



***The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library***

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search  
<http://ageconsearch.umn.edu>  
[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

# Forêt paysanne et Politique agricole commune : une évaluation des impacts d'une incitation au reboisement

*Pierre-Alain JAYET,  
Alain BIRFET,  
Annie HOFSTETTER*

*Agro-forestry and the  
Common Agricultural  
Policy :  
an investigation  
of incentives  
to afforestation*

**Key-words:**  
forestry, agriculture,  
modelling, Common  
Agriculture Policy

**Forêt paysanne et  
Politique agricole  
commune : une  
évaluation des impacts  
d'une incitation au  
reboisement**

**Mots-clés:**  
forêt, agriculture,  
modélisation, Politique  
agricole commune

**Summary —** *The aim of this text is to study the impact of the combination between the Common Agricultural Policy incentives concerning the practice of fallowing land, and the incentives to increase forestry zones given by the environmental policy. We therefore intend to measure these impacts in France when policy makers allow farmers to re-afforest on land set aside which benefits from CAP subsidies. We assume these subsidies are maintained in the long term. For this purpose, we will use an agricultural supply model conceived to measure the effects of the CAP alteration on the agricultural and husbandry sector. We shall also use elements of rent calculation for forestry investments. These elements of economic calculation will enable us to present an attempt of regional measurement of potential reafforestation for several selected tree species.*

**Résumé :** Si le problème de l'utilisation des terres libérées par la Politique agricole commune au titre des jachères fixes est fréquemment évoqué, les incitations au reboisement n'en sont pas moins d'actualité, elles pourraient même se développer au titre du soutien public au secteur du bois et sous l'impulsion de la politique de l'environnement. Nous nous proposons, pour la France, de mesurer les effets de la combinaison de ces deux politiques, par le biais d'une autorisation du reboisement des jachères fixes primées par la PAC et que l'on supposera maintenues sur le long terme. Pour cela, nous utilisons, d'une part, un modèle d'offre agricole conçu pour mesurer les effets des changements de la PAC sur le secteur de l'agriculture et l'élevage, et, d'autre part, des éléments de calcul de rente pour l'investissement forestier. A partir de ces éléments de calcul économique, nous présentons un essai de mesure régionale du reboisement potentiel en quelques essences présélectionnées.

\* INRA, LESPA, Département d'économie et de sociologie rurales, 78850 Grignon  
e-mail : [jayet@grignon.inra.fr](mailto:jayet@grignon.inra.fr) ; [hofstett@grignon.inra.fr](mailto:hofstett@grignon.inra.fr)

**L**a jachère apparaît comme un instrument privilégié des politiques agricoles depuis de nombreuses années, aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis. Elle peut être le fruit d'obligations ou d'incitations contractuelles en échange de contreparties versées aux exploitations agricoles, sous forme d'aides compensatoires aux surfaces plantées en certaines productions, ou sous forme de prix garantis élevés. La réforme de la Politique agricole commune (PAC) de 1992 en a fait un instrument privilégié pour la gestion des Organisations communes de marché (OCM) concernant les « grandes cultures » (céréales, oléagineux, protéagineux). Compte tenu des variations importantes des prix et échanges entre marché communautaire et marchés mondiaux, la jachère tend à devenir un instrument de gestion de court terme, permettant des ajustements plus rapides lorsqu'on en diminue la durée d'engagement.

## PRODUCTIONS LIGNEUSES ET JACHÈRE FIXE

La jachère peut être définie comme libre de tout usage. Très rapidement, il est apparu qu'elle pourrait être détournée au profit d'usages non agricoles (jachère cynégétique), d'usages à des fins non alimentaires (cultures énergétiques), et d'usages liés à l'élevage (certains fourrages et prairies). L'introduction des productions ligneuses sur des terres libérées contractuellement des usages strictement agricoles se conçoit dans cet esprit. Le caractère pérenne de ces dernières productions en limite l'intérêt au titre des seules jachères fixes, excluant donc les jachères tournantes.

Par ailleurs, des considérations de nature environnementale, telles que la qualité des paysages, la préservation de la biodiversité, la gestion des eaux de surface, pourraient se traduire par des incitations au reboisement sous-tendues par la rémunération des aménités. Cette rémunération pourrait prendre la forme de « primes », analogues alors aux primes versées au titre des terres mises en jachère. Mais on peut également concevoir que l'autorisation de mise en production ligneuse des terres en jachère les exempte de prime, dans la mesure où la production serait commercialisée.

Nous traitons dans cet article de la confrontation entre les incitations publiques à la mise en jachère, d'une part, et les incitations privées ou publiques au redéploiement de surfaces en production ligneuse, d'autre part. L'analyse est abordée dans le cadre des exploitations agricoles existantes. Nous privilierons l'analyse microéconomique de court terme, pour laquelle nous disposons d'outils de calcul économique et qui nous paraît pertinente compte tenu des points évoqués ci-dessus. Nous donnerons une dimension régionale à l'analyse, puisque les outils le permet-

tent, et qu'il s'agit, à l'évidence, d'une dimension opérationnelle compte tenu des différences de conditions de production entre systèmes d'exploitation agricole.

Dans la première partie, nous abordons l'introduction de la jachère fixe dans le modèle de calcul économique AROPA2 (Jayet, 1993 ; 1994 et 1996), avec possibilité de la rémunérer compte tenu d'éventuels usages non agricoles ou non alimentaires. Les résultats de simulation qui en découlent sont présentés dans le cadre d'un scénario reprenant les options actuelles de la PAC, l'accent est mis sur les coûts d'opportunité des jachères. La deuxième partie indique les éléments retenus pour la valorisation économique des parcelles boisées, en les appuyant sur des données techniques et économiques issues de la littérature et sur un calcul standard de la rente actualisée. Ces calculs de rente sont fondés sur le calcul des périodes de rotation, l'intégration du risque dans le taux d'actualisation, et le choix des essences. La troisième partie intègre les rentes forestières dans le modèle AROPA2, afin de déterminer la part des surfaces d'origine agricole susceptibles d'être valorisées en parcelles boisées. La dernière partie donne quelques indications sur les avantages et les limites de notre approche, en termes microéconomiques et d'économie publique.

## OFFRE DE JACHÈRE FIXE

### Méthode pour une évaluation

Le volet concernant les jachères dans la PAC distingue les jachères tournantes et les jachères fixes. Les premières peuvent s'insérer dans le jeu des rotations agronomiques, retrouvant ainsi un rôle qui leur était traditionnellement confié. Les secondes s'apparentent à un retrait permanent : elles sont notamment exclues du jeu des rotations culturales. En terme d'instrument de politique agricole, ces deux types de jachère se différencient à la fois par le niveau minimal du taux de retrait en surface de la production, et, éventuellement, par le niveau des primes de gel de terre. En général, le taux requis de retrait est plus important en jachère fixe qu'en jachère tournée. Dans la modélisation, nous intégrerons l'idée que les producteurs peuvent choisir le type de jachère le plus avantageux en respectant les contraintes de la PAC. Nous introduirons l'autorisation de boisement des jachères fixes comme une option supplémentaire qui leur serait offerte.

En pratique, on s'attend à ce que les agriculteurs gèlent en priorité les terres les moins productives de l'exploitation lorsqu'il s'agit de gel fixe. Le gel tournant résulte d'un arbitrage entre des parcelles de rentabilité différente insérées dans le jeu des rotations. Si l'exploitation agricole est parfaite-

tement homogène du point de vue de la qualité agronomique de ses terres, à taux égal de retrait des surfaces et de prime, il est en général plus coûteux pour l'exploitation de choisir le gel fixe que le gel tournant. En effet, le gel fixe, qui est par définition exclu du jeu rotationnel des cultures, offre moins de possibilité en matière de réallocation des surfaces.

L'hypothèse d'homogénéité des terres au sein de chacune des exploitations agricoles représentatives du modèle AROPA2 (cf. annexe 1) a donc pour conséquence de biaiser les estimations de surfaces en jachère, en minorant la jachère fixe au profit de la jachère tournante. De la même façon, les coûts de substitution de la jachère fixe au sein des différents groupes types de producteurs seraient biaisés supérieurement. Cette limite de la modélisation est cependant corrigée par le grand nombre de groupes types composant le modèle. Nous pouvons ainsi, jusqu'au niveau régional, différencier les terres de façon satisfaisante.

Les coûts de substitution constituent un bon indicateur de l'intérêt économique de la jachère fixe au niveau des exploitations agricoles. D'une manière générale, le coût de substitution d'une activité de surface est la perte marginale de profit consécutive à l'augmentation arbitraire d'une unité de la surface en question. Dans les modèles de production, lorsque la surface allouée à l'une des différentes productions ou au retrait des terres est de valeur zéro à l'optimum, le coût de substitution est équivalent à la valeur duale associée à la contrainte implicite de positivité de cette activité. Les coûts de substitution résument l'information que font peser sur ces activités toutes les contraintes auxquelles elles participent, en tenant compte de la valeur respective de ces activités dans la fonction d'objectif du programme de maximisation. Cet ensemble de contraintes, outre les contraintes agronomiques de rotation culturelle, comporte essentiellement les contraintes qu'implique la prise en compte des règles de la PAC. On note :

#### *Indices :*

$j$ ,  $0 \leq j \leq J + 2$ , indice de surface selon la production (y compris le maïs fourrager, lorsque celui-ci est éligible aux aides compensatoires des surfaces en céréales, oléagineux, protéagineux, *i.e.* la SCOP, dans laquelle seront comptées les surfaces en retrait du fait du respect des règles de la PAC),  $J + 1$  représentant la surface en gel tournant primé,  $J + 2$  représentant la surface en gel fixe primé.

