

# Approche théorique pour l'élaboration d'un indicateur de durabilité d'un processus de production agricole

Sylvie Ferrari

*Quels indicateurs pour apprécier la durabilité de l'agriculture ? Parmi les différents concepts pouvant être appliqués pour répondre à cette question, cet article propose de faire appel aux apports de la thermodynamique. L'auteur montre tout d'abord l'intérêt d'une approche positive de la multifonctionnalité de l'agriculture, puis il présente une démarche de construction d'un indicateur de durabilité basé sur l'énergie utilisable (exergie). Enfin, la question de la mesure des externalités est posée.*

D'un point de vue économique, la durabilité caractérise généralement le développement d'une économie où le bien-être des agents évolue de manière non décroissante dans le temps. La non-décroissance de la consommation par tête au cours du temps rend compte de la signification du développement durable proposée en 1987 par la commission mondiale sur l'environnement et le développement présidée par Gro Harlem Brundtland : « un développement qui permet la satisfaction des besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ». Trois dimensions interdépendantes caractérisent la durabilité :

– la dimension économique, qui se traduit par une combinaison optimale des ressources dans le temps afin de maximiser le bien-être des agents ;

– la dimension sociale, qui implique la garantie d'un accès aux ressources afin de réaliser un niveau de bien-être satisfaisant pour les générations successives ;

– enfin, la dimension environnementale, qui vise à gérer les stocks de ressources naturelles et à préserver la qualité de l'environnement.

Appliquée à une activité économique particulière, la durabilité contribue à caractériser la manière de produire. Dans le cas de l'agricul-

ture, l'activité doit permettre de produire en quantité suffisante des produits alimentaires et des cultures industrielles de façon efficace, rentable et sûre, afin de satisfaire une demande mondiale croissante sans dégrader les ressources naturelles et l'environnement (OCDE, 1995). On peut noter que cette proposition s'inscrit dans le prolongement de l'Agenda 21 (chapitre 14), où le principal objectif d'un développement agricole et rural durable est « d'assurer une augmentation de la production alimentaire de manière durable et d'améliorer la sécurité alimentaire ».

Dans ce contexte, la durabilité de l'activité met l'accent sur les moyens permettant de garantir l'objectif de satisfaction des besoins alimentaires et industriels avec en particulier le respect de contraintes économique (efficacité) et environnementale (préservation de l'environnement) (Union européenne, 1999).

De manière implicite, les trois dimensions du développement durable impliquent de considérer la multifonctionnalité de l'agriculture d'un point de vue normatif. Dans le cas de la France, c'est notamment ce que traduit la loi d'orientation agricole du 9 juillet 1999. Le premier article de cette loi stipule : « La politique agricole prend en compte les fonctions économique, environnementale et sociale de l'agriculture et participe à l'aménagement du territoire, en vue d'un développement durable. Elle a pour

## Les contacts

CERESUR, université de La Réunion, en délégation au Cemagref, UR Agriculture et dynamique de l'espace rural, 50 Avenue de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas Cedex

1. Pour une synthèse originale, se reporter à : Vidal, C. ; Marquer, P., 2002 *Vers une agriculture européenne durable. Outils et méthodes*, Educagri Éditions, Dijon, 111 p.
2. Ici, le déchet est un résidu potentiellement préjudiciable pour l'environnement. D'un point de vue physique, il désigne une quantité de matière et d'énergie qui est disponible dans l'environnement sous une forme inutilisable car dégradée. Dans le contexte de cet article, certains résidus de récoltes ne sont pas pris en compte (cas par exemple de pailles de céréales enfouies sur place).
3. L'aménité considérée ici est posée comme dépendante de l'activité de production agricole. Ce n'est pas toujours le cas.

*objectifs (...) la production de biens agricoles, alimentaires et non alimentaires de qualité (...) la mise en valeur des productions de matières à vocation énergétique ou non alimentaire dans le but de diversifier les ressources énergétiques du pays (...) la préservation des ressources naturelles et de la biodiversité (...)* ».

Les diverses fonctions sociales, environnementales et économiques de l'agriculture se confondent ainsi avec les objectifs sociétaux du développement durable auxquels ce secteur est invité à participer. Parallèlement, la nature durable de l'activité nécessite une démarche évaluative.

C'est dans cette perspective que différents travaux relatifs à l'évaluation de la multifonctionnalité de l'agriculture ont conduit à l'élaboration d'indicateurs pour de nombreux pays européens (Arfini *et al.*, 2002). La plupart d'entre eux ont pour particularité de ne pas être fondés sur des approches théoriques.

