

# Impact des plantations forestières traitées semi-intensivement sur la fertilité minérale des sols et la qualité de l'environnement

J. Ranger, D. Gelhaye et M.-P. Turpault

INRA centre de Nancy - Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers - 54280 Champenoux

## RÉSUMÉ

La production de bois de sciage et d'industrie est en grande partie réalisée dans des plantations pures et équiennes d'essences résineuses en particulier (Epicéa commun, Sapin, Pin maritime, Douglas). Ces essences à croissance rapide et à fort potentiel de production, ont remplacé les essences natives, feuillues en général, ou ont été utilisées pour le reboisement d'anciennes terres agricoles.

Le traitement semi-intensif conduit à des contraintes pouvant devenir fortes pour le sol, en fonction des pratiques sylvicoles et des caractéristiques des sols, car aucune restitution d'éléments nutritifs n'a lieu. Malgré une efficacité importante des essences forestières dans l'utilisation des éléments nutritifs pour produire la biomasse, et un recyclage très performant des éléments nutritifs dans l'écosystème, le risque d'altération de la qualité des sols dans leurs diverses fonctions de production, écologiques ou environnementales est un enjeu majeur de la gestion durable des écosystèmes forestiers.

Les travaux de recherche dans le domaine se heurtent à la longévité des écosystèmes qui évoluent de plus en plus dans un contexte environnemental changeant (climat, apports atmosphériques, CO<sub>2</sub> atmosphérique...).

Le travail présenté ici concerne la quantification de contraintes écologiques résultant de la sylviculture semi-intensive de plantations fortement productives de Douglas. Cet exemple a été choisi car le Douglas est l'une des premières essences de reboisement en France, et ce modèle sylvicole semi-intensif, sans restitution des exportations minérales, devrait conduire aux contraintes maximum pour le sol, compte tenu de sa productivité.

## Mots clés

Sols forestiers – sylviculture semi-intensive – flux d'éléments – bilans de fertilité – Douglas

## SUMMARY

### EFFECT OF SEMI INTENSIVELY MANAGED FOREST PLANTATIONS ON SOIL QUALITY AND ENVIRONMENT.

Wood for sawmill and industry is mainly produced by monospecific and even-aged plantations, usually planted with coniferous species e.g. Norway spruce, fir, maritime pine and Douglas-fir. These fast growing species with high productivity either replaced the native species, generally broadleaved, or were selected for afforestation of abandoned agricultural lands.

This semi intensive management could lead to strong constraints on soil quality, depending on soil type and silvicultural practices, when there are no artificial nutrients input. Even as efficient nutrient cycling in high biomass production stands, unadapted silviculture may diminish the efficiency of the existing cycles. This potential degradation of soil quality for production, ecology, and environment represent a major challenge for sustainable management of forest ecosystems.

Research in forest nutrition is difficult due to forest species longevity and ecosystem development in a changing environment, i.e. climate, atmospheric deposition, atmospheric CO<sub>2</sub> concentration...

The work presented here concerns the ecological constraints associated with semi-intensively managed high-production Douglas-fir plantations. Douglas-fir was selected because it is now the primary species for afforestation in France. Its high productivity was expected to lead to maximum constraints to soil mineral fertility. Nutrient budgets calculated for the different stages of stand development (current seasonal or annual budgets) or extrapolated for a theoretical rotation lengths (mean annual budgets), showed the following tendencies: i) current budgets were strongly negative for all elements in the young stand, but became equilibrated in the older stand, ii) mean annual budgets are projected to equilibrate for rotation lengths of about 120 years, although rotations of about 60 to 70 years are most common in current management regimes.

The afforestation of agricultural land led to high nutrient losses at the first part of the rotation. This was related to high nitrification rates, the change in soil organic matter equilibrium, and the rather high atmospheric-N deposits. It appears that more equilibrated nutrient budgets will occur during the next rotation, but risk of soil Ca depletion is serious in this site.

#### Key-words

Forest soils – silvicultural treatments – nutrient fluxes – nutrient budgets – Douglas-fir

## RESUMEN

### IMPACTO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES TRATADAS SEMI-INTENSIVAMENTE SOBRE LA FERTILIDAD MINERAL DE LOS SUELOS Y LA CALIDAD DEL MEDIO AMBIENTE

La producción de madera de sierra y de industria está en grande parte realizada en plantaciones puras y equianas de esencias resinosas en particular ( *Epicea* común, *Sapino*, *Pino marítimo*, *Douglas*). Estas esencias con crecimiento rápido y fuerte potencial de producción, reemplazaron las esencias naturales, caducifolias en general, o se usaron por la repoblación de viejas tierras agrícolas.

El tratamiento semi-intensivo llega a limitantes que pueden estar fuertes por el suelo, en función de las prácticas silvícolas y de las características de los suelos, porque ninguna restitución de elementos nutritivos se hace. Mientras una eficiencia importante de las esencias forestales en el uso de los elementos nutritivos para producir biomasa, y una reutilización muy performante de los elementos nutritivos en el ecosistema, el riesgo de alteración de la calidad de los suelos en sus diversas funciones de producción, ecológicas, ambientales está un problema mayor de la gestión sostenible de los ecosistemas forestales.

Los trabajos de investigación se chocan a la longevidad de los ecosistemas que evolucionan además en un contexto ambiental que cambia (clima, aportes atmosféricos, CO<sub>2</sub> atmosférico).

El trabajo presentado concierne la cuantificación de las limitantes ecológicas que resultan de la silvicultura semi-intensiva de plantaciones fuertemente productivas de *Douglas*. Este ejemplo fue elegido porque el *Douglas* está una de las primeras esencias de repoblación en Francia, y este modelo silvícola semi-intensivo sin restitución de las exportaciones minerales, debería conducir a las limitantes máximas para el suelo, siendo su productividad.

#### Palabras claves

Suelos forestales, silvicultura semi-intensiva, flujo de elementos, balance de fertilidad, *Douglas*.

Les contraintes écologiques de l'aménagement durable des écosystèmes forestiers dépendent très largement des fonctions que l'on va privilégier, et des caractéristiques spécifiques de la station forestière (type de sol, relief, climat).

Il y a une certaine opposition entre la fonction de conservation et la fonction de production, en particulier quand on prend en compte les systèmes extrêmes (réserves biologiques et plantations intensives traitées à courte révolution). Dans les cas intermédiaires, les fonctions de production, les fonctions écologiques et les fonctions environnementales sont plus largement compatibles (figure 1). Il est donc important de définir la ou les fonctions à privilégier pour un écosystème en identifiant au mieux l'échelle de référence : la parcelle, le massif forestier, le bassin versant ou la petite région.

Le sol est un compartiment majeur qui assez paradoxalement reste très insuffisamment pris en compte dans les directives diverses de protection des écosystèmes. Il a une valeur intrinsèque, remplit de multiples fonctions, et représente une ressource non renouvelable. Il possède certes une inertie importante (pouvoir tampon, capacité de filtration, capacité à stocker les contaminants), mais n'est-ce pas son pire ennemi ? (EEA, 2000). C'est un «organisme» vivant, susceptible de se dégrader assez rapidement, en particulier sous l'influence de pratiques sylvicoles mal adaptées.

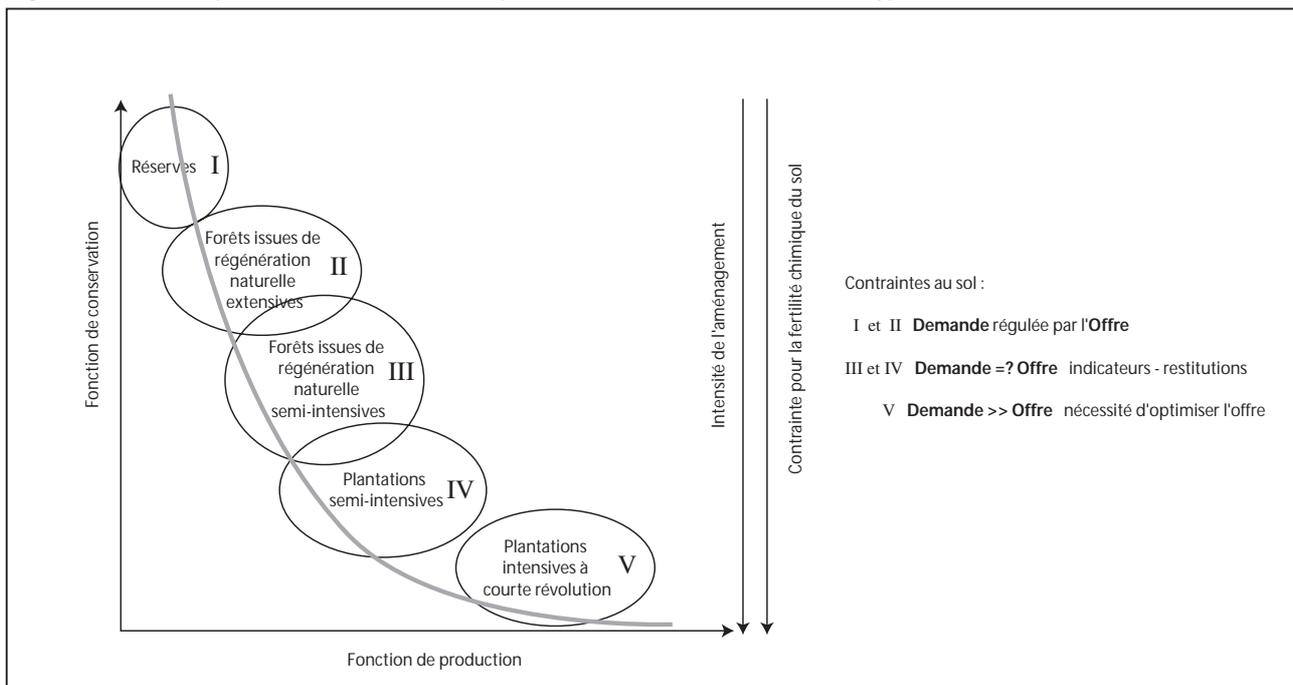
La stratégie de la recherche menée consiste à étudier en détail des écosystèmes forestiers de référence, de façon à identifier les mécanismes de leur fonctionnement et à simuler l'impact de la sylviculture. Cette approche matériellement lourde conduit à un nombre

limité de cas étudiés en France : comparaison feuillus-résineux, (Nys, 1987 ; Ranger *et al.*, travaux en cours) ; étude des pessières vosgiennes (Dambrine *et al.*, 1995 ; Mohamed Ahamed, 1992) ; effet des enrésinements sur les sols et les eaux de surface, (Didon-Lescot, 1996) ; stabilité de la hêtraie de plaine (Nys *et al.*, travaux en cours). Seule une dizaine d'études du même type sont disponibles en Europe (cf. revue de Hornung *et al.*, 1990). La modélisation à base mécaniste et la simulation de certaines pratiques sylvicoles, associées aux observations réalisées sur des réseaux d'observation (par exemple le réseau français Renécofor, Ulrich, 1995), permettront de développer des simulateurs suffisamment précis pour fournir des recommandations pratiques pour les aménagements forestiers. L'objectif des travaux sur les sols forestiers est donc de fournir des indicateurs simples et fiables de sensibilité d'un écosystème forestier dans le domaine de leur fertilité minérale, de façon à intégrer les contraintes écologiques et environnementales dans les aménagements sylvicoles. Les connaissances actuelles sont loin d'être suffisantes pour que cet objectif soit atteint ; toutefois, il existe un nombre certain de résultats acquis, permettant des recommandations générales, évitant des évolutions irréversibles de la qualité des sols, et de leur fertilité minérale en particulier.

