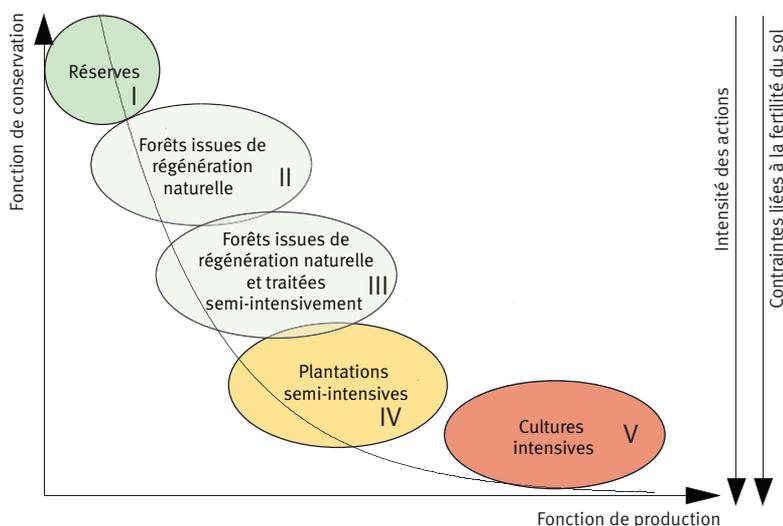
Ces contraintes majeures constituent, avec d'autres, la base du projet de directive cadre sur la protection des sols en Europe (Council of the European Union, 2007).

La montée en puissance des questions d'environnement dans notre société, suite aux crises mondiales (pollution, changement climatique, crise énergétique), se traduit par des politiques prônant l'utilisation beaucoup plus forte de bois bio-matériau et de bois énergie. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, les différents acteurs se sont accordés pour mobiliser davantage de bois dans le respect de la gestion durable des forêts.

### **OBJECTIFS DE CETTE SYNTHÈSE**

Ce travail tente d'évaluer les risques que font peser les pratiques forestières actuelles sur la durabilité des sols et des écosystèmes. La figure 1 (p. 246) présente les relations entre l'intensité des actions pour la fonction de production et la fonction de conservation des sols. Cette relation montre une certaine antinomie entre ces deux objectifs. Que conclure ? Dans tous les

**FIGURE 1 RELATIONS ENTRE LES FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE CONSERVATION POUR DIFFÉRENTS MODÈLES SYLVICOLES**  
(d'après Nambiar, 1996)



Contraintes liées au sol :

I et II **Demande** régulée par la **disponibilité**

III et IV **Demande proche de la disponibilité** → indicateurs ; remédiation

V **Demande très supérieure à la disponibilité** → fertilisation indispensable

cas, il faut adapter les interventions au milieu en sélectionnant la ou les fonctions privilégiées. La gestion multifonctionnelle des forêts françaises, prônée par tous, n'autorise généralement pas une intensification sylvicole très forte. La question des cultures dédiées ligno-cellulosiques très intensives, posée dès les années 1970, reste d'actualité en milieu tempéré. Ces cultures se sont par contre très fortement développées en milieu tropical, où la surface plantée atteint déjà environ 60 millions d'hectares (selon la FAO). Cette voie pourrait résoudre des problèmes très divers, tant techniques que socioéconomiques, voire environnementaux.

## RAPPELS SUR LA FERTILITÉ DES SOLS FORESTIERS ET SON DIAGNOSTIC

La fertilité des sols a une composante physique, une composante chimique et une composante biologique.

La fertilité physique, dépendant du matériau, a plusieurs composantes : la structure du sol liée à l'état d'agrégation des particules entre elles (plus elle est exprimée et stable, plus la porosité est forte, plus vite l'excès d'eau est drainé et plus l'oxygénation du sol est correcte et l'activité biologique forte) ; la masse volumique du sol ou densité apparente, et sa variation sur le profil de sol rendent compte de l'état de la porosité ; et la résistance du sol qui détermine la capacité des racines à pénétrer dans les horizons et dans les agrégats. La physique du sol détermine directement la capacité en air et en eau du sol ainsi que la circulation des fluides dans les sols.

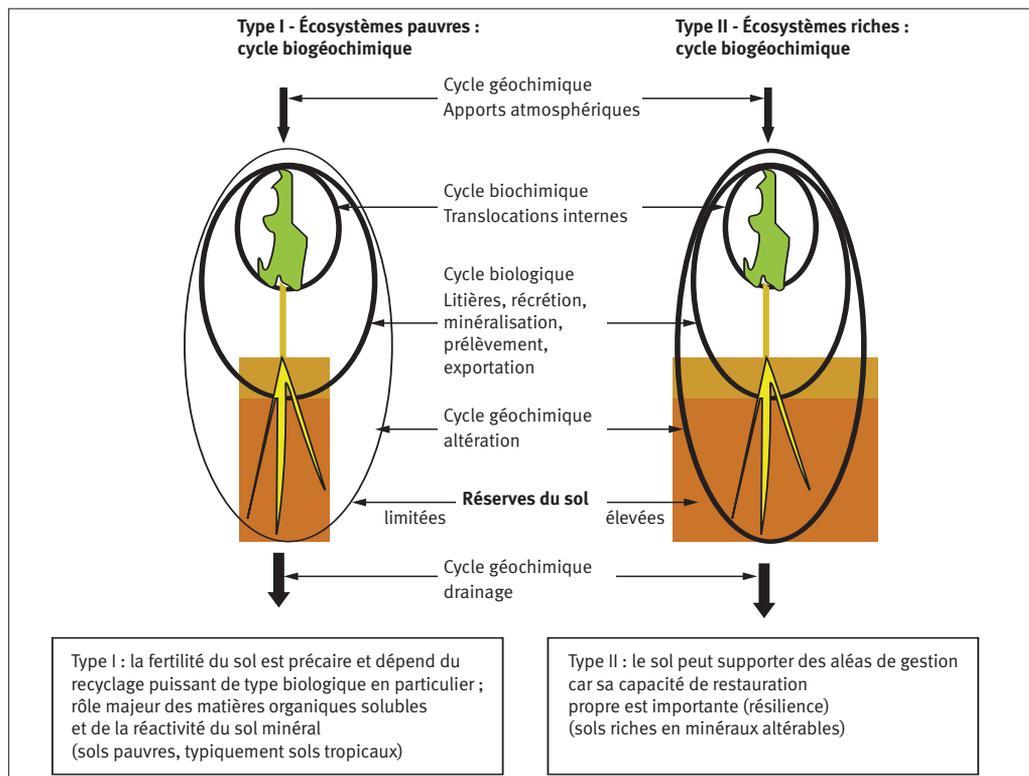
La fertilité chimique a trois composantes : la capacité à fournir des éléments (sol réservoir), la capacité à retenir (sol échangeur d'ions), et la capacité à recycler qui conduit à optimiser les

réserves limitées du sol pour produire la biomasse. Ce dernier point est très spécifique aux écosystèmes pérennes et longévifs tels les écosystèmes forestiers.

La performance des cycles biogéochimiques a été maintes fois démontrée et explique des productions significatives sur des sols très pauvres (Duvigneaud, 1984 ; Ranger et Bonneau, 1984). Toutefois, la stabilité de l'écosystème est évidemment d'autant meilleure que les réserves du sol sont élevées. Autrement dit, malgré une optimisation remarquable des systèmes développés sur les sols les plus pauvres, leur vulnérabilité est bien réelle puisque la fertilité chimique repose sur des flux faibles, ce qui la rend très sensible aux perturbations extérieures. Toute gestion inappropriée risque de se traduire par une dégradation irréversible du sol pour toutes ses fonctions (de production, environnementales et écologiques). Le délai pour en observer les conséquences est par contre très difficile à prévoir car les successions naturelles prennent en compte cette évolution du sol et les aménagements privilégient les essences de plus en plus rustiques, voire substituent aux essences natives des essences moins exigeantes, ce qui peut entraîner une poursuite de la dégradation du sol. Dans ce cas, la fonction de production n'est pas nécessairement affectée, voire parfois au contraire améliorée, ce qui n'incite guère à se poser la question de la durabilité ! C'est par exemple ce qui s'est passé dans les Ardennes, le Morvan ou le Massif central dans les stations épuisées par une surexploitation forestière, qui ont été reboisées en plantations résineuses.

