

**ENERGIE ET SOCIETE : L'EXEMPLE DU BILAN  
ENERGETIQUE DE L'AGRICULTURE OCCIDENTALE.**

---

G. BOETSCH (\*)

Depuis une quinzaine d'années, les sociétés occidentales se sont vu contraintes de reconsidérer leur modèle de croissance économique.

Face au problème actuel de l'énergie, il apparaît nécessaire de redéfinir le coût réel du développement de la production, car si l'économie est le fait relatif à la production, la distribution et la consommation des richesses dans une collectivité humaine, l'énergie représente la possibilité pour un système de produire du travail.

Nous allons voir le rapport existant entre production (valeur brute) et productivité (rendement) dans un agroécosystème occidental.

---

(\*) ER 221 du CNRS et Laboratoire d'Ecologie Humaine de l'Université d'Aix-Marseille III.

## I - L'AGROECOSYSTEME :

### 1) Productivité primaire

La biomasse est composée de l'ensemble des organismes présents dans l'écosystème : la phytomasse et la zoomasse. La productivité primaire est la vitesse de production de la biomasse des producteurs primaires (la productivité secondaire est la vitesse de production de la biomasse des consommateurs et/ou des décomposeurs).

La productivité nette est égale à :

$$PN_1 = \frac{B_2 - B_1}{t_2 - t_1} \Rightarrow PN_1 = B_2 - B_1 = \Delta B$$

c'est-à-dire que, en principe, la productivité primaire nette est égale à l'augmentation de la biomasse, mais comme il y a perte de biomasse par mortalité et consommation,  $PN_1 > \Delta B$  (les mesures de  $PN_1$  se font en pesant les récoltes).

### 2) Notion de flux d'énergie

L'énergie solaire interceptée dans les latitudes moyennes est de 9-10 milliards de Kcal/ha/an. On peut se demander avec quelle efficacité cette énergie est utilisée par les divers types d'écosystèmes ?

La  $PN_1$  d'1 ha de forêt tempérée donne, par exemple :

- 8 t de bois
- 3 t de feuilles
- 1 t de fruits
- 1 t de racines

qui brûlés donnent :

$$36 + 13,5 + 4,5 + 4,5 = 58,5 \text{ millions de Kcal}$$

soit :

$$58,5 \text{ millions}/9 \text{ milliards} = 0,6 \% \text{ d'efficacité.}$$

Mais le milieu transformé techniquement par l'homme voit s'accroître cette efficacité.

Pour l'agroécosystème, l'écosystème qui fournit à l'homme la plus grande partie de son alimentation, on tente de réduire la phytocénose à une seule espèce de haut rendement (herbicides, insecticides...) car ce système est cultivé pour la productivité primaire de sa phytocénose.

La production est limitée au fait que ces plantes ont souvent besoin d'une longue période de développement.

Il s'agit d'un système **fragile**, car **peu complexifié** et **peu diversifié**.

**Flux d'énergie** - Une culture expérimentale de maïs aux USA, optimalement irriguée et fumée, donne une efficacité de 5,3 % de la radiation solaire totale (Cf. Fig. 1).

Pour  $500 \text{ cal/cm}^2/\text{j.} \rightarrow 222 \text{ cal/cm}^2/\text{j.}$  de RPA (Radiation photosynthétiquement active), on obtient une efficacité de 12 % des RPA (efficacité théorique des RPA : 10 quanta de lumière fixent 1 molécule de  $\text{CO}_2$ ).

Le rendement photosynthétique est assez mauvais (le cas qui vient d'être cité est optimal) : en général, les bons rendements de maïs sont de 17 à 25  $\text{g/m}^2/\text{j.}$ , soit une efficacité de 4 % de la RPA.

## II - BILAN ENERGETIQUE ET TYPES DE DEVELOPPEMENT

### 1) L'omniprésence de l'énergie dans le procès économique :

La crise de l'énergie a provoqué la modification d'un certain nombre de valeurs, celle de "consommation" par exemple. L'énergie est présente dans le procès économique, mais elle l'est encore plus dans les activités biologiques. L'homme a besoin de 2 à 3.000 Kcal/j. pour survivre. Toute l'énergie

