



AVERTISSEMENT

On trouvera ici un ensemble de textes qui constituent le début d'une recherche interdisciplinaire sur l'économie physique du renouvelable. Par renouvelable, on définit ce qui ne provient pas de sources fossiles. Bien que ces travaux soient encore au stade de la gestation, il nous a semblé nécessaire de leur assurer une diffusion restreinte afin de recueillir les critiques indispensables et de susciter d'éventuelles collaborations.

Ph.COURREGE

J.DEFLANDRE

P.MATARASSO

DOCUMENT PROVISOIRE ET CONFIDENTIEL. NE PAS DIFFUSER.

RECUEIL DE BANALITES A USAGE D'INTRODUCTION

Un certain nombre d'évènements récents, dont la menace d'épuisement, en une à deux générations, des gisements connus d'hydrocarbure, la disparition progressive de certaines espèces de poissons, consécutive à une pêche intensive, des évènements plus conjuncturels, comme la sécheresse de ces derniers mois, ont montré en quelques années la fragilité du lien qui existe entre les hommes et les ressources naturelles.

Le fossé s'accroît entre les pays développés et les pays en voie de développement. Aucune planification réelle des stocks épuisables d'énergie ou de nourriture n'a été jusqu'ici entreprise à l'échelle mondiale. Les pays les plus riches continuent à se tailler la part du lion, au détriment du reste du monde.

A la pression pétrolière, certains états envisagent de répondre par le chantage aux céréales. La poussée démographique aidant, on s'oriente de plus en plus vers une période où se succèderont les pénuries, pénuries touchant à diverses denrées alimentaires, énergétiques ou minérales.

De plus en plus, des limites apparaissent à l'exploitation des ressources terrestres :

- limites physiques des gisements exploitables
- limites géographiques résultant de la répartition inégale des gisements.

- limites politiques résultant de cette répartition inégale.
- limites écologiques à l'usage de certaines ressources (pollution thermiques, chimique, etc...).

Ces limites sont connues depuis longtemps; toutefois, on pensait repousser les échéances, voire les dépasser, grâce à des percées technologiques. L'expression mythique de cet espoir en la technologie était représenté par la confiance en la triple colonisation de l'espace, de l'océan et de la matière, sources "inépuisables" d'énergie, de nourriture et de matières premières bon marché. Bon nombre d'économistes, de cadres internationaux ont vécu depuis la fin de la guerre sur l'idée de sources "nouvelles" de matériaux (nodules de manganèse), d'énergie (nucléaire), de nourriture (protéines artificielles), relayant des sources anciennes.

Cet espoir en une technologie, dont les plus brillants résultats datent d'une époque d'abondance en matériaux et énergie, diminue aujourd'hui. Le plus puissant pays du monde se voit contraint de réduire son programme spatial, trop coûteux, le pétrole off shore demande des capitaux considérables, l'atome rencontre des difficultés au niveau du cycle du combustible dans la pénurie prévisible d'uranium et dans la réalisation des conditions de la fusion thermonucléaire contrôlée. Dans tous les cas, ces solutions restent hors de portée des pays en voie de développement.

Cette situation mondiale, empreinte de désenchantement, s'est traduite par un ensemble de symptômes comme :

- les rapports du Club de Rome
- la montée du courant écologiste
- les rapports du programme des Nations Unies sur l'environnement
- les mouvements en faveur des technologies douces, adaptées ou alternatives

- l'intérêt croissant pour l'énergie solaire.

Ces différents symptômes ont entraîné une certaine forme de culpabilisation qui a été à l'origine de décisions gouvernementales, dans de nombreux pays sur l'environnement, le respect de la nature, les énergies nouvelles. Peu à peu s'est dégagée une prise de conscience de la nécessité d'une symbiose réelle de l'homme avec le milieu naturel et le désir mal précisé d'une "autre croissance", impliquant un nouveau rapport avec la nature et de nouveaux rapports sociaux.

Dans le même temps, la crise de l'énergie s'est déclarée, puis approfondie. La pénurie énergétique a imposé une vision du monde nouvelle, où l'énergie est devenue une "catégorie fondamentale" au même titre que le capital, la monnaie, le travail humain. Par analogie avec l'économie, on s'est mis à faire des bilans énergétiques, des calculs d'amortissement énergétique, des analyses du transfert de l'énergie, etc... La crise de l'énergie a suscité la création d'un nouveau corps de spécialistes, de consultants, de chercheurs spécialisés dans l'analyse énergétique et la prospective énergétique.

Cette tendance, malgré son aspect réducteur (l'énergie n'est qu'une des dimensions de l'espace des ressources, les autres étant la surface de terres cultivables, les ressources en fer, cuivre, etc...) a entraîné l'introduction décisive d'une donnée physique dans les calculs économiques et a contraint à une prise en compte plus profonde qu'auparavant de la nature technologique de la production. Parallèlement s'est peu à peu développée une conception de l'économie où l'analyse du rapport des hommes à la planète prend une importance comparable à celle des relations de production entre les hommes.