La douglasaie du Beaujolais a été choisie comme écosystème modèle, considérant que ces plantations fortement productives doivent permettre d'identifier les contraintes les plus fortes pour la fertilité minérale des sols forestiers dans les aménagements semi-intensifs, où aucune restitution des exportations n'est réalisée. Le Douglas

**Figure 1** - Relation entre fonction de conservation et fonction de production pour les différents types de forêts

**Figure 1** - Relationships between conservation and production functions for different forest types.



est par ailleurs une des premières essences de boisement en France, pour lequel peu de références existaient avant cette étude, dans le domaine du fonctionnement minéral de l'écosystème.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Considérations générales

Compte tenu de la longévité des peuplements forestiers, il est matériellement difficile voire impossible de suivre le fonctionnement de l'écosystème pendant la révolution forestière complète pour y mesurer des flux, et calculer des bilans de fertilité minérale sur une durée intéressant le cycle forestier complet. Quand bien même cela serait possible, les résultats obtenus ne seraient pas nécessairement parfaits. En effet, tout facteur qui va influencer de manière systématique le fonctionnement pendant tout ou partie de la révolution, va se traduire par une courbe de référence biaisée : les forestiers connaissent bien cela pour les tables de production, donnant l'évolution normale d'un peuplement en fonction du type de station, qui ne sont plus opérationnelles dans les peuplements actuels dont la croissance n'est plus comparable à ce qu'elle était dans le passé (Dhôte et Hervé, 2000).

La méthodologie utilisée consiste à réaliser les observations pendant plusieurs années, dans des peuplements d'âge croissant représentant les principaux stades de développement d'un même peuplement : c'est l'approche chronologique. Il faut bien entendu que tous les autres facteurs soient constants entre les peuplements (climat macro, méso et micro ; relief ; exposition ; sol ; essence ; traitement ; occupation passée des sols). Il est difficile de réunir toutes ces conditions, mais cette approche permet cependant d'obtenir des résultats suffisamment fiables pour mettre en évidence les grandes tendances et fournir des recommandations pour des aménagements prenant en compte les contraintes écologiques.

Le bilan de fertilité minérale représente la méthode de référence pour quantifier les contraintes des aménagements forestiers pour le sol (Ranger et Turpault, 1999). C'est une méthode lourde au plan technique, et dont les résultats doivent encore être améliorés, car la mesure de certains termes du bilan est encore imprécise. De plus, et ce n'est pas la moindre difficulté, il est nécessaire que les bilans soient calculés pour les différents stades de développement des peuplements, et, pour la révolution totale, incluant les phases de récolte et de régénération.

Un bilan de fertilité minérale s'établit pour une entité donnée (écosystème, sol) dont on va fixer les limites physiques, pour un pas de temps donné (bilans courants saisonniers ou annuels, bilans moyens annuels pour une révolution...), et, pour une catégorie donnée d'éléments (en général les éléments assimilables par la végétation). Quand ces paramètres sont fixés, le bilan est la somme algébrique des flux entrants et sortants, pendant la période de référence. Ces flux sont décrits dans un modèle conceptuel à compartiments et à flux (Ranger et Bonneau, 1984 ; Ranger et Turpault, 1999). Les bilans

sont calculés ponctuellement à un stade donné de développement du peuplement (ce sont les bilans courants annuels ou saisonniers calculés à partir des flux mesurés pendant une période donnée), ou sont calculés pour une révolution forestière complète par extrapolation et interpolation (ce sont les bilans moyens pour la révolution).

Dans un écosystème simplifié, tel qu'une plantation, le nombre de flux à prendre en compte dans le bilan de fertilité minérale est limité (il faut cependant vérifier que tel est bien le cas) :

Bilan de fertilité minérale = Flux entrants (Apports atmosphériques + Altération) - Flux sortants (Exportations avec la biomasse + Pertes par drainage).

### Précisions concernant la mesure des principaux flux

#### - Le flux d'éléments issu de l'altération des minéraux du sol

Ce flux n'est pas directement quantifiable car les éléments produits ont des devenir multiples : néoformation de minéraux secondaires plus ou moins stables, fixation temporaire en position échangeable, passage en solution, prélèvement par les organismes vivants. Ce flux dépend des minéraux, de leur localisation par rapport aux solutions agressives (surface exposée aux agents altérants), de la réactivité actuelle des surfaces minérales. La modélisation est l'approche actuelle la plus simple qui permette d'estimer ce flux : elle est réalisée par un modèle géochimique à compartiment et à flux, validé par l'équilibre chimique de la solution du sol issu des observations. Le modèle Profile, développé à l'Université de Lund (Suède) a été utilisé (Sverdrup et Warfvinge, 1993). Plus les informations sur l'écosystème sont précises, meilleur est le résultat sur le flux. La limitation la plus sérieuse du modèle concerne l'identification des réactions actuelles de transformation des minéraux du sol et leur réactivité, ainsi que la géométrie du domaine réactif (contact minéraux-solution), très difficiles à identifier. Ce modèle considère de plus des horizons de sols homogènes, ce qui est naturellement faux. C'est toutefois une approche intéressante, tant par les tests de sensibilité du flux aux différents paramètres, que par l'ordre de grandeur des flux qu'il estime (Dambrine *et al.*, 1995).

#### - Les apports atmosphériques

Ils représentent l'ensemble complexe des éléments apportés par les dépôts humides (pluie, neige), les dépôts secs (poussières, gaz) et les dépôts occultes (aérosols, brouillards). Leur quantification directe basée sur la composition de l'air, le flux d'air dans le peuplement et l'absorption sur les surfaces foliaires, est encore peu utilisée car les propriétés des surfaces foliaires vis-à-vis de l'adsorption des gaz est mal connue. De plus, les éléments qui ne sont pas apportés par voie gazeuse (tels que les particules), ne sont pas pris en compte. Les quantifications basées sur l'observation en continu de la pluie et des pluviollessivats restent imprécises, car leur composition ne résulte pas que du simple dépôt atmosphérique. Une partie des éléments résulte de l'échange entre la pluie et la feuille (récré-

tion), ou, à l'inverse, de l'absorption directe des éléments de la pluie (absorption d'azote) au niveau du houppier des arbres. La méthode utilisée pour séparer les différentes composantes est la méthode du traceur, utilisant un élément qui n'entre pas dans le cycle biologique : c'est le cas de Na, Cl ou S dont l'enrichissement éventuel dans les pluviocessivats est attribuable aux seuls dépôts secs (ni récrétion, ni absorption), et permet de calculer le dépôt d'autres éléments dont l'interaction avec la canopée est plus complexe (Ulrich, 1983).

### - Les éléments exportés par la récolte de biomasse

La dimension des arbres et la distribution des éléments nutritifs dans les compartiments (aiguilles, branches, tronc, racines) conduit à des protocoles lourds pour quantifier la biomasse produite et son contenu minéral (Ranger *et al.*, 1995). En effet, la distribution quantitative de biomasse dans les compartiments et la concentration en éléments de ces compartiments, sont globalement inversement proportionnelles (Ranger et Bonneau, 1984). Les protocoles utilisés sont parallèles à ceux qui permettent d'établir des tarifs de cubage (abaque permettant d'estimer le volume d'un arbre à partir de mesures simples, par exemple sa hauteur totale et sa circonférence à 1,30 m du sol), mais doivent prendre en compte la distribution des éléments, spécifique aux plantes pérennes. Les principales étapes sont les suivantes : inventaire des peuplements ; sélection d'arbres échantillons répartis dans toutes les classes de circonférence ; mesures sur les principaux compartiments (circonférences, longueurs, masse) à partir d'un échantillonnage destructif (bois et écorce de tronc, feuilles et branches, racines) ; sélection d'échantillons pour les mesures d'humidité et de composition chimique ; établissement de « tarifs » reliant un paramètre dendrométrique facilement mesurable (circonférence à 1,30 m), aux mesures réalisées sur les différents compartiments des arbres échantillons (masse d'aiguilles, de branches, de bois ou d'écorce de tronc) ; application des tarifs de biomasse et de minéralomasse (contenu minéral) à l'inventaire du peuplement.