La figure 2 illustre la relation entre richesse du sol et vulnérabilité de l'écosystème.

**FIGURE 2** EFFETS DE LA RICHESSE DU SOL SUR LA HIÉRARCHIE DES FLUX DANS UN ÉCOSYSTÈME FORESTIER



Dans les sols riches, c'est la partie géochimique des cycles qui fournit les flux les plus forts, en particulier par altération physique ou biologique des minéraux du sol.

Dans les sols les plus pauvres, c'est la partie biologique des cycles qui domine les flux. La fertilité chimique n'y est pas le fait d'une réserve importante dans le sol, mais celui d'un flux actif qui recycle rapidement un pool limité d'éléments. C'est l'humus qui est le niveau clé de la ressource, le flux d'éléments issu de l'altération des minéraux du sol y étant très faible. Les interventions de l'homme doivent respecter ce compartiment organique sensible à l'érosion physique et à la minéralisation rapide. Pour illustrer l'importance du rôle de la matière organique, citons les observations faites au Congo, où la production des peuplements d'Eucalyptus est positivement corrélée à la quantité d'éléments nutritifs présente dans les rémanents d'exploitation, mais pas aux réserves du sol (Deleporte *et al.*, 2007). Cet exemple montre que le diagnostic réalisé classiquement sur le sol (valeurs seuils pour définir l'état du sol sur la base des concentrations ou des réserves d'éléments dans un volume donné) n'est pas approprié dans ce type de situation où ce n'est pas le sol minéral dépourvu de réserves qui contrôle la nutrition minérale des arbres.

La fertilité biologique correspond au niveau de diversité biologique qui permet, au fur et à mesure des modifications des conditions du milieu, que toutes les fonctions importantes soient satisfaites par des groupes fonctionnels complémentaires, par exemple la minéralisation de la matière organique, l'altération biologique des minéraux du sol, ou encore les symbioses.

Ces trois aspects de la fertilité sont en très forte interaction.

## **EXAMEN DES DIFFÉRENTS NIVEAUX D'INTENSIFICATION DE LA SYLVICULTURE ET DE MOBILISATION DE LA RESSOURCE EN BOIS QUANT À LEURS IMPLICATIONS POUR LE SOL**

### **Les forêts gérées extensivement**

Ce domaine concerne les réserves, les forêts de protection et certaines forêts privées très peu exploitées. La fonction de production n'y est pas la préoccupation majeure.

L'aspect physique de la fertilité du sol est le plus concerné. Le problème est surtout celui de la stabilité du sol en forêt de protection (dunes, forêts d'altitude y compris dans les réserves, forêts sur sols instables en zone méditerranéenne à climat contrasté) où la gestion doit limiter les risques d'érosion physique. Le traitement en futaie jardinée, où les récoltes se font par pied, ou par bouquets d'arbres d'âge élevé, et où, de plus, le débardage des produits se fait par câble voire par hélicoptère, est très bien adapté à la conservation des sols instables.

Pour ce qui concerne les réserves et les forêts gérées très extensivement, la fonction de production y étant marginale, la durabilité des sols n'est en général pas en cause, si ce n'est que très localement.

### **Les forêts cultivées semi-intensivement**

Ces forêts, issues de régénération naturelle ou de plantation, représentent la situation la plus fréquente en France où est récoltée la majorité des bois commercialisés. Ce modèle sylvicole se situe typiquement dans le cadre d'une gestion multifonctionnelle, fournissant à la fois un niveau de production élevé et de nombreux services écologiques et environnementaux.

Par définition, cette gestion est extensive par le fait qu'elle ne comporte, sauf exceptions, ni les restitutions des exportations d'éléments lors des récoltes, ni la restauration par amendement calco-magnésien de l'acidification des sols liée à la perte d'éléments capables de neutraliser les acides

(acides minéraux ou organiques, issus des apports externes ou générés dans le sol par la dégradation des matières organiques, ou issus du prélèvement des cations par les plantes), ni celle des dégâts physiques éventuellement causés par la mécanisation. Elle est par contre intensive quand les pratiques visent à sélectionner ou introduire des essences productives, raccourcir les révolutions, augmenter la quantité de biomasse récoltée, mécaniser la majorité des opérations sylvicoles.

La durabilité de cette gestion de l'écosystème dépend des relations entre la richesse intrinsèque du sol et les contraintes liées aux traitements sylvicoles et à l'intensité des récoltes.

Les diagnostics classiques de fertilité du sol à partir de données qualitatives (concentrations par éléments pour un horizon de sol) et quantitatives (masse d'élément pour un volume de sol) et de nutrition de la plante par analyse foliaire sont connus, avec les limites discutées précédemment. Les abaques sont fournis par Bonneau (1995).

Un diagnostic plus sophistiqué est fourni par les bilans de fertilité qui consistent à calculer la différence entre les flux entrants et sortants d'un écosystème (Ranger et Turpault, 1999). Ces bilans sont calculés pour les éléments disponibles pour la plante, sur des pas de temps permettant de saisir la dynamique au cours du développement des peuplements (bilans courants) et pour la révolution complète (interpolation des bilans courants). Avec ces données, on peut simuler des scénarios sylvicoles et tester ainsi des facteurs clés tels l'effet du milieu, l'essence, la révolution ou l'intensité des récoltes. La méthode du bilan de fertilité est une approche lourde qui ne peut pas être mise en œuvre sur un grand nombre de sites. Le bilan est établi sur des situations de référence qui serviront à identifier les variables qui les contrôlent. Ces recherches sont développées notamment sur les sites-ateliers de l'Observatoire de recherche en environnement ORE F-ORE-T (coordonné par le Gip ECOFOR), dont font partie les sites les plus instrumentés du réseau Rénécofor géré par l'ONF.

Les variables clés sont les suivantes :

- la richesse du site qui joue sur l'intensité des flux. Les flux de prélèvement par la végétation, de libération d'éléments issus de l'altération des minéraux du sol et du drainage sont plus élevés en sol riche ;

- l'essence intervient par plusieurs voies : la demande en nutriments, les restitutions en carbone et en nutriments, la capture de polluants atmosphériques, le contrôle de processus tels la minéralisation de la matière organique et la nitrification, ou encore l'altération des minéraux via les microorganismes associés ;

- le niveau des apports atmosphériques : ce sont des entrées variables dans l'espace en fonction des sources (apports marins, pollution agricole et industrielle, vents sahariens) et de la dispersion de la pollution par les vents dominants. Ces apports ont un impact négatif quand ils sont trop abondants et déséquilibrés, mais sont utiles dans le cas contraire : les quantités de Ca et Mg apportées par les embruns marins ou les vents sahariens sont couramment supérieures au flux d'altération des minéraux du sol en milieu acide ;

- les antécédents du site : les plantations sur ancien sol agricole conduisent à des rééquilibrages du compartiment organique pouvant momentanément augmenter les pertes par drainage. De plus, s'il existe des reliquats de fertilité, les plantations en bénéficient et leur production ne traduit pas uniquement la fertilité naturelle du site ; cette partie héritée n'est pas pérenne et décroît au cours des générations successives, malgré un recyclage efficace.

Les simulations conduisent à deux ensembles de conclusions suivantes :

. Premier ensemble : les traitements sylvicoles ont un rôle significatif sur les bilans de fertilité :

- la récolte des rémanents a toujours un effet négatif important,

— le raccourcissement des révolutions a en général un effet négatif sur le bilan, quand la révolution est inférieure à l'âge auquel l'accroissement courant du peuplement est maximal,

— la coupe à blanc a des effets négatifs qui dépendent de la durée du maintien du sol à nu et de la surface concernée. Lorsque la végétation spontanée se développe, elle capte le flux de nutriments dans un « compartiment temporaire » qui libérera ces éléments à la fermeture du couvert, évitant leur perte pour l'écosystème. Un équilibre doit être trouvé pour éviter la concurrence avec la régénération ou la jeune plantation. L'effet des coupes à blanc sur le bilan d'éléments nutritifs est très variable : il peut être élevé quand la végétation spontanée est éradiquée (Bormann *et al.*, 1968) et reste en général modeste quand elle est conservée (Ranger *et al.*, 2007).

— l'andainage peut avoir un effet aussi fort voire plus fort que les récoltes totales s'il est mal réalisé (rémanents et horizons superficiels du sol poussés vers l'andain ou andains orientés dans le sens de la plus grande pente), provoquant une érosion physique et chimique du sol.