Ces divers symptômes sont, bien entendu, plus que l'expression d'un malaise ou d'une crise de société, l'inscription de faits réels dont le plus important est probablement la mesure de la dimension finie de notre planète. En effet, de la démarche itinérante du stade de la cueillette aux colonisations agricoles et à l'expansion de la société industrielle, la notion de terres vierges aux ressources multiples et inexploitées garantissait l'avenir. Cet espace s'est aujourd'hui refermé et ce n'est pas par hasard que le terme "nouvelle frontière" est apparu il y a plus d'une décade, comme simple représentant idéologique, marquant ainsi la fin de la période des explorateurs et des premiers colons.

De dimension finie, la Terre doit cependant inclure une population humaine de plus en plus importante. En effet, la notable diminution de la mortalité infantile, l'augmentation de la durée de vie et la réduction progressive des grandes épidémies ont conduit (ceci à travers, entre autres, un faible investissement en moyens sanitaires) à une rupture de l'équilibre qui a longtemps existé entre l'espèce humaine et les différentes espèces animales et végétales qui peuplent cette planète. Il n'est pas dans nos intentions d'examiner ici les diverses causes de ce que l'on a appelé la "prodigieuse expansion de notre espèce". Nous remarquerons seulement que l'homme est le seul "prédateur universel", effectuant ses prélèvements à tous les stades du cycle écologique.

Indépendamment des raisons qui ont permis à l'espèce humaine de se développer "au delà" de sa place "écologique", on peut néanmoins, hors de toute prétention humaniste, examiner les possibilités de limitation en nombre à travers des systèmes "naturels", en entendant par là des causes de limitation ou de réduction de population pouvant avoir une origine sociale ou non, mais ne faisant pas appel à l'initiative individuelle (c'est à dire hors d'une politique de "limitation des naissances"). Parmi ces types de limitations, on trouve au premier chef (au niveau de

l'efficacité), les guerres, les épidémies, les famines, qu'elles soient volontairement provoquées ou non.

La dissémination progressive de l'armement nucléaire implique pratiquement le développement de tout conflit important en troisième guerre mondiale. Nous nous placerons volontairement hors de cette hypothèse de "solution finale". Il apparaît bien alors que les conflits "locaux" qui se sont multipliés dans les trente dernières années ne représentent pas un moyen convenable de limitation de la croissance de la population mondiale. Ils correspondent à un investissement (énergie, main d'oeuvre) important et très supérieur à ce qui aurait été nécessaire pour maintenir en vie la fraction de population éliminée. A titre d'exemple, le coût financier de la récente guerre du Vietnam a été de l'ordre de $\$120.10^9$, la réduction de population étant de l'ordre de $1,8.10^6$ hommes, ce qui représente un coût moyen de $\$67\ 000$ par habitant.

La plupart des épidémies peuvent, par ailleurs être réduites rapidement et à peu de frais. Les réductions de population qu'on peut en attendre sont donc faibles. Il n'en serait pas de même d'épidémies provoquées (guerre bactériologique). Mais du fait même qu'elles supposent un agent provocant elles seraient probablement génératrices de situations politiques conduisant à un conflit mondial.

Reste la possibilité de grandes famines, supportées passivement par des populations dont l'organisation politique est faible. Il apparaît bien que cette solution ne concerne qu'une faible partie de la population mondiale, la structure politique des lieux à forte densité de population s'étant maintenant nettement affirmée. Il est donc à peu près certain que la population mondiale des années 2 000 se situera entre six et dix milliards d'hommes. Quelles sont alors les nécessités?

De nombreux travaux ont tenté d'évaluer de façon prospective les consommations futures d'énergie sur la planète et la conséquence de la production de cette énergie sur le climat. Ces évaluations sont incertaines, la polémique restant parfois ouverte en ce qui concerne le sens des évolutions prévisibles, la majeure partie des auteurs concluant par une probabilité de réchauffement de la terre, due à la pollution thermique (toute énergie produite termine sa "carrière" sous forme thermique) et à l'augmentation de la teneur en CO² de l'atmosphère (augmentation de 9% depuis 1870, probabilité de 30% en 2 000). Sans vouloir reproduire ici de fastidieuses listes de chiffres, nous citerons quelques caractéristiques des prévisions pour la période 2 050-2 100. (Toutes énergies confondues).

consommation par habitant et par an	30.10 ³ KWh France actuelle	90.10 ³ KWh USA actuel	300.10 ³ KWh Doublement en 60 ans
Population mondiale 6 milliards	180.10 ¹² KWh Pas d'incidence climatique	540.10 ¹² KWh	1800.10 ¹² KWh
10 milliards	300.10 ¹² KWh	900.10 ¹² KWh ~0,2% de l'énergie solaire. Modification climatique locale	3 000.10 ¹² KWh
20 milliards	600.10 ¹² KWh	1800.10 ¹² KWh	6000.10 ¹² KWh 1% de l'énergie solaire. Modification climatique globale et profonde.