#### *Paramètres :*

$r_{ref}^j$ , rendement de référence associé à  $j$  (y compris, le cas échéant, aux surfaces en retrait), en application des mesures de la PAC.

$\tau_1$ , seuil en quantité de céréales discriminant les catégories de producteurs, au delà duquel il y a obligation de retrait des terres pour bénéficier des aides compensatoires.

$p_{c_1}$ , taux de retrait de la SCOP associé au gel tournant  $J + 1$ .

$p_{c_2}$ , taux de retrait de la SCOP associé au gel fixe  $J + 2$ .

$p\epsilon_3$ , taux limite global de terre en retrait de la SCOP et donnant droit à prime.

$inf$ , paramètre à valeur réelle « suffisamment grande ».

$c_j$ , charge variable de la surface allouée à  $j$ .

$a_j$ , aide compensatoire associée à la surface de type  $j$ .

$b_j$ , aide ou rémunération spécifique éventuelle associée à  $j$  (i.e. le gel fixe  $j = J + 2$ ).

Activités :

$X_j$ ,  $0 \leq j \leq J$ , surface allouée à  $j$ , non primée, non déclarée comme devant bénéficier des aides compensatoires.

$XA_j$ ,  $1 \leq j \leq J + 1$ , surface allouée à  $j$ , en catégorie « petit producteur », les surfaces en SCOP pondérées par les rendements de référence ne dépassant pas le seuil  $\mu_1$  (associée au gel tournant).

$XB_j$ ,  $1 \leq j \leq J + 1$ , surface allouée à  $j$ , en catégorie « grand producteur ».

$XD_j$ ,  $1 \leq j \leq J$  ou  $j = J + 3$ , surface allouée à  $j$ , associée au gel fixe.

$IN, IP, IQ, IR$ , variables binaires à valeurs sur {0,1}.

Les mesures de la PAC ont pu faire l'objet de différentes interprétations. Par ailleurs, les réformes proposées ces dernières années ont évolué avant d'être traduites en application. Nous proposons donc ci-dessous une interprétation particulière de la PAC réformée (1992). La partie du module de politique agricole concernant les jachères fait appel aux contraintes suivantes :

*Limitation de la SCOP d'un « petit producteur » :*

$$\sum_j ref_j XA_j \leq \mu_1 \quad (\text{CTR1})$$

*Respect du contrat en gel tournant primé :*

$$XB_{j+1} \geq p\epsilon_1 \sum_j XB_j \quad (\text{CTR2})$$

*Respect du contrat en gel fixe primé :*

$$XD_{j+3} \geq p\epsilon_2 \sum_j XD_j \quad (\text{CTR3})$$

*Limitation globale des primes au titre du gel de terre :*

$$XA_{j+1} + XB_{j+1} + XD_{j+3} \leq p\epsilon_3 \sum_j (XA_j + XB_j + XD_j) \quad (\text{CTR4})$$

La sous-matrice associée à ces activités et contraintes d'un programme linéaire type est présentée ci-dessous (hors contraintes rotationnelles). On notera que l'introduction des seuils et du caractère strictement complémentaire de certaines activités nécessite de faire appel à la programmation avec variables binaires. Outre l'objectif (OBJ) et le second membre, la présentation ci-dessous intègre les conditions d'exclu-

sion qu'impliquent les seuils introduits par la PAC. Les coefficients de valeur nulle n'apparaissent pas.

	$X_j$	$XA_j$	$XB_j$	$XD_j$	$IN$	$IP$	$IQ$	$IR$
OBJ	$-c_j$	$-c_j + a_j$	$-c_j + a_j$	$-c_j + a_j + b_j$				
CTR1		$ref_j$						$\leq ts_1$
CTR2			$\begin{cases} pc1, j \neq J+1 \\ pc1-1, j = J+1 \end{cases}$					$\leq$
CTR3				$\begin{cases} pc2, j \neq J+3 \\ pc2-1, j = J+3 \end{cases}$				$\leq$
CTR4		$\begin{cases} -pc3, j \neq J+1 \\ 1-pc3, j = J+1 \end{cases}$	$\begin{cases} -pc3, j \neq J+1 \\ 1-pc3, j = J+1 \end{cases}$	$\begin{cases} -pc3, j \neq J+3 \\ 1-pc3, j = J+3 \end{cases}$				$\leq$
CTR5	1				$-\inf$			$\leq$
CTR6		1	1	1		$-\inf$		$\leq$
CTR7					1	1		$=1$
CTR8		1				$-\inf$		$\leq$
CTR9			1	1			$-\inf$	$\leq$
CTR10					1	1		$=1$

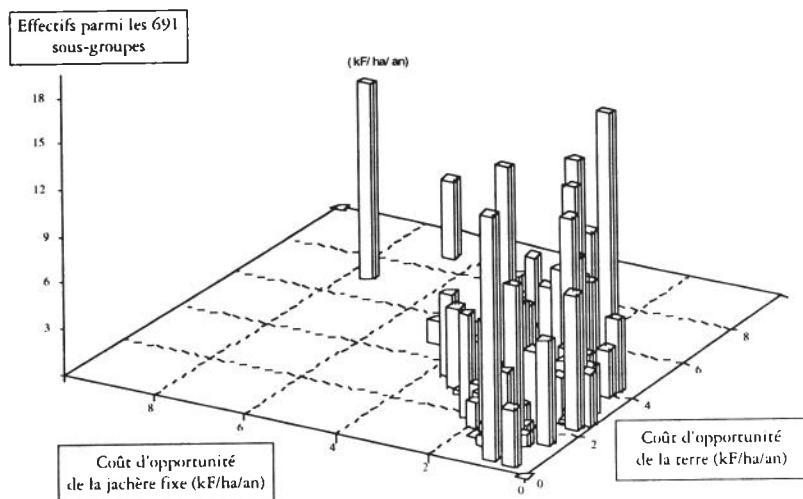
### Évaluation des coûts d'opportunité des jachères fixes par simulation

Le principe des simulations est le suivant. On utilise le modèle AROPA2 dans sa version calibrée sur la dernière année de référence 1990 (compte tenu de la disponibilité des données du RICA sur lesquelles le modèle est fondé, et compte tenu du «coût informatique» du calibrage). Les paramètres de l'environnement économique (prix, actualisation des charges variables, mesures de politique agricole) sont actualisés.

Une simulation consiste à résoudre les 691 programmes linéaires associés aux 691 «sous-groupes» du modèle AROPA2 (voir annexe 1). À chaque sous-groupe est associé, via le Réseau d'information comptable agricole (RICA), un coefficient de représentativité, de sorte que l'on peut reconstituer, même imparfaitement, le système de production agricole français pour les productions concernées par le modèle. La typologie sous-jacente permet de tenir compte des différences régionales et des différences entre principales orientations de production végétale ou animale, ainsi que de la dimension des exploitations. Elle devrait donc permettre de restituer en particulier, dans une certaine mesure, la distribution des coûts d'opportunité de la terre et des coûts de substitution de la jachère fixe.

La figure 1 illustre cette distribution, répartissant les exploitations agricoles selon les coûts d'opportunité de la jachère fixe et de la ressource totale en terre agricole, à partir des hypothèses suivantes : les coûts d'entretien des jachères sont fixés arbitrairement à 500 F/ha, les exploitations d'élevage en hors-sol sont écartées de la distribution. Les primes et coûts d'entretien, ainsi que le jeu complexe introduit par les contraintes de politique agricole dans les programmes linéaires associés aux comportements des groupes de producteurs impliquent que les coûts de substitution de la jachère fixe puissent être sensiblement différents des coûts d'opportunité de la terre. La figure 1 montre que le coût d'opportunité de la jachère fixe est généralement inférieur au coût d'opportunité de la terre. Elle montre aussi, pour une grande majorité d'exploitations agricoles, dans quelle mesure la jachère fixe limite les effets négatifs sur les revenus agricoles auxquels aurait conduit un retrait pur des terres sans les contreparties offertes par la PAC.

Figure 1.  
Distribution  
des exploitations  
agricoles  
représentatives du  
modèle  
selon les coûts  
d'opportunité de la  
terre (SAU) et de la  
jachère fixe nue  
obtenue par  
simulation



## CARACTÉRISTIQUES MICROÉCONOMIQUES DE LA CONDUITE DES PEUPLEMENTS

Dans le modèle d'offre agricole que nous utilisons, l'horizon de court terme sur lequel sont fondées les réallocations des surfaces est d'une année. Tout autre usage de la terre que ceux initialement prévus doit être valorisé sur la même période si l'on veut utiliser le modèle en intégrant ce nouveau mode de valorisation. Lorsqu'il s'agit d'un mode de valorisation pérenne, il importe de l'évaluer sur la durée d'une période à partir d'un calcul d'actualisation.

