



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

*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.

Un modèle d'offre régional de sous-produits agricoles

V. RÉQUILLART

Les résidus ligno-cellulosiques de culture sont beaucoup mieux adaptés à la valorisation industrielle que les sous-produits issus de l'élevage, notamment en raison de leur moins grande teneur en humidité. L'offre de sous-produits agricoles est tributaire des décisions des agriculteurs confrontés au problème économique suivant : Est-il plus avantageux d'enfouir les sous-produits dans le but de maintenir ou améliorer la fertilité des sols, ou de vendre des sous-produits en renonçant ainsi à de possibles revenus futurs ? La présentation théorique sera illustrée d'exemples se rapportant souvent au cas des pailles de céréales. La méthode n'en demeure pas moins générale.

L'INTÉRÊT DU MODÈLE

Plusieurs facteurs nous ont poussés à bâtir un modèle d'offre régionale de sous-produits agricoles. L'utilisation industrielle des sous-produits agricoles est une réalité (papeterie, énergie, chimie) certes encore peu développée en France mais qui fait l'objet d'importants travaux de recherches. Ainsi les progrès réalisés sur l'hydrolyse enzymatique de la cellulose ouvrent des voies intéressantes pour la valorisation des produits ligno-cellulosiques.

En cas de développement de ces techniques, un problème de choix des substrats à utiliser se posera aux industriels dans la mesure où, d'un point de vue technique, de nombreux substrats permettent l'obtention des mêmes produits finis. Par ailleurs, les acteurs, qui seront amenés à effectuer ces choix, ont en général une faible connaissance des caractéristiques de l'offre des sous-produits agricoles. De plus, pour ce type de production le coût de la matière première représente une part importante du coût de production des outputs. Il paraissait donc intéressant de rassembler et structurer les connaissances techniques et économiques en la matière et de bâtir un outil permettant d'argumenter, d'une part, le choix des substrats et, d'autre part, l'organisation de la collecte.

Le développement d'un marché des sous-produits peut également avoir des effets néfastes sur le revenu d'un certain nombre d'agriculteurs. En effet, dans le cas de la paille par exemple, le développement de nouvelles valorisations pourrait entraîner une augmentation du prix de la paille qui se répercutera sur les charges des exploitations utilisatrices. Parallèlement cette augmentation de prix rend plus attractive la vente de paille en andains et modifie donc les termes du choix économique. Des agriculteurs à cours de trésorerie pourront alors être tentés de vendre des quantités excessives de paille au détriment de l'entretien organique de leurs sols (Reboul, 1977). Afin de prévenir l'apparition de ces effets pervers, il est souhaitable de pouvoir définir, au niveau d'une région, des scénarios d'utilisation de la ressource, en intégrant les différentes contraintes.

Enfin, à ce modèle d'offre régionale, nous avons ajouté un modèle représentant l'unité de transformation. L'objectif est alors l'analyse des effets d'échelle, de la gestion optimale des approvisionnements de l'usine et des coûts d'opportunité des produits finis.

Avant de présenter la démarche retenue pour modéliser l'offre au niveau régional, nous rappellerons quelques mécanismes micro-économiques régissant l'offre des sous-produits au niveau de l'exploitation agricole en mettant en évidence un certain nombre de ses spécificités.

L'OFFRE INDIVIDUELLE DE SOUS-PRODUITS

LES SOUS-PRODUITS : DES RESSOURCES NATURELLES ?

Une ressource naturelle peut être définie « *comme tout bien ou facteur de production qui est fourni par la nature et ne peut être reproduit par l'homme* » (Gaudet, in Angelier et al., 1983). Classiquement on distingue les ressources épuisables des ressources non épuisables. Au sein des ressources épuisables, on classe les ressources renouvelables (faune, flore) et les ressources non renouvelables (mines). Cette classification est en fait peu précise. Ainsi si l'on s'en tient à la définition stricte, toute action de l'homme en vue de l'enrichissement d'une ressource naturelle (sylviculture, repeuplement...) la transforme en ressource « non naturelle ». De la même façon, la terre qui au XIX^e siècle apparaissait comme non épuisable apparaît à l'heure actuelle comme épuisable (désertification, épuisement des sols...). Le progrès technique, la maîtrise de plus en plus importante de l'homme sur la nature rendent ces définitions quelque peu caduques. Ce qui semble important, s'agissant des ressources, c'est de déterminer si elles peuvent fournir indéfiniment un flux de production (énergie solaire). Les décisions concernent alors uniquement l'utilisation de ce flux ou, s'il s'agit d'un stock à gérer, les actions de gestion du stock prennent alors une dimension intertemporelle et peuvent concerner :

- l'exploitation proprement dite du stock, étant entendu que la notion même de stock est évolutive (nouvelles découvertes de gisement, amélioration du taux de récupération...)
- la gestion du stock, à savoir son entretien ou son amélioration (repeuplement, amélioration génétique, fertilisation...).

Dans le cas des sous-produits agricoles, la gestion intertemporelle de la fertilité des sols visera à déterminer quelle part peut être exploitée chaque année et quelle part doit être enfouie pour conserver à la production son caractère renouvelable.

On rejoint ainsi la remarque d'Abraham-Frois (in Junquera Lopez, 1985) : « *cultiver ce n'est pas seulement produire du blé (ou tout autre produit), c'est aussi veiller à l'entretien de la terre pour éviter son épuisement* ».

LES SPÉCIFICITÉS DE L'OFFRE

Des productions liées

Tout d'abord les sous-produits sont des productions liées. En effet, ils existent uniquement parce que les agriculteurs ont décidé de produire la culture dont ils sont issus. On peut considérer que l'agriculteur, dans le cadre de son système et des contraintes pesant sur celui-ci (terre disponible, emploi...), cherche à optimiser le choix de ses productions compte tenu des rapports de prix des productions et des facteurs. Or, les rapports de prix existants entre la production principale et le sous-produit sont souvent très élevés, le prix du sous-produit est lui-même très variable. Dans ces conditions, l'agriculteur ne tiendra généralement pas compte de la possibilité de vendre le sous-produit ⁽¹⁾. Les déterminants de la production annuelle de

⁽¹⁾ Cela est vrai en pratique. En théorie, si, en raison d'une variation du prix du sous-produit, le prix de vente de la culture varie, toutes choses égales par ailleurs, à l'optimum la surface consacrée à cette culture variera, sauf si elle se trouvait limitée par une contrainte spécifique, la duale correspondant à cette contrainte traduisant le niveau de rente de la culture. En l'absence de contrainte spécifique, la culture n'a pas de rente et toute variation de prix entraîne un réajustement global.

sous-produits ne dépendent donc pratiquement pas, dans les conditions actuelles de prix des productions et des facteurs, du prix de vente des sous-produits mais plutôt du prix de vente du produit principal. Cela a également pour conséquence de mettre les agriculteurs en position de force lors de négociations de prix avec les acheteurs.

Des usages concurrents

Les sous-produits agricoles trouvent déjà des valorisations, essentiellement zootechniques ou agronomiques. Ainsi, dans le cas des pailles de céréales, outre quelques utilisations diverses (champignons, granulations, énergie, industrie) qui n'utilisent qu'environ 2 % de la production annuelle, les deux tiers de celle-ci sont destinées à l'élevage, le reste étant soit enfoui, soit brûlé au champ.