En abandonnant ces prévisions pessimistes, nous pouvons prosaïquement remarquer que les investissements nécessaires aux seules centrales électriques représentent :

\$3,6.10¹² dans l'hypothèse basse (6 milliards à 30.10³ KWh)

\$20.10¹² dans l'hypothèse moyenne (10 milliards à 90.10³ KWh)

\$120.10¹² dans l'hypothèse haute (20 milliards à 300.10³ KWh)

en se basant sur un rapport (électricité/énergie totale), voisin de la situation actuelle et un prix moyen des centrales correspondant à \$1000 le KW installé.

De tels chiffres paient peu. A titre de comparaison, le produit mondial actuel est de l'ordre de \$6.10¹². Les investissements nécessaires représenteraient donc de 0,6 à 20 fois le produit mondial actuel et ceci uniquement pour les sources d'électricité. Cependant, si l'on compare ces investissements aux dépenses actuelles d'armement (estimées à \$0,2.10¹²), on voit que, en se bornant aux hypothèses basses et moyennes, il y correspond respectivement 18 et 100 années de dépenses d'armement.

La situation mérite également d'être examinée sur le plan de la nourriture nécessaire à cette population. Rappelons ici quelques chiffres : la surface de notre planète est de l'ordre de 510.10¹² m², les masses continentales représentant environ 140.10¹² m², cette dernière surface n'étant pas entièrement propre à la culture (zones montagneuses, déserts, etc.... Selon l'annuaire de la FAO, 10% des terres émergées sont cultivables).

La surface nécessaire à la vie d'un homme varie bien évidemment selon les climats et les modes d'utilisation du sol. S'il faut 140 km² à un esquima 250 m² suffisent à un jardinier chinois. En Grande-Bretagne, la surface cultivée représente 7 000 m² par habitant. Elle est en moyenne de 11 000 sur la surface de la terre. Par contre, une agriculture intensive permettrait de ramener cette surface à 1 000 m² par habitant. Dans ce type d'agriculture, le rendement énergétique ($\frac{\text{production}}{\text{consommation}}$) est de l'ordre de

3 à 4. C'est donc une agriculture coûteuse en énergie, mais permettant une production élevée sur une surface réduite.

Nous retiendrons de ces chiffres que la surface de sol nécessaire à la nourriture d'un homme se situe entre $1\ 000\ m^2$ et $10\ 000\ m^2$. En reprenant les hypothèses de population citées plus haut, on arrive aux résultats suivants :

Population	$6 \cdot 10^9$	$10 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^9$
$1\ 000\ m^2/\text{habitant}$	$6 \cdot 10^{12}\ m^2$	$10 \cdot 10^{12}\ m^2$	$20 \cdot 10^{12}\ m^2$
$10\ 000\ m^2/\text{habitant}$	$60 \cdot 10^{12}\ m^2$	$100 \cdot 10^{12}\ m^2$	$200 \cdot 10^{12}\ m^2$

On remarque immédiatement que, dans le cas du maintien du rendement actuel de l'agriculture sur le plan mondial, la surface nécessaire est, dans le cas d'une population de 10 milliards d'hommes (probable), voisine de la surface des terres émergées et, dans le cas d'une population de 20 milliards supérieure à la surface des terres émergées dont seul le dixième est actuellement jugé cultivable. L'utilisation (supposée possible) d'une agriculture intensive sur une surface correspondant au septième des terres émergées semble cependant résoudre le problème. Il reste à examiner le coût énergétique d'une telle agriculture. Si l'on admet une réduction drastique des activités à très faible rendement (en particulier l'élevage), on peut espérer un rendement énergétique de l'ordre de $5(R_c)$.

La nourriture d'un homme nécessitant environ $2,8\ kWh/\text{jour}$, on est conduit aux résultats suivants en ce qui concerne l'investissement énergétique annuel :

Population	$6 \cdot 10^9$	$10 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^9$
$1\ 000\ m^2/\text{habitant}$ $R_c = 5$	$1,2 \cdot 10^{12}\ kWh$	$2 \cdot 10^{12}\ kWh$	$4 \cdot 10^{12}\ kWh$
$10\ 000\ m^2/\text{habitant}$ $R_c = 15$	$0,4 \cdot 10^{12}\ kWh$	$0,7 \cdot 10^{12}\ kWh$	$1,4 \cdot 10^{12}\ kWh$

7.

Ces chiffres sont évidemment approximatifs, les consommations énergétiques dépendant beaucoup des types d'agriculture et des produits cultivés. Ils donnent néanmoins un ordre de grandeur des consommations à prévoir.

Il apparaît clairement que ces chiffres sont faibles devant les prévisions exposées plus haut et que la subsistance d'une population de l'ordre de 10 milliards d'hommes peut être assurée au prix d'une agriculture adaptée et élaborée.

Nous n'avons examiné ici, à titre d'exemple, que deux postes de la consommation humaine : l'énergie et la nourriture. Une telle démarche pourrait porter sur les minéraux d'origine fossile et de nombreux auteurs ont déjà décrits les probabilités futures de pénurie.