Les productions pérennes telles que les productions ligneuses sont susceptibles d'apporter des revenus de façon beaucoup plus irrégulière, le

revenu principal ne survenant qu'au moment de la coupe en fin de période. La période de rotation est ici beaucoup plus grande que la période de simulation du modèle AROPA2, puisque selon les essences, elle varie de quelques années à plusieurs décennies. Nous détaillons ci-dessous le mode de calcul de la rente forestière selon l'horizon de coupe, ainsi que celui de l'horizon optimal de coupe.

## Principe du calcul de la rente actualisée nette

Le calcul exposé dans cette section est effectué en temps discret, le pas de temps étant l'année. On note  $r$  le taux d'actualisation,  $T$  la période de rotation du peuplement, et  $q_t$  la valeur nette en monnaie courante de l'exploitation d'un peuplement à l'âge  $t$ , en fin d'année, avec  $0 \leq t \leq T - 1$ . L'annuité équivalente, notée  $A_0$ , de la valeur actualisée nette en début de cycle d'un cycle de durée  $T$  est telle que :

$$A_0(T) = \frac{r}{1 + r} \cdot \frac{1}{1 - (1 + r)^{-T}} \sum_{t=0}^{T-1} \frac{q_t}{(1 + r)^t} \quad (1)$$

Si l'on fait l'hypothèse que l'exploitation forestière à long terme est une succession de cycles identiques, il est alors facile de vérifier que l'annuité équivalente correspondante est égale à l'annuité équivalente de la valeur actualisée nette sur un cycle.

Le taux d'actualisation est l'un des paramètres fondamentaux des évaluations que nous proposons. Si l'on considère le taux d'actualisation comme un coût d'opportunité des fonds engagés, il convient de comparer ce taux aux taux de rémunération d'investissements concurrents sur un terme équivalent. Terreaux (1990) donne des indications à ce sujet. En tenant compte du fait que les investissements forestiers que nous considérons dans cette étude viennent en substitution à des activités agricoles, tant que ces investissements ne comportent pas de risque particulier, nous pourrions retenir un taux d'actualisation de l'ordre de 4 %.

Les deux sous-sections suivantes abordent les autres points clés que sont l'intégration des risques liés à l'investissement forestier et le choix de la durée du cycle.

## Facteurs de risque et répercussions sur la rente

Les facteurs de risque sont en général nombreux en matière d'investissement forestier, tout en variant considérablement selon les conditions pédoclimatiques du lieu dans lequel l'investissement est susceptible d'être réalisé. On distinguera des facteurs de risque de nature technique et de nature économique.

Parmi les facteurs techniques de risque, le choix d'une essence sur un sol à vocation agricole peut conduire à une forte mésestimation de la production. On dispose de trop peu d'information pour pouvoir le mesurer. Quant au risque de destruction par incendie, il varie considérablement d'une région à l'autre, de même que les autres risques naturels liés au climat. Les risques d'attaque biologique peuvent aussi se révéler déterminants. Ces risques peuvent être probabilisés en tenant compte des observations effectuées en France depuis de nombreuses années. Ainsi, Terreaux (1990) estime la surface forestière moyenne annuelle brûlée en France, entre 1977 et 1985, à 0,055 % des surfaces forestières, excluant toutefois les surfaces les plus exposées à l'incendie (en Corse, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Ce risque d'incendie représenterait 15 % des risques naturels. Pour une durée de cycle de  $T$  années et un taux moyen annuel de production détruite  $\alpha$ , la probabilité  $R_0$  en début de cycle, liée à ce risque, d'une perte de la récolte serait donc de :

$$R_0(T) = \alpha \sum_{t=0}^{T-1} (1-\alpha)^t = 1 - (1-\alpha)^T \quad (2)$$

Pour  $\alpha = 0,055\%$  et  $T = 40$  ans, cette probabilité est de 2 % environ, correspondant à une probabilité moyenne de l'ordre de 0,05 % par an. Si le taux de surface brûlée était de 0,5 % (plus proche du taux des zones à plus grand risque en France), cette probabilité serait de 0,4 % par an pour des peuplements de durée de cycle inchangée.

A ces risques techniques, il convient d'ajouter le risque induit par l'aversion présumée des propriétaires forestiers-agriculteurs vis-à-vis des variations du prix du bois. La prime de risque qu'ils sont prêts à consentir, qui est la différence entre l'espérance de revenu et son équivalent certain, est au premier ordre proportionnelle à la variance du prix du bois anticipé pour la récolte. Dans le modèle classique d'une utilité variant exponentiellement et négativement avec le revenu, si  $\beta$  est l'indice absolu d'aversion pour le risque et  $\sigma$  l'écart type du prix, la prime de risque économique  $p$  est alors proche de :

$$p \equiv 1/2 \beta \sigma^2 \quad (3)$$

Il est clair que l'aversion pour le risque peut varier beaucoup d'un producteur à l'autre, et la structure aléatoire du prix d'un bois d'une qualité donnée peut elle-même beaucoup évoluer au cours du temps. Compte tenu du modèle utilisé pour des simulations numériques, qui, rappelons-le, repose sur la représentation de producteurs types, toute évaluation de la couverture de l'ensemble des risques par ces producteurs pourra paraître arbitraire. On retiendra par la suite un taux de 1 % par an. Dans un calcul au premier ordre, ce taux de couverture du risque peut être ajouté au taux d'actualisation, dans la mesure où le coût de reboisement après destruction est du même ordre que le coût de mise en

exploitation après récolte. Après l'évaluation faite précédemment, on tiendra un taux d'actualisation global annuel de 5 %.

## Rotation optimale d'un peuplement

Une fois le taux d'actualisation déterminé, si l'on sait évaluer la valeur de la ressource à chaque instant au cours d'un cycle de peuplement, il est alors possible de déterminer la durée optimale de ce cycle lorsqu'on maximise la valeur actualisée de la ressource. En annexe 3, on présente le principe du calcul en temps continu, l'approximation d'un calcul en temps discret par un calcul en temps continu étant justifiée par l'approximation  $(1 + r)^t \equiv e^{rt}$  d'autant plus valable que le pas de temps est petit. Les calculs sont détaillés selon l'horizon que l'on se fixe.

Dans le cas d'un horizon infini (ou d'une durée aléatoire assez grande), la recherche de la durée  $T$  du cycle passe par l'égalisation du taux de croissance à la date  $T$  de la ressource évaluée en monnaie courante et du taux d'actualisation pondéré par un correctif  $(1/(1 - e^{-rT}))$  dont la valeur est proche de 1 si la durée du cycle est assez grande. Cette dernière approximation est d'ailleurs d'autant plus valable que le taux d'actualisation est important. On notera que la durée de cycle décroît lorsqu'augmente le taux d'actualisation. Un calcul par approximations successives doit permettre de résoudre simplement l'équation véritable dès lors que la courbe de croissance  $q(t)$  tracée dans un plan  $\{q, q\}$  ne coupe qu'en un point dans l'orthant positif les droites de pente égale à  $r/(1 - e^{-rT})$  (voir figure 4 en annexe 2).

## Courbes de croissance et estimations

On fait appel habituellement à la fonction de Richards pour représenter, sur un cycle, une fonction d'accumulation d'une ressource naturelle telle que la biomasse forestière (voir par exemple Osumi, 1983). Ce type de fonction s'applique particulièrement à l'évolution du volume ou de la circonférence d'un arbre. On fera l'hypothèse qu'une fonction de même nature représente l'évolution de la valeur de la biomasse forestière sur une unité de surface boisée. L'annexe 3 développe la présentation de cette fonction et des hypothèses qu'il convient de faire sur les paramètres qui la caractérisent.

A partir de quelques observations disponibles dans la littérature, une technique d'estimation des paramètres d'une fonction de Richards est alors proposée en annexe 3. Les estimations sont conduites pour chaque essence à partir des valeurs observées dans une région représentative du peuplement. On tiendra compte par la suite des différences régionales en matière de conditions pédo-climatiques de production, pour une essence

donnée, en différenciant les courbes de production en valeur par leur taux maximal de croissance. L'annexe 4 montre la sensibilité de la rente vis-à-vis des paramètres de croissance et du taux d'actualisation.

## Choix des essences

Nous utilisons les scénarios sylvicoles établis à l'IDF par Picard et Méchineau (1993), dans le cadre d'une étude sur le boisement des terres agricoles. Ces scénarios concernent des essences types en terme de durée de cycle et de qualité de bois, et soumises à des conditions relativement favorables. Ces essences sont le peuplier, le chêne, le frêne, le cèdre et le douglas.

Le *peuplier* a été retenu pour ses qualités de développement rapide et sa bonne rentabilité. Il s'adapte facilement aux terrains humides tout en étant très exigeant en eau. On le trouve donc surtout dans les vallées. Ses régions de prédilection sont les vallées de la Saône, l'Oise, la Marne, l'Yonne, la Garonne et l'Adour. Selon le clone choisi, le peuplier est subventionné par le FFN dans toutes les régions de France. En France, la surface des peupleraies est passée de 116 000 ha en 1955 à 219 000 ha en 1985. Le peuplier est devenu la première essence feuillue pour la production de grumes. Son âge d'exploitabilité varie entre 15 et 30 ans.