Cette tendance existe d'ailleurs au sein de nombreux organismes qui élaborent des indicateurs du développement durable à partir de cadres conceptuels très différents<sup>1</sup>. Par exemple, celui retenu par l'OCDE est construit sur la base d'un schéma « pression-état-réponse ».

Ce schéma, sans fondement théorique, présente avec clarté sous la forme d'une chaîne causale les liens entre la sphère économique, l'environnement et la sphère sociale. Au niveau des indicateurs sectoriels (agro-environnementaux) et en prolongement de ce modèle, le cadre « causes agissantes-état-réponses » a été choisi (OCDE, 2000). Un autre exemple est celui retenu par les Nations-Unies avec le schéma de type « force motrice-état-réponses ».

Celui-ci s'inscrit plutôt dans une logique d'évaluation du développement durable et ne relie pas explicitement les indicateurs par un lien de causalité.

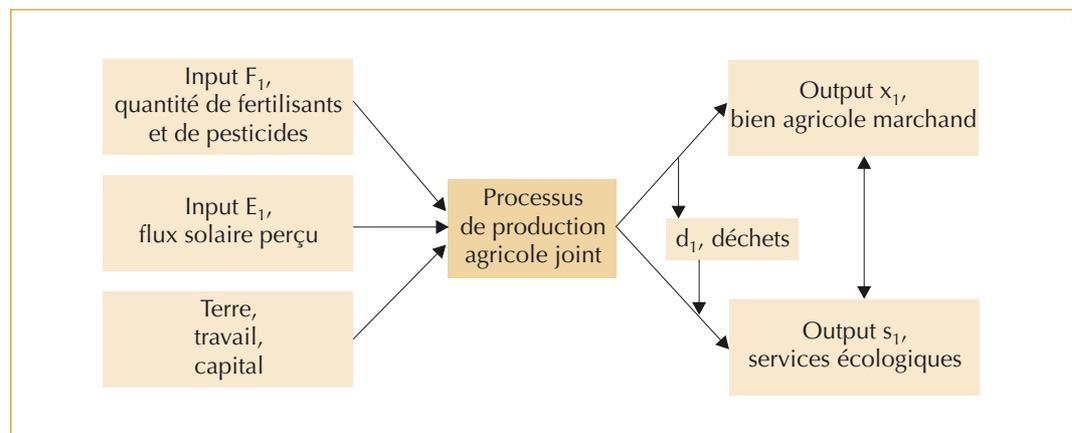
Dans ce contexte, l'objet de notre travail consiste à proposer un cadre théorique pour apprécier la durabilité de l'agriculture. Dans un premier temps, nous montrons l'intérêt d'une approche positive de la multifonctionnalité de l'agriculture comme fondement de la durabilité des processus de production. Puis, dans un second temps, nous proposons de construire un indicateur de durabilité en considérant l'existence d'une production jointe.

## Fondements théoriques de la durabilité du processus de production agricole

### Éléments pour une définition théorique de la durabilité

Dans une perspective positive, la multifonctionnalité s'appuie sur les propriétés spécifiques du processus de production (figure 1) et de ses produits multiples (OCDE, 2001).

Dans ce cas, il existe une production conjointe de plusieurs produits dont certains sont dépourvus de valeur marchande (déchets<sup>2</sup>, aménités rurales<sup>3</sup>, biodiversité...). On peut noter que la question de l'existence de jointure entre les produits agricoles marchands et non marchands a récemment fait l'objet d'un grand nombre de travaux (Abler, 2001 ; Le Cotty *et al.*, 2002 ; Blandford *et al.*, 2002).



► Figure 1 – Représentation du processus de production agricole.

Par conséquent, l'aspect multifonctionnel du processus de production dépend directement du lien d'ordre physique existant entre les différentes productions. Selon l'origine de la jointure, on peut distinguer trois situations :

- celle où le caractère conjoint de la production dépend de l'existence d'interdépendances techniques au sein du processus de production ;
- celle où il dépend d'un facteur de production non allouable ;
- celle où il existe une compétition entre les outputs pour un input allouable mais qui existe en quantité fixe au niveau de l'exploitation (facteur fixe imputable).