### - Les éléments perdus par le drainage au-delà de la zone racinaire

Il s'agit d'un terme essentiel du bilan de fertilité chimique, difficile à quantifier, car il est d'une part nécessaire de quantifier un flux d'eau avec précision et d'autre part d'avoir une mesure précise des éléments en solution quittant la zone de prélèvement racinaire des arbres. La difficulté est d'autant plus grande que le sol est hétérogène au plan du transfert de l'eau (sol caillouteux, sol développé sur des matériaux karstiques, sol développé sur roche fissurée etc.), et que la dimension des peuplements forestiers exclut la possibilité d'utiliser des cases lysimétriques étanches donnant accès direct au bilan d'eau et de solutés. Il faut donc avoir recours à des capteurs spécifiques ne biaisant pas la qualité de la solution drainante. L'utilisation des bassins versants n'est pas satisfaisante car le signal « solution drainante du sol » est toujours très transformé au niveau du bassin (Ranger et Turpault, 1999). Le flux d'eau ne peut être quan-

tifié que par un modèle hydrique : les plus performants sont les modèles s'appuyant sur les mécanismes du transfert de l'eau de pluie dans l'écosystème. Ces modèles sont encore peu opérationnels, et un champ important de recherche doit leur être consacré. Pour l'instant des modèles à compartiments et flux sont utilisés, dans lesquels le compartiment sol est le plus souvent considéré comme une boîte noire (Granier *et al.*, 1999). Ces modèles ont été utilisés pour la quantification des flux, ainsi que pour l'estimation de l'état du réservoir eau du sol. La vérification des sorties de ces modèles par la mesure *in situ* et en continu de l'humidité du sol met en évidence les biais éventuels des modèles qui considèrent le sol comme un objet sans inertie. Le système TDR (Trase system de Soil Moisture, USA) avec 5 répétitions de sondes enterrées à 4 niveaux (15, 30, 60 et 120 cm de profondeur) pour estimer la variabilité spatiale des placettes d'observation, et mesurant en continu l'humidité du sol toutes les deux heures par le biais d'un multiplexeur, a été utilisé à cet égard.

La mesure de la composition chimique des solutions du sol est réalisée à partir de la collecte des solutions gravitaires à l'aide de plaques lysimétriques sans tension, installées à la base du sol. Ces solutions libres ont une composition très différente des solutions liées prélevées simultanément dans les mêmes sols par des bougies poreuses, ou extraites par centrifugation (Ranger *et al.*, 2001).

Les éléments perdus par drainage sont quantifiés par le flux d'eau issu d'un modèle hydrique, auquel on associe une composition chimique issue de mesure *in situ* par des plaques lysimétriques sans tension.

Dans toutes ces mesures de flux, la prise en compte des variabilités spatiale et temporelle est indispensable : le climat, le sol et les peuplements sont éminemment variables, impliquant des suivis sur des parcelles suffisamment grandes et pendant des durées suffisamment longues (en pratique au minimum 3 ans), afin que les flux mesurés soient réellement représentatifs d'une situation.

## Observations spécifiques dans la chronoséquence de Douglas de Vauxrenard (Beaujolais)

La présentation générale du site de Vauxrenard figure dans plusieurs documents (Marques, 1996 ; Ranger, 1998) (panche 1)

### - Situation générale

Les peuplements étudiés sont situés dans le massif forestier des Aiguillettes, dans les Monts du Beaujolais (Rhône). L'altitude est de 750 m, l'exposition est Sud - Sud-Est, le climat est de type collinéen, à influence atlantique avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1 000 mm, et une température moyenne annuelle de 7 °C (moyennes trentenaires).

### - Les sols

Les sols ont été décrits et échantillonnés pour les mesures physiques [épaisseur, densité, granulométrie, courbes de rétention en

eau] et chimiques [pH eau et KCl, analyses des éléments totaux par fusion alcaline au métaborate de Li, libres par la méthode CBD (Mehra et Jackson, 1960) et échangeables par méthode de Rouiller *et al.* (1980)] dans 7 fosses distribuées sur toute la surface de chaque parcelle. Pour ce qui concerne la coupe à blanc, les sols ont été prélevés en 32 points systématiquement distribués sur la parcelle, avant la coupe puis systématiquement tous les ans.

### - Les peuplements

Trois peuplements de 20, 40 et 60 ans (âge en 1992) situés à quelques centaines de mètres les uns des autres, représentent les trois termes de la chronoséquence. Ils sont issus de plantations sur d'anciennes terres agricoles. Les courbes hauteur-âge établies pour chaque peuplement par analyse de tige (analyse retrospective de la croissance en hauteur et largeur des arbres à partir de rondelles prélevées sur des billons de longueur constante) sont parfaitement comparables, validant la chronoséquence quant à ce critère. La phase de récolte et régénération est étudiée sur le peuplement de 60 ans coupé à blanc en Octobre 1998.

Leurs caractéristiques sont décrites dans le *tableau 1*.

Les peuplements sont bienvenants, sains et le diagnostic foliaire montre que la nutrition ne pose pas de problème (en référence aux travaux de Bonneau, 1995).

La biomasse a été mesurée en 1992 conformément au protocole présenté ci dessus, et nous avons considéré que les tarifs établis en 1992 étaient applicables en 1998, autorisant une estimation de l'accroissement courant au cours de la période 92-98.

Les végétaux sont séchés à 65 °C, finement pulvérisés, conservés en container étanche, puis analysés pour N (attaque Kjeldhal

et dosage par spectrométrie moléculaire sur Technicon II puis Traacs 2000) et P, K, Ca, Mg voire Mn, Na (dosage par spectrométrie ICP après attaque H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HClO<sub>4</sub> à ébullition).

### - Les mesures de flux

Les trois peuplements ont été équipés en 1992: i) pour les mesures climatiques (pluviométrie hors couvert, température de l'air et du sol sous couvert), ii) les mesures de pluviollessivats et de ruissellement de troncs (10 arbres par peuplement), iii) les mesures de flux de transferts de soluté dans les sols par des dispositifs lysimétriques sans tension installés à différentes profondeurs (litières, - 15, -30, -60 et -120 cm (sauf dans le 20 ans pour cette dernière profondeur) et iv) les retombées de litière (15 bacs de 0,5 m<sup>2</sup> par peuplement).

Les solutions prélevées systématiquement toutes les 4 semaines, sont filtrées à 0,45 µm sur filtre Gelman en ester de cellulose, et analysées pour les éléments totaux (Si, Al, Fe, Ca, K, Mg, Mn, P, S) par spectrométrie ICP (JY38+), pour l'ammonium par spectrométrie moléculaire (Technicon II, puis Traacs 2000), pour le carbone organique dissous à l'aide d'un analyseur Shimadzu TOC 5050, pour les anions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, et F<sup>-</sup>) par chromatographie ionique (Dionex DX300). Les analyses des retombées de litière sont réalisées avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour les végétaux.

### - Le calcul des bilans entrées-sorties

Les bilans courants annuels sont calculés pour chacun des stades de développement, à partir de la moyenne des mesures annuelles réalisées sur les flux pendant les 6 années d'observation.

Les bilans « saisonniers » sont calculés en individualisant la pério-

**Tableau 1** - Principales caractéristiques des peuplements de Vauxrenard.

**Table 1** - Main characteristics of the Vauxrenard stands.

	20 ans <sup>(1)</sup>	40 ans	60 ans
hauteur moyenne (m)			
en 1992 <sup>(2)</sup>	14	28	36
en 1998	22	35	40
densité (tiges/ha)			
en 1992	922	490	312
en 1998	850	275	206
circonférence moyenne (cm)			
en 1992	57	105	164
en 1998	74	136	166
accroissement moyen <sup>(3)</sup> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	0 - 20 ans 8,5	20 - 40 ans 21	40 - 60 ans 17,5
accroissement courant <sup>(3)</sup> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	20-27 ans 28	40-47 ans 16	60-67 ans 10

(1) âge du peuplement en 1992

(2) caractéristiques du peuplement avant éclaircie

(3) tronc total

**Tableau 2 -** Principales caractéristiques des sols du site de Vauxrenard : exemple du peuplement de 60 ans.  
**Table 2 -** Main soil characteristics for the 60-year-old stand.

horizon cm	Granulométrie				Eléments totaux				Elémentst libres			
	Argile %	Limon %	Sable %	Matière Org. (%)	N org. %	C/N	Ca tot. %	Mg tot. %	K tot. %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> tot. %	Al %	Fe %
A1Ap 0-10	19,8	40,5	39,7	8,15	0,37	12,8	0,09	0,50	3,17	0,16	0,62	0,93
Ap2 10-20	20,3	42,7	37,0	3,85	0,21	10,9	0,08	0,49	3,30	0,15	0,46	0,86
ApS 20-35	22,1	42,2	35,7	3,06	0,15	12,1	0,08	0,57	3,38	0,17	0,39	0,90
S1 35-50	25,1	40,0	34,9	1,15			0,06	0,62	3,48	0,15	0,33	0,90
S2 50-65	16,9	36,0	47,1	0,55			0,07	0,71	3,66	0,15	0,23	0,86
S3 65-75	18,1	33,6	48,3	0,33			0,17	0,79	3,71	0,10	0,20	0,69
SC 75-85	17,4	34,2	48,4	0,33			0,18	0,87	3,75	0,08	0,19	0,59
C1 85-100	13,7	38,3	48,0	0,28			0,28	0,89	3,68	0,07	0,19	0,62
C2 100-110	13,9	35,7	50,4	0,28			0,15	0,93	3,60	0,07	0,20	0,58

Eléments échangeables												
horizon cm	pH <sub>(H2O)</sub>	K cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Ca cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Mg cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Mn cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Fe cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Na cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Al cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	CB cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	CB/CEC %	CEC %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assim. %
A1Ap 0-10	4,1	0,20	0,18	0,15	0,07	0,02	0,05	7,52	0,57	7,0	8,19	0,02
Ap2 10-20	4,3	0,19	0,08	0,07	0,03	0,00	0,11	4,37	0,44	9,1	4,83	0,01
ApS 20-35	4,4	0,15	0,07	0,05	0,03	0,00	0,02	4,46	0,30	6,4	4,79	0,01
S1 35-50	4,5	0,13	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00	4,08	0,22	5,2	4,32	0,01
S2 50-65	4,4	0,13	0,05	0,03	0,01	0,00	0,03	4,15	0,25	5,6	4,41	0,01
S3 65-75	4,4	0,14	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	4,49	0,22	4,7	4,72	0,01
SC 75-85	4,4	0,15	0,03	0,05	0,02	0,00	0,06	4,94	0,28	5,4	5,24	0,01
C1 85-100	4,5	0,17	0,07	0,05	0,01	0,00	0,05	4,95	0,33	6,2	5,29	0,01
C2 100-110	4,5	0,17	0,05	0,04	0,01	0,00	0,11	4,55	0,37	7,6	4,94	0,01

CB: Cations Basiques ; CEC= Capacité d'Echange Cationique (méthode Rouiller et al., 1980)

Eléments libres : méthode Mehra et Jackson, 1962

P assimilable : méthode Duchaufour-Bonneau, 1959

de de végétation (du 16 avril au 30 septembre) et la période de dormance (du 1<sup>er</sup> octobre au 15 avril).