Le *chêne* est moins exigeant en eau que le peuplier. Bien qu'il donne un bois de qualité, sa rentabilité est faible car son âge d'exploitabilité est élevé (entre 80 et 150 ans pour les chênes autres que le chêne rouge). C'est l'essence la plus répandue en France. En 1994, elle couvre la moitié des surfaces feuillues : 4,2 millions d'hectares en chêne rouvre et pédunculé, 1,3 millions d'hectares en chêne vert, pubescent et liège et 17 000 hectares en chêne rouge. Le chêne pédunculé, très implanté dans l'Ouest de la France, se trouve relayé dès le Bassin parisien par le chêne rouvre. Il s'adapte dans toutes les régions à l'exception du Bassin méditerranéen et des régions au delà de 600 mètres d'altitude.

Nous avons retenu le *frêne* pour représenter les feuillus précieux. D'une manière générale, ces arbres sont très exigeants en sol et en eau mais ils donnent en contrepartie un bois de très bonne qualité en un temps plus court que le chêne. Leur rentabilité est donc légèrement meilleure que celle du chêne. Les autres feuillus précieux sont le merisier, l'éryable, le noyer, mais le frêne est le plus répandu avec 310 000 hectares en France en 1994. Le merisier, l'éryable et le frêne sont subventionnés par le FFN dans toute la France à part la région méditerranéenne. Le noyer est subventionné dans toute la France.

Le *cèdre* a été retenu parce qu'il est peu exigeant en sol et en eau. Il donne un bois de faible qualité en un temps comparable à celui nécessaire aux feuillus précieux. Nous l'avons utilisé pour représenter l'en-

semble des résineux (hors douglas). Les résineux dominent en régions montagneuses, mais aussi en plaines et en basse montagne, là où des forêts artificielles ont été créées. Les reboisements d'après-guerre ont ainsi permis d'implanter les résineux dans les zones peu propices au développement de feuillus de qualité. Par leur utilisation en reboisement, les résineux marquent fortement le paysage. Si le cèdre est présent partout, il domine surtout le Bassin méditerranéen. Le pin maritime prévaut en Aquitaine, les pins sylvestre et laricio en Sologne et le pin noir dans les Cévennes.

Le *douglas* est une essence exotique introduite en France il y a 150 ans. C'est actuellement la première essence de reboisement. Il est assez exigeant en eau mais sa croissance rapide permet d'obtenir de bons rendements.

L'étude effectuée par Picard et Méchineau proposait en outre un scénario de *taillis à courte rotation*. Cependant, les débouchés offerts à ce type de sylviculture étant actuellement assez faibles, nous nous limiterons aux 5 essences précitées.

La rente ne saurait être le seul critère à prendre en compte pour mesurer les impacts que l'autorisation de boiser la jachère fixe pourrait avoir. Pour tenir compte des freins de nature diverse que le reboisement de terres agricoles est susceptible de rencontrer, on affectera les surfaces agricoles potentiellement offertes au reboisement d'un coefficient inférieur à 1 selon une règle précisée à la fin de l'annexe 3.

Tableau 1. Caractéristiques retenues pour la présélection d'essences

	<i>Peuplier</i>	<i>Chêne</i>	<i>Frêne</i>	<i>Merisier</i>	<i>Cèdre</i>	<i>Pin Laricio</i>	<i>Douglas</i>
Adaptabilité	-	+	--	--	++	++	+
Age d'exploit.	15 - 30	80 - 150	50 - 60	40 - 60	60 - 80	45 - 65	40 - 45
Prix F/m <sup>3</sup>	300	1000	1000	1600	250	250	500
Rentabilité	++	--	0	+	--	-	+

## OFFRE DE TERRES POUR LES PRODUCTIONS LIGNEUSES

Nous effectuons des simulations numériques à partir des éléments suivants.

Les options retenues pour la PAC s'appuient sur la réforme de 1992. Plus précisément, les taux minimaux de jachère tournante ou fixe sont fixés à 12 % de la SCOP de chaque exploitation agricole, sachant que le total des jachères primées ne peut excéder 30 % de cette SCOP. Le niveau de la SCOP est choisi librement par les exploitants, en tenant

compte de ces contraintes. La jachère fixe ne bénéficie pas de prime supplémentaire, au titre du reboisement par exemple. Par contre, la rente forestière intégrant le coût de l'investissement et les éclaircies, la jachère fixe n'est plus grevée de coûts d'entretien. Le coût d'entretien de la jachère tournante est maintenu au niveau arbitraire de 500 F/ha (cf. la première partie). Par rapport à la simulation précédente, les seuls paramètres dont les valeurs sont susceptibles d'être modifiées concernent donc la rémunération des jachères fixes, qui cumulent ainsi les aides prévues par la PAC et la rente forestière. Cette dernière intègre tous les éléments de calcul évoqués dans la deuxième partie.

Tableau 2. Bois sur jachère fixe par région et par essence –  
Potentiel économique (*PC*), potentiel exploitable (*PX*) (1000 ha)

Région*	Peupliers		Frênes		Cèdres		Douglas		Chênes	
	<i>PC</i>	<i>PX</i>								
1	38	15,20	25	0	25	0	38	9,50	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	2,10	0	0	0	0	0	0	0	0
4	231	115,50	0	0	3	0	3	0,75	0	0
5	78	34,32	23	0	41	9,84	41	13,12	13	0
6	383	134,05	44	0	44	15,40	64	19,20	0	0
7	0	0	0	0	21	11,76	25	11	0	0
8	0	0	0	0	0	0	27	21,33	0	0
9	0	0	0	0	0	0	7	4,20	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	18	6,84	10	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	163	122,25	0	0	0	0	0	0	0	0
17	274	139,74	143	70,07	0	0	0	0	0	0
18	47	15,98	5	2,05	0	0	5	1,25	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
France	1237	585,98	249	72,12	134	37	209	80,35	13	0

\* voir le tableau 5, en annexe 3, pour la composition des régions.

Tableau 3.  
Utilisation des  
jachères : jachères  
fixes boisées, jachères  
nues (1000 ha)

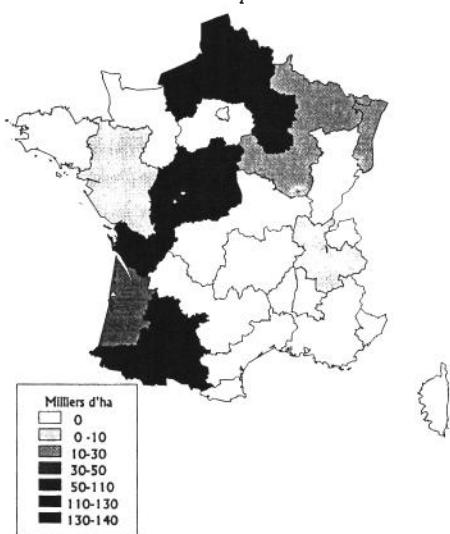
Région*	Scénario avec reboisement			Maintien en jachère nue	
	bois sur jachère	jachère fixe nue	jachère tournante	jachère fixe	jachère tournante
1	24,7	8,8	76,3	25	218
2	0	0	153	0	153
3	2,1	0	197,6	0	304
4	116,2	0,8	51,2	3	205
5	57,3	0	0	41	12
6	168,6	0	0	51	156
7	22,8	0	0	25	80
8	21,3	0	21,8	0	104
9	4,2	0	9,2	0	23
10	0	0	16	0	16
11	0	0	42	0	42
12	6,8	0	22,3	0	36
13	0	0	23	0	23
14	0	0	134	0	134
15	0	0	92	0	92
16	122,3	0	18,5	0	74
17	209,8	0	0	0	240
18	19,3	0	0	5	26
19	0	0	0	0	0
France	775,4	9,5	857	150	1938

\* voir le tableau 5, en annexe 3, pour la composition des régions.

Figure 2. Surface agricole exploitable selon les essences à l'échelle des régions AROPA2

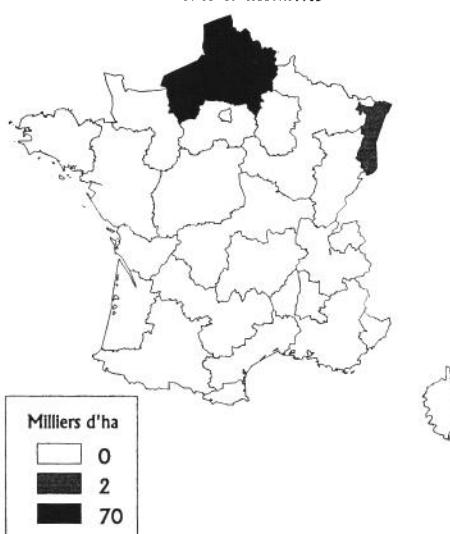
Carte 2.1.

Peupliers

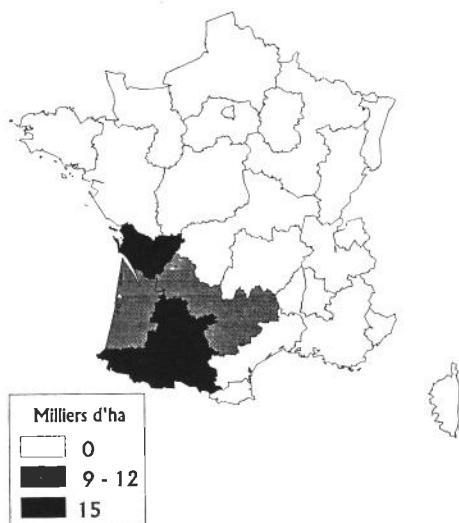


Carte 2.2.