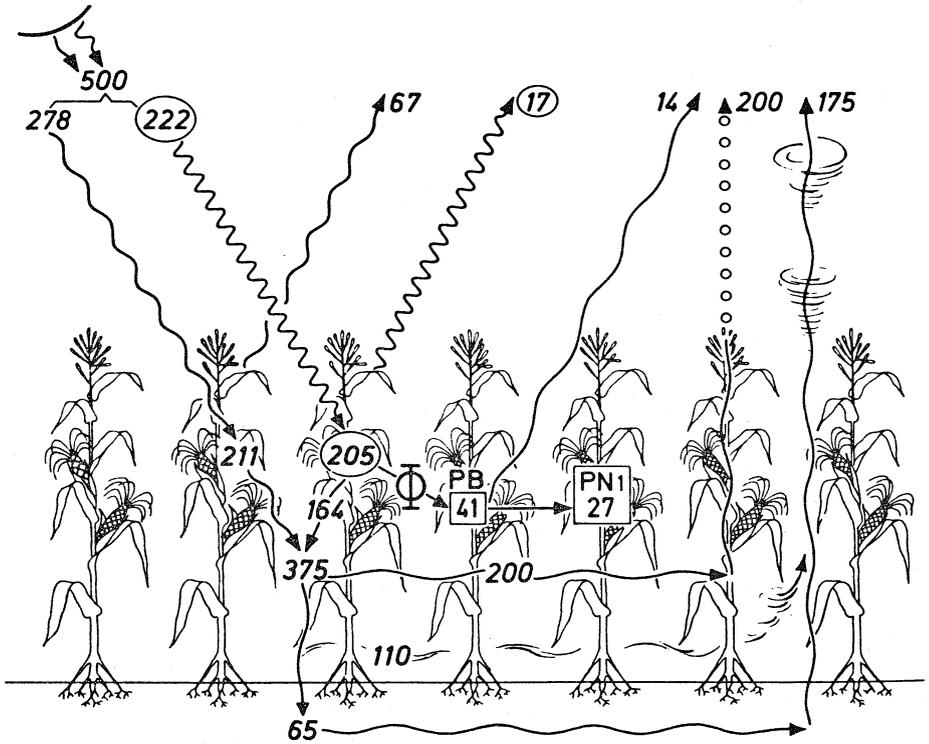


FIGURE 1: L'écosystème "Champ de Maïs" aux U.S.A. (données d'après Loomis Williams in Gates, 1971). Fonctionnement pendant un beau jour d'été, dans des conditions d'alimentation en eau et nutriments optimales. 500 cal/cm<sup>2</sup>/jour d'énergie solaire globales (222 RPA, 278 infra-rouges courts).

disponible provient du soleil.

L'homme convertit l'énergie solaire qu'il a ingéré sous forme de nourriture, en énergie mécanique et en chaleur. Mais cette capacité humaine à transformer l'énergie humaine en chaleur a deux limites :

- il ne peut ingérer plus de 4.000 Kcal/j.
- l'organisme humain a une limite de rendement de conversion d'énergie (1/5).

Cette limitation de la capacité humaine à produire de l'énergie mécanique, et plus particulièrement de l'énergie de "surplus" (quantité d'énergie disponible pour d'autres besoins que ceux de reconstitution), a eu pour effet de conduire à la recherche d'autres convertisseurs. Ce concept de "surplus énergétique" est relié à celui de "division du travail".

Pour illustrer, nous allons prendre deux exemples : le premier, dans la production de matière première alimentaire, et le second dans la production de matière première non alimentaire.

Dans les années 50, la riziculture japonaise a eu de très hauts rendements : 5.000 litres/ha pour 225 jours de travail. Le surplus énergétique par agriculteur était de  $10 \cdot 10^6$  de Kcal/an. Si l'on déduit les besoins énergétiques propres de l'agriculteur, il reste  $9 \cdot 10^6$  Kcal, c'est-à-dire que l'agriculteur japonais produisait l'énergie nécessaire à 9 autres personnes. Comparons ces résultats avec ceux obtenus dans les mines de charbon.

En Angleterre, à l'époque de la révolution industrielle, un mineur pouvait extraire 500 livres de charbon par jour. L'énergie moyenne contenue dans 1 livre de charbon est de 3.500 Kcal, ce qui équivaut aux besoins énergétiques quotidiens d'un travailleur de force. Le surplus produit est de  $2720 \cdot 10^6$  de Kcal, et si l'on utilise cette énergie dans des machines à vapeur au rendement de 1 % (ce qui correspond aux performances des premières machines à vapeur), le charbon produira  $27,2 \cdot 10^6$  Kcal. Ce qui représente le triple d'énergie mécanique disponible

par rapport à celle obtenue par la riziculture intensive. Le rendement des machines ayant énormément augmenté depuis, les surplus énergétiques se sont accrus dans des proportions importantes (sans pour autant être infinies : personne ne peut se nourrir de charbon, mais nous verrons plus loin qu'on peut "réinvestir" cette énergie pour accroître les rendements).