Il est donc possible de poser la question de l'universalité de la "société industrielle" telle que nous la vivons actuellement, ses possibilités d'extension à l'ensemble de la planète et à une population de l'ordre de dix milliards d'habitants semblant plus que problématiques.

Nous ne devons pas dissimuler les difficultés de cette interrogation, même si nous la posons résolument hors de toute culpabilité ou de tout esprit missionnaire. Situés au coeur de cette société, connaissant ses avantages tentés de considérer ses inconvénients comme des erreurs ou des désorganisations locales corrigeables à travers des aménagements politiques (des utopies socioculturelles), nous sommes tout naturellement conduits à envisager sa généralisation. Cette dernière nous est cependant apparue comme tout à fait improbable, quel que soit notre désir d'exemplarité, et nous devons prendre conscience du fait que cette société est localisée dans l'espace et dans le temps, parce que limitée dans l'espace et dans le temps. Elle n'a pu en effet se développer que par exportation de sa pénurie en ressources fossiles (découverte de nouveaux gisements) et sa

durée n'est que celle de ces ressources. Ce n'est pas pour autant que ses immenses acquis technologiques ne puissent s'adapter à de "nouvelles ressources" à travers une suite de mutations qui doivent d'ores et déjà être envisagées.

Il n'est donc pas possible de considérer la société industrielle comme un "âge" de l'humanité, étape que devrait traverser à plus ou moins brève échéance toute société humaine.

Un sol de surface limitée, des ressources fossiles qui s'épuisent, une société industrielle qui a perdu son universalisme mythique, ainsi se marque aujourd'hui la fin prochaine du stade de la cueillette et la nécessité réelle, loin de tout fantasme naturalisant, d'une nouvelle politique d'insertion des hommes dans leur milieu.

Les démarches jusqu'ici utilisées dans ce but ne conviennent plus. Face à des systèmes complexes, liés à des contraintes historiques peu mesurables elles se contentent généralement d'ajustements à court terme. Mais ceux-ci s'effectuent bien souvent à travers des investissements élevés qui ne peuvent être justifiés que par leur possibilité d'existence à long terme. Les situations se trouvent ainsi "gelées" à travers des choix dont la durée d'existence est très supérieure à la durée de validité des prévisions qui les ont produits. Toute politique qui se voudrait "raisonnable" en prenant en compte les conséquences futures des investissements qu'elle entreprend se heurterait encore à la fragilité de l'extrapolation d'une situation actuelle malconnue à travers une évolution historique que l'on ignore. C'est bien pourquoi la futurologie, toute excitante qu'elle soit pour le lecteur, n'est bien souvent que de l'histoire-fiction. Le recours à la création d'utopies ne semble guère plus opératoire. En effet, l'utopie étant définie, on peut effectivement examiner les conditions de son émergence et imaginer les stratégies de transition nécessaire au passage

de la situation actuelle : à la réalisation de l'utopie. L'apparente réalité de cette démarche, qui conduit souvent à la détermination de lignes d'actions à travers des raisonnements rigoureux , masque le point de départ de l'utopie, à savoir la situation historique qui l'a produite dans l'ignorance des conditions matérielles de sa réalisation.

Face à cette impuissance ressentie, quand à un avenir que nos décisions quotidiennes déterminent de plus en plus profondément sans que nous puissions le prévoir, nous entreprenons actuellement un travail dont les premières articulations se présentent comme :

- une démarche assez globaliste concernant ce qui sera défini plus loin comme "écosystèmes construits". Ce travail vise l'examen "in fine" des possibilités de la planète à travers des systèmes conçus pour utiliser au mieux les ressources renouvelables, donc issues de l'activité solaire.

- la proposition de création d'un centre d'expérimentation des technologies utilisant ces ressources renouvelables et, plus particulièrement, de l'étude des liaisons possibles entre ces technologies.

Il ne s'agit pas là d'un projet de restructuration de la planète, mais bien d'une tentative limitée de liaison du possible au nécessaire. Il faut en effet remarquer que les modèles actuels de prévision sont essentiellement axés sur des extrapolations de la société industrielle et semblent oublier que la majorité de la population mondiale vit et continue à vivre dans des zones à dominante agricole.

Les textes qui suivent sont, bien entendu, inhomogènes dans leur présentation et dans l'avancement des travaux qu'ils impliquent. Ils sont ici donnés à titre d'exemple pour indiquer l'orientation générale de cette recherche.

Que ce travail puisse, au cours de son évolution, servir un peu de soutien et de garde fou aux constructeurs de sociétés que sont les hommes, sera notre espoir.