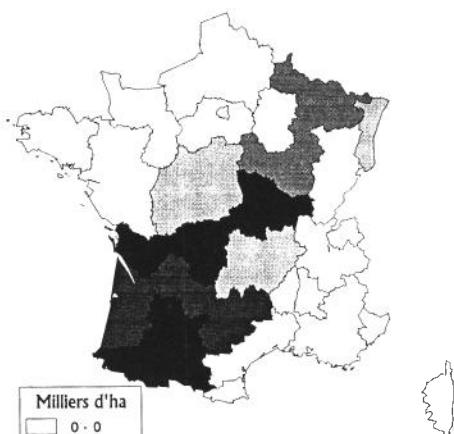
Frênes et assimilés



Carte 2.3.  
*Cèdres et assimilés*



Carte 2.4.  
*Douglas*



Le potentiel économique de chaque essence, parmi les cinq essences retenues, est obtenu par un jeu complet de simulations faisant intervenir les 691 « sous-groupes » représentatifs de l’offre agricole française. Par hypothèse, les simulations privilégient le boisement des jachères au détriment des jachères fixes nues, de façon à véritablement faire apparaître le potentiel sylvicole propre à chaque essence. On tient ensuite compte d’un taux exogène d’érosion de ce potentiel, tel qu’il a été déterminé pour chaque essence en annexe 3 et qui intègre divers freins économiques et techniques. Les cartes de la figure 2 montrent l’impact régional que la PAC offrirait à chaque essence avec l’autorisation de boiser les jachères fixes primables. Le chêne n’apparaissant potentiellement que sur une région qui en exclut l’exploitabilité, les résultats présentés concernent les quatre autres essences. La carte de la figure 3 et les tableaux 2 et 3 résument les résultats par région et par essence, et à l’échelle nationale toutes essences confondues. Le premier des deux tableaux met en évidence les potentiels des essences considérées séparément. Le second indique le niveau des jachères nues auquel conduit le modèle en l’absence d’incitation au reboisement, et l’on tient compte de l’arbitrage au niveau des exploitations agricoles entre les jachères reboisées d’une part et les jachères nues d’autre part.

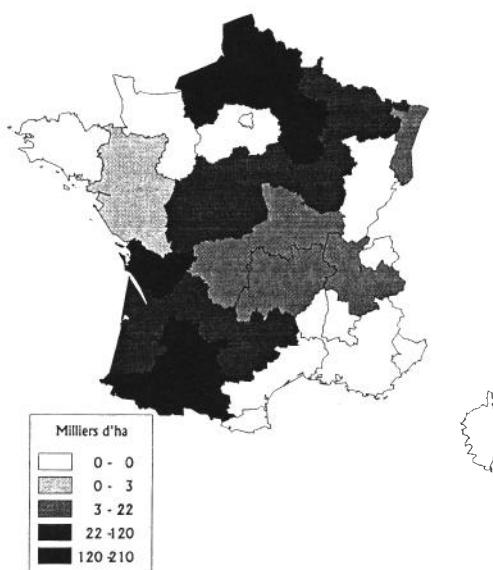
Les résultats sont évidemment fortement tributaires des hypothèses retenues, concernant en particulier le taux d’actualisation et le taux de jachère imposé par la PAC.

Ils sont présentés à l’échelle des régions « AROPA2 », gommant ainsi les fortes disparités qui peuvent exister au sein de chaque région. Par ailleurs, même si l’exploitabilité présumée des différentes essences dans

les différentes régions est prise en compte, les surfaces agricoles offertes au reboisement présentent quelque différence avec les implantations actuellement observées de ces essences. Cela tient en partie à la structure des exploitations agricoles et au caractère contraignant de la Politique agricole commune.

Les régions agricoles ne sont évidemment pas concernées de la même façon par la possibilité offerte aux exploitations agricoles de boiser leurs jachères, la mise en jachère fixe étant elle-même très réduite dans certaines régions. Seraient ainsi exclues de tout reboisement de terres agricoles les régions de l'Ouest (Bretagne, Basse-Normandie) et du Sud-Est, ainsi que la grande couronne parisienne. Les régions qui semblent les plus propices à un tel reboisement suivent un axe du Sud-Ouest vers le Nord en passant par la Région Centre. On y trouve la plupart des grandes exploitations de cultures de vente. La région parisienne semble exclue du fait de terres agricoles très rémunératrices et du fait que les rentes estimées sont fondées sur les sols actuellement exploités. Quant aux essences, il est clair qu'une essence à croissance rapide et rentable telle que le peuplier est fortement avantageée, puisqu'elle occuperait les trois quarts des surfaces agricoles exploitables en sylviculture.

Figure 3.  
Surface agricole  
exploitable en  
sylviculture sur  
jachère fixe



## AVANTAGES ET LIMITES DE L'ANALYSE MICROÉCONOMIQUE DE LA SYLVICULTURE SUR JACHÈRE

L'analyse proposée dans cet article est fondée sur une approche micro-économique utile pour une analyse coût-avantage du boisement des jachères dans le cadre de la PAC. Elle est étayée par des simulations sur

modèle. Il convient évidemment de considérer les évaluations proposées selon les hypothèses retenues. A titre d'exemple, le taux minimal de jachère de 12 % qui était en vigueur en 1994 est tombé à 5 % en 1996. Le caractère pérenne des productions ligneuses accroît, pour les producteurs privés, le risque de s'engager sur le long terme si l'aléa de la réglementation est d'une variance élevée. Mais les conséquences chiffrées de ces variations du taux de gel sur les surfaces en jeu sont supérieures à celles qu'occasionneraient d'éventuels changements de valeur affectant les paramètres techniques ou économiques associés au calcul de la rentabilité forestière.

Nos estimations des surfaces boisées sur jachère fixe pourraient paraître fortes en valeur absolue. Représentant 45 % des surfaces totales en retrait dans le cadre de la PAC, elles ne représentent que 2,5 % de la surface agricole utile totale.

Si l'on considère que les mesures de la PAC, comportant le recours à la jachère, puissent être stabilisées, une utilisation pérenne des jachères fixes est envisageable, et le reboisement apparaît comme une utilisation possible des terres ainsi libérées de leur usage agricole traditionnel. Si l'on sait mesurer tous les obstacles de nature microéconomique qui peuvent se dresser face à ce mode d'exploitation de la terre, il est possible d'en tenir compte dans une analyse économique fondée sur le calcul d'une rente actualisée par unité de temps et de surface.

En « fixant » la dimension des exploitations agricoles au cours du temps, il est alors possible d'évaluer la réallocation de la terre entre usages agricoles et non agricoles, quelle que soit la durée d'occupation associée à chaque usage. Les activités agricoles et sylvicoles, tout comme les activités liées à l'élevage, concourent toutes à l'utilisation de la ressource en terre. Les modèles d'offre, tels que le modèle AROPA2, fondés sur l'optimisation de ces choix nous ont donc paru adaptés à cette analyse économique. Ils le sont d'autant mieux qu'ils sont capables d'intégrer le rôle des instruments de la PAC, parmi lesquels les jachères ont un rôle primordial.

Cependant, les résultats de ce type de modèle doivent être « filtrés » pour tenir compte de problèmes spécifiques à l'exploitation sylvicole. Même en faisant abstraction des compétences des exploitants agricoles (qui pourraient faire appel à des services extérieurs, diminuant alors les marges qu'ils retireraient de cette activité), l'activité sylvicole peut se heurter à la faiblesse locale des marchés du bois et à divers freins économiques ou techniques qui ne relèvent pas strictement de choix individuels. Nous en avons tenu compte en pondérant les surfaces en jachères potentiellement offertes au reboisement par un taux exogène d'exploitabilité.

Toutes ces hypothèses sont autant de limites à la validité de notre analyse. Les calculs et résultats proposés ont du moins le mérite de ren-

ter de rapprocher des analyses économiques et techniques généralement conduites de façon séparée. Ils fournissent des éléments qui pourraient nourrir une analyse des coûts et avantages publics d'une meilleure coordination entre politique forestière ou d'aménagement du territoire, et politique agricole. En particulier, il apparaît possible de quantifier les effets de toute politique de rémunération des externalités positives liées à une utilisation non agricole de terres agricoles, telle que la sylviculture. C'est en ce sens que sont par exemple engagés des travaux orientés sur l'étude de la régulation de l'effet de serre d'origine agricole.

Le modèle d'offre dont nous disposons permet donc d'alimenter les analyses coût-avantage traitant de la PAC et des politiques agri-environnementales dont l'incitation au reboisement serait l'un des volets. Il permet par exemple d'évaluer les réallocations de surface entre productions agricoles et jachères fixes et tournantes, ainsi que les conséquences qui en résulteraient en matière de revenu agricole et d'impact budgétaire direct. Mais pour être complètes, les analyses devraient s'appuyer sur des éléments qui ne sont pas disponibles ici, qu'il s'agisse des impacts sur les secteurs de la transformation du bois et des produits agricoles, ou des impacts budgétaires indirects tels que les restitutions aux exportations hors Union européenne de céréales.