2) Energie organique et société à bas profil économique :

Presque toute l'énergie disponible sur cette terre est issue de l'énergie solaire, que ce soit sous forme directe ou sous moyen de stockage. Le monde organique repose entièrement sur les plantes comme convertisseur d'énergie. Remarquons que ce sont elles qui obtiennent les meilleures performances dans l'utilisation de l'énergie solaire ; lorsque les animaux sont utilisés pour convertir l'énergie produite par les plantes, on assiste à des pertes considérables.

Par exemple :

1 t de blé consommé sous forme de :

Pain.....	240.000 Kcal
Boeuf.....	23.000 Kcal

Ce résultat ne fait qu'exprimer la loi de Lindeman (pyramide des biomasses) qui enseigne que si l'on fixe la ration énergétique nécessaire à l'être humain à 3.000 Kcal, si celui-ci se nourrit de viande de boeuf (nourri au maïs), il lui faudra 30.000 Kcal de boeuf, elles-même fournies par 300.000 Kcal de maïs produit par transformation de  $30 \cdot 10^6$  Kcal d'énergie solaire.

Ceci implique qu'une société qui consomme, en plus du blé, 50 % de ses besoins caloriques sous forme de boeuf aura besoin d'une surface de terre

par habitant 6 fois plus grande.

Les surplus énergétiques dont dispose une société à bas profil économique sont donc directement fonction du rendement des récoltes et surtout de la quantité de terre disponible par habitant.

Une augmentation de la densité de population entraîne une diminution de la consommation énergétique par tête, mais une certaine densité de population est néanmoins nécessaire si l'on veut cultiver toute la terre disponible et ce, dans les meilleures conditions (Cf. BOSERUP - 1970).

Dans ce cas, il s'agit de sociétés non-malthusiennes où production et consommation doivent se dérouler dans des unités de temps et d'espace peu importants, et où les moindres variations économiques provoquent des phénomènes de régulation démographique.

Un des problèmes posé pour ce genre de société est que le transport des marchandises exige une grande quantité d'énergie. Si la distance entre le lieu de production et le lieu de consommation > 20 km, le transport absorbera l'essentiel du surplus énergétique. Une société "organique" (à bas profil économique) sera forcée d'adopter un mode d'habitat dispersé et l'urbanisation s'avèrera difficile (sauf si la région agricole avoisinante produit des surplus dépassant le coût énergétique du transport).

Ainsi, la masse des surplus énergétiques disponibles dans une société organique dépend de deux facteurs contradictoires :

- l'un positif : surface et rendement
- l'autre négatif : distance entre producteur et consommateur.

Dans une société de ce type, seul le féodalisme a permis d'assurer la richesse individuelle pour une classe dominante féodale à l'échelle villageoise qui consomme le surplus énergétique au dépend de la subsistance de la paysannerie. La consommation de masse y est hors de question.

3) Conséquences énergétiques de la consommation de masse :

La société de consommation de masse se définit par le fait que les marchandises peuvent être produites en quantité **théoriquement** illimitée.

De ce fait, il est intéressant de vendre à bas prix, où une faible marge de profit se multiplie par de grandes quantités. L'élaboration des prix sera différente suivant qu'il s'agit de produit rares ou abondants.

L'industrialisation a pour corrolaire l'augmentation de biens de consommation. Mais cette dernière oblige la société de consommer, en plus de l'énergie transformée directement à partir du solaire, les **ressources énergétiques stockées** (combustibles fossiles).

La croissance exponentielle de l'économie est impensable sans un gaspillage des ressources énergétiques.

- 2 types d'énergie :**
- 1) Energie reproductible  
(surplus énergétique de l'énergie solaire incidente)
  - 2) Capital énergétique  
(énergie stockée : gaz, charbon, pétrole)

Le problème du capital énergétique est qu'il s'épuise rapidement.

La consommation d'énergie quotidienne aux USA est de 206.000 Kcal/habitant, c'est-à-dire 82 fois les besoins journaliers d'un homme et 400 fois la quantité d'énergie mécanique qu'il peut produire.