Nous nous intéressons ici au premier cas, car il est à l'origine d'externalités de production négatives (présence de polluants, érosion du sol...) et positives (production d'aménités rurales, d'habitats pour la faune...). Il existe un lien physique entre l'émission de l'externalité et le niveau de la production agricole. De plus, la production d'un bien dépend de la quantité de facteur allouée à ce bien, mais aussi de la quantité produite de l'autre bien.

Pour simplifier, nous considérons que la jointure est caractérisée par la production de trois produits interdépendants : un bien agricole marchand  $x_1$ , une quantité de déchets  $d_1$  (externalité négative), une quantité de services écologiques  $s_1$  (externalité positive). Le processus de production agricole est donc un processus joint<sup>4</sup> qui se caractérise comme suit :

$$\begin{aligned} x_1 &= g_1(F_1, s_1) \\ s_1 &= g_2(E_1, x_1) \\ d_1 &= g_3(x_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$F_1$  représente la quantité de fertilisants et de pesticides consommés par le processus de production<sup>5</sup> pour produire  $x_1$ , et  $E_1$  le flux solaire perçu.

Par hypothèse, la production de bien agricole  $x_1$  dépend du facteur  $F_1$  dont le prix est non nul pour le producteur. Le facteur « flux solaire » n'intervient pas directement car il est sans coût. La quantité de déchet produite dépend uniquement de la production du bien agricole.

Cette représentation de la jointure qui relie les inputs et les outputs entre eux appelle deux remarques.

Tout d'abord, du fait de l'interdépendance technique, un changement dans la production de  $x_1$  va avoir un effet sur la productivité marginale<sup>6</sup> du facteur utilisé  $E_1$  pour produire  $s_1$ . On fait l'hypothèse qu'une hausse de la quantité d'output marchand produite implique une diminution de la production de services écologiques via l'augmentation de la quantité de fertilisants et de pesticides employés. Dans ce cas, les deux produits  $x_1$  et  $s_1$  sont techniquement substituables.

Par ailleurs, ce cadre de référence de l'activité agricole s'appuie sur l'analyse du fonctionnement du processus de production et de ses interactions avec l'environnement. Il permet de traiter explicitement deux dimensions de la durabilité : les dimensions économique et environnementale.

Dès lors, il convient d'étudier d'une part, la combinaison productive et ses caractéristiques et d'autre part, les impacts environnementaux de l'activité agricole sur les éléments de l'environnement naturel.

Dans des travaux antérieurs (Ferrari *et al.*, 2001), l'étude de la dimension physique d'un processus de production a permis de mettre l'accent sur la qualité des éléments qui interviennent dans la combinaison productive mais aussi sur la production de déchets qui l'accompagne. L'interprétation du processus de production s'appuie ici sur les travaux de N. Georgescu-Roegen avec en particulier l'introduction de la loi d'entropie (ou second principe de la thermodynamique) en économie (Georgescu-Roegen, 1971).

Selon cette dernière approche, un processus de production durable est un processus qui crée peu de dissipation et donc peu de déchets. D'un point de vue thermodynamique, ces éléments sont dotés d'une forte entropie<sup>7</sup>. L'existence d'un déchet traduit physiquement la variation qualitative d'un système, ou encore son changement qualitatif dans le temps : si un système produit beaucoup (peu) de déchets – ou de dissipation, alors son entropie est grande (petite). Et inversement.

En général, les processus de production agricoles des pays industrialisés ont pour particularité de produire des déchets et de générer des pollutions qui menacent la qualité des ressources environnementales. Cela renvoie aux choix culturels mais aussi aux pratiques agronomiques qui sont en rupture avec les cycles de circulation de la matière (azote, eau...) et les transformations opérées

4. Nous ne considérons pas ici de forme fonctionnelle particulière pour décrire la production jointe. Nous formulons seulement des hypothèses de complémentarité/substitution entre les inputs et les outputs.

5. Il s'agit d'une quantité d'énergie artificielle consommée par le processus de production. Il est clair que d'autres intrants tels que les carburants pourraient également être considérés.

6. La productivité marginale du facteur mesure l'accroissement de la quantité produite qui résulte d'une augmentation de la quantité de facteur utilisée.

7. L'entropie constitue une mesure de la dissipation, de la dégradation de l'énergie au sein d'un système. Tout comme la pression, elle est une fonction d'état du système qui permet d'apprécier le changement qualitatif entre deux moments du temps.