Toute nouvelle valorisation se situe donc en concurrence avec les usages traditionnels. Cet état de fait peut engendrer des conflits d'intérêts entre utilisateurs. Ainsi on peut se demander si, en cas de tension sur le marché (baisse de la production suite à un climat défavorable, augmentation importante de la demande des éleveurs pour combler une pénurie de fourrage), une certaine solidarité entre céréaliers et éleveurs se manifesterait, mettant ainsi en cause l'approvisionnement des industriels.

Il faut également préciser qu'une part importante des sous-produits est intraconsommée. Cette intraconsommation étant assez stable d'une année sur l'autre, les quantités offertes à la vente sont susceptibles de varier dans de grandes proportions lorsque la production varie.

Le régime de propriété et l'atomisation du marché

À la différence d'un grand nombre de ressources naturelles renouvelables qui sont propriété commune, les sous-produits sont la propriété privée des agriculteurs ce qui ne sera pas sans conséquence sur les quantités offertes. On sait en effet que, pour les ressources renouvelables non appropriées, la situation de concurrence entre les producteurs entraîne l'épuisement de la ressource renouvelable (cf. modèle de Gordon).

Le régime de propriété privée entraîne l'atomisation de la ressource puisque près de 800 000 exploitations cultivent des céréales en France. Bien sûr, une grande partie de l'offre est concentrée dans quelques régions, où dans l'ensemble les systèmes sont de taille plus importante ; il n'en demeure pas moins que le nombre d'offeurs est élevé. Cela peut entraîner l'apparition de rentes de localisation et ce d'autant plus que les sous-produits sont en général peu denses donc d'un transport malaisé. En outre, les contraintes d'organisation de la collecte sont également très importantes.

Malgré cette atomisation de la ressource dans de nombreuses exploitations, nous verrons que le marché des sous-produits est de type oligopolistique, notamment mais non uniquement, en raison d'une différenciation des produits liée à la difficulté de transport du produit.

Par ailleurs, les acheteurs industriels ont, dans la plupart des cas, une faible maîtrise sur l'offre (manque de garantie d'approvisionnement, possibilité d'augmentation rapide des cours) ce qui se révèle être un frein important à la valorisation industrielle des sous-produits ; une exception : les coopératives agricoles qui, de par leur structure, maîtrisent de façon indirecte

l'offre. On peut d'ailleurs constater que la valorisation énergétique des pailles s'est principalement réalisée au sein des coopératives.

Le maintien de la fertilité du sol

Une partie des sous-produits doit être enfouie et ce pour maintenir « la fertilité des sols » c'est-à-dire en fait pour maintenir un caractère renouvelable à la production. Dans ce cadre, nous présentons un modèle théorique simple qui permettra de comprendre certains mécanismes de l'offre de sous-produits. On peut formaliser le problème de la façon suivante :

soit	Y_t	la production du bien principal à la date t
	q_t	la production du sous-produit à la date t
	S_t	le stock de matières organiques dans le sol à la date t
	p_t^y et p_t^q	les prix du bien principal et du sous-produit à la date t
	f	la fonction de production du bien principal $y_t = f(S_t)$
	g	la fonction de production du sous-produit $q_t = g(S_t)$ (on a une relation entre y_t et q_t : $q_t = u(y_t)$ puisque ceux-ci sont des produits liés).
	f et g	sont supposées continues, croissantes, convexes
	q_t	peut être soit enfouie : q_t^* soit vendue : q_t^v
	$q_t = q_t^* + q_t^v$	

L'équation d'évolution du stock de matières organiques est :

$$S_{t+1} = S_t + \alpha q_t^* - \sigma$$

où	α	= rendement en humus du sous-produit
	σ	= différence entre les pertes d'humus par minéralisation et les apports obligatoires de la culture.

On démontre alors qu'à l'optimum la productivité marginale est égale au produit du rapport des prix et du taux d'actualisation (voir annexe 1).

On a : $y_t^* = a \frac{p_t^q}{p_t^y}$, on peut également écrire :

$$f_s = \frac{a}{\alpha} \frac{p^q}{p^y}$$

Le taux optimal de matières organiques est donc fonction :

- du rapport des prix du sous-produit et du bien principal. Une augmentation du prix de vente des sous-produits entraîne un déplacement de l'optimum vers la gauche, c'est-à-dire vers des valeurs plus faibles du stock de matières organiques.

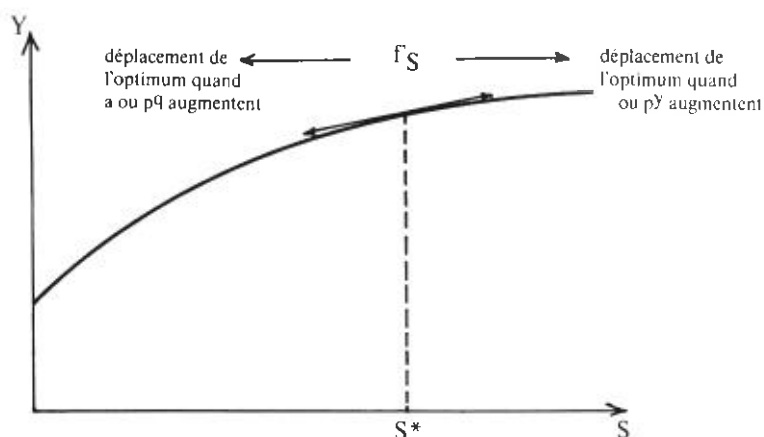
En effet, l'augmentation de revenu consécutive à la vente d'une quantité donnée de sous-produits est alors plus élevée ; elle devra donc être compensée par une plus grande variation de rendement. Compte tenu des propriétés de la fonction f (rendements non croissants), l'optimum se situe donc pour des valeurs plus faibles de S . Une diminution du prix de vente du produit principal produit le même effet.

- du taux d'actualisation retenu qui peut se traduire en termes de préférence pour le présent. Quand le taux d'actualisation augmente, le poids accordé au présent augmente. Une augmentation du taux se traduit donc par un déplacement de l'optimum vers des valeurs plus faibles de S .

– du coefficient α qui correspond au coefficient de transformation du sous-produit en humus.

Grphe 1 :

Fonction de production



Lorsque l'on est à l'optimum, la quantité de sous-produit à enfouir est telle que : $S_{t+1} = S_t \Leftrightarrow q_t^* = \frac{\sigma}{\alpha}$

Si le taux n'est pas optimum, alors il faut ajuster les enfouissements pour rejoindre l'optimum le plus vite possible. La vitesse d'ajustement ne dépend donc ni du taux d'actualisation ni du rapport des prix. Ces paramètres influent uniquement sur la position de l'optimum.