La dilapidation toujours accélérée du capital énergétique a permis de maintenir le coût de l'énergie assez bas. Ceci a produit des distorsions réelles au niveau des prix : sur les livres de compte, l'énergie apparaît encore de nos jours comme une denrée peu chère. Prenons le rapport entre énergie et

travail humain. Une personne produit environ 500 Kcal d'énergie mécanique par jour → 0,5 Kwatt, ce qui revient environ à 0,27 F alors que le prix d'une journée de travail (SMIC) est de 250 F (toutes charges incluses), c'est-à-dire 1.000 fois supérieure.

De ce fait, peut-on encore utiliser l'approche monétaire comme moyen efficace de calcul de répartition des charges.

Nous allons voir, à l'aide d'un exemple pris dans l'agriculture, qu'il ne suffit plus à un système d'être payant pour qu'il soit réellement décrit comme rentable et économique.

### III - LE GOUFFRE ENERGETIQUE DE L'AGRICULTURE OCCIDENTALE :

L'agriculture occidentale est parvenue à atteindre de très hauts rendements grâce à une technologie avancée.

Aux USA, le nombre d'individus non-agricoles/ nombre d'agriculteurs est passé de 10 en 1930 à 48 en 1971. Ceci a été lourd de conséquences tant sur le plan social (chômage...) que sur le plan de l'environnement naturel (sols épuisés, pollution...). De plus, cette "transformation" de l'agriculture a été réalisée grâce à un accroissement massif de l'utilisation de combustible fossile. Cette réduction de main-d'oeuvre a eu pour corrolaire une augmentation de l'utilisation de tracteurs, engrais, pesticides, irrigation...

PIMENTEL (1973) a dressé le bilan énergétique de l'agriculture du maïs aux USA.

Une première remarque lui est venue en 1970, les USA ont consommé plus du tiers de la consommation mondiale d'énergie (dont 35 % du pétrole), pour seulement 1/17 de la population mondiale. Pour certains types de productions agricoles, le taux d'utilisation d'énergie a triplé, car en plus de l'énergie nécessaire à la production agricole

proprement dite, de grandes quantités d'énergie sont nécessaires pour transporter les produits bruts, les stocker, les conditionner, les surgeler...

#### 1) Production de maïs et intrants d'énergie

L'exemple du maïs a été retenu pour deux raisons :

- c'est une production qui consomme "moyennement" de l'énergie dans l'agriculture américaine entre les fruits (+) et le foin de prairie (-) ;
- c'est une des principales céréales cultivées aux USA et dans le monde ;
- les données étaient les plus complètes.

#### Histoire de la production :

En 1909, les rendements étaient de 27 boisseaux/acre (15 q/ha) et en 1971 de 87 boisseaux/acre (49 q/ha).

La forte élévation des rendements s'est opérée vers 1950.

2 facteurs :

- 1) maïs hybride (↗ 20 à 40 % rendement)
- 2) intrants énergétiques (↗ 60 à 80 % rendement).

Entre 1945 et 1970, les rendements de maïs ↗ 240 % alors que la main-d'oeuvre ↘ 60 % (Cf. tableau I).

Le taux moyen de puissance est passé de 10 ch en 1945 à 47 en 1971, et le nombre de tracteurs a augmenté de 88 %.

Pour l'ensemble de la production de maïs, la consommation de carburant n'est passée que de 10 l./ha (1945) à 14,5 l./ha (1970). En fait, l'agriculture utilise plus de pétrole que toute autre secteur industriel pris isolément.

Mais c'est l'emploi massif des engrais qui a été le plus spectaculaire entre 1945 et 1970, l'azote seul a été multiplié par 16 (Cf. tableau 1).

D'autre part, l'introduction de maïs hybride a nécessité l'emploi de techniques spécifique : le

INPUTS.	ANNEES	
	1945	1970
Travail humain .....	12500	4900
Matériel agricole .....	180000	420000
Essence .....	543400	797000
Azote .....	58800	940800
Phosphore .....	10600	47100
Potassium .....	5200	68000
Graines .....	34000	63000
Irrigation .....	19000	34000
Insecticides .....	000	11000
Herbicides .....	000	11000
Séchage .....	10000	120000
Electricité .....	32000	310000
Transport .....	20000	70000
INPUTS c. Fossiles .....	913000	2891900
OUTPUTS récoltes .....	3427200	8164800
Rendements : $\frac{\text{outputs}}{\text{inputs}}$ .....	3,75	2,82

**Tableau 1 : Inputs énergétiques en Kcal dans la production de maïs aux U.S.A.**

Avec 1 calorie fossile, on produisait 3,75 calories alimentaires en 1945 et 2,82 calories alimentaires en 1970.

séchage, par exemple, car le maïs hybride a une teneur en humidité élevée ( $> 13\%$ ) ; il faut sécher pour abaisser les pertes.