8. On peut noter que ces pratiques diffèrent fortement suivant le type d'agriculture pratiquée : intensif (ou productiviste), raisonné, intégré ou biologique. De même, les techniques culturales simplifiées, sans labour et avec maintien en surface des résidus végétaux, l'enrichissement organique des sols, ou encore la réduction de l'érosion des sols constituent autant de pratiques susceptibles de limiter l'impact anthropique sur les écosystèmes.

9. Par exemple, c'est la chaleur libérée par l'usage de combustibles durant le fonctionnement du processus de production.

le long des chaînes alimentaires (apparition d'insectes nuisibles avec l'usage intensif de fertilisants par exemple)<sup>8</sup>. Des travaux récents ont montré la pertinence des outils de la thermodynamique pour comprendre et expliquer le caractère non durable de certains modes d'exploitation des terres (Steinborn *et al.*, 2000 ; Svirezhev, 2000).

Comme la production jointe de déchets est une caractéristique de la non-durabilité du processus, la réduction de cette production est donc une condition nécessaire pour tendre vers la durabilité de l'activité agricole. Cela implique une amélioration de l'efficacité du processus avec l'économie d'inputs.

Finalement, la propriété de durabilité du processus de production agricole dépend d'une part, de la préservation quantitative des composantes de l'environnement et d'autre part, des conditions de jointure de la production agricole en présence d'externalités négatives et positives.

### L'approche exergétique ou comment mesurer la durabilité ?

La durabilité du processus de production agricole dans le temps peut être mesurée par la variation qualitative de ses composantes physiques. Cela implique deux hypothèses : d'une part, il existe des possibilités de substitution entre les outputs interdépendants et d'autre part, il est possible de réaliser de telles substitutions en améliorant l'efficacité du processus de production.

Une approche pertinente pour apprécier à la fois la qualité et la quantité des éléments participant à la production est l'approche exergétique (Wall *et al.*, 2001). L'intérêt de cette approche est de permettre une évaluation des pertes entropiques et de définir un rendement thermodynamique du processus. Ces deux aspects donnent ainsi une approche réelle de l'efficacité du processus de production.

L'exergie est définie comme la quantité maximale de travail physique qui peut être extraite d'un flux d'énergie donné (Van Gool *et al.*, 1985). La qualité initiale d'une ressource quelconque peut être mesurée par l'exergie. Par exemple, Wall (1990) évalue la qualité exergétique de différentes formes d'énergie en multipliant leur contenu énergétique respectif par un facteur de qualité (tableau 1).

Comme l'entropie, elle s'exprime dans les mêmes unités (joule). À une création d'entropie correspond une destruction d'exergie. L'expression de l'exergie associée à une source d'énergie particulière, *i.e.* son contenu exergétique, est donnée par la relation suivante :

$$E_x = Q \left[ 1 - \frac{T_0}{T_1} \right] \text{ avec } T_1 > T_0 \text{ et } 1 - \frac{T_0}{T_1} = \delta < 1 \quad (2)$$

avec  $Q$ , la chaleur de la source considérée qui est reçue par le processus de production<sup>9</sup> ;  $T_0$ , la température de la source froide et  $T_1$ , température de la source chaude. Le terme  $\delta$  est l'expression du rendement de Carnot ou rendement théorique maximal. Il est strictement inférieur à l'unité. Le rendement réel d'un processus irréversible est borné supérieurement par ce rendement.

Lorsque le processus de production fonctionne, la variation de sa qualité dépend directement de la quantité de déchets produite dans le temps. Comme à une production de déchet correspond une réduction de sa capacité à produire de l'exergie (ou capacité exergétique), la variation de la qualité du processus dans le temps peut donc être appréciée directement par la variation de l'exergie.

Si l'efficacité de la transformation augmente avec, en parallèle, une diminution des déchets, alors un même niveau d'output marchand

Forme de l'énergie	Facteur de qualité exergétique $\in [0,1]$
Énergie mécanique	1,0
Énergie électrique	1,0
Vapeur chaude (600°C)	0,6
Énergie solaire	0,93

▲ Tableau 1 – Exemples de qualité de quelques formes d'énergie (d'après WALL, 1990).

peut être obtenu avec moins d'input énergie par exemple. Il est donc possible de réaliser des économies d'exergie en réduisant la quantité de déchets produite. Dans ces conditions, une analyse en termes d'exergie apparaît pertinente pour contribuer à évaluer l'impact environnemental d'une production de déchets (Ayres, 1998).