Dans la réalité, le problème est plus complexe, il est très difficile de relier directement stock de matières organiques et production et ce pour différentes raisons :

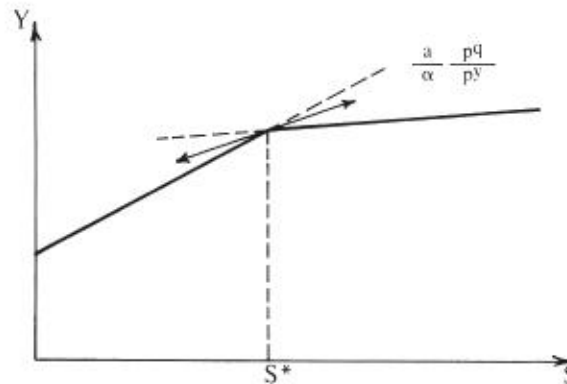
- L'extériorisation d'un manque de matières organiques n'est pas systématique, elle dépend notamment du type de sols, des conditions climatiques, du système de culture et des techniques culturales mises en œuvre. Il serait plus juste de dire qu'elle réduit les possibilités d'actions optimales, notamment par une diminution des jours disponibles.
- Le stock de matières organiques est un des éléments qui permet de caractériser « la fertilité des sols », ce n'est pas le seul.
- Les répercussions éventuelles d'une baisse du taux de matières organiques n'apparaissent que sur une période de temps assez longue, dans la mesure où la baisse est très lente.

Néanmoins, à partir de ce modèle simple, on peut expliquer deux types de comportements quant à la politique d'enfouissement à suivre.

Lorsque les agronomes définissent des seuils minima pour les taux de matières organiques cela revient à considérer une fonction de production coudée (cf. graphe 2) de telle sorte que l'optimum se trouve au point anguleux. C'est-à-dire que $\frac{a \cdot p^q}{\alpha \cdot p^r}$ est compris entre la valeur des dérivés à droite et

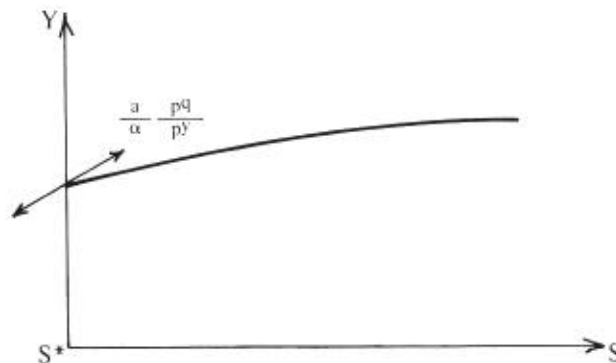
à gauche de f par rapport à S . On verra plus loin que, pour évaluer la contrainte humique pesant sur les exportations de sous-produits agricoles au sein d'une région, nous avons eu recours à une telle méthode. En effet, la base de départ de la quantification a été de retenir, selon les types de sol, un taux-seuil de matières organiques en dessous duquel le taux réel ne doit pas descendre.

Graphe 2 : Cas
d'une fonction
de production coudée



Dans la mesure où l'effet d'une baisse du taux de matières organiques est ténue et se manifeste relativement à long terme les agriculteurs peuvent percevoir une fonction de production très plate. Si la pente est toujours inférieure à la valeur optimale $\frac{a}{\alpha} \cdot \frac{p^q}{p^y}$ l'agriculteur aura tendance à ne pas tenir compte de cette variable, ce qui pourra entraîner à terme des risques de diminution de la fertilité des sols.

Graphe 3 : Cas
d'une fonction
de production « plate »



L'OFFRE INDIVIDUELLE

Un moyen classique de déterminer la fonction d'offre d'un produit est la programmation linéaire. La méthode consiste alors à imposer au modèle la vente de quantités croissantes du produit. L'évolution de la valeur duale de la contrainte de vente correspond alors à la fonction d'offre du produit. On obtient une courbe croissante par palier.

Cette détermination sur modèle nous donne une courbe d'offre théorique en situation de concurrence pure et parfaite. Or si, à première vue, nous sommes bien dans cette situation (nombre d'offreur important ne disposant que d'une faible quantité de produit homogène par rapport à l'ensemble), dans la réalité il n'en est rien et nous sommes en présence d'un marché de type oligopolistique. On sait alors que, selon les interdépendances entre les acteurs, les solutions d'équilibre sont différentes. Ainsi, en cas d'entente, les oligopoleurs agissent dans le but de maximiser le profit total de la branche qui devient alors un monopole. A l'optimum, le prix de vente du produit est supérieur aux coûts marginaux des oligopoleurs ; en outre, on a égalité entre tous les coûts marginaux.

Dans le cas exposé par Cournot, où chaque oligopoleur maximise son profit avec l'hypothèse que les autres ne modifient par leur production, à l'optimum le revenu total marginal de chaque entreprise est égal au coût marginal de l'entreprise. Le prix de vente du produit est supérieur à ce dernier ⁽²⁾. Dans le cas des pailles de céréales où le prix de vente est nettement supérieur au coût marginal, divers éléments permettent de justifier et d'expliquer l'existence d'un marché oligopolistique :

- Les coûts de transport étant élevés, le nombre d'offreurs du produit homogène (par exemple les offreurs se trouvant à une distance comparable de l'usine) se trouve diminué.
- La demande est peu soutenue et ne permet pas d'esquisser un schéma de concurrence. On a affaire à une entente au niveau des intentions de vente qui n'est pas soumise ensuite à la réalité des actes. Par ailleurs, l'enjeu économique pour les agriculteurs est faible ; ces derniers sont donc peu enclins à se livrer à une concurrence importante.
- Les répercussions de l'exportation des résidus de culture sur la fertilité des sols sont mal connues ; en d'autres termes, on connaît mal la courbe de coût marginal. L'exigence d'un prix assez élevé pour les sous-produits constitue donc une assurance sur les risques à long terme.

LE MODÈLE D'OFFRE RÉGIONALE

Grâce à ce modèle on veut pouvoir mesurer l'effet de la localisation d'unités industrielles sur leur coût d'approvisionnement. En outre, on doit pouvoir utiliser le modèle dans un cadre régional variant d'une étude à l'autre.

PRÉSENTATION SUCCINCTE DU MODÈLE

Le modèle construit fait appel à la programmation linéaire qui est une méthode mathématique permettant d'optimiser une fonction objectif linéaire soumise à des contraintes linéaires. Pour un scénario donné, défini par le nombre d'unités industrielles, leur taille et localisation, le modèle détermine, compte tenu des contraintes existantes, le schéma de collecte qui minimise le coût global d'approvisionnement des unités industrielles. La comparaison des solutions pour différents scénarios permet alors de mesurer l'effet de la localisation des unités sur le coût d'approvisionnement.