En résumé, les rendements de maïs sont passés de 25 q/ha à 60 q/ha (x 2,4) entre 1945 et 1970, alors que les intrants d'énergie sont passés de 0,9 M de Kcal à 2,9 M. de Kcal (x 3,1).

Le rendement énergétique a subi une diminution de 24 %.

L'intrant de combustible fossile représente une petite partie de l'intrant énergétique comparé à l'intrant d'énergie solaire, mais ce rapport va en augmentant ( $1,79.10^{-4}$  et  $5,66.10^{-4}$ ). L'énergie solaire est illimitée, le combustible fossile ne l'est pas (Cf. figure 2).

## 2) Solution de rechange

Le principale problème, pour l'agriculture occidentale, est de réduire les intrants d'énergie fossile.

1 - Première constatation, la **main-d'oeuvre** représente le plus faible de tous les intrants d'énergie. Une augmentation de main-d'oeuvre, du point de vue énergétique, serait économiquement avantageuse (Ex. Application d'un herbicide sur maïs : tracteur = 18.000 Kcal, à la main = 300 Kcal).

Remarquons que d'un point de vue financier, le coût d'application à la main coûte 4 fois plus cher (mais problème rareté énergie fossile). De plus, il faut voir les conséquences d'une restructuration de l'agriculture sur le chômage et sur l'urbanisation.

2 - Développement d'une **technologie mieux adaptée** (matériel spécifique) car on ne peut revenir aux bêtes de traits (coût énergétique élevé à cause de la nourriture).

3 - Les **engrais** sont de grands consommateurs d'énergie. En les remplaçant par l'épandage de fumier (surtout pour l'azote) → gain possible après bilan : 2,7 M de Kcal/ha (ce qui en plus recy-

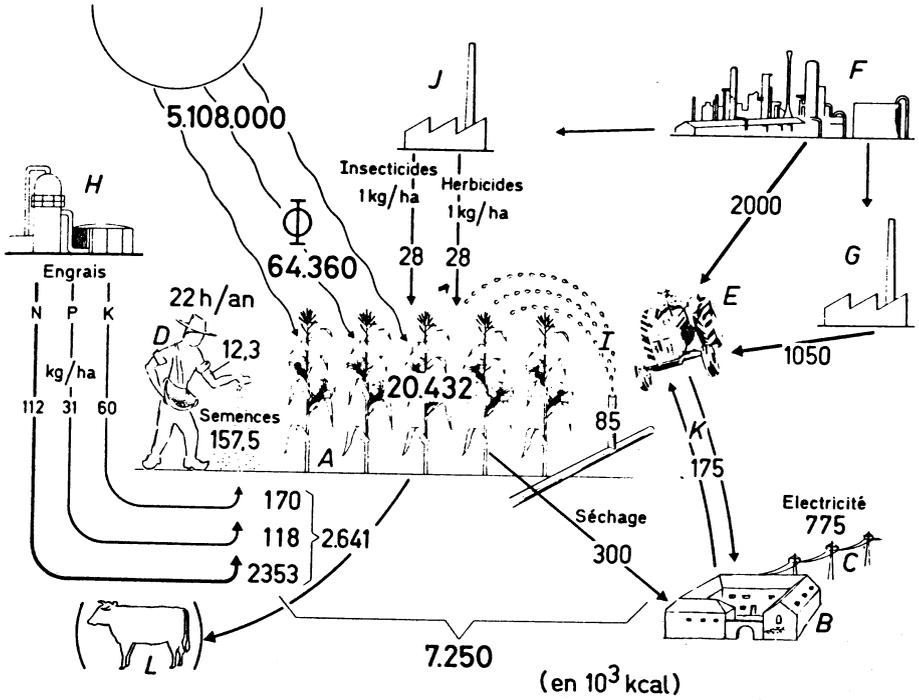


FIGURE 2 : Fonctionnement de l'écosystème "Champ de Maïs" aux U.S.A. Introduction d'énergie subsidiaire (données de Pimentel et al., 1973).

clerait les déjections animales). Pour l'**azote**, on peut aussi envisager un assolement associé avec des légumineuses (abaissement des besoins azotés du maïs et les légumineuses sont défavorables au vers du maïs).