## Vers une mesure de la durabilité du processus de production agricole

### Définition du rendement exergétique

L'analyse de la durabilité implique de prendre en compte les éléments suivants : le travail, la terre, le capital, l'énergie solaire et ses dérivés (fertilisant, pesticides). Par ailleurs, la jointure fait apparaître différents types de produits : des biens agricoles, des aménités rurales (paysage, chasse...), des déchets (nitrates, phosphates, pertes de chaleur par dissipation...), des services écologiques (biodiversité, habitats...). Certains sont marchands, d'autres ne le sont pas. D'un point de vue physique, il importe de mettre en évidence l'aptitude du processus à produire des éléments de valeur, *i.e.* caractérisé par une faible entropie.

Afin d'apprécier la capacité d'un processus de production  $P_1$  à produire de l'exergie, nous proposons de définir son rendement exergétique pour des niveaux donnés de capital, de travail et de terre, par la relation :

$$R_{ex}(P_1) = \frac{x_1 + s_1}{E_1 + F_1} \quad \text{et} \quad 0 \leq R_{ex}(P_1) \leq 1 \quad (3)$$

$$\text{avec } F_1 \geq 0 \quad \text{et} \quad E_1 \geq 0$$

Les quantités sont exprimées en unités physiques (joule) par unité de temps.

Dans cette expression, les variables représentent les quantités d'exergie associées aux différents inputs et outputs du processus de production. Au numérateur, figure le travail réel ou l'exergie produite par le processus de production à partir de l'énergie disponible. Le dénominateur correspond à l'exergie disponible contenue dans les intrants et utilisée par le processus.

Le rendement exergétique peut prendre plusieurs valeurs. S'il prend la valeur unitaire, cela signifie que le processus de production est durable car la production de déchet est nulle (cas d'un proces-

sus réversible). Au contraire, s'il est égal à zéro, alors le processus est au repos et ne produit aucun travail, aucune exergie. Dans la réalité, les processus de production ont un rendement exergétique positif mais strictement inférieur à l'unité du fait de l'existence de pertes exergétiques. On est alors en présence de processus de nature irréversible.

Dans la mesure où les intrants permettent de caractériser la nature du processus de production agricole, on peut distinguer deux configurations intéressantes pour notre propos :

– si  $F_1 = 0$ , alors le processus de production caractérise une agriculture de type biologique. Le seul intrant est le flux solaire. Dès lors, le niveau de production du bien agricole  $x_1$  pourra être plus faible par rapport au niveau correspondant à un apport non nul de fertilisants et pesticides ;

– si  $E_1 = 0$ , alors on est en présence d'un processus de production de type industriel. Dans ce cas, la production de services écologiques est nulle. Cela repose sur l'hypothèse qu'en l'absence de flux solaire, aucun écosystème ne peut produire de services écologiques<sup>10</sup>. Le seul intrant est constitué par une quantité non nulle d'énergie artificielle. À la limite, on est en présence d'un processus de production hors sol.

Par ailleurs, on considère par hypothèse que la dissipation de l'énergie dans le processus de production ne provient que de la transformation des quantités d'énergie utilisées pour produire le bien agricole ( $x_1$ ). Compte tenu de l'origine des déchets, le bilan de la production de déchets au sein du processus s'écrit donc :

$$d_1 = E_1 + F_1 - x_1 \quad (4)$$

La quantité de déchets produite par le processus caractérise les pertes d'exergie. Les flux  $E_1$  et  $F_1$  correspondent à l'input exergie : ce sont les quantités maximales de travail physique qui peuvent être extraites des flux d'énergie artificielle et solaire.

Finalement, le rendement exergétique du processus de production devient :

$$R_{ex}(P_1) = \frac{(E_1 + F_1) - d_1}{E_1 + F_1} + \frac{s_1}{E_1 + F_1} \quad (5)$$

10. Ici, on ne considère pas l'existence de certaines externalités positives telles que les aménités rurales qui peuvent être produites sans  $E_1$  : il s'agit par exemple de l'esthétique des bâtiments agricoles, de l'entretien de haies, de murets ou encore de chemins.

Le premier terme traduit la part de l'exergie provenant de la production du bien marchand et le second celle provenant de la présence d'externalités positives de production.

La présence d'une production jointe de services écologiques accroît la valeur de l'efficacité du processus de production, *i.e.* son rendement exergetique.

Ce résultat est lié à l'hypothèse relative à l'origine de la dissipation de l'énergie au sein du processus de production : seul l'intrant « énergie artificielle » est responsable de la production de déchets.