La crédibilité de l'approche tient essentiellement au fait que la technologie agricole et les instruments d'intervention de la PAC intégrés dans le modèle sont explicitement fondés sur les véritables paramètres qui les caractérisent à une échelle infra-régionale. L'utilisation d'un tel modèle requiert cependant un nombre limité d'exploitations agricoles représentatives, renvoyant aux habituels problèmes de biais d'agrégation. Elle demeure à notre connaissance l'un des rares moyens d'évaluer, en terme de coût privé, ou même de coût public, les conséquences d'interventions économiques de facture nouvelle étroitement associées aux caractéristiques techniques des firmes.

## BIBLIOGRAPHIE

- AGRESTE, 1995 — Statistiques forestières 1993, *Données chiffrées*, n° 69, juillet.
- AMIGUES (J.-P.), MOREAUX (M.), TERREAUX (J.-P.), 1989 — Exploitation d'une ressource non renouvelable, possibilité de stockage et règle de Hotelling, INRA ESR Toulouse, 31 p.
- CARRIAT (S.), CHERKI (F.), FAYOLLE (C.), LEROUX (F.), VROMAND (G.), 1994 — Bois : Faut-il planter ?, *Cultivar*, n° 366, pp. 33-51.

- DERF, 1994 — *Boisement des terres agricoles et développement local*, 7 vol.
- IDF, 1989 — Les calculs économiques en forêt, *Forêt Entreprise*, n° 61, juillet/août, pp. 18-56.
- JAYET (P.-A.), 1993 — Prix, productions et revenus agricoles : une mesure des effets d'une réforme de la Politique agricole commune. Etude réalisée pour le compte du Commissariat général du plan et la Direction de la Prévision, Études Économiques INRA-ESR Grignon, n° 10, septembre.
- JAYET (P.-A.), 1994 — Revenus et politiques agricoles, efficacité et équité, un modèle pour des réponses quantifiées, *Économie Rurale*, n° 220-221, mars-juin.
- JAYET (P.-A.), HOFSTETTER (A.), 1996 — Agricultural supply modeling for the CAP: a modular approach based on linear programming, Mimeo INRA ESR Grignon, 17 p.
- NORMANDIN (D.), 1994 — Déprise agricole et extension forestière : Aspects régionaux et incidences de la réforme de la PAC, INRA ESR Nancy.
- OSUMI (S.), 1983 — Applicabilité de la fonction de Richards à la croissance de l'arbre, *Les Colloques de l'INRA*, 19, pp. 77- 86.
- PICARD (O.), MÉCHINEAU (F.), 1993 — Micro-économie du boisement des terres agricoles, IDF Section Toulouse.
- PRÉVOT (H.), 1993 — *L'économie de la forêt: mieux exploiter un patrimoine*, Edisud, 233 p.
- TERREAUX (J.-P.), 1990 — Principes de gestion des investissements en forêt, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse I.

## ANNEXE 1

## Présentation succincte du modèle AROPA2

Les principes de la modélisation sont ceux de la programmation mathématique, et singulièrement de la programmation linéaire. Les données disponibles, la qualité des algorithmes de génération de matrices et d'optimisation, l'évolution des matériels informatiques ont sensiblement accru la maniabilité des modèles de programmation. Les aspects « contractuels » et les effets de seuil de la PAC (prix différenciés, aides découpées, retrait des terres arables...) sont aisément intégrés dans ces programmes grâce à l'introduction de variables entières.

Ces modèles permettent de rendre compte de la diversité des productions agricoles, souvent présentes en nombre dans les systèmes individuels de production. Ils permettent donc de construire un système d'offre agricole multi-producteur et multi-produit. Les productions représentées appartiennent aux principales cultures de vente, aux fourrages, et aux productions animales. Parmi ces dernières, les activités bovines font l'objet d'un niveau de résolution particulièrement fin (à l'aide d'un module démographique). Les activités de production sont représentées à l'échelle de l'année. L'ensemble des activités représentées correspond à la fois à des activités substituables les unes aux autres (par le biais de l'alimentation animale si l'on considère les productions végétales et animales), et à des activités rendues nécessaires par les modes de régulation publique (par les OCM).

Le principe fondamental est l'importance accordée aux caractéristiques techniques de la production agricole, de sorte que l'on puisse « représenter » le comportement des exploitations qui, tout en recherchant un profit aussi grand que possible, sont supposées respecter les contraintes inhérentes à la production agricole et les contraintes de la PAC sur un registre très varié. Le comportement économique d'un producteur représentatif est associé au programme suivant de maximisation d'un profit de court terme :

$$\begin{aligned} \max_{X} \quad & P(\theta, \varphi) \cdot X \\ \text{s.t.} \quad & A(\theta, \varphi) \cdot X \leq B(\theta, \varphi) \\ & X \geq 0 \end{aligned}$$

où  $X$  représente le vecteur des activités,  $P$  le vecteur des « prix »,  $A$  la matrice des coefficients,  $B$  le vecteur des « ressources ». Les paramètres caractéristiques du producteur sont représentés par le vecteur  $\theta$ , tandis que  $\varphi$  représente le vecteur des paramètres généraux (caractéristiques de l'environnement économique). La solution de ce programme est notée  $X^*(\theta, \varphi)$ .

La maquette qui représente l'ensemble de production type regroupe les contraintes de production en 5 sous-ensembles : les contraintes d'assoulement, les contraintes d'alimentation animale, les contraintes de disponibilité en fac-

teurs quasi-fixes et de capacité (terre, capital animal), le module de démographie bovine, les contraintes nées de la PAC.

Compte tenu des activités pressenties dans la maquette, des données individuelles disponibles (par le RICA), et des contraintes informatiques, une typologie des producteurs est proposée. Elle repose sur un triple niveau de partitions emboîtées : regroupement de petites unités administratives (les départements pour la France) en régions, regroupements des producteurs selon les principales orientations technico-économiques (les OTE du RICA), partitions des groupes ainsi constitués en fonction de la distribution des surfaces. La typologie mobilise les techniques de l'analyse des données (classification hiérarchique, classification automatique). La version 2 (AROPA2) du modèle français comporte 19 régions, 82 groupes, 691 sous-groupes. Les sous-groupes, en situation « hors PAC réformée », sont des représentations homothétiques de leurs groupes d'origine dans le rapport des ressources en terre.

L'étape suivante consiste, pour chaque groupe type, en l'estimation des paramètres  $\theta$ . Des techniques simples d'estimation sont mobilisées (relevant des moindres carrés ordinaires, avec en particulier l'utilisation des modèles de covariance pour l'estimation des charges variables par culture). L'estimation obtenue,  $\theta_0$ , est considérée comme une valeur initiale d'une méthode d'estimation utilisant plus d'information (*i.e.* le calibrage). Cette étape est la plus exigeante en calculs intermédiaires. Elle consiste en un ajustement des paramètres préestimés afin de rapprocher le niveau optimal  $X^*$  des activités obtenu en situation de référence et le niveau  $X^0$  des valeurs observées pour ces activités dans une telle situation. Le programme est le suivant (pour chaque groupe) :

$$\min_{\theta} |X^*(\theta, \varphi) - X^0|^2$$

$$s.c. \quad \theta \in \Theta$$

La résolution repose sur une combinaison de méthodes de type Montecarlo et d'algorithmes de gradient, une solution initiale pour chaque programme linéaire étant obtenue à partir des valeurs initialement estimées des paramètres, éventuellement complétées par un programme d'« expertise » (complétude en cas de défaut d'observation ou de valeur aberrante des paramètres). L'ensemble  $\Theta$  limite les valeurs possibles pour  $\theta$ .

L'étape précédente utilise les programmes de génération de matrices conçus pour la programmation linéaire. Ces programmes permettent le « maquettage » des ensembles de production à partir de la définition des paramètres, des activités et des contraintes. Ils servent également dans la phase terminale de la modélisation, à savoir les travaux de simulation.

## ANNEXE 2

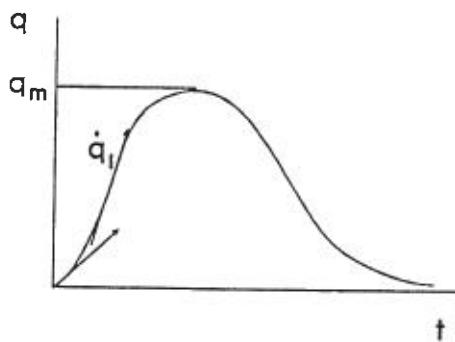
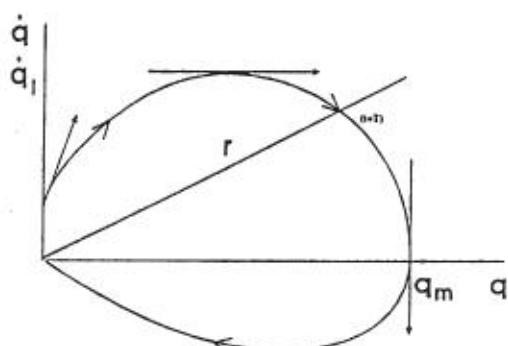
## Rotation optimale d'une ressource renouvelable

## Analyse sur un cycle

Considérons une ressource pérenne dont la croissance varie au cours du temps et dont la valeur en monnaie courante à l'instant  $t$  à la valeur certaine  $q$ , ne dépend que de l'âge. Soit  $\tau$  le taux de croissance instantané de cette valeur ( $\tau = \dot{q}/q$ , en notant  $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$ ) et  $r$  le taux d'actualisation. Nous raisonnons ici en temps continu. Sa valeur actualisée à la date 0 est  $y_t = q_t e^{-rt}$ .