. Deuxième ensemble : les événements ponctuels peuvent conduire à une déstabilisation importante de l'écosystème modifiant le niveau de base de l'équilibre du sol :

— une tempête peut avoir des conséquences équivalentes à une coupe à blanc avec travail mécanique du sol,

— la chaleur extrême exacerbe des processus de minéralisation quand elle est associée à une humidité suffisante.

Dans ces conditions, la gestion durable nécessite de respecter au mieux les possibilités de l'écosystème puisque la remédiation est coûteuse, techniquement délicate et n'est jamais durable. La gestion appropriée est une clé majeure de la durabilité dans ce modèle :

— essences adaptées à chaque station,  
— éclaircies dynamiques pour éviter la dégradation des humus liée au déficit d'énergie arrivant au sol,

— révolutions en accord avec les possibilités de la station,  
— récoltes adaptées à la fertilité du sol en sachant que les rémanents sont tout sauf des déchets pour l'écosystème (Cacot *et al.*, 2006),

— mécanisation contrôlée et généralisation des cloisonnements (Pischedda, 2009),

— remédiation par amendement si nécessaire (Bonneau, 1995).

### Les cultures lignocellulosiques

L'option prioritaire est ici la production et ici la gestion multifonctionnelle locale devient moins réaliste. Cette multifonctionnalité se raisonne à des échelles supérieures et, à ce titre, produire du matériau énergie en utilisant éventuellement des déchets de stations d'épuration rurales, pour amender et fertiliser les sites dédiés, est écologiquement et environnementalement pertinent.

#### • *Les révolutions moyennes*

Ce type de traitement associe l'amélioration du potentiel de production de la plante par sélection génétique et l'amélioration du milieu par le travail du sol et la fertilisation. Celle-ci vise ici à amener l'offre du sol à un niveau compatible avec la demande du peuplement pour que son potentiel puisse s'exprimer totalement.

Depuis les travaux de Switzer *et al.* (1973), il est bien connu que ces améliorations conduisent à une demande plus forte des peuplements que dans le cas précédent. En France, ce système correspond à la ligniculture du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Ce système intensif est mis en place sur un milieu pédologique plutôt hostile : sols très pauvres, très drainants, parfois indurés en profondeur, riches en aluminium toxique, parfois hydromorphes et engorgés jusqu'à la surface une partie de l'année, mais présentant une grande variabilité stationnelle,

souvent liée à la hauteur de la nappe (Jolivet *et al.*, 2007). La généralisation des conclusions issues de ce milieu spécifique est par définition difficile.

Dès les années 1960, les pratiques de fertilisation se sont généralisées, sans être actuellement systématiques, après la diffusion des résultats de l'essai de Mimizan mis en place en 1957 où environ 125 kg/ha de scories concentrées sur les bandes plantées (la moitié de la surface cadastrale) ont permis de doubler la production (Guinaudeau *et al.*, 1963). Celle-ci est actuellement comprise entre 12 et 14 m<sup>3</sup>/ha/an pour des révolutions de 30 à 50 ans. Les semis sont désormais abandonnés au profit des plantations. Une partie des sylviculteurs de ce massif sévèrement endommagé par les tempêtes de 1999 et 2009 pourraient s'écarter des modalités de production antérieures. Certaines évolutions, telles la valorisation des rémanents et des souches ou la réduction de la fertilisation (à des fins de réduction des frais) doivent être considérées avec attention.

Quels sont les risques associés aux options sylvicoles ?

L'analyse du fonctionnement de cet écosystème le situe très clairement dans le type biologique, qui donne un rôle majeur au compartiment organique du sol et au recyclage. La contribution géochimique étant très limitée (peu de minéraux facilement altérables porteurs de nutriments), la fertilisation est impérative à la fois pour fournir aux jeunes semis ou plants les éléments qui font défaut, et pour compenser les exportations. Ne pas respecter cette règle ferait probablement retomber significativement la production. Le tableau I présente les réserves disponibles et totales de sols. Le ratio entre ces phases pour un élément donné (environ 10 % en moyenne) souligne le caractère « organique » de ce sol où les éléments présentent tous, sauf K, une liaison organique importante (Augusto *et al.*, 2006).

TABLEAU I **Réserves totales et biodisponibles dans les sols des Landes de Gascogne**  
(Augusto *et al.*, 2006)

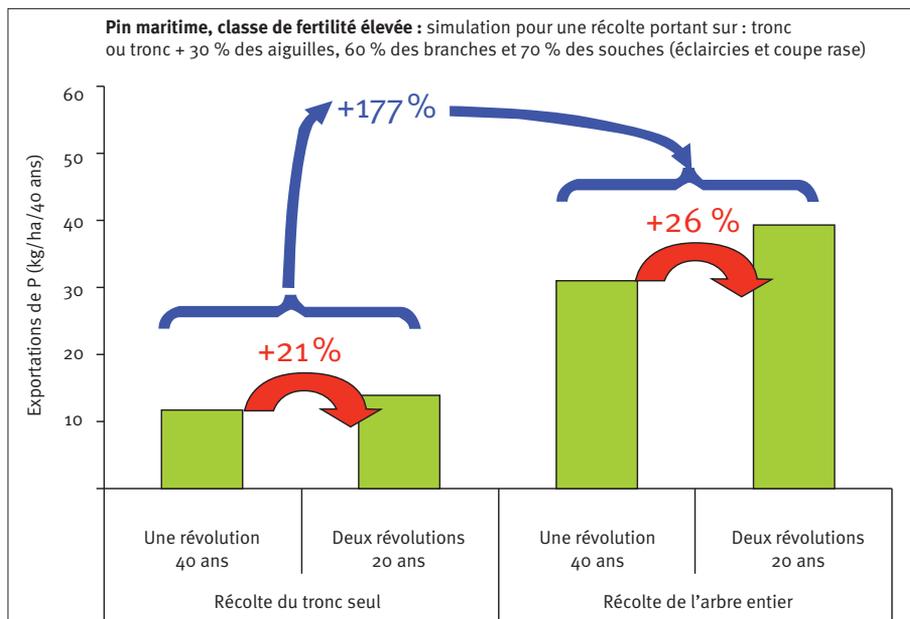
Profondeur	N total	P total	K total	Ca total	Mg total	P assimilable	K échangeable	Ca échangeable	Mg échangeable
	t/ha					kg/ha			
0-15 cm	1,5-2,0	0,11-0,29	4,8-7,1	0,8-1,6	0,27-0,44	27-34	28-39	193-289	49-72
15-45 cm	2,1-3,8	0,11-0,35	11,9-16,6	1,9-5,1	0,51-0,95	27-65	29-43	197-306	46-70
45-100 cm	2,3-3,7	0,51-0,94	32,8-41,1	5,3-7,8	1,52-2,19	96-36	54-86	216-348	43-101
Total	6,0-9,5	0,73-1,58	49,5-65,1	8,0-14,5	2,3-3,59	150-236	111-168	606-944	138-244

Raccourcir les révolutions diminue le risque de subir une catastrophe naturelle telle une tempête, mais la récolte de bois plus jeunes se traduit par une augmentation des exportations minérales. En fait, l'augmentation de la fréquence des perturbations en phases de récolte et de régénération pourrait alourdir le déficit des bilans. Au plan environnemental, le travail fréquent du sol dilue le carbone organique et augmente la minéralisation ; seule l'incorporation de rémanents par le discage rétablit le bilan quantitatif (Jolivet, 2000). La répercussion négative sur les autres éléments est évidente.

Augmenter le taux de biomasse récoltée priverait ce sol déjà pauvre en éléments nutritifs indispensables à la future génération et contraindrait son développement. De plus, la réduction de l'apport de rémanents au sol, affectant le carbone réactif, risque de contraindre la diversité et l'activité des microorganismes du sol, d'autant plus que ces rémanents sont porteurs d'une masse significative d'éléments minéraux actifs, également indispensable à l'activité biologique.

Par exemple, la simulation du phosphore exporté dans un scénario comparant la récolte des seuls troncs à celle des troncs augmentée de 60 % des branches, 30 % des aiguilles et 70 % des souches, indique un accroissement de 177 % du P exporté quelle que soit la révolution (figure 3) ! La récolte des souches, bouleversant le sol en brassant les horizons et en apportant des « morts terrains » à sa surface, se traduit également par de fortes exportations de P, Mg et surtout de K (Cacot *et al.*, 2007).