Les bilans moyens annuels ont été simulés pour des longueurs de révolution croissante, de la façon suivante :

pour les apports atmosphériques, l'altération et les pertes par drainage, les flux courants mesurés sur 6 ans sur les peuplements de 20, 40 et 60 ans en 1992, ont été extrapolés respectivement pour les périodes [0-30 ans], [31-50 ans] et [51-70 ans].

pour l'accroissement de biomasse (peuplement sur pied et éclaircies prises en compte à partir des cahiers d'aménagement de l'ONF),

révolution simulée à 30 ans : flux moyen entre [0 et 20 ans] à partir des mesures de 1992 + flux courant (différence entre mesure 92 et mesure 98 rapportée à l'année).

révolution simulée à 50 ans ; flux moyens entre [0 et 20 ans] et [21 et 40 ans] à partir des mesures de 1992 + flux courant entre [41 et 50 ans] (différence entre mesure 92 et mesure 98 rapportée à l'année).

révolution simulée à 70 ans ; flux moyens entre [0 et 20 ans], [21 et 40 ans] et [41 et 60 ans] à partir des mesures de 1992 + flux courant entre [61 et 70 ans] (différence entre mesure 92 et mesure 98 rapportée à l'année).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Les sols

Les sols sont développés à partir de l'altérite d'un tuf volcanique induré d'âge carbonifère. Cette roche mère à structure porphyrique (phénocristaux dans une pâte dévitrifiée), est relativement riche en Ca (1,4 %), en Mg (1,2 %) et en K (3,4 %). La compacité de la roche conduit à une altération dominée par la dissolution chimique dans une auréole d'altération, qui se traduit par une perte importante d'éléments majeurs tels que Ca. Le sol n'est donc que le résidu de cette roche, très appauvri en minéraux altérables (Ezzaïm, 1997, Ezzaïm *et al.*, 1999).

Le sol est un Alocrisol typique dont les principales caractéristiques analytiques sont résumées dans le (tableau 2) (Marques, 1996). L'humus est de type mull à mull-modér peu développé avec un horizon OH toujours inférieur à 1 cm. La terre fine a une texture limoneuse à limono-sableuse. La structure est fine et moyennement exprimée. Le taux de particules grossières (>2 mm) peut atteindre localement 50 % en profondeur. La porosité est bonne et la réserve en eau du sol est de l'ordre de 70 à 80 mm sur 60 cm d'épaisseur et d'une centaine de mm sur 80 cm. L'enracinement domine dans les horizons de surface (60 % des racines sont dans les 30 premiers centimètres et 80 à 90 % sont dans les 60 premiers cm). Ce sol est acide (pH eau compris entre 4,2 et 4,5 en fonction des horizons), et désaturé (le pourcentage de Ca+Mg+K sur la garniture ionique, est inférieur à 10 en surface, et un peu plus élevé en pro-

fondeur). La variabilité intra-peuplement est limitée et non significative. La variabilité inter-peuplements se traduit par des différences significatives pour certains éléments comme Ca et Mg. Elle est le fait du jeune peuplement. Son origine est complexe, d'une part un léger coluvionnement superficiel de roche plus riche, voire, d'autre part, une occupation passée différente du sol. C'est une donnée qui devra être prise en compte par la suite. Il est en pratique très difficile de trouver des situations parfaites.

Les réserves d'éléments assimilables ont été quantifiées pour différentes épaisseurs de sol à partir des analyses décrites précédemment, et de la mesure de la densité apparente du sol (tableau 3). Les résultats montrent que les réserves biodisponibles sont limitées. Le stock d'éléments totaux est certes beaucoup plus élevé, mais sa mise à disposition est lente comme le montre le flux d'éléments qu'il est susceptible de fournir annuellement (cf. III-3 flux d'éléments issu de l'altération des minéraux du sol). Ce sol est faiblement pourvu en Ca et Mg, mieux pourvu en K et P, d'après les normes proposées par Bonneau (1995).

### Les peuplements

Les mesures de biomasse compartimentées réalisées en 1992, les nouvelles estimations réalisées en 1998, ainsi que le suivi des retombées de litière mesurées régulièrement depuis cette date, permettent d'accéder à de nombreuses données concernant le stockage moyen et courant d'éléments dans les structures pérennes et annuelles des peuplements (Ranger *et al.*, 1995, 1996, 1997). Ce sont des données de base pour calculer les besoins totaux (masse d'éléments incorporée dans la biomasse produite chaque année), le prélèvement au sol, l'immobilisation définitive dans les structures pérennes, les transferts internes des parties cessant d'être fonctionnelles vers les organes en croissance, et leur dynamique au cours du développement du peuplement.

Les principales données concernant la biomasse et la minéralomasse des peuplements figurant au tableau 4, permettent de quantifier par interpolation simple, les exportations lors des récoltes et les éléments contenus dans les rémanents d'exploitation, en fonction du scénario de récolte choisi (biomasse totale vs biomasse partielle, troncs non écorcés en général). D'une manière générale, récolter les petits compartiments de biomasse a un coût très élevé pour la fertilité chimique du sol, et doit être évité dans les sols les plus pauvres.

Les données synthétiques, relatives aux flux cumulés d'éléments nutritifs au cours du développement du peuplement, mettent parfaitement en exergue le comportement du cycle biologique, et son rôle dans le fonctionnement du sol (tableau 5) (pour les calculs, voir Ranger *et al.*, 1997):

- Les besoins totaux pour l'élaboration de la biomasse du peuplement sont élevés.

- Ces besoins sont satisfaits par les prélèvements au sol et les transferts internes à la plante ; importants pour N, P et K (se développant en fait avec la maturité du peuplement), négligeables pour

**Tableau 3** - Réserves d'éléments biodisponibles et d'éléments totaux dans le sol du peuplement de 60 ans de Vauxrenard (données pour 60 cm de sol exprimées en kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ; seule la terre fine a été prise en compte).

**Table 3** - Bio-available and total soil nutrient reserves.

	N	P	K	Ca	Mg
Horizons holorganiques éléments totaux (Ol, Of, Oh)	600	40	420	200	140
Horizons minéraux éléments biodisponibles		370	600	600	130
éléments totaux	6000-7500	2300	360000	10200	65000

**Tableau 4** - Biomasse et minéralomasse des peuplements de Douglas de Vauxrenard.

**Table 4** - Biomass and nutrient content of the Douglas-fir stands

	biomasse			minéralomasse N			minéralomasse P			minéralomasse K			minéralomasse Ca		
	t.ha <sup>-1</sup>			kg.ha <sup>-1</sup>			kg.ha <sup>-1</sup>			kg.ha <sup>-1</sup>			kg.ha <sup>-1</sup>		
ans	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60
feuilles	17	14	16	287	210	225	17	13	16	83	58,2	79	162	81	129
branches	17	26	50	63	94	121	7	9	13	36	58,3	44	65	70	162
houppier	34	40	66	350	304	346	24	22	29	119	116,5	123	227	151	291
écorce de tronc	9	30	45	57	116	154	6	14	20	46	84	99	18	59	135
bois de tronc	57	203	307	37	125	195	1	4	9	74	152	66	17	60	94
tronc total	66	233	352	94	241	349	7	18	29	120	236	165	35	119	229
racines	nd	58	nd	t.ha <sup>-1</sup>	95	nd	nd	6	nd	nd	37	nd	nd		nd
total	100	331	418	444	640	695	31	46	58	239	389,5	288	262	270	520

**Tableau 5** - Besoins nutritifs des peuplements de Vauxrenard et origine des éléments.

**Table 5** - Nutrient demand by the stands and origin of nutrients.

Peuplement forestier	N	P	K	Ca	Mg
Incorporation totale <sup>(1)</sup>	5250	600	3450	2040	460
Prélèvement <sup>(2)</sup>	3010	250	1520	2180	290
Immobilisation <sup>(3)</sup>	460	40	190	390	40
Transferts internes totaux <sup>(4)</sup>	1560	260	190	-730	50
Litière <sup>(5)</sup>	2710	220	340	1780	200
Récréation <sup>(6)</sup>	0	0	1000	170	60
Absorption foliaire directe <sup>(7)</sup>	500				

(1) besoins totaux du peuplement pour élaborer sa biomasse annuelle

(2) part des éléments prélevée à partir des réserves biodisponibles du sol

(3) part des éléments définitivement fixée dans la biomasse ligneuse pérenne

(4) redistribution d'éléments interne à la plante des tissus âgés vers les tissus jeunes (valeurs positives) ou l'inverse (valeurs négatives)

(5) restitution d'éléments par les chutes de litière

(6) éléments lessivés à partir de la couronne des arbres par la pluie

(7) absorption directe par le houppier, d'une partie des apports atmosphériques

Mg, et négatifs pour Ca (à l'inverse cet élément s'accumule dans les tissus âgés). Couramment pour N, une part des besoins provient de fixation directe des dépôts atmosphériques au niveau des houppiers.

- Plus de 80 % des prélèvements sont restitués au sol par les chutes de litières aériennes (en fait beaucoup plus si l'on prenait en compte la mortalité racinaire).

- En définitive l'immobilisation d'éléments dans les parties pérennes est faible par rapport aux besoins totaux. Cette immobilisation a souvent été confondue avec les besoins réels, conduisant à une notion de frugalité des peuplements quelque peu erronée et surfaite, car la disponibilité des éléments doit pouvoir couvrir le prélèvement annuel total à partir des réserves du sol : on considère qu'en fonction de la mobilité des éléments, un pool équivalent à 10 à 20 fois la demande (éléments mobiles tels que Ca, Mg voire K) ou 50 fois (éléments peu mobiles tels que P) doit être disponible pour l'alimentation du peuplement (Ranger et Bonneau, 1984 ; Bonneau et Ranger, 1999).