Au contraire, en l'absence de production jointe de services écologiques, la valeur du rendement serait plus faible et égale à :

$$R_{ex}(P_1) = 1 - \frac{d_1}{E_1 + F_1} \quad (6)$$

Par conséquent, la production d'externalités positives se traduit physiquement par un potentiel d'énergie utile susceptible d'être valorisé pour des usages.

Par définition, quand la production de déchets tend vers zéro, le rendement réel s'approche du rendement maximal du processus de production. Dans l'expression du rendement exergetique, le premier terme indique la part de l'input exergie, nette de la dissipation, qui peut être transformée en travail (ou énergie utile) par le processus agricole. Cette transformation peut être renforcée si le processus de production est de type intensif. Dans ce cas, la valeur de  $x_1$  augmente avec l'élévation de l'intrant  $F_1$ . Cependant, comme l'augmentation du rendement s'accompagne par ailleurs d'une dégradation de l'environnement avec la production de déchets, la valeur du rendement peut rester en deçà de la valeur unitaire (et  $s_1 < d_1$ ). Néanmoins, comme le processus de production est ouvert sur le flux solaire, il est possible que la valeur du rendement exergetique soit, à moment donné, supérieure à l'unité : c'est le cas où  $s_1 > d_1$ . Ici, c'est la propriété physique d'ouverture du processus de production qui implique une valeur du rendement strictement supérieure à 1. Le flux solaire peut contribuer à réduire l'entropie du processus de production à travers les transformations réalisées par les processus biologiques au sein des écosystèmes et de la biosphère (Kaberger *et al.*, 2001).

Dans ce contexte, la durabilité du processus s'appuie à la fois sur l'existence d'une relation physique entre l'efficacité du processus de production et la quantité de déchets produite, et sur la propriété de substituabilité entre les externalités positives et négatives qui résulte de l'hypothèse de jointure retenue dans le modèle. Il est possible à partir de ce raisonnement de construire un indicateur de durabilité.

### Construction d'un indicateur de durabilité

L'amélioration de l'efficacité du processus de production dépend essentiellement de la maîtrise de la production de déchets. Celle-ci peut par ailleurs se réaliser en présence d'un changement dans la production des outputs.

La diminution de  $d_1$  qui est à l'origine de l'élévation du rendement du processus et qui provient de la réduction de  $F_1$  peut se traduire soit par une baisse du niveau du bien agricole  $x_1$ , soit par le maintien de son niveau (cas d'un processus surconsommant de l'énergie artificielle). Ainsi, si la valeur de  $x_1$  diminue, en vertu du premier principe de la thermodynamique (principe de conservation), la réduction de l'apport de  $F_1$  peut éventuellement s'accompagner d'une hausse de la production de  $s_1$ . La réduction de déchets permet alors de produire plus de services écologiques.

Par conséquent, du fait de la propriété de substituabilité entre les externalités positives et négatives, la propriété de jointure de l'activité agricole peut donc participer à la durabilité du processus de production.

Il est possible de mesurer la maîtrise de la production de déchets à l'aide d'un indicateur de nature exergetique. Comme l'exergie disponible conditionne la durabilité du processus de production, on peut définir le taux de destruction exergetique de la manière suivante :

$$\lambda_1 = \frac{x_1 + s_1 + d_1}{E_1 + F_1} \quad \text{avec } \lambda_1 \in [0,1] \quad (7)$$

Au numérateur, figure l'exergie disponible dans les outputs tandis qu'au dénominateur les deux termes représentent l'exergie disponible dans les inputs. Pour des quantités d'intrants inchangées, la quantité d'exergie détruite dépend seulement de la combinaison des inputs.

Finalement, un indicateur de durabilité relatif à un ensemble de processus de production agricoles  $P_i$  peut être construit. Il s'écrit :

$$\varphi = \frac{\sum_i \beta_i (E_i + F_i)}{\sum_i (E_i + F_i)} \quad \text{et} \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad (8)$$

La valeur de cet indicateur sans dimension est pertinente du point de vue de la durabilité du processus de production agricole. En effet, si quelque soit  $i$ , on a  $F_i = 0$ , alors le processus de production est de type biologique. Le seul intrant d'exergie étant une source renouvelable, le flux solaire, le processus est durable et réversible – car il ne produit aucun déchet. Dans ce cas, la valeur attribuée à  $\beta_i$  est la valeur unitaire. C'est indicateur reflète une durabilité plutôt forte du processus de production dans la mesure où seul le flux solaire est pris en compte.