(2) En effet si l'on note π_i : le profit de l'entreprise i
 R_i : le revenu total de i
 C_i : le coût de la production i
 q_i : la production de i
 p : le prix de vente.

$$\text{On a } \pi_i = R_i - C_i(q_i) \text{ à l'optimum } \frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial R_i}{\partial q_i} = \frac{\partial C_i}{\partial q_i}$$

$$R_i = p \cdot q_i \Leftrightarrow \frac{\partial R_i}{\partial q_i} = p + q_i \frac{\partial p}{\partial q_i} = \frac{\partial C_i}{\partial q_i} \frac{\partial p}{\partial q_i} \text{ étant } < 0 \text{ on a } p > \frac{\partial C_i}{\partial q_i}$$

Plus précisément, la région étudiée est subdivisée en sous-régions (50 au maximum pour des raisons de taille du modèle) qui seront autant de localisations possibles pour les unités. Chaque sous-région est caractérisée par :

- sa localisation
- ses ressources (disponibilités en sous-produits et disponibilité humique)

Les activités retenues dans le modèle sont :

- l'achat des sous-produits. Les différents sous-produits présents dans les sous-régions (jusqu'à dix types de sous-produits agricoles, dix types de sous-produits industriels et dix types de produits forestiers) sont mis en concurrence.
- la récolte des sous-produits ; différentes techniques de récolte sont mises en concurrence. Cela permet également de mesurer l'intérêt d'utiliser des matériels polyvalents.
- le transport des ressources jusqu'aux unités ;
- le stockage ;
- l'utilisation des produits dans l'usine. Le coût de cette activité n'est pas pris en compte (on a voulu dans un premier temps étudier uniquement la phase d'approvisionnement). Cette activité permet de tenir compte de la « teneur » en produit final de chacune des ressources. On peut ainsi raisonner à production finale donnée.

Les contraintes venant limiter ces activités sont :

- les disponibilités en sous-produits agricoles, forestiers et industriels de chaque sous-région ;
- la disponibilité humique pour chaque sous-région qui vient limiter le volume total de sous-produits agricoles disponible dans une même zone ;
- les capacités des unités.

Pour un scénario donné, le modèle détermine donc le choix optimal des activités à retenir pour assurer l'approvisionnement des usines, à savoir quels sous-produits acheter, dans quelles sous-régions, avec quels types de machines les récolter, les transporter... Le principe d'utilisation du modèle est ensuite très simple. Il suffit de comparer les résultats obtenus pour différents scénarios de localisation ou de taille d'unités. Le recours à l'informatique permet également de tester l'effet sur l'optimum de la variation de différents paramètres ou hypothèses (disponibilité plus ou moins élevée, variation des prix de certaines ressources...).

Enfin l'analyse des valeurs associées aux contraintes réellement limitantes ou aux activités non retenues à l'optimum permet d'apprécier la stabilité de la solution obtenue.

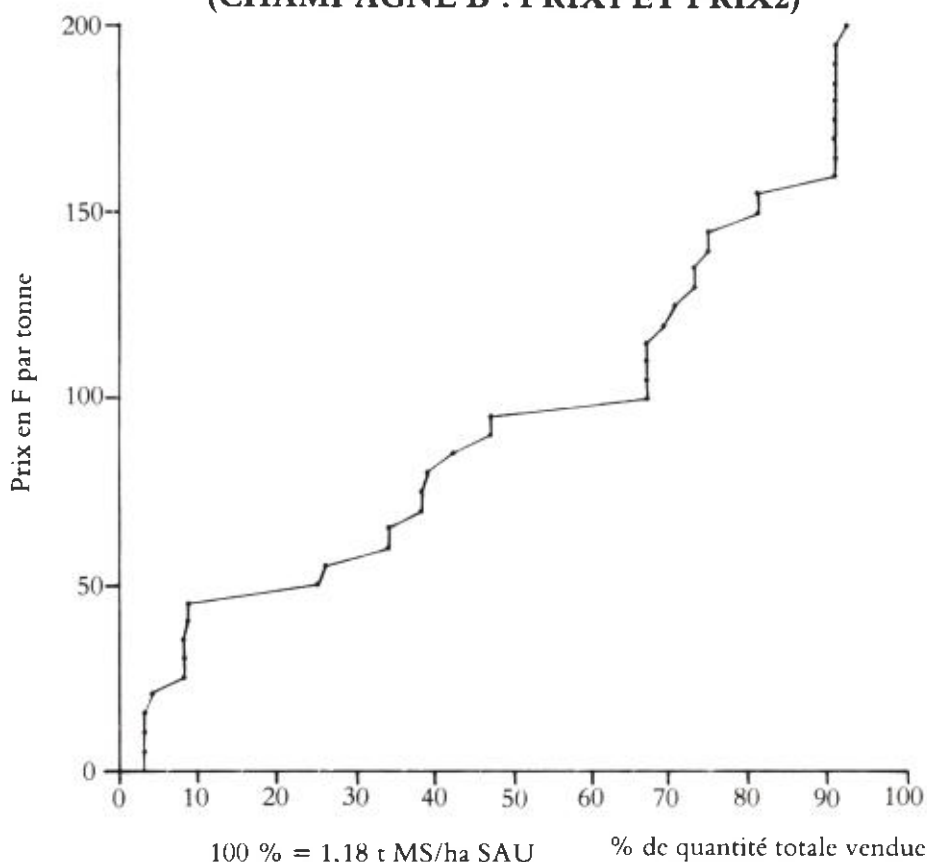
Pour plus de détails on présente, en annexe 2, la structure générale de la matrice de programmation linéaire.

LES DONNÉES RÉGIONALES NÉCESSAIRES CAS DE LA RÉGION CENTRE

L'offre de sous-produits agricoles

On a vu certaines caractéristiques de l'offre de sous-produits, notamment on a mis en évidence l'impossibilité de déduire une courbe d'offre agrégée au niveau régional à partir d'une analyse des coûts marginaux des sous-produits dans les différents types d'exploitation.

COURBES DE RÉPONSE GLOBALE (CHAMPAGNE B : PRIX1 ET PRIX2)



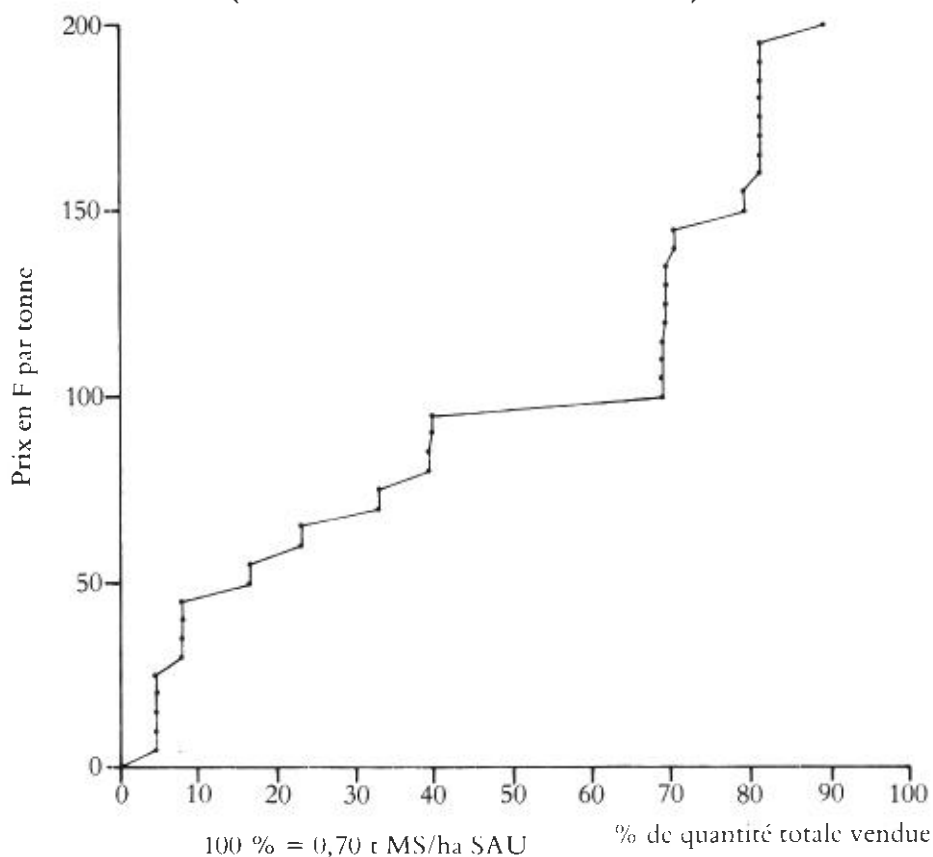
On a donc choisi d'évaluer l'offre du principal sous-produit, à savoir la paille de céréales, par enquête auprès d'agriculteurs des deux principales régions agricoles céréalières de la région Centre (Beauce, Champagne berri-chonne). Cela nous a permis de construire les courbes d'offres de la paille (cf. graphe 4). On a mis en évidence une différence significative entre les deux régions pour les quantités offertes par hectare mais non pour les prix demandés. Par ailleurs il n'a été mis en évidence aucun effet de la taille de l'exploitation sur les prix.