**FIGURE 3** **SIMULATION DES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE EN FONCTION DE L'INTENSITÉ DE LA RÉCOLTE DE PIN MARITIME**  
(Augusto *et al.*, 2008)



Le cumul de ces éléments d'intensification fait peser un risque majeur sur la pérennité de cet écosystème fragile. Les machines actuellement disponibles sur le marché (fagoteuses de rémanents, croqueuses de souches) montrent que techniquement ces scénarios sont envisageables (cf. article Laurier dans ce numéro).

La décision de récolte des rémanents et des souches ne peut se justifier en termes agronomiques que si les éléments exportés sont restitués sous forme de fertilisants. Le contexte landais pose des questions spécifiques. Le phosphore est un élément extrêmement conservatif qui ne migre généralement pas à l'état soluble dans les sols, y compris dans les plus poreux, ce qui n'est pas le cas des autres éléments, et en particulier de l'azote. Un déficit en azote aurait des conséquences environnementales plus dramatiques que celui du phosphore dans ce sol, puisque ni le nitrate ni l'ammonium ne peuvent se fixer faute de capacité d'échange suffisante en anions et en cations, créant un risque majeur de pollution des nappes et des eaux de surface. Il conviendrait d'apporter des doses fractionnées, contrainte incompatible avec la gestion forestière même intensive pour sauvegarder ce service environnemental majeur de la forêt.

Signalons que FCBA a mis des essais en place dans les Landes de Gascogne pour tester l'effet de l'intensification des récoltes et les restitutions à opérer. Les résultats permettront de simuler les effets de sylvicultures mixtes, en particulier semi-dédiées pour la production de biomasse énergie.

Photos Laurent AUGUSTO



Photo 1  
Machine à désoucheur dite "Rhino Croq"



Photo 2  
Fagoteuse de rémanents commercialisée par John Deere

- *Les révolutions courtes (TCR) et très courtes (TTCR)*

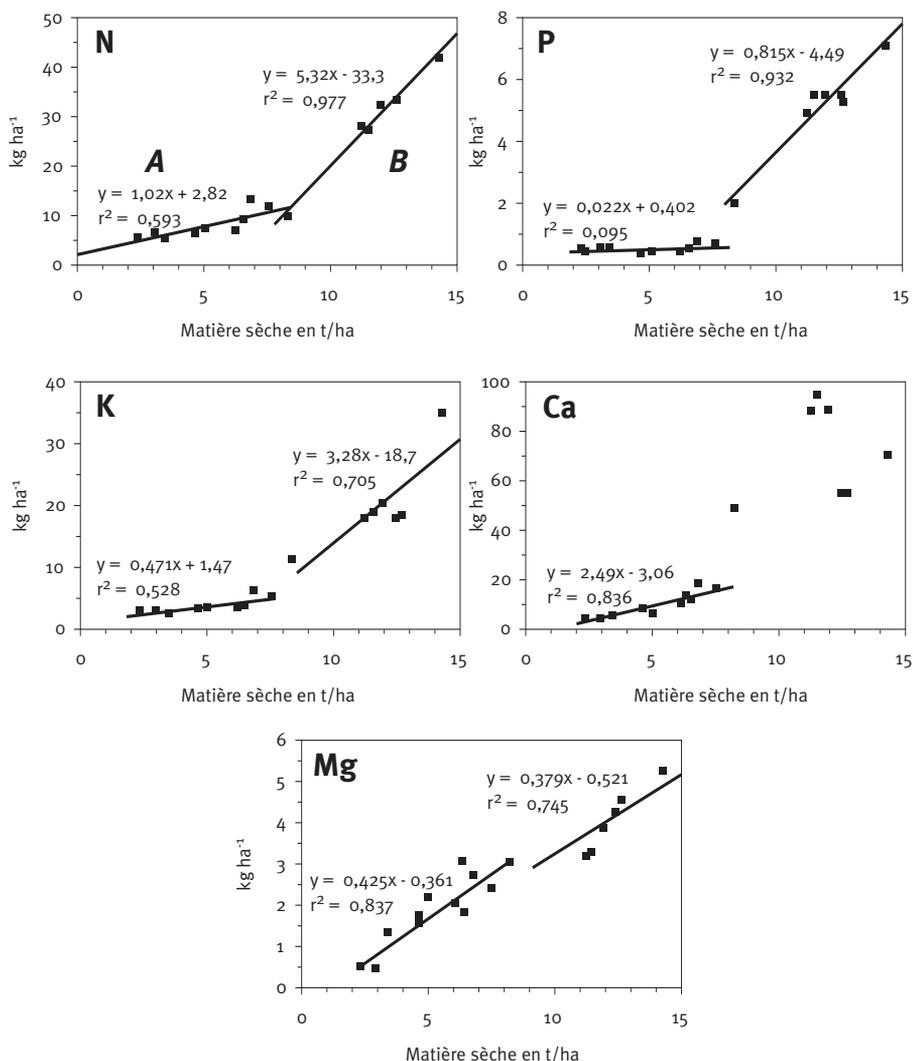
L'objectif de ces plantations est de produire une ressource en bois d'industrie ou d'énergie planifiable dans un périmètre limité pour satisfaire des besoins programmés (Afofel, 2007). La production maximum que nous avons enregistrée en France est de 14 t/ha/an de matière sèche ligneuse aérienne dans des taillis de Peuplier constitués de plusieurs hectares, implantés par l'Afofel (Ranger et Nys, 1996). Des chiffres nettement supérieurs sont souvent cités, mais ils proviennent généralement d'extrapolations à partir de résultats obtenus en microcosmes.

Ce degré d'intensification nécessite d'une part des conditions de milieu optimales et d'autre part des végétaux performants, avec en particulier une croissance juvénile très forte et une très bonne aptitude à rejeter de souche. La durée pour atteindre l'accroissement courant maximal doit être la plus courte possible (2 ans au plus).

L'espèce phare a été le Peuplier, essence à fort potentiel de croissance, mais pour laquelle le sol doit être de très bonne qualité physique (sol aéré profond bien alimenté en eau mais non hydromorphe) et chimique (sol riche ou susceptible de retenir les éléments apportés par fertilisation). La très grande majorité des sols forestiers est exclue de ce schéma pour cette culture lignocellulosique intensive, dont le concept est plus proche des modes de conduites agricoles que forestiers. Plus la rotation est courte plus cette affirmation est fondée. Des niveaux de production justifiant ces cultures ne peuvent être obtenus que sur des sols fertiles, bien alimentés en eau, habituellement dédiés à la production alimentaire. Les itinéraires techniques parfaitement définis par l'Afofel (Bonduelle, 1989) soulignent que ces plantations craignent très fortement la concurrence, intraspécifique (la densité de plantation doit être optimale) et interspécifique (avec la végétation spontanée). Le potentiel de cette essence améliorée génétiquement fait que son implantation en sol médiocre se traduirait par des productions plus faibles que celles obtenues avec des essences rustiques placées dans ces mêmes conditions.

Pour les taillis à courte rotation (TCR), les travaux menés dans les années 1980 et 1990 ont permis d'établir les relations entre la matière sèche produite et l'immobilisation minérale (figure 4, ci-dessous) (Ranger et Nys, 1996). Si on excepte le cas du magnésium, il apparaît que les TCR consomment 3 à 5 fois plus d'éléments que les taillis classiques (rotation de 20 à 40 ans) pour élaborer leur biomasse. Ces résultats suivent la loi générale de consommation exponentielle d'éléments quand la biomasse augmente (Switzer *et al.*, 1973). Il faut donc une réserve bio-disponible (naturelle ou apportée par fertilisation) nettement plus importante dans les sols supportant ces cultures que dans ceux supportant les taillis classiques.

**FIGURE 4** **RELATION ENTRE PRODUCTION DE BIOMASSE SÈCHE ET IMMOBILISATION MINÉRALE**  
**(A) dans les taillis classiques traités à rotation comprise entre 20 et 40 ans**  
**et (B) taillis à courte rotation (moins de 10 ans)**



D'autres limites doivent être soulignées.

Une fertilisation optimale appliquée à un sol forestier suffit-elle ?