UN PROJET DE RECHERCHE : LES ECOSYSTEMES CONSTRUITS

L'implantation des établissements humains s'est toujours déroulée de façon pragmatique, suivant la logique d'une économie de cueillette. Ceci correspondait au caractère ouvert de l'espace des ressources et à la possibilité de son extension spatiale. Cet espace se referme aujourd'hui, la mesure de ses limites étant de plus en plus précise en ce qui concerne les énergies et les matériaux "fossiles". De surcroît, la croissance de la population mondiale ne peut être brutalement réduite. La planète devra donc progressivement jouir de ses revenus au lieu de consommer son capital. Cette situation qui suscite de nouvelles technologies conduira à de nouvelles méthodes de gestion.

On ne visera pas ici à résoudre ce problème, mais on tentera d'ébaucher une méthode d'évaluation pouvant aider à un choix raisonné des possibilités d'établissement humain à travers une analyse privilégiant la réalité physique quantifiée au détriment des variables financières.

Ce travail s'effectuera à travers une démarche réductrice radicale, démarche qui consiste à "évacuer" l'ensemble des problèmes socio culturels et à ne prendre en compte que les technologies utilisant des matériaux et des sources d'énergie renouvelables. Les matières fossiles actuellement utilisées ne seront considérées que dans la mesure où elles peuvent être considérées comme renouvelables, c'est à dire lorsque l'on peut leur affecter un "cycle" définissant leur circulation et quantifier les étapes de ce cycle. En outre, nous tenterons de décrire les équilibres de systèmes "stables" dont les

bilans entrées-sorties seront positifs sur la majorité des postes examinés. Il ne s'agit pas là de tentatives plus ou moins utopiques d'"autarcie", mais d'une contrainte que l'on s'impose en vue de parvenir à une optimisation maximale des systèmes. Cette contrainte permettra d'envisager, dans la suite de l'étude, les interactions entre systèmes et conduira de façon plus aisée au montage d'un "système des systèmes". Dans une telle démarche, les bilans ne sauraient, de toute évidence, être décrits en termes monétaires. Les valeurs choisies, pour l'étude des circulations et des équilibres, sont donc l'énergie et le temps de travail humain. Le terme "humain" n'est employé ici qu'à titre d'indicateur, les éléments socio culturels ayant été éliminés. Les hommes ne seront donc dans ces systèmes que des éléments producteurs, considérés à la fois par rapport au travail produit et par rapport au processus de production des éléments producteurs eux-mêmes (ce processus de production comprenant l'alimentation, la protection contre les aléas climatiques, la transmission et le maintien en état des forces de production).

Les résultats que l'on peut espérer de ce type d'études ne sont donc pas applicables à la construction de systèmes "réels". Ils pourront cependant servir de guide à l'évaluation du fonctionnement de systèmes réels existants ou ayant existé et, dans une certaine mesure, permettront une rationalisation des choix dans le cas de systèmes en cours de développement.

Dans un premier temps, ces études seront menées sur des systèmes à dominante agricole pour la simple raison que ces systèmes utilisent déjà actuellement certaines matières et énergies renouvelables. Elles s'étendront ensuite à des systèmes industriels, considérés uniquement comme devant satisfaire les nécessités d'outils industriels des systèmes agricoles et susceptibles d'absorber leur "surproduction agricole" à travers un système d'échange.

1. DEFINITION DE L'ECOSYSTEME CONSTRUIT

Nous allons maintenant tenter, à travers une suite de remarques à but de garde fou méthodologique, de définir, caractériser et justifier ce modèle l'Ecosystème construit.

1.1. Le terme Ecosystème construit (ESC) se définit par l'articulation de ses deux composants. En effet, toutes les études actuelles sur les écosystèmes sont axées sur l'examen d'équilibres "naturels" alors que le développement historique a fait émerger des systèmes agraires et industriels complexes où s'exerce l'activité humaine. Mais ces dernières n'ont pas été "construits" au sens premier de l'architecte et leur croissance anarchique pose un problème souvent dit de "société". Par opposition, un ESC tend à substituer à cette situation conflictuelle non maîtrisée et instable un ensemble de productions en relations mutuelles, étudiées pour assurer une adaptation maximale du milieu à l'activité prédatrice de l'homme. Cette adaptation qui peut, à la limite, se traduire par une restructuration complète de l'environnement, implique un strict contrôle de son fonctionnement afin d'assurer sa reproduction et sa stabilité.

1.2. Un ESC va donc se présenter comme un artifice de montage, se fixant un certain nombre d'objets qui seront les pièces du jeu, des règles d'assemblage et de fonctionnement et un but final. Imitation du comportement réduit d'un écosystème, il pourra donc être considéré comme complètement transparent. N'étant pas construit pour ressembler à la réalité, son fonctionnement ne pourra pas rendre compte de "faits réels observés". Au contraire d'un modèle du type structuraliste, un ESC ressort donc de la classe des automates. C'est un automate transhistorique.