Les résultats obtenus pour ces deux régions ont servi de base pour évaluer l'offre des autres sous-régions. De même il a été nécessaire d'extrapoler les résultats obtenus sur la paille au cas des autres sous-produits en considérant que le niveau de rente exigé serait identique.

La méthode retenue (programmation linéaire) ne nous permet pas d'utiliser les courbes d'offre telles quelles dans le modèle puisqu'elles ne sont pas linéaires. Deux solutions étaient alors possibles :

- soit une linéarisation par palier des courbes d'offre par sous-région. On supposait alors que le prix d'achat d'un même sous-produit pouvait différer d'une zone à l'autre. (On fait alors apparaître des rentes différentielles liées à la localisation).
- soit une étude de simulation en considérant que les unités achetaient un même sous-produit à un prix unique quelle que soit sa localisation d'origine. Pour tester l'effet d'une variation du prix, et donc de la quantité offerte qui

COURBES DE RÉPONSE GLOBALE (BEAUCE : PRIX1 ET PRIX2)



lui correspond, on sera obligé d'effectuer plusieurs simulations et de comparer les résultats obtenus pour les différents prix testés.

Nous avons actuellement opté pour la seconde solution dans la mesure où dans la réalité, lorsqu'il y a utilisation de paille à des fins industrielles, le produit est acheté à un prix unique quel que soit son éloignement de l'usine.

La contrainte humique

Cette contrainte traduit la nécessité de ne pas exporter l'ensemble des résidus de culture et ce pour maintenir la fertilité des sols. Sa quantification est difficile, aussi avons-nous défini des scénarios plus ou moins exigeants. Le principe de la quantification est de fixer un seuil minimal au taux de matière organique dans les sols (cf. *supra*). Compte tenu de ce taux, du taux actuel de matière organique dans les sols, on établit un bilan humique prévisionnel et on en déduit les quantités de sous-produits non indispensables agronomiquement.

L'offre de produits forestiers

L'inventaire forestier national nous fournit pour chaque région forestière les statistiques concernant les types de peuplements, les accroissements... A partir de ces données, et de statistiques ou d'estimations d'experts sur les

autres utilisations du bois, on en déduit les disponibilités pour chaque sous-région. L'introduction de contraintes d'exploitation permet de définir plusieurs scénarios de disponibilités. Pour les interrogations que nous avons effectuées, on a estimé que le prix de vente du bois était égal au prix actuel constaté sur le marché de la trituration. On suppose donc une élasticité infinie du prix de l'offre.

L'offre de sous-produits industriels

Les sous-produits industriels peuvent également être pris en compte dans le modèle. L'estimation des courbes d'offre de ces sous-produits doit être établie par enquête.

Autres données

Un grand nombre de données doivent être rassemblées. Il s'agit, d'une part, du coût des différentes opérations prises en compte, à savoir récolte, transport, stockage des divers produits et, d'autre part, de la valeur des coefficients techniques retenus.

MÉCANISMES MIS EN ÉVIDENCE

Un exemple d'utilisation du modèle

Le modèle a été utilisé pour analyser l'approvisionnement dans le Centre d'unités de production d'ABE ⁽³⁾ à partir de produits ligno-cellulosiques. Nous présenterons ici, à titre d'illustration, quelques résultats concernant l'approvisionnement d'une unité produisant 80 000 tonnes d'ABE (pour plus de détails, voir Bouldoires – Soro, 1985, Requillart, 1986).

Effet de la localisation

Pour des hypothèses moyennes concernant certaines contraintes et les prix des sous-produits agricoles, le coût moyen d'approvisionnement varie d'environ 20 % lorsque la localisation de l'unité varie. Par ailleurs, les types d'approvisionnement des unités varient de façon importante (cf. tableau 1).

Tableau 1
Pourcentage de produits
utilisés par les usines selon
leur localisation

	Usine en Beauce (région céréalière)	Usine en Sologne (région forestière)
Paille	65,8 %	82,2 %
Canne de maïs	5,7 %	—
Pailles de colza	0,1 %	—
Bois	28,4 %	17,8 %

Ainsi une usine située en région céréalière a tendance à utiliser moins de paille de céréales qu'une usine située en zone forestière. Ce paradoxe s'explique facilement dans la mesure où la région forestière se trouve à proximité

⁽³⁾ La production d'acétone-butanol-éthanol fait l'objet de travaux de recherches importants notamment à l'Institut français du pétrole. Commencée dans les années 80 dans le cadre du programme « carburants de substitution », les recherches concernent plus largement l'hydrolyse enzymatique de la cellulose et la valorisation des produits obtenus, notamment les sucres.

de deux grandes régions céréalières ; l'usine s'approvisionne prioritairement en paille. A l'inverse, en région céréalière, elle s'approvisionne en paille dans sa région puis en bois. Elle n'a pas intérêt à utiliser la paille de la deuxième grande région céréalière (Champagne berrichonne) qui se trouve trop éloignée.

Choix de techniques

Le modèle permet de déterminer les techniques optimales notamment en matière de transport ou de conditionnement. Ainsi, dans le cas des pailles, selon la distance ressource-usine, le type de conditionnement retenu varie. Quand la distance croît, on utilise en premier lieu des presses à balles rondes, puis des presses à grosses balles carrées dont le coût de récolte est certes plus élevé mais dont le transport est moins onéreux.