L'expérience d'Uxeloup (Nièvre) a montré que ce n'était pas le cas. Un clone très performant au milieu des années 1980 (Beaupré) a été planté après défrichage d'un taillis-sous-futaie développé sur un sol lessivé à pseudogley de fertilité minérale correcte. La densité de plantation était de 3 300 boutures par ha, recepées à 2 ans et conduites à la rotation de 9 ans. Un apport variable de fertilisant a été réalisé, avec un traitement correspondant à 330 kg de N, 125 kg de P, 190 kg de K et 800 kg de Ca par ha la première année de plantation. Un entretien a été réalisé, manuel autour des boutures et mécanique entre les rangs. La production moyenne annuelle observée à 9 ans a été de 1,1 t de MS/ha/an dans le témoin et de 3,2 t de MS/ha/an dans le traitement de fertilisation maximum (Gelhaye *et al.*, 1997). Il est probable que l'entretien n'a pas été optimal, mais, quoi qu'il en soit, cette expérience conforte l'idée que toutes les conditions doivent être réunies pour que ces plantations produisent les 15 t escomptées. Il est évident que ce sol forestier ne peut pas soutenir ce type de récolte pour des raisons qui relèvent de sa qualité physique, impossible par ailleurs à améliorer : difficulté d'enracinement du peuplier, problèmes d'anoxie, sécheresse estivale, concurrence herbacée difficile à contrôler.

Peut-on espérer une production soutenue sur un sol de très bonne qualité ?

L'essai de l'Afocel à Conteville (Eure) apporte un élément de réponse à cette question. Deux clones, Beaupré et Raspalje, ont été implantés après labour d'une ancienne prairie permanente sur alluvions récentes de la vallée de la Seine. Le sol est riche et profond. La production moyenne annuelle à 8 ans a été de 11,1 t de MS/ha/an pour le clone Beaupré, mais seulement de 9,3 t de MS/ha/an pour le clone Raspalje (Berthelot *et al.*, 2000). Malgré des conditions de sol *a priori* optimales, les deux étés pluvieux de 1992 et 1994 ont conduit à la prolifération de la rouille, réduisant la production pour le clone Raspalje. Le rattrapage n'a pas été parfait et le handicap s'est maintenu. C'est maintenant Beaupré qui est régulièrement touché par la rouille.

Cet essai conforte l'hypothèse qu'un seul facteur défavorable aura une forte répercussion sur ces cultures fragiles, ce qui peut faire douter de la possibilité d'atteindre régulièrement les très fortes productions annoncées. Les produits issus de ces plantations auront toujours une valeur modeste, posant d'emblée la question du coût de leur production. Des cours plus élevés de l'énergie ou une politique active de soutien aux énergies renouvelables devraient toutefois améliorer le contexte.

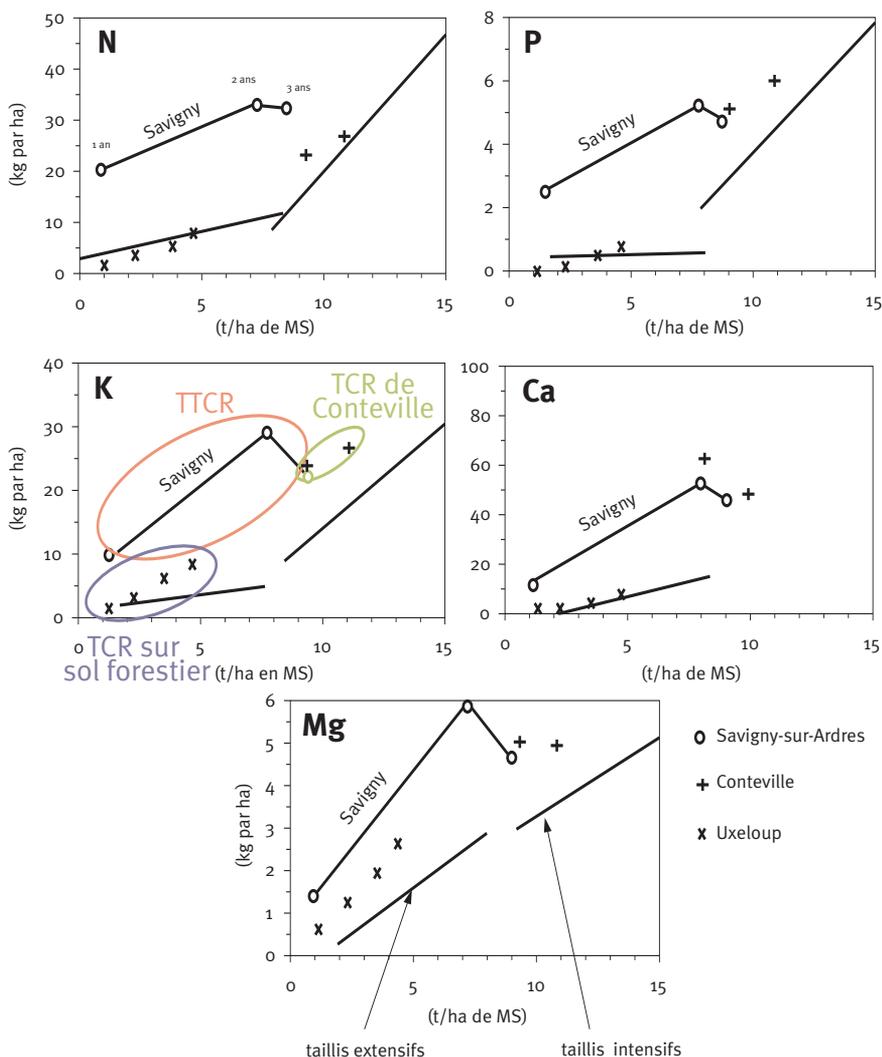
Par ailleurs, l'utilisation d'essences plus rustiques, tolérant des sols moins fertiles, où la disponibilité en eau est plus limitée, est une alternative à ne pas négliger, puisque la concurrence avec l'alimentaire y sera plus faible. Les tests réalisés par l'Afocel sur Eucalyptus dans la région Midi-Pyrénées montrent que l'on pourrait atteindre des productions de matière ligneuse de 8 à 12 t de MS/ha/an pour des rotations de 10 ans (Afocel, 2002). Une espèce comme le Châtaignier devrait produire de 6 à 10 t de MS/ha/an au nord du Massif central, à partir d'ensouchements récents, puisque des productions atteignant 7,5 t de MS/ha/an ont été mesurées sur des taillis à ensouchement ancien (Ranger *et al.*, 1990). Les révolutions devront toutefois être allongées probablement à 15 ans pour atteindre cet objectif.

S'agissant des taillis à très courte rotation (TTCR), ces cultures ont les mêmes exigences édaphiques que les TCR. Toutefois, leur production concerne uniquement des tissus juvéniles, par définition très concentrés en éléments nutritifs. En effet, le processus « conservatif » de translocation interne d'éléments des tissus âgés vers les organes en croissance, caractéristique de la nutrition des plantes pérennes, ne s'est pas encore mis efficacement en place.

Les observations faites sur l'essai de Savigny-sur-Ardres (Aisne), installé sur un sol riche de la vallée de l'Aisne, sont présentées dans la figure 5. La première année, la production est très faible (environ 1,1 t de MS/ha/an) excluant tout intérêt pour une éventuelle récolte. La seconde année, la production s'élève nettement (à 7,6 t de MS/ha/an) mais la progression est ensuite faible puisqu'elle n'atteint en quatrième année que 8,7 t de MS/ha/an. La consommation de ces peuplements est plus forte que pour celles des TCR, ce qui signifie que leur efficacité dans l'utilisation des éléments nutritifs pour produire la biomasse est plus faible que ces derniers.

**FIGURE 5 POSITIONNEMENT DU TAILLIS À TRÈS COURTE ROTATION (TTCR) DE SAVIGNY-SUR-ARDRES DANS LES AIRES DES TAILLIS EXTENSIFS ET DES TAILLIS INTENSIFS**

La relation entre la consommation d'éléments et la production suit une courbe dont la trajectoire ne rejoint l'aire des TCR qu'en 4<sup>e</sup> année. Le point correspondant à la deuxième année montre bien la singularité de ce traitement qui consomme très fortement sans fournir une production exceptionnelle sur ce site pourtant riche



Si aucune valeur ajoutée n'est trouvée au produit de ces TCR, ou s'ils n'ont pas d'autre utilité que de produire de la biomasse de médiocre qualité, il ne semble pas y avoir d'argument majeur pour développer ces plantations, surtout pas au plan de l'environnement et des sols. Ils pourraient éventuellement trouver un intérêt pour la dépollution agricole. Les données actuelles pour la productivité et pour la nutrition minérale sont plus favorables aux TCR qu'aux TCR.