- 1.3. Quoique artifice de montage, un ESC peut néanmoins être considéré comme un objet matériel. Il peut effectivement être fabriqué et c'est alors l'équivalent d'un instrument scientifique. La réunion des moyens nécessaires à cette fabrication pose, bien sûr, un problème qui se situe hors de la construction et de l'étude des fonctionnements de l'ESC. Ce problème apparaîtra a posteriori au niveau de la possibilité de production de ces moyens par l'ESC lui-même.
- 1.4. L'étude d'un système, quel qu'il soit, et pourvu qu'on le considère sur une durée de temps supérieure à la durée de vie de l'élément le moins pérenne postule l'étude de ses conditions de reproduction interne. Ce n'est pas là étudier l'histoire du système. L'histoire est l'inscription à posteriori des modifications. Un système stable est une page blanche de l'histoire.
- 1.5. La reproduction d'un système implique la transmission de son message et sa transcription dans l'ordre du matériel. Cette opération nécessite une dépense de matière et d'énergie. Cette dépense est donc le surplus minimal du système nécessaire à sa survie. Une survie plus "sûre" ou plus "confortable" implique la nécessité d'une redondance de la transmission et de la transcription, donc un surplus majoré.
- 1.6. La notion d'histoire (ou de devenir) d'un ESC n'apparaît que pour un surplus très important qui, joint à la logique de fonctionnement ou, plus simplement lié à un but fixé, permet un taux de reproduction de l'ESC très supérieur à ce qui est nécessaire à son maintien à l'état stable. L'ESC pourra alors s'agrandir, se perfectionner, par exemple, rembourser l'investissement initial qui a permis sa création.

1.7. Rappelons ici encore qu'il n'est pas question, à travers un ESC, de l'étude d'une société "équilibrée" au sens des "idées" du manipulateur de l'ESC. Le terme société ne s'inscrit que dans l'approche historique qui la décrit postérieurement ou dans l'approche sociologique qui s'essoufle à poursuivre un modèle dont elle est elle-même l'objet. Ce n'est pas là notre propos.

1.8. Dans cette mesure l'étude des modèles historiques, dont nous ne nions pas l'intérêt, semble paradoxalement sans utilité pour ceux qui tentent de "faire l'histoire". Elle engage en effet dans une voie de comparaison (et aussi d'amalgame) entre des situations qui n'ont en commun ni l'espace ni le temps. Et elle vise, à travers des identités plus ou moins reconnues (ou ressenties) à effectuer des prévisions ou même à trouver des règles d'action (les mêmes causes produisent les mêmes effets). C'est une démarche proche de la prévisions météorologique. A contrario, nous tenterons de promouvoir la "pensée du jardinier" qui, sur son sol, équilibre sa production et ses besoins.

1.9. On peut, de la même façon, remarquer que les études actuelles sur les "écosystèmes" sont :

- soit à caractère descriptif, souvent dans la tradition de pensée des naturalistes du XVIIIème siècle. A la limite, elles sont symptôme d'un "regret de la nature".
- soit à caractère unidimensionnel dans leur tentative de tout quantifier à travers une variable unique permettant l'étude d'une circulation de flux. La transformation des phénomènes politiques ou religieux en kilowatts.heure est un exercice intéressant, mais nous semble peu opérationnelle. De plus, la complexité des systèmes humains est telle que ces résultats ne peuvent être obtenus que sur des exemples simples (l'Oasis

l'Atoll du Pacifique). Ces exemples ont, par ailleurs, amplement prouvé leur fragilité par rapport aux perturbations extérieures qu'elles soient climatiques, idéologiques ou économiques. Aucune de ces études ne permet de gérer un système ni même de guider un choix.

1.10 Il ne s'ensuit pas que les études écosystémiques de sociétés humaines ne puissent présenter un grand intérêt. Au contraire, envisagées sous l'angle de l'inscription historique, elles permettent :

- de pointer les principaux paramètres en cause et de juger de leur pertinence (besoins réels, techniques et matières utilisables, etc...).
- de recueillir les données numériques indispensables à toute évaluation d'un ESC.
- de définir les paysages géoclimatiques où faire évoluer les ESC.

1.11 Il apparaît donc bien qu'un ESC, en tant qu'automate transhistorique se veut dégagé de toute référence à un "modèle de société". Ce n'est pas pour autant qu'il doit être considéré sans référence à l'existence de l'"humain". Ce concept réapparaît en effet au niveau de :

- la notion de consommation stricte
- l'éventail des techniques prises en compte, celui-ci correspondant en fait au langage minimal de l'espèce.

De plus, la nécessité de l'existence d'un "poste" socio culturel n'est pas totalement escamotée. Sa possibilité apparaîtra dans le surgissement d'un temps et d'une énergie "disponibles", surplus du système dont l'inscription ne postulera pas l'usage.

1.12 Indiquons enfin que la notion de "consommation stricte" tend à s'écarter totalement du concept fourre tout de besoin. Il nous apparait souvent que tout se passe comme s'il existait deux planètes l'une productrice et l'autre consommatrice. Et que la production est de plus en plus faite pour être consommée et non la consommation pour être produite. Il semble donc que la notion de besoin ait perdue sa localisation, et ce, à tel point, qu'une définition du besoin nous paraît recouvrir une pure tautologie.