Contraintes limitantes

Au sein d'une zone donnée, l'ordre de préférence des produits s'établit comme suit : paille, bois, cannes de maïs, colza. Pour les sous-produits agricoles, la contrainte limitante sera soit la disponibilité en paille soit la contrainte humique. Les valeurs duales sur ces contraintes seront, dans le cas étudié (usine de 80 000 t située en Beauce), très élevées, de l'ordre de 170 F/t de matière sèche pour la contrainte de disponibilité en paille et de l'ordre de 2 000 F/t d'humus pour la contrainte humique ; cela signifie que toute technique mise en œuvre permettant d'amener une tonne « d'humus » est économiquement intéressante si son coût est inférieur à 2 000 F/t d'humus apporté. Ainsi le réépandage des sous-produits de fabrication de l'ABE (boues contenant la lignine) pourrait être une opération envisageable.

Prix des sous-produits

Nous avons testé l'effet d'une variation du prix des sous-produits, et par là-même des quantités offertes, sur le coût d'approvisionnement des unités. Il apparaît qu'il n'est pas toujours plus intéressant d'acheter la paille à 50 F/t de matière sèche plutôt que 100 (cf. tableau 2). En effet, l'économie réalisée sur le prix d'achat des sous-produits agricoles ne permet pas toujours de compenser l'augmentation des coûts de transport due à l'augmentation de l'aire d'approvisionnement et l'obligation d'utiliser d'autres produits moins intéressants. Il est quelquefois avantageux d'acheter les produits agricoles au prix le plus élevé.

Tableau 2
Indice des coûts d'approvisionnement selon le prix d'achat des sous-produits agricoles

Zone d'implantation de l'usine ^(a)	H1 ^(b)	H2 ^(b)	H3 ^(b)
Beauce (Eure-et-Loir)	103	100	109
Sologne	103	105	117
Champagne	114	118	125
Champagne berrichonne	106	104	111

^(a) On a testé 28 implantations (la région Centre a été subdivisée en 28 sous-régions).

^(b) Prix d'achat des sous-produits :

H1 : valeur minérale (paille, maïs et colza à 50, 88 et 86 F/t)

H2 : valeur minérale, plus 50 F/t

H3 : valeur minérale, plus 110 F/t.

Implantation des unités

Pour une production régionale donnée (80 000 t/an), on a simulé l'implantation de deux usines. Il apparaît d'une part que les coûts d'approvisionnement diminuent d'un peu plus de 10 % et surtout que cela offre un plus large éventail de choix d'implantation.

PRISE EN COMPTE DU RISQUE ET DE LA VARIABILITÉ

Bien évidemment l'approvisionnement des unités sera soumis à de nombreux aléas sur la production ou les prix. On peut analyser certaines incidences de ces variations par simulation de scénarios sur des quantités offertes ou sur les prix. C'est un premier élément d'analyse, mais il ne prend pas en compte les fréquence d'apparition des scénarios.

Dans le cas étudié, le prix de certaines ressources, particulièrement celui des sous-produits agricoles, peut varier dans des proportions assez importantes d'une année sur l'autre. Ne pas prendre en compte ce facteur d'incertitude peut conduire à privilégier un produit plus avantageux en moyenne, mais en fait plus risqué et éventuellement délaissé dans la réalité. Afin de prendre en compte ce risque sur les prix, on introduit dans le modèle, non seulement le prix moyen, mais également les écarts à la moyenne observée sur plusieurs années. L'optimisation reste la même, à savoir la minimisation du coût global d'approvisionnement calculé avec les prix moyens, mais on introduit des contraintes supplémentaires, le coût d'approvisionnement ne devant pas dépasser une valeur seuil dans plus de x % des cas (cf. Bouldoires – Soro, 1985).

On a utilisé, dans l'étude du cas de la production d'ABE, une telle approche en supposant que seul le prix des pailles de céréales était incertain. On constate qu'au fur et à mesure que l'exigence augmente, ce qui se traduit par une diminution de la valeur seuil, le coût moyen d'approvisionnement augmente et les produits sûrs viennent se substituer à la paille dans l'approvisionnement. L'augmentation du coût moyen d'approvisionnement peut s'interpréter comme le prix d'une assurance permettant de se garantir contre des variations trop importantes des coûts réels.

LIMITES DU MODÈLE

Le modèle présenté peut être considéré comme un outil d'aide à la décision. En effet, il permet de mesurer la conséquence des choix de localisation et taille des unités sur les coûts et l'organisation de l'approvisionnement. L'analyse des résultats permet de mettre en évidence les mécanismes mis en jeu. Enfin le modèle permet de tenir compte de plusieurs facteurs déterminant l'offre des sous-produits agricoles, notamment la contrainte humique, l'incertitude pesant sur les prix et le comportement d'offreur des agriculteurs. Néanmoins, il importe de bien préciser les limites du modèle afin de ne pas interpréter abusivement les résultats.

En premier lieu, il convient de rappeler que l'ambition de cette modélisation est d'apporter des éléments économiques permettant de chiffrer la conséquence de choix. En aucun cas, il ne s'agit de déterminer quel est le meilleur choix sachant que de telles décisions ne dépendent pas uniquement des facteurs purement économiques pris en compte. De nombreux autres facteurs, économiques ou non, interviennent.

Le découpage géographique

Cette limite tient plus à l'utilisation du modèle qu'à sa construction proprement dite. En effet, ayant uniquement quantifié les ressources disponibles dans l'aire d'étude, le modèle ignore totalement l'extérieur. Lors des simulations, les implantations d'unités dans les zones de bordure se trouvent donc artificiellement désavantagées puisqu'il est bien évident que, dans la réalité, on pourra s'approvisionner dans les zones non prises en compte par le modèle. On pallie cette lacune en introduisant les disponibilités à l'extérieur de la région et ne testant que des implantations à l'intérieur de la région.

La fiabilité des données

On a vu que, pour chaque sous-région, il fallait rassembler de nombreuses données concernant l'offre de produits ou la contrainte humique. Un certain nombre de ces données statistiques existent mais il faut souvent compléter ces informations par des enquêtes, ce qui n'est pas faisable pour chaque sous-région. On procède alors à des extrapolations. Par ailleurs, certaines données sont difficiles à quantifier précisément (évaluation de la contrainte humique par exemple) ; dans ce cas on procède par « dire d'experts » avec toute la subjectivité que cela comporte.

Dès que les données sont peu précises, on procède à des interrogations du modèle pour différents jeux d'hypothèses de façon à mesurer l'effet d'une variation des paramètres mal connus.

La non prise en compte de la transformation

La minimisation des coûts globaux de production passe par la modélisation de la transformation des produits et, en particulier, par la prise en compte de possibles effets d'échelle au niveau de l'usine. L'optimum étant alors un compromis entre une tendance à augmenter le nombre des unités, et donc diminuer leur taille pour minimiser les coûts d'approvisionnement, et à diminuer le nombre des unités, et donc augmenter leur taille pour minimiser les coûts de transformation. L'objectif de cette modélisation complète, outre l'analyse de l'approvisionnement et des effets d'échelle, est l'étude des coûts d'opportunité des produits finis.

CONCLUSION

L'offre de sous-produits agricoles présente un certain nombre de caractéristiques qui sont fondamentales.