Cependant, s'il existe au moins un intrant d'exergie  $i$  tel que  $F_i$  est différent de zéro – i.e. il existe un intrant qui n'est pas renouvelable, alors il est impératif de conserver cette ressource « épuisable »<sup>11</sup> à l'aide d'une réduction des pertes d'exergie – i.e. de la quantité de déchets produite. Dans ce cas, on considère  $\beta_i = \lambda_i$ .

L'indicateur prend la valeur unitaire si l'ensemble des processus de production agricoles est constitué de processus de type biologique ( $F$  égal à zéro). Si non, sa valeur est strictement inférieure à l'unité et dépend du taux de destruction exergétique. Ce taux peut donc constituer une variable pertinente pour l'étude de la durabilité des processus de production agricoles considérés. Nous pouvons résumer les différents résultats comme indiqué dans le tableau 2.

### Conclusion

Un fondement théorique de la durabilité de l'agriculture a été proposé en présence d'un processus de production joint. Par ailleurs, l'analyse en terme d'exergie a autorisé une évaluation de l'impact environnemental du processus avec la prise en compte du déchet dans un contexte de production jointe à travers un indicateur original. Les conditions relatives à la jointure de la production et les liens entre les inputs et les outputs qui en découlent sont essentielles pour caractériser la durabilité du processus étudié. La durabilité n'est donc pas un concept absolu et dans le cas de la production agricole, certains modes de production ont un potentiel de durabilité plus ou moins élevé. Par exemple, la prise en compte de productions non marchandes telles que les

11. L'énergie artificielle est considérée par extension comme une ressource épuisable, car elle est obtenue à partir de ressources naturelles non renouvelables (pétrole notamment).

	Production jointe avec aménité	Processus de type biologique	Processus de type industriel
Nature des inputs	$\forall i, E_i > 0 \text{ et } F_i > 0$	$\forall i, E_i > 0 \text{ et } F_i = 0$	$\forall i, E_i = 0 \text{ et } F_i > 0$
Rendement exergétique	$R_{ex}(P_i) = \frac{(E_i + F_i) - d_i}{E_i + F_i} + \frac{s_i}{E_i + F_i}$ $R_{ex} > 1 \text{ si } s_i > d_i$ $R_{ex} < 1 \text{ si } s_i < d_i$	$R_{ex}(P_i) = 1 + \frac{s_i}{E_i}$ $R_{ex} > 1$	$R_{ex}(P_i) = 1 - \frac{d_i}{F_i}$ $R_{ex} < 1$
Disponibilité exergétique	$0 \leq \lambda_i = \frac{x_i + s_i + d_i}{E_i + F_i} \leq 1$	$\lambda_i = \frac{x_i + s_i}{E_i}$	$\lambda_i = \frac{x_i + d_i}{F_i}$
Indicateur de durabilité	$\exists i / F_i \neq 0, \beta_i = \lambda_i$ $0 \leq \varphi \leq 1$	$\beta_i = 1$ $\varphi = 1$	$\forall i, F_i \neq 0, \beta_i = \lambda_i$ $0 < \varphi < 1$

▲ Tableau 2 – Nature du processus de production et mesure de sa durabilité.

services écologiques peut contribuer à accroître la durabilité du processus de production en élevant le rendement de ce dernier.

Par ailleurs, la mesure de la pertinence de l'approche proposée implique un prolongement empirique. En particulier, l'étude des substitutions possibles entre les différents outputs et la prise en compte de différents types d'agriculture pourront contribuer à apprécier la capacité des processus à réduire la quantité de déchets produite. De plus, les impacts immédiats et futurs des choix cultureux sur la durabilité des processus pourraient être analysés : la production de biocarburants, par exemple, pourrait être étudiée en considérant sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le temps. La présence d'une culture énergétique ainsi que la prise en compte du recyclage des déchets auraient nécessairement un impact sur l'équation relative à la dissipation de l'énergie au sein du processus de production.

Sur un plan pratique, la démarche proposée vise à élaborer des indicateurs sur la base d'observa-

tions micro-économiques. Il est donc nécessaire de collecter auprès des agriculteurs – et pour des processus de production agricole clairement identifiés – des données relatives à l'utilisation des inputs, à la composition précise de ces inputs et à leur application (durée). Cette étape doit permettre de déterminer le contenu exergétique de chacun des éléments chimiques (exprimés en joule/mole par exemple). La même démarche doit être adoptée à l'égard des outputs.