4 - Le **génie génétique** pourrait produire des espèces hybrides à maturation plus rapide et plus résistantes aux maladies et aux insectes, et surtout capables d'assimiler directement l'azote atmosphérique.

5 - L'**eau** est d'un coût énergétique élevé (irrigation). Il faudrait planter le maïs en priorité dans les régions où l'irrigation n'est pas nécessaire.

Toutes ces solutions ne sont sûrement pas facilement praticables, autrement elles l'auraient été depuis longtemps ! Mais lorsque l'énergie deviendra rare et chère, toutes les solutions devront être envisagées.

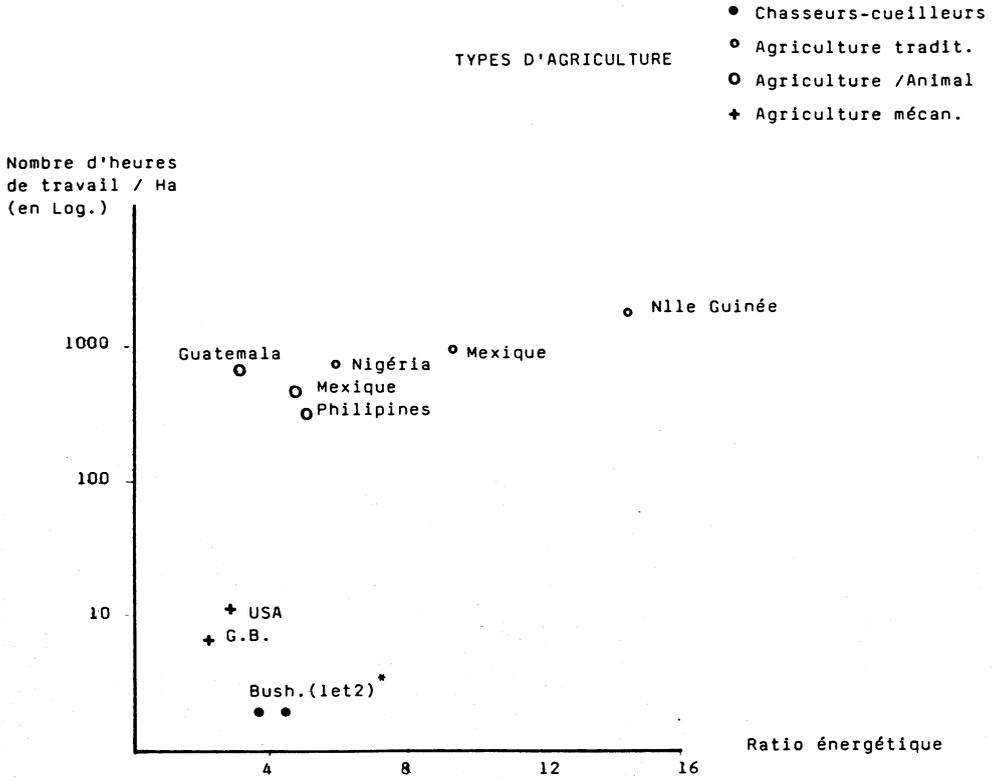
### 3) Comparaison entre différents systèmes agricoles

Comment se situe le modèle de l'agriculture occidentale par rapport à d'autres systèmes agricoles.

A partir des exemples proposés par PIMENTEL (1979), nous avons retenu quatre grands types de systèmes agricoles :

- chasse-cueillette
- agriculture traditionnelle à la main
- agriculture traditionnelle avec traction animale
- agriculture mécanisée.

En ce qui concerne le rapport entre le nombre d'heures de travail et le ratio énergétique obtenu, les Bushmen et l'agriculture américaine se rejoignent : peu d'heures de travail effectives pour un mauvais ratio énergétique ; à contrario, on trouve un très bon rendement énergétique pour beaucoup d'heures de travail dans l'agriculture traditionnelle (Cf. figure 3).