Si la fonction  $q$ , fonction du temps, est continûment différentiable, la condition nécessaire d'optimalité de la valeur actualisée qui caractérise la durée optimale du cycle est l'égalité entre taux de croissance et taux d'actualisation (condition de Hotelling, voir aussi la figure 4.b pour une solution graphique dans un plan  $\{q, \dot{q}\}$  où une courbe est définie par l'abscisse curviligne  $t$ ):

$$\tau(T) = r \quad (a4)$$

Figure 4a. Courbe d'accumulation théorique  $q(t)$ Figure 4b. Accumulation  $q(t)$  et croissance  $\dot{q}(t)$ 

## Analyse sur un horizon fini

On considère ici une succession de  $n$  cycles sur une durée totale «assez longue» (i.e. le nombre de cycles est considéré comme assez grand). On note  $T_j$  la durée du cycle d'ordre  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ). Le programme de maximisation de la valeur actualisée en  $t = 0$  est alors:

$$\max_{T_j} \sum_{j=1}^n q(T_j) e^{-r \sum_{k=1}^{j-1} T_k}$$

Un raisonnement à rebours permet de résoudre ce problème, en considérant que la durée  $T$  du dernier cycle est libre, et, par récurrence, la durée du cycle d'ordre  $n - b$  ( $0 \leq b < n$ ) est obtenue par la relation suivante :

$$\frac{\dot{q}}{q}(T_{n-b}) = r \left( 1 + \sum_{k=1}^b q(T_{n-b+k}) e^{-r \sum_{i=1}^k T_{n-b+i}} \right) \quad (a5)$$

Si l'on impose que la durée de cycle soit constante sur une période totale de  $n$  cycles, il est aisé de vérifier que la nouvelle valeur optimale de rotation est telle que :

$$\frac{\dot{q}}{q}(T) = r \left( 1 + \frac{1}{e^{rT} - 1} - \frac{n}{e^{nrT} - 1} \right) \quad (a6)$$

#### *Analyse sur un horizon infini*

Il est évident que la durée optimale des cycles est constante. Elle est égale à :

$$T(T) = \frac{\dot{q}}{q}(T) = \frac{r}{1 - e^{-rT}} \quad (a7)$$

On retrouve au second membre de cette équation la limite du second membre de l'équation (a6) lorsque  $n$  tend vers l'infini. On notera que le choix des cycles sur un horizon qui en comporte plusieurs conduit à raccourcir la durée optimale des cycles par rapport au cas où le calcul se fait sur un seul cycle. Ce résultat est obtenu immédiatement en comparant les relations (a4) et (a7) et en utilisant la figure 4.b.

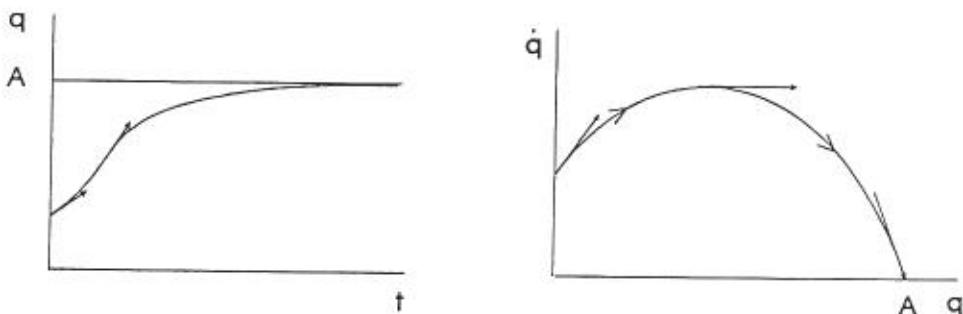
## ANNEXE 3

**Méthode d'estimation des paramètres de croissance  
d'un peuplement**

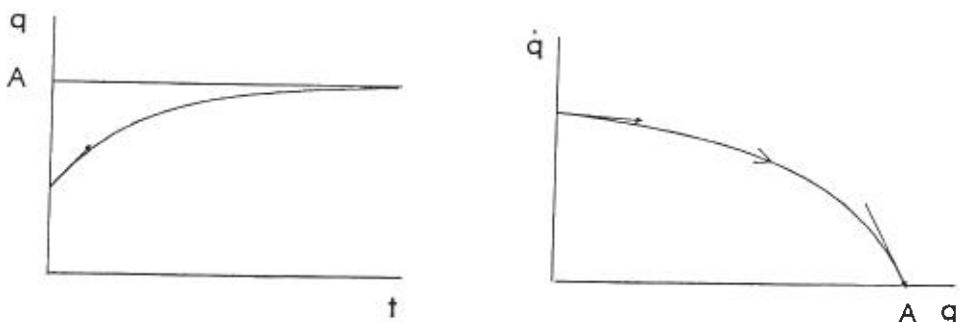
La forme générique d'une fonction de Richards est la suivante :

$$q_t = A (1 + c e^{-kt})^{1/(1-m)}$$

Figures 5a. Accumulation et croissance : fonction de Richards de type (I1)



Figures 5b. Accumulation et croissance : fonction de Richards de type (I2)



avec  $A > 0$  et  $k > 0$ . On considère les deux cas pratiques (R1),  $\{c > 0, m > 1\}$  et (R2),  $\{c < 0, 0 \leq m < 1\}$ , pour lesquels le taux de croissance reste positif sur la durée du cycle.  $A$  représente alors la valeur maximale, qui est aussi la valeur limite quand  $t$  tend vers l'infini. On vérifie que la courbe de croissance présente un point d'inflexion en  $t_1$ , ( $t_1 > 0$ ) si  $c(m - 1) > 1$ . Les figures 5 donnent une allure des courbes de croissance et leur traduction dans un plan  $\{q, \dot{q}\}$  dans les deux cas (I1),  $\{c/(m - 1) > 1\}$ , (I2) sinon. On se limitera aux cas où  $q_0 = 0$ , c'est-à-dire  $c = -1$ .

*Estimation de la courbe en valeur*

On suppose que la valeur totale du bois produit au cours d'un cycle par unité de surface (y compris les éclaircies) suit une fonction de Richards, de valeur nulle en début de cycle :

$$q_r = A (1 - e^{-kt})^b \quad (a8)$$

Le taux de croissance associé vaut, à l'instant  $t$ ,  $bk/(e^{kt} - 1)$ , soit, au premier ordre en  $t$ ,  $b/t$ . Si la croissance est de type II, la croissance est maximale en  $t$ , alors :

$$\frac{\dot{q}}{q} (t_p) = \frac{bk}{b-1} \quad (a9)$$

$$b = e^{kt_p} \quad (a10)$$

Nous faisons l'hypothèse que les courbes de croissance analysées présentent toutes un point d'infexion, et que la limite asymptotique  $A$  de la valeur cumulée est connue. Pour chaque essence que l'on suppose produite dans une région offrant de « bonnes conditions » de production, nous utilisons des observations  $q_1$  et  $q_2$  aux 2 âges les plus élevés  $t_1$  et  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ,  $q_2 > q_1$ ) dont nous disposons. En effet, plus le peuplement est âgé, plus les arbres ont un diamètre important, plus leur valeur marchande est approchable. En outre, la zone de la courbe qui nous intéresse le plus est celle où le bois est susceptible d'être récolté.

Tableau 4.  
Estimation des paramètres de croissance pour 5 essences

	$A$ ( $kF/ha$ )	$k$ ( $an^{-1}$ )	$b$
Frêne	751,30	0,022	3,77
Douglas	311,30	0,036	4,46
Peuplier	256,73	0,032	1,68
Cèdre	279,96	0,022	2,73
Chêne	520,00	0,028	15,0

La résolution de notre problème d'estimation se réduit à un système de 2 équations à 2 inconnues, qu'il est aisément de réduire à une équation en  $k$  n'ayant qu'une solution, et facile à résoudre par « balayage ». Soit  $g(k) = 0$  cette équation, avec  $g(k)$  :

$$g(k) = \frac{\ln(q_1/A)}{\ln(q_2/A)} = \ln(1-e^{-kt_2}) - \ln(1-e^{-kt_1}) \quad (a11)$$

On notera que l'équation ( $g(k) = 0$ ) équivaut en première approximation à l'équation :

$$Q = e^{k(t_2-t_1)}, \text{ avec } Q = \frac{\ln(q_1/A)}{\ln(q_2/A)} > 1$$

Les valeurs estimées pour les 5 essences retenues sont données dans le tableau 4.