## QUELQUES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON ENTRE CES TRAITEMENTS SYLVICOLES

### L'efficacité des peuplements pour produire la biomasse (tableau II)

C'est un critère simple qui traduit de manière moyenne la quantité de matière sèche produite par kg d'élément nutritif immobilisé. Pour les rotations longues, les conifères sont plus performants que les feuillus. Pour les traitements en taillis, le Châtaignier se montre très efficace pour les éléments majeurs N, P et K, au même niveau que les futaies de Douglas ou d'Épicéa. Cette essence semble intéressante pour la production de biomasse, avec peu voire pas de concurrence avec l'agriculture.

TABLEAU II **Efficacité des peuplements pour produire la biomasse**  
(données exprimées en tonne de biomasse sèche produite par kilogramme d'élément immobilisé dans la matière ligneuse aérienne des peuplements)

	Douglas	Épicéa	Chênes	Hêtre
N	0,6-0,9	0,5-0,8	0,3-0,5	0,5-0,7
P	8-13	4-13	4,8-9,0	5,3-7,3
K	0,9-3	0,8-1,5	0,7-0,9	0,7-0,7
Ca	0,8-2	0,6-0,9	0,4-0,5	0,8-0,5
Mg	7-14	4-7	2,8-7,0	4,0-3,6

	Taillis Châtaignier (20-30 ans)	Autres taillis (30-40 ans)	Peupliers TCR 7-9 ans	TTCR 1 an	TTCR 2 ans	TTCR 3 ans
N	0,6-0,9	0,3-0,4	0,3-0,4	0,1	0,2	0,3
P	6,6-15,5	3,9-5,2	2,0-4,3	0,4	1,5	1,6
K	1,3-1,8	0,7-1,0	0,4-0,7	0,1	0,3	0,4
Ca	0,5-0,8	0,5-0,6	0,1-0,2	1	0,2	0,2
Mg	2,3-3,0	4,2-6,1	2,7-3,5	0,2	0,9	1,9

En traitement de taillis, l'intensification conduit à diminuer la rotation et à utiliser des essences plus exigeantes (souvent le Peuplier) introduites sur des milieux favorables pour obtenir une production significative, conduisant au total à des efficacités nettement inférieures à celles observées pour les taillis classiques. Les très courtes rotations de Peuplier sont extrêmement peu performantes à 1 an. La situation s'améliore quand la rotation s'allonge.

### La relation entre la révolution et la demande d'éléments au sol (tableau III)

Ces données moyennes issues de la compilation des données de la littérature confirment que le raccourcissement des révolutions se traduit par une augmentation des prélèvements au sol et des immobilisations, et potentiellement des exportations.

Pour les courtes révolutions, le prélèvement courant pour produire la biomasse prend des valeurs totalement impossibles à satisfaire par les sols forestiers même correctement pourvus.

La disponibilité des éléments dans le sol pour satisfaire cette demande dépend de plusieurs facteurs :

- la mobilité des éléments ; en instantané, le stock biodisponible doit être environ 50 fois supérieur au prélèvement pour P et 20 fois pour les autres éléments plus mobiles (Ca, Mg, nitrates),
- le volume de sol colonisé, qui améliore la ressource nutritive et tamponne les variations hydriques,
- la prospection radicaire et les associations biologiques (en particulier les mycorhizes),
- le régime hydrique (les sols secs ne permettent pas la mobilité des éléments vers les racines).

TABLEAU III **Relation entre la révolution et la demande en éléments au sol**

Révolution	Processus	Référence temporelle	Essence	N	P	K	Ca	Mg
Révolutions longues	Prélèvement	Moyen annuel Moyen annuel	Résineux Feuillus	30-50 40-80	3-5 4-6	15-35 35-55		
Courtes rotations (production >10t de MS par ha et par an)	Prélèvement	Moyen annuel Courant annuel	Feuillus Feuillus	70-110 100-150	10-20 20-35	70-110 110-160		
Révolutions longues	Immobilisation	Moyen annuel	Toutes essences	5-15	0,5-2	2-10	5-15	0,5-3
Courtes rotations (production >10t de MS par ha et par an)	Immobilisation	Moyen annuel	Feuillus	30-50	6-8	20-35	55-90	3-8

Immobilisation = quantité d'éléments fixée définitivement dans la biomasse = extraction temporaire du sol, qui devient définitive si l'arbre est récolté.

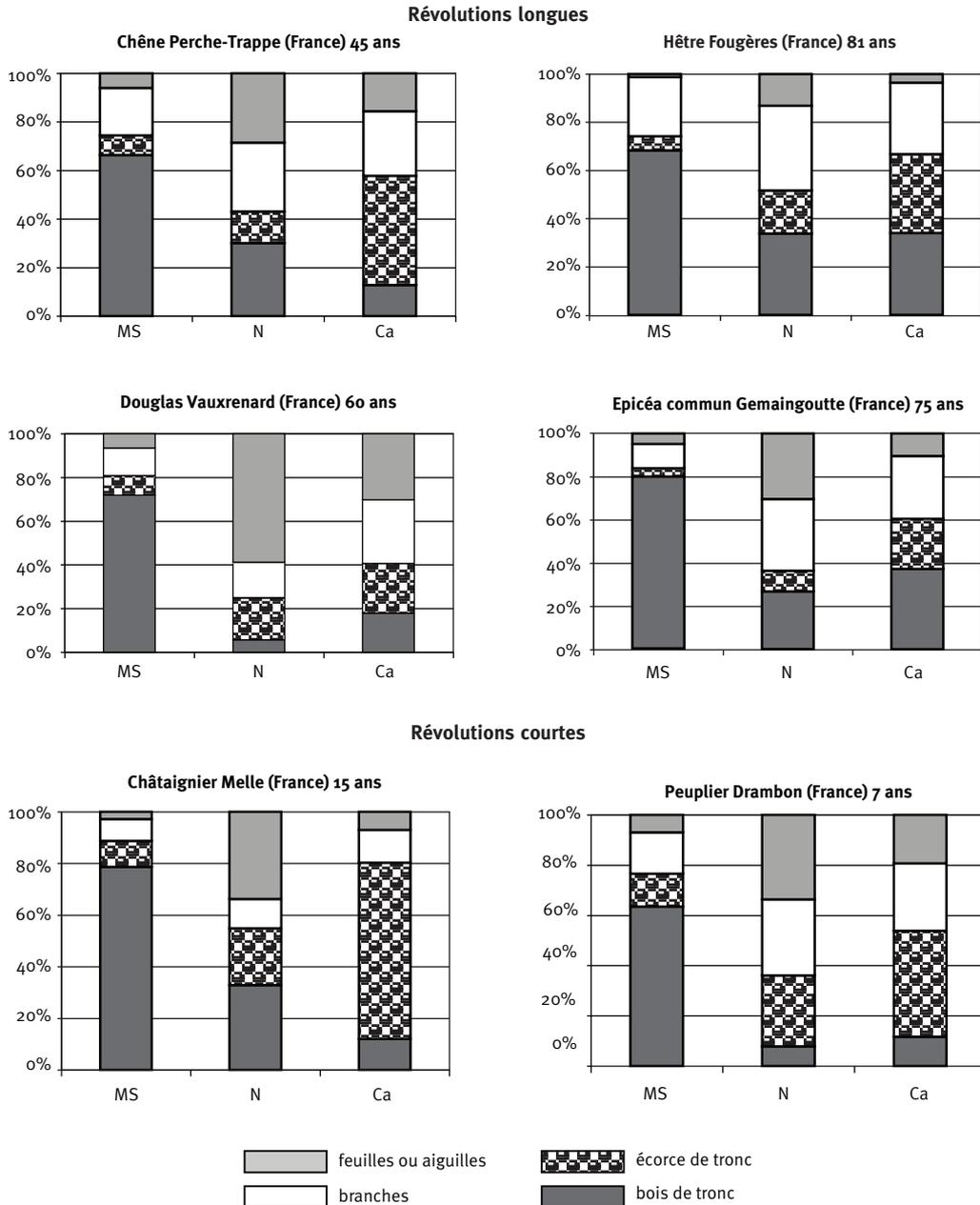
Prélèvement (au sol) = Immobilisation + restitutions annuelles par les litières et la récrétion (éléments soustraits au houppier par lixiviation par les eaux de pluie) = extraction maximum au sol dont une partie revient par les litières.