- La fertilité minérale du sol dépend fortement des restitutions par les litières. 210 t de matières organiques sont restituées au sol pendant 60 ans, soit 5 fois ce qui existe à la surface du sol en fin de révolution : il s'agit d'un impact majeur, compte tenu des rôles multiples de cette matière organique (restitution d'éléments, fixation d'éléments échangeables, support de l'activité biologique, ciment des agrégats déterminant l'aération du sol).

- La fertilité minérale est un concept dynamique : le prélèvement cumulé au sol représente respectivement 60 %, 236 %, 309 % et 190 % des réserves assimilables du sol pour P, K, Ca et Mg. Il faut donc que cette réserve soit en constant renouvellement (minéralisation, altération, apports atmosphériques) pour que le prélèvement soit satisfait. De plus, ces éléments prélevés sur toute la profondeur du sol (mais toutefois majoritairement dans la tranche 0 - 40 cm où se situe le maximum de racines) sont restitués (pour ce qui concerne la biomasse épigée) à la surface du sol. Pour Ca par exemple, les restitutions pendant 60 ans représentent de l'ordre de 1 800 kg de Ca, soit l'équivalent de la quantité apportée par 4 500 kg de carbonate de calcium. C'est donc en sol acide la voie essentielle de recharge en Ca des horizons de surface.

## Les flux entrant et sortant de l'écosystème

Les résultats concernant les mesures réalisées pendant 6 années sont présentés dans la *figure 2*.

Les **apports atmosphériques** totaux (*figure 2a*), incluant la fixation directe au niveau du houppier (concernant principalement N), sont élevés (environ 20, 8 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour N, 8 kg pour Ca et 1 kg pour Mg), sans variation nette en fonction de l'âge des peuplements. Les dépôts humides se situent dans la gamme élevée du réseau Renécofor, et sont conformes à ce qui a été mesuré en vallée du Rhône (Ulrich *et al.*, 1998). Les apports sont relativement équilibrés sur l'année, parallèlement à la pluviométrie.

Leur origine est double, marine (pluies d'hiver) et continentale. Une grande partie de la pollution est certainement liée à l'activité urbaine

et industrielle de la vallée du Rhône, mais les apports marins (tracés par le sodium et le chlore), sahariens (poussières rouges apportées régulièrement, contenant par exemple de l'ordre de 4 % de Ca), ou locaux (traitement des vignobles tracés par le soufre) participent à ce « cocktail » complexe.

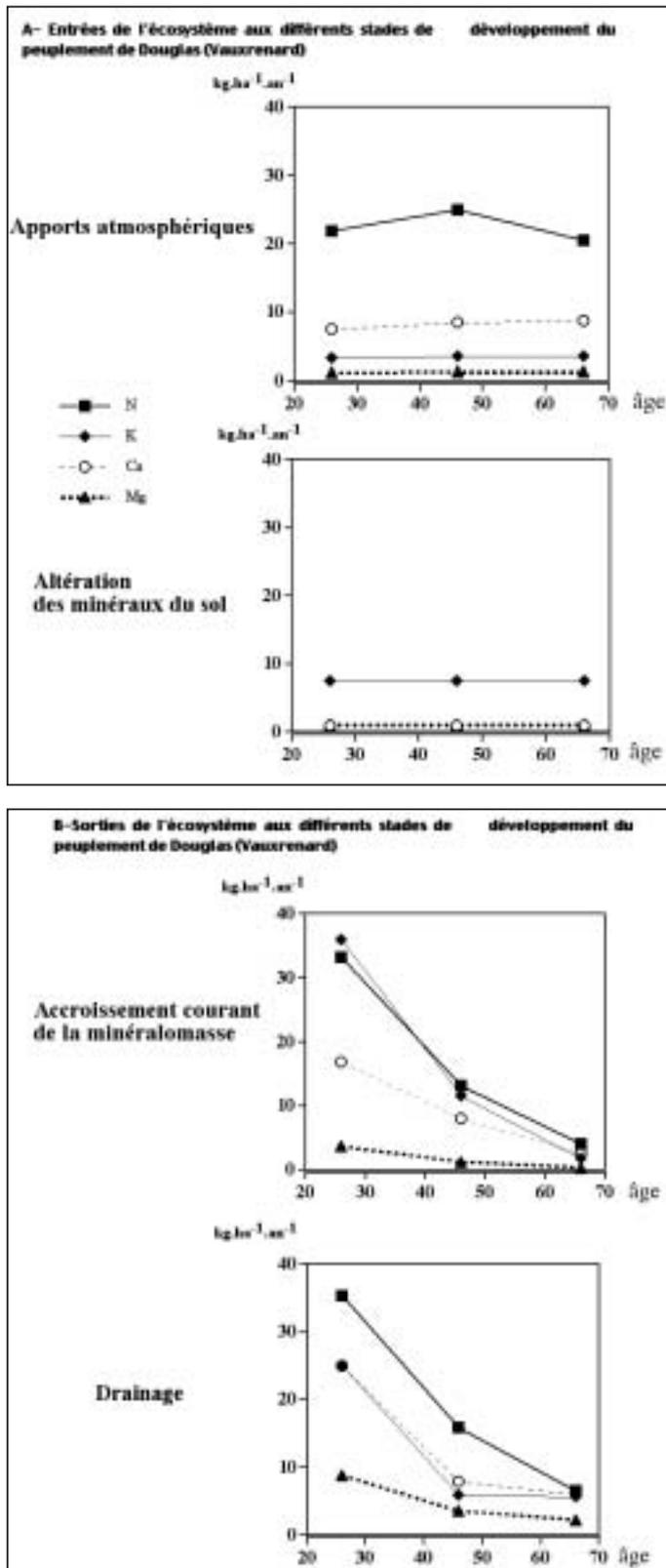
Les bilans saisonniers illustreront le rôle complexe des apports atmosphériques en fonction de l'élément et de l'âge du peuplement.

Le flux d'éléments issu de **l'altération** des minéraux du sol tel qu'évalué par le modèle Profile est très faible pour ce qui concerne des éléments majeurs comme Ca (0,9 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> sur 60 cm de sol) et Mg (1 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) (Ezzaïm, 1997, Turpault *et al.*, 1999). Il est plus important pour K (7,5 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) (*figure 2a*). Les valeurs doublent approximativement pour 1,2 m de sol (limite maximum de l'enracinement). Ce résultat n'est plus surprenant après les travaux d'Ezzaïm (1997), qui a montré que l'altération de cette roche dure se faisait par dissolution chimique, entraînant des pertes importantes d'éléments majeurs dès les premiers stades de son altération. Ces processus sont particulièrement déterminants pour Ca, élément pour lequel aucun minéral secondaire n'existe en milieu acide. Quand il est libéré du minéral primaire, il n'y a pas d'autre alternative que la fixation temporaire sur le complexe d'échange avec les risques de perte que cela comporte compte tenu de sa faible compétitivité vis-à-vis de l'aluminium, ou le prélèvement biologique, mettant en exergue le rôle déterminant du recyclage pour son maintien dans l'écosystème (*tableau 5*). L'état actuel des connaissances ne permet pas d'identifier l'impact du stade de développement du peuplement sur le flux d'altération, ni celui de sites particuliers tels la rhirosphère (ces travaux sont en cours).

Les **stocks et accroissements** courant et moyen de **biomasse** et de minéralomasse permettent de quantifier les **exportations** liées à l'exploitation forestière (*figure 2b*). Deux paramètres interviennent dans le stockage d'éléments dans la biomasse végétale : l'efficacité des éléments pour produire la biomasse (quantité de biomasse produite par une unité d'élément) et la quantité de matière sèche produite. L'efficacité apparente des éléments pour produire la biomasse augmente nettement avec l'âge du peuplement, et la production de biomasse suit les lois décrites par les tarifs de cubage (Decourt, 1967) ou les modèles de croissance (Ottorini, 1991) ; les résultats complets figurent dans Ranger *et al.* (1995 et 1996).

L'efficacité du Douglas est forte (au moins aussi bonne que celle de l'épicéa), mais sa forte production de biomasse conduit à des prélèvements et à des immobilisations importants. L'âge de récolte du peuplement, le mode d'exploitation (récolte totale ou partielle), et le traitement des rémanents (broyage, brûlage, andainage) vont déterminer les exportations réelles du site. D'une manière générale les rotations longues (supérieures à 40 ans) et les récoltes partielles (trunks à découpe commerciale ; partie du tronc effectivement commercialisable) sont les plus économes pour la fertilité des sols. Il ne faut pas non plus négliger le fait que le traitement des rémanents peut apporter la même contrainte à la fertilité chimique des sols que la récolte totale de biomasse : c'est le cas de l'incinération pour les

Figure 2 - Principaux flux entrants et sortants de l'écosystème  
 Figure 2 - Main input and output fluxes for the ecosystem



éléments volatils comme l'azote, ou de l'andainage qui élimine de la zone réservée à la plantation, les restitutions d'éléments issues de leur décomposition.