*Détermination de la période de rotation optimale*

Elle s'appuie sur les calculs précédents, dans lesquels on intègre la valorisation nette cumulée des éclaircies effectuées au cours du cycle et que l'on note  $d_t$ . On fait l'hypothèse que la croissance estimée précédemment intégrait les ef-

fets des éclaircies au cours du cycle. On suppose enfin que le montant de la valorisation nette cumulée des éclaircies ne dépend plus du temps au delà d'un seuil que l'on suppose dépassé par la durée optimale du cycle. En d'autres termes, on néglige les coûts ou ressources de l'entretien du peuplement en fin de cycle. En notant  $d_s$  cette valorisation, on applique la relation (a7) pour la détermination de la durée optimale de rotation du peuplement :

$$\frac{bkAe^{-k_1}(1-e^{-k_1})^{b-1}}{A(1-e^{-k_1})^b + d_s} = \frac{r}{1-e^{-rl}} \quad (a12)$$

#### Détermination des courbes régionales

Pour tenir compte des différences de conditions de production entre les régions, on modifiera, pour une essence donnée, la valeur du seul paramètre  $k$ , modifiant ainsi le taux de croissance optimal (voir l'équation a9). Les disparités régionales sont fondées sur l'appréciation des observations suivantes.

- superficies et volumes de bois sur pied produits par régions, selon AGRESTE,
- zones géographiques subventionnées par le Fond forestier national,
- répartition géographique des principales essences exploitées dans les 3/4 nord de la France.

Pour chaque essence, connaissant l'âge minimal d'exploitation  $T_m$  correspondant, nous calculons la valeur maximale  $k_m$  du paramètre  $k$ , associée à cet âge, par l'équation (a12). On détermine les valeurs régionales de  $k$  selon les deux cas suivants de disponibilité d'une information régionale :

**Cas 1. Les volumes de bois sur pied et produits annuellement sont disponibles.**

Le rapport, volume de bois produit sur volume de bois existant donne une estimation du taux de croissance en volume des peuplements. On formule les deux hypothèses :

- dans la région où le taux est le plus fort,  $k$  est égal à  $k_m$ ,
- les valeurs régionales de  $k$  sont proportionnelles aux taux de croissance en volume.

Nous avons donc multiplié la première estimation des taux de croissance (voir le tableau 4) par une constante permettant d'obtenir ce résultat.

**Cas 2. Les volumes de bois sur pied et produits annuellement ne sont pas disponibles.**

Nous avons fait l'hypothèse que plus une essence présente un potentiel de croissance élevé en volume dans une région, plus la surface occupée par cette essence est grande. Nous avons supposé que les taux régionaux  $k$  sont proportionnels aux ratios d'érosion du potentiel économique donnés par le tableau 5. Pour calculer les valeurs du coefficient permettant de transformer ces ratios en taux de type  $k$ , nous avons procédé comme dans le cas précédent.

#### Détermination du taux régional d'érosion du potentiel économique des différentes essences

Ce taux traduit dans quelle mesure une essence est susceptible de se développer dans une région une fois que le calcul économique théorique en garantit la rentabilité. Dans un premier temps, nous supposons qu'une essence rus-

tique comme le pin ne subit pas d'érosion de son potentiel économique. Pour les autres essences, nous faisons l'hypothèse que leur adaptabilité dépend de l'exploitation forestière actuellement observée et du fait qu'elles puissent être subventionnées par le FFN.

Tableau 5. Accessibilité des surfaces libres par région AROPA2 et par essence

Départements (Région)	Pins	Peupliers	Douglas précieux	Feuillus	Chênes
8 21 52 54 55 57 89 (1)	1	0,40	0,25	0,51	0,81
22 29 56 (2)	1	0,11	0,32	0,32	0,34
35 44 49 53 79 85 (3)	1	0,35	0,25	0,37	0,40
18 36 37 41 45 86 (4)	1	0,50	0,25	0,34	0,79
33 40 (5)	1	0,44	0,32	0,43	0,26
9 16 17 31 32 47 64 65 82 (6)	1	0,35	0,30	0,49	0,42
12 24 46 48 81 (7)	1	0,18	0,44	0,39	0,43
3 19 23 58 71 87 (8)	1	0,13	0,79	0,45	0,82
15 42 43 63 69 (9)	1	0,16	0,60	0,49	0,44
11 26 30 34 (10)	1	0,12	0,27	0,18	0,10
25 39 70 74 88 90 (11)	1	0,20	0,26	0,59	0,55
1 38 73 (12)	1	0,38	0,32	0,69	0,38
4 5 7 13 83 84 (13)	1	0,03	0,29	0,15	0,07
14 50 61 72 (14)	1	0,26	0,25	0,51	0,45
28 77 78 91 95 (15)	1	0,27	0,28	0,55	0,51
10 51 (16)	1	0,91	0,25	0,65	0,71
2 27 59 60 62 76 80 (17)	1	0,61	0,25	0,77	0,48
67 68 (18)	1	0,34	0,25	0,57	0,54
6 66 (19)	1	0,03	0,25	0,17	0,03

Le tableau 5 donne les valeurs que nous retenons comme taux d'exploitabilité résumant ces éléments pour les régions du modèle AROPA2. Pour les autres essences que le pin, ce taux est le rapport entre accroissement maximal et accroissement moyen annuels de la ressource (source : AGRESTE, 1995).

Dans un deuxième temps, nous effectuons une péréquation entre les essences privilégiant les essences autres que le pin en tenant compte de leur rentabilité (tableau 7). Le tableau 6 intègre cette dimension supplémentaire. Il résume notre évaluation de la répartition des surfaces disponibles pour le boisement des jachères entre les essences choisies.

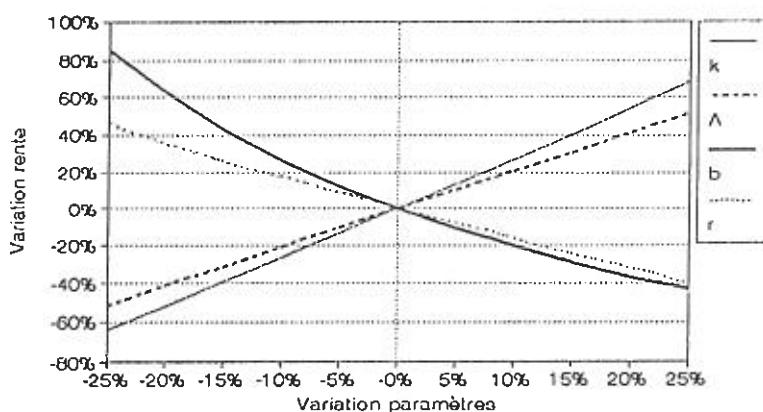
Tableau 6.  
Accessibilité relative  
des surfaces par  
région AROPA2 et  
par essence

<i>Région</i>	<i>Pins</i>	<i>Peupliers</i>	<i>Douglas</i>	<i>Feuillus précieux</i>	<i>Chênes</i>
1	0	0,40	0,25	0	0,35
2	0,68	0	0,32	0	0
3	0,40	0,35	0,25	0	0
4	0	0,50	0,25	0	0,25
5	0,24	0,44	0,32	0	0
6	0,35	0,35	0,30	0	0
7	0,56	0	0,44	0	0
8	0,21	0	0,79	0	0
9	0	0,40	0,60	0	0
10	0,73	0	0,27	0	0
11	0	0,20	0,26	0,54	0
12	0	0,38	0,62	0	0
13	0,71	0	0,29	0	0
14	0,75	0	0,25	0	0
15	0,45	0,27	0,28	0	0
16	0	0,75	0,25	0	0
17	0	0,51	0	0,49	0
18	0	0,34	0,25	0,41	0
19	0,75	0	0,25	0	0

## ANNEXE 4

### Sensibilité des rentes forestières vis-à-vis de quelques paramètres

Figure 6. Variations de la rente forestière vis-à-vis des paramètres de croissance et du taux d'actualisation (cas du peuplier)



Les rentes théoriques issues des calculs précédents sont présentées sur le tableau 7.

Les graphiques de la figure 6 permettent de mesurer la sensibilité de la rente actualisée vis-à-vis du taux d'actualisation  $r$  et des paramètres de croissance  $A$ ,  $b$  et  $k$  tels qu'ils ont été définis dans l'annexe 3. On présente ici les variations de rente pour une seule essence, le peuplier, pour laquelle l'amplitude de ces variations est intermédiaire parmi les cinq essences retenues dans l'étude.

Tableau 7.  
Rente théorique par  
essence et par région  
(1000 F/ha)

<i>Région</i>	<i>Douglas</i>	<i>Pins</i>	<i>Chênes</i>	<i>Frênes</i>	<i>Peupliers</i>
1	0,072	-0,166	-0,148	-0,284	0,122
2	0,104	-0,065	-0,272	-0,481	-0,549
3	0,072	-0,114	-0,197	-0,454	0,279
4	0,072	-0,123	-0,066	-0,468	0,763
5	0,103	-0,056	-0,274	-0,393	2,319
6	0,095	-0,165	-0,262	-0,315	1,286
7	0,176	-0,185	-0,283	-0,432	-0,305
8	0,449	0,082	-0,058	-0,377	-0,731
9	0,289	-0,159	-0,203	-0,325	0,009
10	0,079	-0,187	-0,333	-0,525	-0,215
11	0,077	-0,263	-0,3	-0,149	0,111
12	0,103	-0,256	-0,297	0,07	0,62
13	0,091	-0,229	-0,333	-0,528	-0,846
14	0,072	0,026	-0,288	-0,289	-0,401
15	0,084	-0,212	-0,306	-0,225	-0,109
16	0,072	-0,066	-0,222	-0,035	1,794
17	0,072	0,009	-0,286	0,277	1,034
18	0,072	-0,244	-0,259	-0,198	1,962
19	0,072	-0,266	-0,333	-0,526	-0,846