### La relation entre biomasse exportée et éléments soustraits au sol

La figure 6 (p. 259) montre que ce n'est pas la révolution qui régit en premier la distribution relative des éléments dans la biomasse. Le compartiment est très discriminant avec une tendance à la relation inverse entre biomasse et contenu minéral, les petits compartiments de biomasse présentant la minéralomasse la plus forte. Toutefois on note effectivement un effet essence, par exemple le Châtaignier est un « hyper accumulateur » de calcium dans son écorce, est-ce un processus de détoxification pour un calcifuge strict ? À l'inverse, des traitements et des essences éloignées conduisent à des distributions semblables, par exemple la proportion d'azote dans les feuilles de conifères et de feuillus de taillis est voisine.

En termes d'exportation, quel que soit le type de traitement, exporter du bois écorcé serait très économe pour la fertilité minérale du sol, exporter les feuilles et les branches fines est au contraire très dommageable.

**FIGURE 6** DISTRIBUTION RELATIVE DE BIOMASSE ET D'ÉLÉMENTS DANS DIFFÉRENTS MODÈLES DE TRAITEMENTS FORESTIERS



## **EN CONCLUSION : DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS DANS LE SOL, PÉRENNITÉ ET CAPACITÉ DU SOL À SATISFAIRE LA DEMANDE DES PEUPELEMENTS**

Les sols forestiers ont en général des ressources limitées, mais l'écosystème est bien adapté pour les optimiser. Le sol évolue très lentement mais inexorablement vers un milieu de plus en plus pauvre. La capacité du sol à fournir les éléments diminue avec la disparition des minéraux les plus facilement altérables, sa capacité à retenir les éléments peut diminuer également quand le sol s'acidifie, et la capacité de recyclage ne fournit pas d'éléments nouveaux mais conserve efficacement ceux qui existent.

Les traitements sylvicoles peuvent donc accélérer ces évolutions quand ils sont inappropriés : essence hors station, densité trop forte des peuplements, récoltes trop fortes par rapport aux possibilités de la station, coupes à blanc sur des versants entiers, mécanisation dégradant la porosité du sol, préparation des sites mal réalisée (andainage ou brûlage). Dans ces conditions, la durabilité du système est compromise.

La question des fertilisations et de l'amendement est importante dans un contexte d'intensification de la production forestière. En excluant le raisonnement d'agronome productiviste, il est clair que toute récolte de biomasse appauvrit le sol lentement, mais inéluctablement. Toutes les fonctions du sol, dont la production, sont altérées. Il convient donc de raisonner à court, moyen et long terme sa fertilité chimique :

- en dehors des milieux carbonatés ou saturés, l'amendement calcique ou calci-magnésien devrait être systématiquement utilisé pour ralentir l'acidification des sols des forêts cultivées semi-intensivement, de façon à redynamiser les cycles, évitant le recours à la fertilisation ;

- la fertilisation, restituant au minimum les éléments exportés par les récoltes, est une pratique indispensable dans les traitements semi-intensifs sur sol pauvres ou lorsque les récoltes sont fortes, pour éviter la déplétion des éléments nutritifs et la chaîne de conséquences qui en découle ;

- la fertilisation optimisant l'offre du sol doit être réalisée systématiquement pour les traitements très intensifs.

Les doses doivent être strictement adaptées au milieu et aux objectifs sylvicoles, en prenant en compte l'ensemble du système, car le déséquilibre de l'offre nutritive pour les organismes se traduit par des dysfonctionnements contraignant toutes ses fonctions.

La composante physique de la fertilité du sol n'a pas été développée ici, seules les interactions avec la fertilité chimique sont abordées ci-après.

Un sol tassé contraint fortement l'activité biologique prise au sens large du terme :

- le système racinaire des arbres ne prospecte pas intégralement le sol pour des causes physiques (différence de densité apparente entre horizons, résistance du sol, saturation permanente en eau) ou chimiques (déficit d'oxygénation, déficit d'éléments indispensables ou présence d'éléments indésirables), voire biologiques (problème de symbiose). L'arbre cantonné dans un volume plus faible de sol, n'a accès qu'à une partie des éléments potentiellement biodisponibles et son alimentation hydrique est perturbée en particulier par un excès d'eau en début de saison de végétation ou un déficit estival en année sèche ;

- l'activité microbiologique est perturbée par l'hypoxie voire l'anoxie qui se développe en sol compacté. Les symbioses, les activités minéralisatrices des matières organiques, sont modifiées ;

— l'activité de la macrofaune fousseuse responsable de la porosité « biologique » du sol est fortement ralentie quand la résistance du sol augmente, et les populations de fousseurs sont d'autant plus rares que les sols sont acides.

De plus, la structure du sol et sa stabilité sont le résultat de l'activité biologique plus forte en sol fertile et de processus physiques liés à la présence de cations flocculants (le calcium est plus abondant en sol riche) et de ciments organiques (de meilleure qualité en sol riche).

L'interaction entre la dégradation physique du sol par la mécanisation de la majorité des opérations sylvicoles et l'appauvrissement chimique est à prendre en compte dans les risques associés aux différents modèles sylvicoles.

En traitement semi-intensif, la correction des effets négatifs de la mécanisation sur le sol n'est pas appliquée. L'interaction avec l'acidification des sols, quasiment généralisée dans ces situations, accentue les effets néfastes, dans la mesure où la vitesse de restauration naturelle du sol décroît avec ce processus. Le tassement est un risque important pour la durabilité des sols dans toutes leurs fonctions. Le guide Prosol (Pischedda, 2009) expose les techniques alternatives pour lutter contre la montée en puissance de ce risque majeur : mise en place de cloisonnements en sol sensible, techniques alternatives pour débarber les bois dans les cas extrêmes (câbles, hélicoptère).

En traitement intensif, la mécanisation des opérations sylvicoles est pratiquement systématique et le tassement des sols est un risque avéré. Toutefois, le maintien d'une fertilité par amendement et fertilisation, et le travail du sol, tendent à limiter les contraintes pour les acteurs biologiques.

**Arnaud LEGOUT — Claude NYS**  
**Jacques RANGER – Etienne DAMBRINE**  
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers (BEF)  
INRA Centre de Nancy  
F-54280 CHAMPENOUX  
(ranger@nancy.inra.fr)  
(nys@nancy.inra.fr) (legout@nancy.inra.fr)

**Laurent AUGUSTO**  
UMR Transfert sols plantes  
et cycles des éléments minéraux (TCEM)  
INRA Centre de Bordeaux  
71 avenue Édouard Bourlaux  
F-33883 VILLENAVE-D'ORNON Cedex  
(augusto@bordeaux.inra.fr)

**Alain BERTHELOT**  
FCBA Station Nord-Est  
F-21170 CHARREY-SUR-SAÔNE  
(alain.berthelot@fcba.fr)

**Jean BOUCHON\* – Jean-Marc OTTORINI**  
Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB)  
INRA Centre de Nancy  
F-54280 CHAMPENOUX  
(ottorini@nancy.inra.fr)  
  
(\*en retraite)

**Emmanuel CACOT**  
FCBA - Station Centre-Ouest  
F-87430 VERNEUIL-SUR-VIENNE  
(emmanuel.cacot@fcba.fr)

**André GAVALAND**  
INRA Centre de Toulouse  
Domaine expérimental  
F-31326 AUZEVILLE  
(andre.gavaland@toulouse.inra.fr)

Jean-Paul LACLAU – Laurent SAINT-ANDRÉ  
UMR Eco&Sols - Écologie fonctionnelle  
& Biogéochimie des sols & Agroécosystèmes  
CIRAD  
2 place Viala - Bâtiment 1  
F-34060 MONTPELLIER  
(laclau@cirad.fr) (standre@cirad.fr)

Manuel NICOLAS  
Département Recherche et Développement  
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS  
F-77300 FONTAINEBLEAU  
(manuel.nicolas@onf.fr)