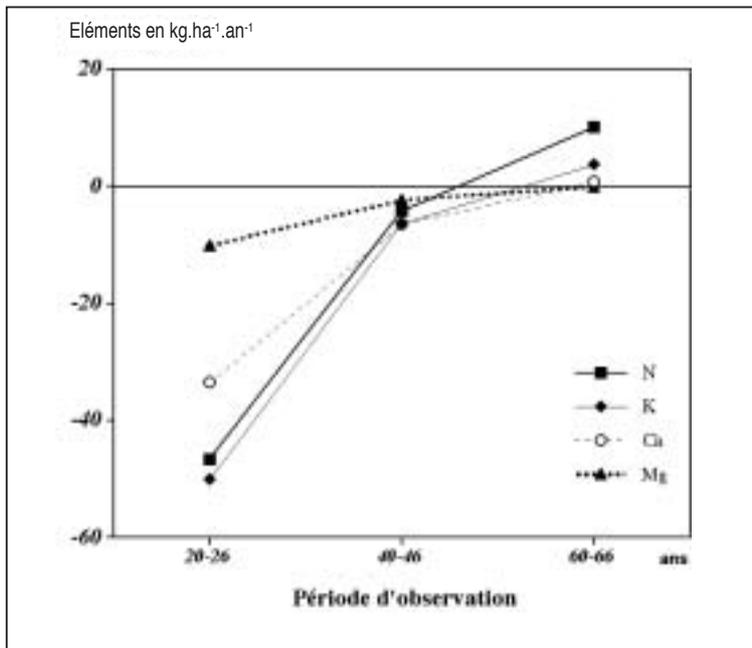
Les pertes d'éléments associées au **drainage** sont très élevées dans le jeune peuplement, mais diminuent avec l'âge (figure 2b); cette tendance est très stable pendant les six années de mesure. Les pertes sont très nettement les plus élevées pendant la saison de dormance des peuplements, quand le flux de drainage est le plus fort (plus de 70 % pour tous les éléments) (données non présentées). Ce comportement est assez inhabituel car les jeunes peuplements consomment beaucoup plus d'éléments que les vieux (la consommation étant fortement liée à la croissance). Dans ce site, deux phénomènes conjuguent leurs effets pour aboutir à ce résultat : d'une part l'antécédent agricole des parcelles qui se traduit par une nitrification forte et, d'autre part, un changement d'équilibre de la matière organique du sol liée à l'introduction du Douglas. Il ne faut pas non plus négliger le fait que le sol du jeune peuplement étant un peu plus riche que celui des autres peuplements, les pertes liées à la nitrification résiduelle peuvent être un peu plus fortes. Sans que l'on puisse le prouver définitivement, il est connu que le changement d'occupation des sols se traduit par un rééquilibrage rapide du compartiment organique ; on ne peut exclure totalement un effet spécifique du Douglas à partir de ce dispositif, mais une partie de l'effet ne lui est pas attribuable. Le fort taux de nitrification dans les anciennes terres agricoles a été montré dans les Vosges (Koerner *et al.*, 1999), résultant probablement d'un ensemencement par les amendements organiques (fumiers) d'une microflore nitrifiante dont l'activité persisterait longtemps après l'abandon des terres par l'agriculture. La forte diminution des pertes par drainage avec l'âge des peuplements indiquerait que le rééquilibrage de la matière organique est relativement rapide. C'est un critère important pour l'extrapolation des résultats à la génération suivante.

Sans que les résultats ne soient encore définitifs, l'observation pendant deux ans des solutions et de l'état d'humidité du sol après la coupe à blanc, indiquent que les pertes occasionnées par cette coupe seront très limitées (François, 2000). Cette observation quelque peu contraire à ce qui est décrit dans la littérature, doit s'expliquer en partie par un développement de la végétation spontanée n'ayant jamais laissé le sol à nu. L'impact de la phase de récolte et de régénération devrait donc être limité dans l'évolution de la fertilité chimique du sol.

## Le calcul des bilans de fertilité minérale

Ils ont été établis dans chacun des peuplements de la chronoséquence (bilans courants saisonniers ou annuels), puis extrapolés à la révolution forestière complète (bilan moyen annuel). Deux épaisseurs de sol ont été prises en compte, 60 et 120 cm de sol. La variabilité observée au cours des 6 années de mesure, essentiellement liée à la pluviométrie et

**Figure 3** - Bilans minéraux entrées-sorties courants pour les trois peuplements  
**Figure 3** - Mean current annual input-output nutrient budgets for the three stands.



au drainage, ne permet pas de dégager des tendances évolutives sur cette durée. Quand bien même cela serait le cas, il faudrait être très prudent quant à l'interprétation qui en serait faite. En effet, les travaux réalisés sur des durées beaucoup plus longues (25 ou 30 ans) montrent que des tendances observables sur des durées de l'ordre de 5 ans, peuvent être à l'opposé de la tendance à long terme (Driscoll *et al.*, 1989). La prise en compte de deux épaisseurs de sol ne modifie pas notablement les conclusions.

Les **bilans courants annuels** sont directement calculés à partir des flux précédemment décrits (figure 3). Ils apparaissent comme très déficitaires dans le jeune peuplement ; ce caractère déficitaire diminue dans le peuplement d'âge moyen et disparaît dans le peuplement le plus âgé où le bilan de plusieurs éléments devient excédentaire. La variation des éléments prélevés pour la croissance, et les pertes par drainage règlent les bilans, puisque l'altération est considérée comme constante et que les apports atmosphériques varient peu entre les peuplements.

Les **bilans courants saisonniers** montrent que les déficits sont les plus élevés pour N, P et K pendant la saison de végétation, et pour Ca et Mg pendant la saison de dormance (figure 4). Ce bilan saisonnier permet d'approfondir l'origine de l'acidification du sol dans cette situation, ainsi que le rôle des apports atmosphériques :

- dans le jeune peuplement, la croissance est responsable de l'acidification en saison de végétation. En période de dormance, c'est le drainage qui en est la cause (le prélèvement biologique étant nul ou très faible). La production d'azote minéral, nitrique en particulier, pendant la saison de dormance, montré par Jussy (1998) et Jussy *et al.* (2000), conduit à l'accumulation dans le sol d'acide nitrique qui est neutralisé rapidement dans le sol. Les apports atmosphériques d'azote ne font qu'augmenter le phénomène en hiver. Les apports atmosphériques de Ca, Mg ou K ont tou-

jours un rôle positif, limitant la désaturation du sol.

- dans le peuplement le plus âgé, le rôle des apports atmosphériques d'azote et de cations nutritifs, jugé par les bilans, tend à devenir strictement positif car ces éléments sont absorbés pendant la phase de végétation et accumulés pour une grande part pendant la phase de dormance (drainage inférieur aux apports).

- dans le peuplement d'âge moyen, la situation est intermédiaire.

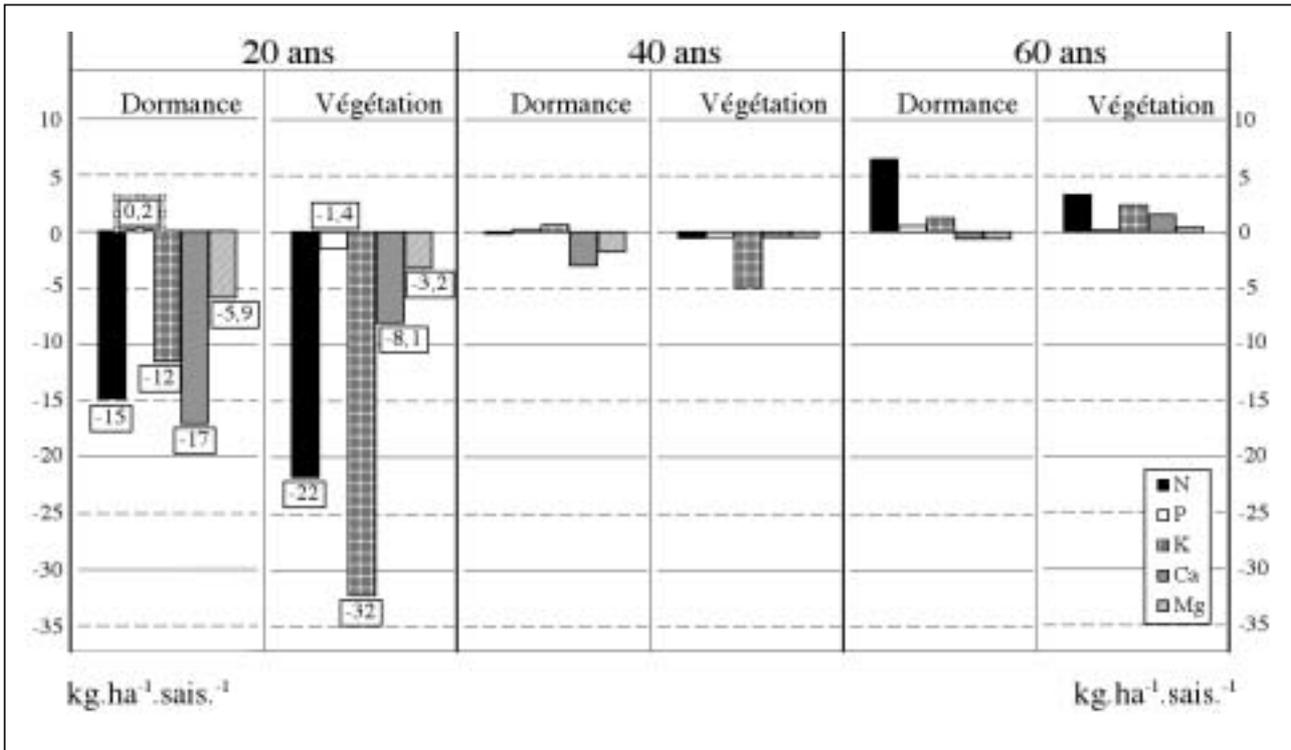
Les **bilans moyens annuels**, calculés pour des longueurs de révolution théoriques de 30, 50 et 70 ans, sont toujours déficitaires quel que soit le scénario de récolte (troncs seuls ou récolte totale) (figure 5). Le caractère déficitaire du bilan décroît avec la longueur de la révolution. Il est cependant extrêmement clair que la récolte totale conduit à des déficits systématiquement plus élevés que la récolte classique. Dans les conditions de cette étude, l'équilibre du bilan ne serait atteint, pour un scénario de récolte de type 'tronc à découpe commerciale' que pour des révolutions très longues de l'ordre de 100 à 120 ans. L'écorçage en forêt, se traduisant par une diminution des exportations d'éléments de l'ordre de 50 % par rapport au bois non écorcé (plus pour P), conduirait à un bilan équilibré pour une révolution d'une centaine d'années. Compte tenu de la faisabilité socio-économique de ce scénario, il est cependant difficile d'en tenir compte.

## CONCLUSIONS

1- Les bilans de fertilité minérale représentent une méthode de référence pour l'étude du fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers. Ils permettent d'obtenir des données d'écologie quantitative, intéressant à la fois l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers et la pratique sylvicole. Ces données sont directement intégrables à des modèles de gestion. Les bilans permettent d'identifier les problèmes avant que les conséquences graves ne se manifestent.

2- C'est une méthode lourde et coûteuse qui ne saurait être généralisée. Elle présente encore des lacunes qui seront comblées par les travaux futurs. Elle doit donc être réservée à quelques écosystèmes modèles. L'élargissement des données locales se fera par l'intermédiaire de modèles plus ou moins sophistiqués, validés sur des réseaux d'observation, comme le réseau Renécofor.