**FIGURE 3** : Ratio énergétique en fonction du nombre d'heures de travail selon le type d'agriculture

\*Pour les Bushmen, les points 1 et 2 correspondent à des zones de chasse et de cueillette distantes de 5 et 10 km du camp (cf. LEE-1969)

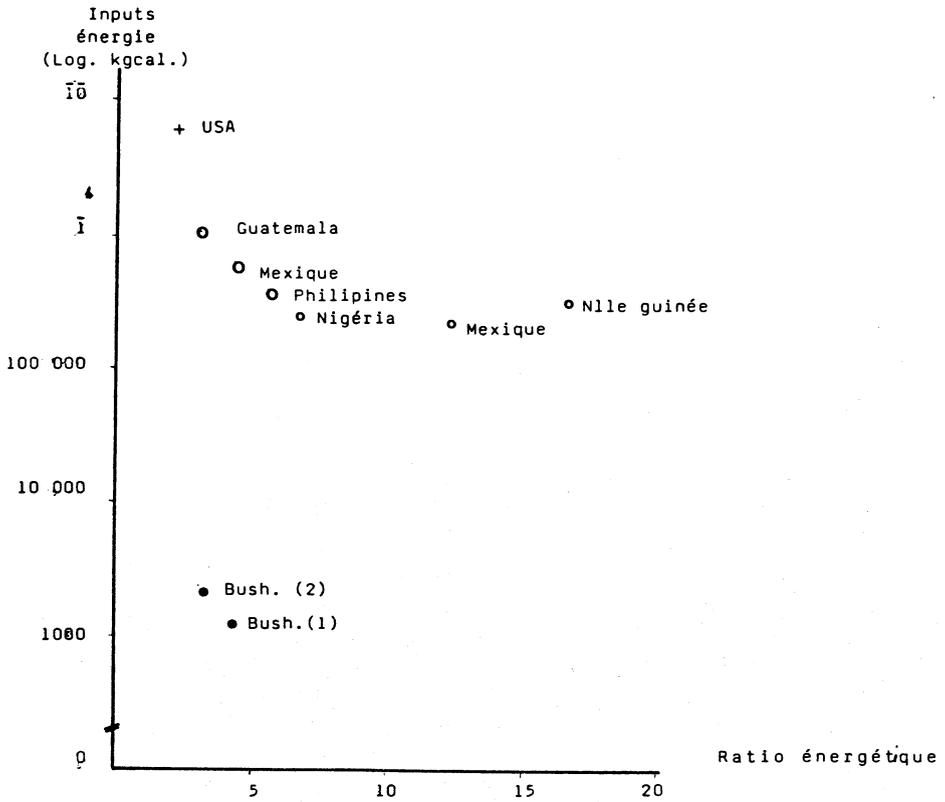
Si l'on fait intervenir le coût énergétique global nécessaire à l'obtention de ces ratio (figure 4), on remarque que l'ordre précédemment établi se trouve inversé, à l'exception des Bushmen qui conservent la même position : l'investissement énergétique est énorme pour l'agriculture mécanisée et le coût énergétique de l'agriculture avec traction animale dépasse celui de l'agriculture traditionnelle manuelle (nourriture des animaux).

Enfin, on peut se poser le problème de savoir si le bilan énergétique varie selon les types de productions végétales (dans les exemples précédents, nous n'avions pris que les céréales).

L'investissement énergétique nécessaire à la production légumière et fruitière dépasse nettement celui des productions céréalières (Cf. figure 5) (le ratio est à peine supérieur à 1, ce qui signifie que le gain énergétique est presque égal à son coût).

Dans le cas du riz, les japonais ont à la fois un coût énergétique et un ratio supérieurs à celui des USA, car ils allient une mécanisation poussée à un travail manuel important (repiquage intensif) ; d'autre part, le riz de Bornéo (travail manuel) exige un investissement énergétique moindre que le riz philippin (travail avec animal) pour un bien meilleur ratio. Pour la production de blé indien, où l'énergie animale demeure encore dominante malgré la "révolution verte", le bilan énergétique est encore plus médiocre que celui des USA.

Il apparaît au travers de l'exemple de l'agriculture, le double problème de l'emploi et du coût énergétique des types de développement. Réduire le développement à la seule croissance est encore plus impossible aujourd'hui qu'au temps de l'abondance énergétique (et pourtant les céréales sont considérées depuis longtemps comme des matières premières).