Quentin PONETTE  
Earth and Life Institute  
Faculté d'ingénierie biologique,  
agronomique et environnementale  
UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN  
Bâtiment Mendel, Croix du Sud 2, bte 9  
B-1348 LOUVAIN-LA-NEUVE (BELGIQUE)  
(Quentin.Ponette@uclouvain.be)

## Remerciements

Cette synthèse de nombreux travaux résulte de recherches lourdes ayant mobilisé depuis plus de 25 ans la compétence et l'énergie des équipes techniques des différents partenaires et de nombreux étudiants de tous niveaux. Chacun y est associé sans pouvoir être nommé individuellement.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFOCEL. — Besoins et exportations minérales des TCR d'Eucalyptus. — *Informations-Forêt*, n° 1, fiche n° 646, 2002.
- AFOCEL. — Produire de la biomasse avec des taillis de peupliers. — *Informations-Forêt*, n° 4, fiche n° 760, 2007.
- AUGUSTO (L.), BADEAU (V.), ARROUAYS (D.), TRICHET (P.), FLOT (J.-L.), JOLIVET (C.), MERZEAU (D.). — Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données. Exemple des sols du massif forestier landais. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 13, n° 1, 2006, pp. 7-22.
- BADEAU (V.), DAMBRINE (E.), WALTER (C.). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 6, n° 3, 1999, pp. 165-179.
- BERTHELOT (A.), RANGER (J.), GELHAYE (D.). — Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. — *Forest Ecology and Management*, vol. 128, n° 3, 2000, pp. 167-179.

- BONDUELLE (P.). — Sylviculture du Peuplier en taillis à courtes rotations. — *Informations-Forêt*, n° 2, fasc. n° 362, 1989, 41 p.
- BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, bases de diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.
- BORMANN (F.H.), LIKENS (G.E.), FISCHER (D.W.), PIERCE (R.S.). — Nutrient Loss Accelerated by Clear-Cutting of a Forest Ecosystem. — *Science*, 159, 1968, pp. 882-884.
- CACOT (E.), EISNER (N.), CHARNET (F.), LEON (P.), RANGER (J.). — La Récolte raisonnée des rémanents en forêt. — Angers : ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2006. — 36 p.
- CACOT (E.) (coord.). — Étude de l'impact du prélèvement des rémanents en forêt (volet 3). Rapport final du projet UZ70 - Convention ADEME-FCBA 0501Coo57 (FCBA, IDF, ONF, UCFF, ADEME, INRA). — 2007. — 60 p. + annexes.
- COUNCIL OF EUROPEAN UNION. — Proposal for a directive of the European parliament and of the Council establishing a framework for protection of soils. — Unofficial document revised by French Presidency. — 2007. — 36 p.
- DELEPORTE (P.), LACLAU (J.-P.), NZILA (J.-D.), KAZOTTI (J.-P.), MARIEN (J.-N.), BOUILLET (J.-P.), SZWARC (M.), D'ANNUNZIO (R.), RANGER (J.). — Effects of harvest residue management on soil chemical properties and growth of second rotation eucalypts in the Congo. *In* : Site management and productivity in tropical plantation forests / E.K.S. Nambiar (editor). Proceedings of workshops of Piracicaba (Brésil) 2004 et Bogor (Indonésie) Nov. 2006. — CIFOR [Center for international forestry research], 2007. — 236 p.
- DUVIGNEAUD (P.). — L'Écosystème forêt. Communication présentée au 101<sup>e</sup> congrès de l'Association française pour l'Avancement des Sciences (AFAS) le 7 septembre 1983. — Nancy : ENGREF, 1984. — 160 p.
- GELHAYE (D.), RANGER (J.), BONNEAU (M.). — Biomasse et minéralomasse d'un taillis à courte révolution de peuplier Beaupré installé sur sol acide hors vallée, amélioré par fertilisation. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 54, n° 7, 1997, pp. 649-665.
- GUINAUDEAU (J.), ILLY (G.), MAUGÉ (J.-P.), DUMAS (P.). — Essai de fertilisation minérale sur Pin maritime à Mimizan (Landes). — *Annales de l'ENEF et de la Station de recherches et expériences forestières*, vol. XX, n° 1, 1963, pp. 3-71.
- JOLIVET (C.). — Le Carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. — Dijon : Université de Bourgogne, 2000 (Thèse).
- JOLIVET (C.), AUGUSTO (L.), TRICHET (P.), ARROUAYS (D.). — Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne : formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale. — *Revue forestière française*, vol. LIX, n° 1, 2007, pp. 7-29.
- LAURIER (J.-P.). — Mobilisation du bois énergie sous forme de plaquettes forestières. — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 2, 2011, pp. 203-216.
- NAMBIAR (E.K.S.). — Sustained productivity of forest is a continuing challenge to soil science. — *Soil Science American Journal*, 60, 1996, pp. 1629-1642.
- PISCHEDDA (D.) (coord.). — Prosol : pour une exploitation forestière respectueuse des sols. — Paris : ONF ; FCBA, 2009. — 110 p.
- RANGER (J.), BONNEAU (M.). — Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. I. Le cycle biologique en forêt. — *Revue forestière française*, vol. XXXVI, n° 2, 1984, pp. 93-112.
- RANGER (J.), LOYER (S.), GELHAYE (D.), POLLIER (B.), BONNAUD (P.). — Effects of the clear-cutting of a Douglas-fir plantation (*Pseudotsuga menziesii* F.) on the chemical composition of soil solutions and on the leaching of DOC and ions in drainage waters. — *Annals of Forest Science*, vol. 64, n° 2, 2007, pp. 183-200.
- RANGER (J.), NYS (C.). — Biomass and nutrient content of extensively and intensively managed coppice stands. — *Forestry*, vol. 69, n° 2, 1996, pp. 91-110.
- RANGER (J.), NYS (C.), BOUCHON (J.). — Les relations entre la fertilité du sol, la production et l'utilisation des éléments nutritifs dans les taillis de Châtaignier. — *Acta oecologica, Oecologica Plantarum*, vol. 11, n° 4, 1990, pp. 487-501.
- RANGER (J.), TURPAULT (M.-P.). — Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. — *Forest Ecology and Management*, vol. 122, n° 1-2, 1999, pp. 139-154.
- SWITZER (G.L.), NELSON (L.E.), SMITH (W.H.). — Effet des raccourcissements des révolutions et de la récolte de la biomasse sur la fertilité des sols. *In* : Colloque "Utilisation des engrais en forêt". — Paris : INRA, 1973. — pp. 355-381.

### **SILVICULTURE ET PROTECTION DES SOLS (Résumé)**

Ce travail tente d'évaluer les risques que font peser les pratiques forestières actuelles sur la durabilité des fonctions des sols et des écosystèmes. La relation entre fonction de production et fonction de conservation des sols traduit une certaine antinomie entre ces deux options. Les contraintes pour la fertilité chimique du sol sont analysées pour les traitements des moins aux plus intensifs, c'est-à-dire des réserves forestières aux cultures lignocellulosiques traitées à très courte révolution. Dans les systèmes extensifs, le recyclage biologique performant est durable si les exploitations se cantonnent aux seuls troncs. Les amendements permettent de corriger l'acidification lente et inéluctable des sols. Dans les traitements intensifs, la fertilité naturelle des sols forestiers ne peut soutenir la production ; seuls les sols de qualité physique convenable et avec apports d'intrants peuvent conduire à des productions élevées et soutenues, en particulier dans les systèmes à courte révolution.

### **SILVICULTURAL PRACTICES AND SOIL PROTECTION (Abstract)**

The purpose of this work is to assess the risks deriving from current forestry practices on the sustainability of soil function and ecosystems. The relationship between the production function and the soil conservation function translates as a certain conflict between these two options. Stresses on the chemical fertility of the soil were analysed from the least intensive to the most intensive treatments, i.e. from forest reserves to very short rotation, treated lignocellulosic crops. Under the extensive systems, high grade biological recycling is sustainable if logging is confined to trunks alone. Dressings can correct the slow but inevitable acidification of soils. When treatments are intensive, the natural fertility of forest soils cannot sustain production; only soils with suitable physical qualities combined with application of appropriate inputs enable sustained high levels of output to be achieved, in particular under the short rotation systems.

---