3- Quand on considère la seule fonction de production, le parallélisme est parfait entre acidification

**Figure 4 -** Bilans minéraux entrées-sorties saisonniers, pour les trois peuplements**Figure 4 -** Seasonal input-output nutrient budgets for the three stands.**Tableau 6 -** Biomasse et minéralomasse des peuplements de Douglas de Vauxrenard.**Table 6 -** Relative effect of acidification processes during stand development.

		20 - 30 ans	40 - 50 ans	60 - 70 ans
Apports atmosphériques	Proton	+	+	+
	Azote	+++	++	+
	Cations	< 0	< 0	< 0
Cycle de l'azote (nitrification résiduelle)	Saison de végétation	+	+	+
	Dormance	+++	++	0
Prélèvement par la végétation		+++	++	+

et perte de fertilité minérale du sol, l'un représentant le processus et l'autre sa conséquence agronomique. Le *tableau 6* résume les principaux facteurs d'acidification du sol dans le contexte particulier de la Douglasaie beaujolaise.

4- Les bilans de fertilité minérale calculés pour la plantation de Douglas de Vauxrenard conduisent à des résultats très clairs :

- La fertilité chimique totale de la station (réserve organo-minérale totale) a été fortement affectée par cette première génération de Douglas, comme le montrent les pertes enregistrées pour divers éléments majeurs. Ces pertes conduisent clairement au concept de sol capital non renouvelable.

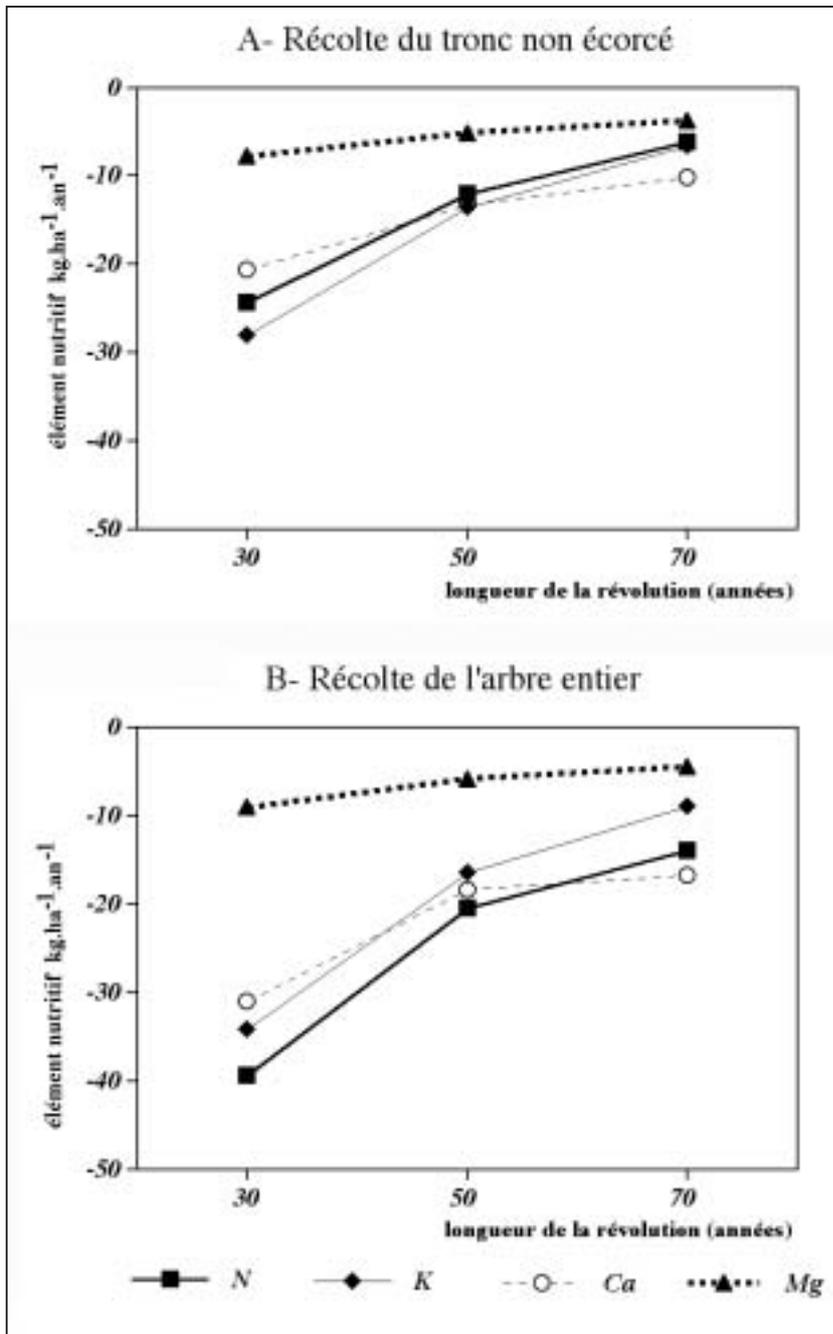
- La reconstitution de la fertilité actuelle (réserve biodisponible du sol) n'est possible qu'avec des récoltes partielles (tronc) et des révolutions longues. Le strict retour à l'équilibre de la fertilité minérale actuelle, correspondant à la notion de révolution écologique définie par Kimmins (1974), n'est possible qu'avec des rotations longues, comprises entre 100 et 120 ans, pour des scénarios sylvicoles actuellement réalistes.

- La gestion des rémanents est d'une importance capitale dans de tels écosystèmes, car ils représentent un potentiel important de restitution d'éléments nutritifs.

- La coupe à blanc ne semble pas se traduire par des pertes très

**Figure 5** - Simulation des effets de l'intensité de la récolte et de la longueur de la révolution forestière sur le bilan moyen annuel d'éléments nutritifs.

**Figure 5** - Simulation of harvesting intensity and rotation length on the mean annual budget of nutrients.



significatives d'éléments ; toutefois, l'association avec un andainage intempestif doit être évitée.

- Le changement d'utilisation des sols (passage agriculture-forêt) est certainement pour une bonne partie à l'origine des pertes par drainage enregistrées. Le Douglas n'est pas spécifiquement en cause. Il faut cependant être conscient qu'une partie de la fertilité minérale du sol résulte d'un reliquat d'amendement agricole, et, que par conséquent, la croissance des peuplements issus de reboisement de terres agricoles ne reflète pas la fertilité minérale naturelle du sol. Cela intéresse plusieurs millions d'hectares de plantations réalisées sur les terrains issus de déprises agricoles.

- La fertilité minérale du sol est a priori encore suffisante pour soutenir une nouvelle génération de Douglas, d'autant que les pertes par drainage correspondant à un rééquilibrage du sol devraient fortement diminuer au cours de cette nouvelle génération. Les connaissances actuelles ne permettent pas d'identifier le niveau de fertilité minimum qui risque de contraindre la production du Douglas, conformément aux lois agronomiques classiques.

- Il est cependant inévitable de prévoir des restitutions d'exportations dans ce type de sol acide et désaturé, de façon à ne pas compromettre la qualité des sols en tant que valeur intrinsèque, et prévoir le maintien des autres fonctions du sol, telles l'épuration des eaux ou la biodiversité. Il n'y a pas d'autres alternatives que de respecter les contraintes liées au milieu (équilibrer la demande d'éléments à l'offre), ou de restituer le surplus de demande.

- Il faudrait rapidement tester l'effet d'une introduction de feuillus en mélange sur le fonctionnement du sol et du peuplement végétal.

- Les contraintes écologiques de la gestion semblent incompatibles avec les contraintes de la filière socio-économique (production de gros bois inadaptés au marché local) : ce découplage conduit actuellement à une gestion qui ne répond pas totalement aux critères de gestion durable.

Les restitutions minérales somme toute modestes devraient être économiquement supportables.

## REMERCIEMENTS

Cette synthèse est le fruit d'un travail collectif de recherche sur le site atelier de Vauxrenard (Beaujolais). Ont participé à ces travaux : Sébastien Allié (Objecteur de conscience), François-Xavier Bernard (DESS), Séverine Bienaimé (AI), Nathalie Boisset (DRD), Ahamed Charaf (CES), Pascal Bonnaud (AI), Micheline Colin-Belgrand (CR), Ahlame Ezzaim (thésarde), Nathalie Flammang (DESS), Matthieu François (DEA), Louissette Gelhaye (TR), Odile Gœdert (DEA), Gérald Goeltl (CES), André Granier (DR), Jean-Hugues Jussy (thésard), Renato Marques (thésard), Médéric Monestier (DESS), Benoît Pollier (TR), Joël Viry (ESGN), Sylvain Villette (ENESAD).

Le financement a été obtenu auprès de l'UE, la DÉR, le GIP Ecofor, l'INRA et le MATE.