Bien que le nombre de vendeurs du produit homogène soit assez élevé, un marché de type oligopolistique impliquant un prix de vente supérieur au coût marginal s'est mis en place. Il semble en effet qu'il y ait entente entre les différents offreurs. Cette entente est rendue possible par deux facteurs principaux :

- une demande peu soutenue qui ne permet pas à un processus de concurrence de se mettre en place. Ainsi l'entente n'est pas soumise à la réalité d'un marché actif qui pourrait inciter certains producteurs à baisser les prix pour s'approprier des parts de marché.
- en cas de vente au coût marginal, l'enjeu économique serait relativement faible pour chaque acteur. Cette caractéristique n'incite guère à la mise en place d'une concurrence importante.

A plus long terme, des incertitudes existent. En effet la vente de sous-produits aujourd'hui peut entraîner une baisse des revenus futurs via une diminution de la fertilité des sols. Néanmoins ces éventuelles répercussions sont très mal connues. D'une part, les effets sont très ténus et se mesurent plus par une diminution de la facilité du travail d'un sol entraînant une augmentation des risques d'accidents culturels que par une baisse systématique du rendement. D'autre part, on évalue très mal les corrections éventuelles permises par le progrès technique. Ces incertitudes impliquent une mauvaise connaissance du coût marginal des sous-produits. L'écart entre le prix de vente exigé par les agriculteurs et le coût marginal n'intégrant pas le long terme peut alors être interprété comme une assurance.

La position dominante des agriculteurs qui, en ne vendant pas les sous-produits, ne renoncent qu'à une faible augmentation de revenu et les incertitudes sur les répercussions d'un non-enfouissement des résidus de culture sont deux freins puissants au développement des valorisations industrielles des sous-produits agricoles dans la mesure où les industriels n'ont pas une sécurité d'approvisionnement importante.

Le modèle régional construit, outil d'aide à la décision, a permis de bien analyser les problèmes liés à l'approvisionnement d'unités de transformation. Dans le cas de la production d'ABE, la paille de céréales apparaît comme le sous-produit agricole le plus adapté. Il apparaît également que la contrainte humique est souvent la plus limitante, conférant à la tonne « d'humus potentiel » une valeur d'usage très élevée, jusqu'à 2 000 francs la tonne. Le choix de la localisation des unités pour la taille des usines analysées entraîne une variation du coût d'approvisionnement global d'environ 20 %, ce qui n'est pas négligeable dans la mesure où le coût de la matière première représente une part importante du coût total de production. De plus la comparaison des coûts d'approvisionnement d'unités situées dans différentes régions françaises fera peut-être apparaître des répercussions plus importantes que celles que l'on obtient lorsque l'on étudie le choix au sein d'une région.

Un certain nombre d'incertitudes demeure, notamment celles liées à l'offre de sous-produits agricoles ; l'intérêt du modèle est alors de tester des scénarios. On a également montré que le risque de fluctuation des prix a pu être considéré.

A l'avenir, la prise en compte de la transformation permettra de pousser un peu plus loin l'analyse de la production des produits issus de la biomasse ligno-cellulosique et l'analyse des rapports économiques entre acteurs au sein d'une filière.

ANNEXE 1

Calcul du régime optimal d'enfouissement

Le revenu d'une période t et pour un régime i s'écrit alors :

$$R_{t,i} = p_t^y \cdot y_{t,i} + p_t^q (q_{t,i} - q_{t,i}^v) = p_t^y \cdot y_{t,i} + p_t^q \cdot q_{t,i}^v$$

Le revenu cumulé actualisé s'écrit :

$$R_i = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_{t,i}}{(1+a)^{t-1}} \quad (a = \text{taux d'actualisation})$$

Si l'on compare deux conduites différentes 1 et 2, 2 sera préféré à 1, si

$$R_2 - R_1 \geq 0 \text{ cad. } \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_{t,2} - R_{t,1}}{(1+a)^{t-1}} \geq 0$$

$$\sum_{t=1}^{\infty} \frac{p_t^y (y_{t,2} - y_{t,1}) + p_t^q (q_{t,2}^v - q_{t,1}^v)}{(1+a)^{t-1}} \geq 0$$

On suppose dans la suite que :

$$\forall t, t' \quad S_{t,1} = S_{t',1} \Rightarrow q_{t,1} = q_{t',1}, \quad q_{t,1}^c = q_{t',1}^c \text{ et } q_{t,1}^v = q_{t',1}^v = \bar{q}_1^v$$

$$\text{c'est-à-dire } q_{t,1}^c = \frac{\sigma}{\alpha}$$

On suppose donc que l'on enfouit tous les ans la quantité de sous-produit qui maintient le stock de matière organique inchangé. On a donc :

$$\forall t, t' \quad y_{t,1} = y_{t',1} = \bar{y}_1$$

$S_{1,1} = S_{1,2}$ (à l'origine les stocks sont identiques)

$$\forall t \neq 1, \forall t' \neq 1 \quad S_{t,2} = S_{t',2} \quad \text{et} \quad S_{1,2} \neq S_{t,2}$$

$$\Rightarrow q_{t,2} = q_{t',2}$$

$$q_{t,2}^c = q_{t',2}^c = \frac{\sigma}{\alpha} \quad \begin{matrix} \forall t \neq 1 \\ \forall t' \neq 1 \end{matrix}$$

$$q_{t,2}^v = q_{t',2}^v = \bar{q}_2^v$$

Mis à part la première période, on enfouit la quantité de sous-produit qui maintient le stock de matière organique inchangé. On a donc :

$$y_{1,2} = y_{1,1}$$

$$y_{t,2} = y_{t',2} = \bar{y}_2 \quad \forall t \neq 1, \forall t' \neq 1$$

f et g sont continues, croissantes, concaves.

On a donc :

$$R_1 = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{p_t^y y_{t,1} + p_t^q q_{t,1}^v}{(1+a)^{t-1}} = \bar{y}_1 \sum_{t=1}^{\infty} \frac{p_t^y}{(1+a)^{t-1}} + \bar{q}_1^v \sum_{t=1}^{\infty} \frac{p_t^q}{(1+a)^{t-1}}$$

$$R_2 = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{p_t^y y_{t,2} + p_t^q q_{t,2}^v}{(1+a)^{t-1}} = \bar{y}_1 p_1^y + \bar{y}_2 \sum_{t=2}^{\infty} \frac{p_t^y}{(1+a)^{t-1}} + q_{1,2}^v p_1^q + \bar{q}_2^v \sum_{t=2}^{\infty} \frac{p_t^q}{(1+a)^{t-1}}$$

$$R_2 - R_1 = (\bar{y}_2 - \bar{y}_1) \sum_{t=2}^{\infty} \frac{p_t^y}{(1+a)^{t-1}} + (q_{1,2}^v - \bar{q}_1^v) p_1^q + (\bar{q}_2^v - \bar{q}_1^v) \sum_{t=2}^{\infty} \frac{p_t^q}{(1+a)^{t-1}}$$

Si de plus on suppose que $p_t^y = p_{t'}^y = p^y \quad \forall t, t'$

$$, \quad p_t^q = p_{t'}^q = p^q \quad \forall t, t'$$

2 est préféré à 1 si

$$p^q (q_{1,2}^v - \bar{q}_1^v) \geq \left[(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) p^y + (\bar{q}_1^v - \bar{q}_2^v) p^q \right] \frac{1}{a}$$

2 sera préféré à 1 si l'augmentation des recettes en période 1, consécutive à

la vente d'une quantité supplémentaire de sous-produit est supérieure à la diminution des recettes futures actualisées consécutive à la diminution de production.