La "consommation stricte" (élément que l'on pourra d'ailleurs faire varier à volonté) ne prend en compte que des éléments du type rationnel alimentaire, protection contre le climat, etc..., éléments que nous hésitons à qualifier de physiologiques. Ces choix sont bien évidemment sujets de critiques si l'on oublie que les habitants d'un ESC ne sont considérés que comme force productive et que, procéder autrement serait s'interdire l'étude d'un ESC tel qu'il a été défini ici.

2. PRODUCTION D'UN ECOSYSTEME CONSTRUIT

Ces préalables méthodologiques ayant été inscrits, il nous est maintenant possible d'exposer un mode de production et d'étude de fonctionnement d'un ESC tel qu'il nous semble actuellement envisageable, c'est à dire sous la forme d'un automate à dominante agraire, utilisant uniquement des ressources renouvelables, conçu pour un fonctionnement en régime permanent avec une période de reproduction interne (retour à l'origine) d'une année, l'étude du fonctionnement s'effectuant à travers une analyse physique de la circulation des flux sur cette période, considérée comme prise à n'importe quel moment de la vie de l'ESC.

2.1. Eléments de construction

La première phase de construction d'un ESC consiste à rassembler les pièces du jeu. Leur choix s'effectue dans des catalogues qu'il importe donc en premier lieu d'établir :

2.1.1. Catalogue "Paysages géoclimatiques".

Il est constitué à partir de l'intersection de différents types de sites (plaines, vallées, zone cotière, etc...) avec des climats types (océanique, tropical, etc...). Un certain nombre (aussi réduit que possible) de "paysages" sont ainsi définis à travers cette combinatoire. On les caractérisera alors par les différents sols et les végétations existantes ou possible en y ajoutant les données climatiques correspondantes et les ressources énergétiques qui peuvent y être puisées (eau, soleil, vent).

2.1.2. Catalogue "population"

C'est ce qui concerne la production et le maintien en état de la force de travail : ration alimentaire, protection contre les aléas climatiques (vêtement et habitat), maintien en état (problèmes de santé), transmission de l'acquis technologique (éducation).

L'établissement de ce catalogue devra résister à deux tendances : celle de définir un "humain type" valable dans toutes les ESC et celle de définir un type d'humain par ESC. La voie la plus raisonnable semble de définir les consommations strictes de quelques "types" à partir d'un catalogue réduit de paysages géoclimatiques (constat de l'adaptabilité de l'espèce).

2.1.3. Catalogue "technologies"

Il comporte bien évidemment toutes les technologies agricoles et industrielles utilisées dans le fonctionnement de l'ESC. Parmi les technologies possibles, seront retenues les moins dispendieuses en énergie et en temps de travail. Ces technologies concernent :

- La production alimentaire :
 - différents modes d'agriculture (intensive, extensive, serres, cultures sans sol, irrigation, etc...)
 - différentes productions agricoles (céréales, fruits, légumineuses, etc...).
 - modes d'élevage et production correspondantes.
 - pisciculture, pêche
 - etc...
- La production d'énergie :
 - centrales solaires, éoliennes, hydraulique, utilisation des résidus agricoles, cultures énergétiques, etc...
- La production de matériaux :
 - bois, paille, pierres, etc...
- La production de fabricats :
 - on définira comme fabricat toute production du système correspondant à un matériau ou à un produit récolté transformé. Par convention, sera défini comme matériau tout objet collecté au niveau de la cueilte et n'ayant subi une transformation immédiate qu'en vue de faciliter sa récolte et son transport vers le stockage ou l'utilisation. Ainsi un arbre coupé et ébranché sera un matériau, une poutre un fabricat, un fruit ressort de la production d'aliments, une conserve, de la production de fabricat, etc...

Toutes ces technologies seront évaluées en fonction du temps de travail et de l'énergie nécessaire par unité produite. Dans ces évaluations entreront le temps de travail et l'énergie utilisées à l'entretien des outils du système et à leur amortissement. On appellera outils du système les objets manufacturés utilisés dans la production de l'ESC ou servant à la réparation et à l'entretien de ces objets. On trouvera, par exemple, le matériel agricole, les unités de fermentation, l'habitat, le matériel domestique, etc... dans la première catégorie. Certaines machines outils et outillages de réparation dans la seconde.

Dans les évaluations de valeurs, certains problèmes peuvent se poser. Ils sont mineurs en ce qui concerne la production alimentaire, l'énergie et les matériaux, l'ensemble de ces éléments étant, pour l'essentiel, produits à l'intérieur de l'ESC. Il n'en n'est pas de même pour ce qui doit être importé. L'ESC ne pouvant disposer en son sein de toutes les technologies nécessaires. Ce matériel comportera des produits finis (qui seront bien souvent les outils de l'ESC) et, éventuellement, des matériaux indispensables non disponibles sur place. On conviendra de donner pour valeur à ces objets l'énergie et le temps de travail nécessaire à leur production à l'extérieur de l'ESC et à leur transport jusqu'au lieu de l'ESC. Ces valeurs pourront être minorées de la valeur de récupération de ces produits retransportés dans l'"extérieur" de l'ESC lorsqu'ils sont hors d'usage. L'extérieur de l'ESC apparaît donc ainsi comme une "boîte noire" susceptible de fournir à l'ESC ce qu'il ne produit pas et capable d'absorber en échange une production de l'ESC, la balance s'effectuant en énergie et en temps de travail. Cette première règle d'échange (qui apparaîtra dans la formalisation exposée plus loin sous

11.
l'aspect d'une "fonction de valorisation") pourra ensuite être affinée.