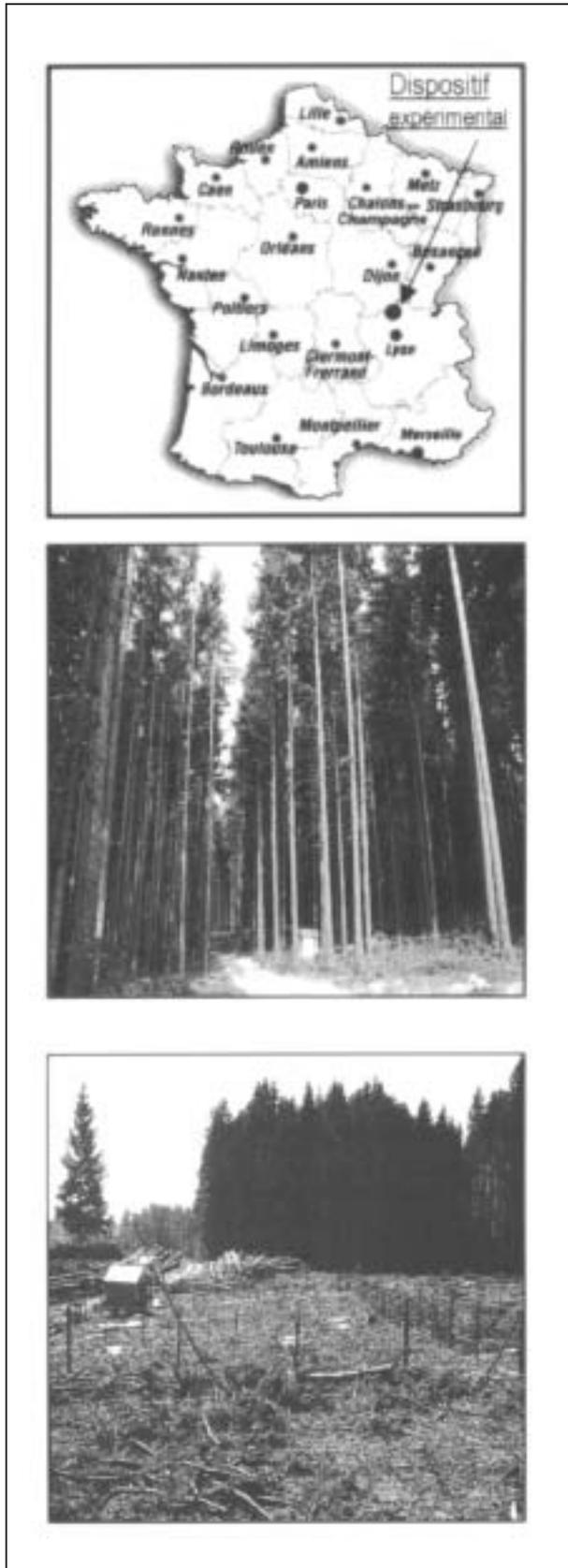
Nous remercions vivement l'Office National des Forêts qui nous a toujours grandement facilité la tâche, aux différents stades de ce travail (Claude Gâteau, Service Départemental de Bourg-en-Bresse, Gérard Poly, Service Technique de Villefranche, Bernard Jobard, Vauxrenard).

## BIBLIOGRAPHIE

Les travaux concernant le site ont été privilégiés.

- Bonneau M., 1995 - Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Edition ENGREF Nancy. 367 p.
- Bonneau M. et Ranger J., 1999 - Évolution de la fertilité chimique des sols forestiers. Recommandations pour une gestion durable. La Forêt privée, 247 : 51-64.
- Dambrine E., Sverdrup H. et Warfvinge P., 1995 - Atmospheric deposition, forest management and soil nutrient availability : a modelling exercise. ch. 3.4. : 11 p. In: Landmann, G. et Bonneau, M. Eds. - Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Berlin : Springer : 259-269.
- Dambrine E., Bonneau M., Ranger J., Mohamed A.D., Nys C. et Gras F., 1995 - Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). ch. 3.3 : 26 p. In: Landmann, G. (Ed.) et Bonneau, M. Ed. - Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Berlin : Springer : 233-258.
- Decourt N. - 1967 - Le Douglas dans le nord-est du Massif Central. Ann. Sci. For. 24 (1)45-84.
- Didon-Lescot J.F., 1996 - Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement, sur l'eau et sur les réserves minérales du sol. Thèse Univ. Orléans., 161p + annexes
- Dhôte J.F. Et Herve J.C. 2000 - Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. Ann. For. Sci.57 : 651-680.
- Driscoll C.T., Likens G.E., Hedin L.O., Eaton J.S. Et Bormann F.H. 1989 - Changes in the chemistry of surface waters : 25 year results at the Hubbard Brook forest, N.H. Envir. Sci. et Techn., Vol 23 : 137-142.
- Duchaufour Ph. et Bonneau M., 1959 - Une nouvelle méthode de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers. Bull. AFES, 4 : 193-198
- European Environment Agency 2000 - Down to the earth : soil degradation and sustainable development in Europe. A challenge for the 21st century. Environmental issues, N° 16. Office for publications of the EC, Luxembourg. 32 p.
- Ezzaim A., 1997 - Intérêt de la mesure du flux d'éléments issu de l'altération des minéraux des sols dans le calcul des bilans minéraux d'un écosystème forestier. Le cas des plantations de Douglas dans le Beaujolais (France). Thèse Université Henri Poincaré-Nancy I. : 198 p. + annexes.
- Ezzaim A., Turpault M.P. et Ranger J., 1999 - Quantification of weathering processes in an acid brown soil developed from tuff (Beaujolais, France). Part II : Soil formation. Geoderma, 87 : 155-177.
- François M., 2000 - Étude de l'impact de la coupe rase d'une plantation de Douglas sur la fertilité chimique du sol. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol de l'Université Henri Poincaré-Nancy I : 19 p.
- Granier A., Breda N., Biron P. et Villette S., 1999 - A lumped water balance model to evaluate the duration and intensity of drought constraints of forest soils. Ecol. Model., 116 : 269-283.
- Hornung M., Roda F., Langan S.J. (Eds), 1990 - A review of small catchment studies in western Europe producing Hydrochemical budgets. Air pollution report 28. CEE, DG Science, Research and Development – Environment Research Programme. ISBN 2-87263-040-6 : 186 p.
- Jabiol B., Ranger J. et Richter C., 2000 - Sol sensible ou résistant ? Éléments simples de diagnostic de la sensibilité à la dégradation chimique ou physique. La forêt privée, 253 : 30-46.
- Jussy J.H., 1998 - Minéralisation de l'azote, nitrification et prélèvements radicaux dans différents écosystèmes forestiers sur sols acides. Effets de l'essence, du stade de développement du peuplement et de l'usage ancien des sols des Vosges. Université Henri Poincaré-Nancy I : 150 p.
- Jussy J.H., Colin-Belgrand M. et Ranger J., 2000 - Production and root uptake of mineral nitrogen in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Beaujolais Mounts. For. Ecol. Manage., 128, 3 : 197-209.
- Kimmins J.P., 1974 - Sustained yield, timber mining, and the concept of ecological rotation ; a British Columbian view. For. Chron., Feb : 27-31.
- Koener W., Dambrine E., Dupouey J.-L. et Benoit M., 1999 - 15N of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. Oecologia, 121, 3 : 421-425.
- Marques R., 1996 - Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) dans les Monts du Beaujolais (France). Thèse E.N.G.R.E.F. Nancy : 240 p. + annexes.
- Marques R., Ranger J., Villette S. et Granier A., 1997 - Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaujolais Mounts (France). 2 : Quantitative approach. For. Ecol. Manage., 92 : 167-197.
- Mehra O.P. et Jackson M.L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Miner. 7 : 316-317.
- Mohamed Ahamed D., 1992 - Rôle du facteur édaphique dans le fonctionnement biogéochimique de deux pessières vosgiennes : effet d'un amendement calcimagnésien. Thèse Université : Nancy I : 136 p
- Nys C., 1987 - Fonctionnement du sol et d'un écosystème forestier : étude des modifications dues à la substitution d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst.) à une forêt feuillue mélangée des Ardennes. Thèse d'Etat Nancy I. : 207 p.
- Ottorini J.-M., 1991 - Growth and development of individual Douglas-fir stands for applications to simulation in silviculture. Ann. Sci. For., 48 : 651-666.
- Ponette Q. et Ranger J. 2000 - Biomasses et minéralomasses aériennes de cinq peuplements de Douglas du réseau Renécofor : quantification et implications sylvicoles. Rev. for. fr., LII, 2 : 115-134.
- Ranger J., 1996 - Effet du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco) sur l'environnement : maintien de la qualité des sols et des eaux superficielles. Etude de la dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation du

- Beaujolais (massif des Aiguillettes-Rhône) par le biais d'une chronoséquence de trois peuplements. Doc interne INRA Centre de Nancy - Cycles biogéochimiques. Septembre 1996 : 64 p
- Ranger J., 1998 - Effet du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco) sur l'environnement : maintien de la qualité des sols et des eaux superficielles. Étude de la dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation du Beaujolais (massif des Aiguillettes-Rhône) par le biais d'une chronoséquence de trois peuplements. Nancy : Doc GIP-Ecofor-INRA Cycles biogéochimiques : 24 p
- Ranger J. et Bonneau M., 1984 - Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. Rev. for. fr., XXXVI, 2: 93-112.
- Ranger J. et Turpault M.P., 1999 - Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. For. Ecol. Manage., 122, 1-2: 139-154.
- Ranger J., Marques R. et Colin-Belgrand M., 1997 - Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. Acta oecol., 18, 2: 73-90.
- Ranger J., Marques R. et Jussy J. H. 2001 - Forest soil dynamics during stand development assessed by lysimeter and centrifuge solutions. For. Ecol. Manage., 114: 129-145.
- Ranger J., Marques R., Colin-Belgrand M., Flammang N. et Gelhaye D., 1995 - The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. For. Ecol. Manage., 72: 167-183.
- Ranger J., Marques R., Colin-Belgrand M., Flammang N. et Gelhaye D., 1996 - La dynamique d'incorporation d'éléments nutritifs dans un peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco). Conséquences pour la gestion sylvicole. Rev. for. fr., XLVIII, 3: 217-230.
- Rouiller J., Guillet B. et Bruckert S., 1980 - Cations acides échangeables et acidités de surface. Approche analytique et incidence pédogénétique. Bull. AFES, 2: 161-175.
- Sverdrup H. et Warvunge P., 1993 - Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. Applied Biogeochemistry, 8: 273-283.
- Turpault M.P., Ranger J., Marques R. et Ezzaïm A., 1999 - Les bilans entrées-sorties, indicateurs de gestion durable des écosystèmes forestiers : cas des plantations de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) des Monts du Beaujolais. Rev. for. fr., LI, 2: 184-196.
- Ulrich E., 1995 - Le réseau Renécofor : objectifs et réalisation. Rev. For. Fr. XLVII-2: 107-124.
- Ulrich B., 1983 - Interaction of forest canopies with atmospheric constituents : SO<sub>2</sub>, alkali and earth alkali cations and chloride. In B. Ulrich and J. Pankrath (Eds) Effects of accumulation of pollutants in forest ecosystems. Reidel publ. Dordrecht, pp 33-45.
- Ulrich E., Lanier M. et Combes C., 1998 - Renécofor. Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous réseau Catenat). rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-134-4, 135 p.



**Planche 1** - Situation du site de Vauxrenard (69). Vues du peuplement de 66 ans avant et après la coupe à blanc, en Octobre 1998.

**Planche 1** - Situation du site de Vauxrenard (69). Vues du peuplement de 66 ans avant et après la coupe à blanc, en Octobre 1998.