On notera que : $\bar{q}_2^v - \bar{q}_1^v = \bar{q}_2 - \bar{q}_1$

Dans le cas des sous-produits $p^q \ll p^y$
 $(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)$ et $(\bar{q}_2 - \bar{q}_1)$ du même ordre de grandeur

l'expression devient alors $(\bar{q}_{i,2}^v - \bar{q}_i^v) p^q \geq (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \frac{p^y}{a}$

Etant donné que : $q_{i,2}^v + q_{i,2}^c = \bar{q}_i^v + \bar{q}_i^c$

On obtient alors : $(\bar{q}_i^c - q_{i,2}^c) p^q \geq (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) p^y$

Pour de faibles variations (passage à la limite) on en déduit qu'à l'optimum la productivité marginale est égale au produit du rapport des prix et du taux d'actualisation. En effet :

$$(\bar{q}_i^c - q_{i,2}^c) p^q \geq (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \frac{p^y}{a}$$

$$\Leftrightarrow \Delta q \cdot p^q \geq \Delta y \cdot \frac{p^y}{a}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Delta y}{\Delta q} = \frac{p^q}{p^y} \cdot a \quad \text{Par passage à la limite}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{y_{q^c}^c = \frac{a \cdot p^q}{p^y}}$$

$$\text{Or } y_{q^c}^c = \frac{\partial y}{\partial q^c} = \frac{\partial f(s)}{\partial q^c} = \frac{\partial f}{\partial s} \cdot \frac{\partial s}{\partial q^c} = f_s \cdot \alpha$$

$$\Leftrightarrow \boxed{f_s = \frac{a \cdot p^q}{\alpha \cdot p^y}}$$

Annexe 2

ACTIVITÉS	ACHAT DES PRODUITS (Tms)	ACHAT DE MACHINES (unité)	RÉCOLTE (Tms)	TRANSPORT (Tms)	STOCKAGE (Tms)	CONDITIONNEMENT (Tms)	UTILISATION DANS LES USINES (Tms)	SECOND MEMBRE	Nombre de ce type
CONTRAINTES	$X_r(X_p + X_{pi} + X_{pf})$	$X_m + X_{ms}$	$X_r X_p X_m$	$X_r X_u(X_p X_m X_c + X_{pf} X_{cf} + X_{pf} X_{cf})$	$X_u X_u(X_p + X_{pi} + X_{pf})$	$X_u X_u X_{pf}$	$X_u X_u(X_p + X_{pi} + X_{pf})$		
Fonction Objectif	COEFFICIENTS DE COÛTS DES DIFFÉRENTES OPÉRATIONS								1
Humus (T)	+ X							disponibilité en humus \leq	X_r
Disponibilité en sous-produits (Tms)	+ 1							disponibilité en sous-produits dans les régions \leq	$X_r(X_p + X_{pi} + X_{pf})$
Machines de récolte (unité)		+ 1						nombre de mach. disponibles par type \leq	$X_m + X_{ms}$
Biomasse à récolter ou à transporter (Tms)	- 1		+ 1	+ 1				≤ 0	$X_r(X_p X_m + X_{pi} + X_{pf})$
Travail pour la récolte (heures)		- X	+ X					≤ 0	$X_{tm}(X_m + X_{ms})$
Biomasse récoltée (Tms)		- X	+ X	+ 1				≤ 0	$X_r X_p X_m$
Biomasse à l'unité (Tms)			- 1	- 1	- X	+ 1	+ 1	≤ 0	$X_u X_u(X_p + X_{pi} + X_{pf})$
Biomasse conditionnée (Tms)				- 1		- 1		≤ 0	$X_u X_u X_{pf}$
Taille de l'usine (T. sucres)						- 1	+ X + X + X	capacité de trait. : période annuelle \leq	$X_u(X_{tu} + 1)$

Tms : Tonnes de matière sèche

Commentaires :

 X_r = nombre de sous-régions. X_p, X_{pi}, X_{pf} = nombre de sous-produits agricoles, industriels, forestiers. X_m, X_{ms} = Nombre de types de machines principales et machines supplémentaires de récolte. X_{tm} = nombre de périodes de récolte. X_u = nombre d'usines. X_c, X_{ci}, X_{cf} = nombre de types de camions pour le transport des sous-produits, agricoles, industriels et forestiers. X_{tu} = nombre de périodes d'utilisation dans l'usine.

BIBLIOGRAPHIE

BOULDOIRES (J.), SORO (S.), 1985. – *Utilisation d'un modèle d'approvisionnement en biomasse d'unités industrielles. Le cas de l'acétone-butanol-éthanol en région Centre*. Grignon, INRA-ESR, 148 p. + annexes (Notes et Documents, n° 11).

COCHIN (B.), 1977. – *Un modèle économique de filières de récupération des pailles. Application à la production d'énergie pour quelques industries agro-alimentaires du nord de l'Aube*. Grignon, INRA-ESR, 110 p. + annexes.

COHENDET (P.), FITOUSSI (J.-P.), HÉRAUD (J.-A.), 1979. – Ressources naturelles et irréversibilité. *Revue d'Economie Politique*, n° 3, p. 379-388.

FLAMAND (F.X.), 1984. – *Approvisionnement d'une usine de production d'acétone-butanol-éthanol à partir de biomasse ligno-cellulosique. Etude de gisements et coûts. Cas de la région Centre*. Grignon, INRA-ESR, 114 p. + annexes, (Notes et Documents, n° 1).

GAUDET (G.), 1983. – Rente minière, prix et marché des ressources naturelles non renouvelables, p. 15-39, in : ANGELIER *et al.* – *Rente et structure des industries de l'énergie*. Grenoble, PUG, collection Energie et société, 229 p.

HENDERSON (J.-M.), QUANDT (R.E.), 1967. – *Micro-économie. Formulation mathématique élémentaire*. Paris, Dunod, 290 p.

JUNQUEIRA LOPES (R.M.E.), 1985. – *L'économie des ressources renouvelables*. Economica, Paris, 145 p.

MAHÉ (L.P.), 1973. – *Théorie économique et problèmes d'environnement*. Rennes, INRA-ESR, (Cours à l'ENSAR), 154 p.

RAMADE (F.), 1981. – *Ecologie des ressources naturelles*. Masson, Paris, 322 p.

REBOUL (C.), 1977. – Déterminants sociaux de la fertilité des sols. *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, (17/18), p. 85-112.

REQUILLART (V.), 1984. – *Valorisation énergétique des pailles de céréales. Analyse économique des filières et de la concurrence entre usages*. Paris, Pyc, 157 p.

REQUILLART (V.), 1986. – Un modèle d'approvisionnement d'unités de transformation de sous-produits agricoles forestiers et industriels. In *Compte rendu : contrat cadre AFME-INRA*, Grignon, INRA-ESR, s.p.