Cependant, la comptabilisation de tous les outputs du processus de production n'est pas un exercice facile : s'il est possible de caractériser le bien agricole et les déchets à partir des bilans matière, il semble plus difficile de réaliser cette démarche pour les externalités positives de production telles que les services écologiques. Plus généralement, ce point soulève la question de la mesure de ces externalités à partir de leur décomposition physico-chimique. L'un des prolongements de ce travail consistera à traiter explicitement cette question afin de donner une portée opérationnelle à l'indicateur de durabilité. □

### Résumé

L'objet de cet article est double : il s'agit d'une part de montrer l'intérêt d'une approche positive de la multifonctionnalité de l'agriculture comme fondement de la durabilité des processus de production agricoles et, d'autre part, de construire sur cette base un indicateur de durabilité en considérant l'existence d'une production jointe.

### Abstract

In this paper, we pursue two purposes. First, we show how essential is a positive approach of the agriculture multifunctionality perceived as a rationale for the sustainability of the agricultural production processes. Second, on this basis, we construct a sustainability indicator applied to a joint production.

## Bibliographie

- ABLER, D., 2001, A synthesis of country reports on jointness between commodity and non-commodity outputs in OECD agriculture, *in Workshop on multifunctionality*, OCDE, Paris.
- ARFINI, F. ; DONATI, M., 2002, La valeur économique de la multifonctionnalité dans les exploitations agricoles de la province de Parme, *in Colloque SFER, «La multifonctionnalité de l'activité agricole et sa reconnaissance par les politiques publiques, 21-22 mars*, Paris.
- AYRES, R.-U., 1998, Eco-thermodynamics: economics and the second law, *Ecological Economics*, vol. 26, n° 2, p. 189-209.
- BLANDFORD, D. ; BOISVERT, R.-N. eds, 2002, *Non-trade concerns and domestic/international policy choice*, Working Paper 02-1, International Agricultural Trade Research Consortium.
- FERRARI, S. ; GENOUD, S. ; LESOURD, J.-B., 2001, Thermodynamics and economics: towards exergy-based indicators of sustainable development, *Swiss Journal of Economics and Statistics*, vol. 137, n° 3, p. 319-336.
- GEORGESCU-ROEGEN, N., 1971, *The entropy law and the economic process*, Cambridge university press, Cambridge (Mass.), 457 p.
- KABERGER, T. ; MANSSON, B., 2001, Entropy and economic processes - physics perspectives, *Ecological Economics*, vol. 36, n° 1, p. 165-179.
- LE COTTY, T. ; VOITURIEZ, T. ; AUMAND, A., 2002, Coopération multilatérale et jointures entre produits agricoles et biens publics territoriaux, *in Conférence La multifonctionnalité de l'activité agricole et sa reconnaissance par les politiques publiques, SFER*, Paris.
- OCDE, 1995, *L'agriculture durable. Questions de fond et politiques dans les pays de l'OCD*, Paris.
- OCDE, 2000, *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture, Méthode et résultats, Volume 1, Résumé*, Paris.
- OCDE, 2001, *Multifonctionnalité. Élaboration d'un cadre analytique*, OCDE, Paris, 177 p.
- STEINBORN, W. ; SVIREZHEV, Y., 2000, Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study, *Ecological Modelling*, vol. 133, n° 3, p. 247-257.
- SVIREZHEV, Y.-M., 2000, Thermodynamics and ecology, *Ecological Modelling*, vol. 132, n° 1-2, p. 11-22.
- Union européenne, 1999, *Pistes pour une agriculture durable*, communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions, Bruxelles, 34 p.
- VAN GOOL, W. ; BRUGGINK, J.-J.-C., 1985, *Energy and time in the economic and physical sciences*, Amsterdam.
- VIDAL, C. ; MARQUER, P., 2002, *Vers une agriculture européenne durable. Outils et méthodes*, Educagri Éditions, Dijon, 111 p.
- WALL, G., 1990, Exergy conversion in the Japanese society, *Energy*, vol. 15, n° 5, p. 435-444.
- WALL, G. ; GONG, M., 2001, On exergy and sustainable development - Part 1: conditions and concepts, *Exergy international journal*, vol. 1, n° 3, p. 128-145.