**FIGURE 4** : Ratio énergétique en fonction de l'investissement énergétique selon le type d'agriculture.

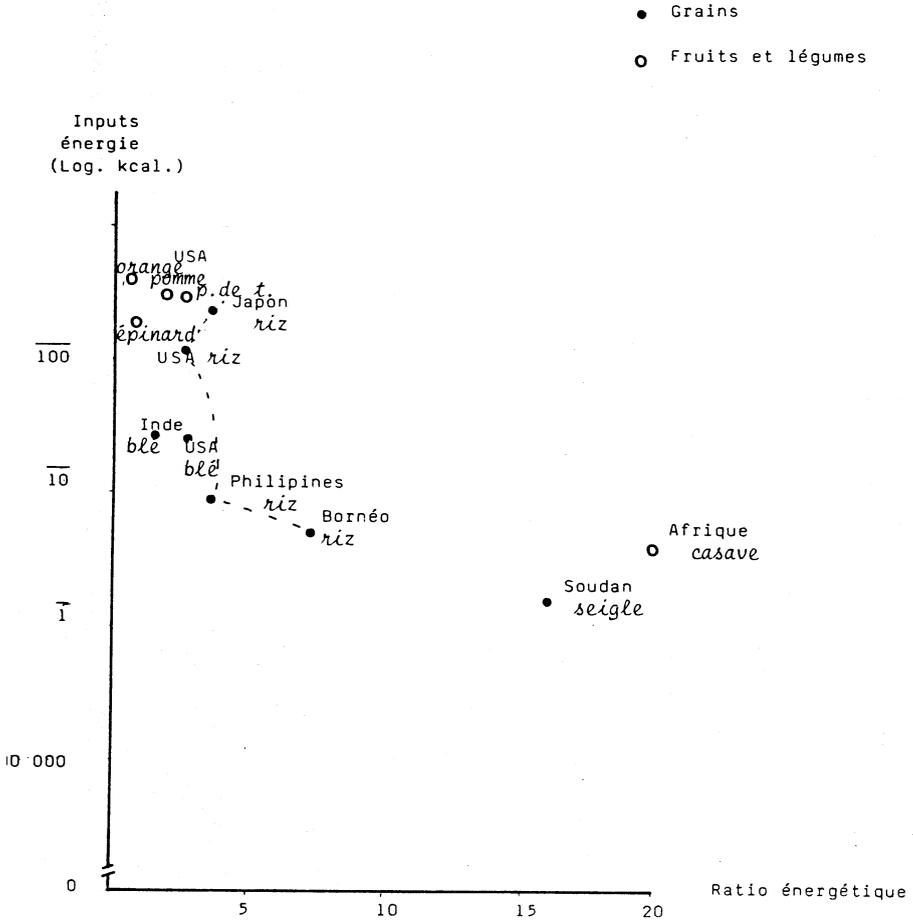


FIGURE 5 : Ratio énergétique en fonction de l'investissement énergétique selon le type de production végétale

De plus en plus, il faut mesurer du point de vue **énergétique** l'apport global par rapport à la production qui en résulte, pour apprécier l'efficacité d'un système économique (ce qui fait directement intervenir le problème de l'emploi). C'est dans cette mesure que l'énergie doit être prise comme unité fondamentale dans le procès économique.

---

BIBLIOGRAPHIE

---

- BOSERUP E. (1970). Evolution agraire et pression démographique - Paris, Flammarion, 221 p.
- COTTRELL F. (1970). Energy and Society - Westport - Connecticut, Greenwood Press, 330 p.
- DUVIGNAUD P. (1980). La synthèse écologique - Paris, Doin (2ème éd.), 380 p.
- GATES D.M. (1971). "The flow of energy in the biosphère" - Scient. Americ., 224, 3, 88-100.
- LEE R.B. (1969). "Kung bushman subsistence : an inpur-ourpur analysis". in Environment and cultural behavior : Ecological studies in cultural anthropology - A.P. VAYDA (ed.). Natural History Press-Garden city - New York, pp. 47-79.
- LOOMIS R.S., WILLIAMS W.A. and HALL A.E. (1971). "Agricultural productivity". Ann. Res. Plant Physiol., 22, 431-468.
- PIMENTEL et coll. (1973). "Food production and the energy crisis", Science 182, 4111, 443-449.
- PIMENTEL D. et M. (1979). Food, energy and society, London, E. Arnold, 165 p.
- RAMADE F. (1974). Eléments d'écologie appliquée, London, Paris, ... Mc Graw Hill, 576 p.
-