On pourra objecter que les choix de technologies comportent une part d'arbitraire non négligeable. On remarquera simplement ici que l'absence d'éléments socio culturels et le fait que l'on considère en premier lieu une production à dominante agricole réduit considérablement la portée de ces objections et que le choix d'une technologie n'est pas la prise en compte de son histoire.

2.2. Mode de construction d'un ESC

Il est maintenant possible, à partir d'objets choisis dans ces catalogues, de procéder au montage d'un ESC. Le premier critère servant de guide est, bien évidemment, la possibilité d'existence. Faire l'architecture d'un ESC consistera donc à articuler et à équilibrer les différents flux productifs afin que la population habitant l'ESC y trouve sa source de vie.

Les principales étapes de la production d'un ESC peuvent donc se définir comme suit :

2.2.1. Choix d'un paysage géoclimatique

Ce choix est arbitraire. C'est le lieu où l'on veut implanter l'ESC.

2.2.2. Choix d'une population

Par définition, cette population doit être stable. On définira donc une pyramide des âges fixe, ce qui imposera le choix d'une population minimale. De cette façon, l'équilibre entre producteurs et non producteurs ne sera pas modifié et n'entrera pas dans les variables examinées dans l'étude du fonctionnement de l'ESC (il sera cependant possible, dans un

deuxième temps, d'examiner l'influence des modifications de population).

Le choix de cette population permet la définition de la consommation stricte.

2.2.3. Choix d'un lot de technologies

Ce choix s'effectuera par comparaison entre les "ressources" du paysage géoclimatique choisi et la consommation stricte de la population défini ci-dessus. Il s'agit d'une articulation du possible au nécessaire.

2.2.4. Première articulation de l'architecture

Cette première construction ne peut être effectuée que par tâtonnements successifs à travers des bilans partiels du type comptable. Elle visera essentiellement à définir les surfaces des sols et leurs utilisations, les principaux modes de production et amènera à une articulation sommaire de la circulation des flux productifs. A son achèvement, correspondra une première définition des nécessités en énergie, travail, matériaux et une première évaluation des productions.

2.2.5. Deuxième articulation et première architecture optimisée

L'étude du fonctionnement de l'ESC primaire permet alors une meilleure définition des équilibres, une évaluation plus précise des importations minimales, etc... Il sera alors possible, sur un ESC reconstruit et rééquilibré de définir avec une certaine précision :

- le temps et l'énergie "disponibles"
- les fabricats et les matières exportables
- les importations indispensables.

2.2.6. Architectures successives

Les étapes précédentes ayant conduit à la construction d'un modèle en état de marche, on pourra alors apporter aux conditions initiales un certain nombre de perturbations et examiner leur répercussion sur la stabilité du modèle.

2.3. Etude du fonctionnement

Il importe de préciser maintenant comment s'effectuera l'étude du fonctionnement de l'ESC. Celui-ci étant par définition un système stable, il ne peut s'étudier qu'à travers son mode de reproduction.

- Reproduction interne d'abord sur une période correspondant aux variations des équilibres. Le rythme choisi est l'année correspondant à une situation répétitive en ce qui concerne les productions agricoles et énergétiques.
- Reproduction externe ensuite, si on lui fixe pour but non seulement de compenser ses pertes, mais de se dupliquer en tant que système.

On trouvera plus loin une proposition de formalisation permettant l'étude du fonctionnement d'un ESC et, par voie de conséquence, l'optimisation de son architecture.

Lorsqu'on aura atteint cette étape de l'étude, on examinera la fabrication d'un ESC en tant qu'objet matériel afin d'évaluer les moyens nécessaires à cette fabrication. Ceux-ci seront définis à travers une comptabilisation de toutes les installations (en partant du défrichage éventuel des sols, les routes, les bâtiments, les outils, le matériel domestique, etc...). On y ajoutera le bilan des consommations correspondant à une année (la "première année") de fonctionnement de l'ESC. Ce bilan pourra, dans une certaine mesure, être pondéré par la production "au fil du temps" de l'ESC (en particulier en ce qui concerne l'énergie).

Ce coût total (en travail et en énergie) pourra alors être comparé au surplus du système, tel qu'il a été défini. Il sera possible de définir ainsi un temps de doublement de l'ESC, temps qui correspond également au remboursement de la "dot" qui a permis de le fabriquer.

3. LES GRAPPES D'ESC

Un certain nombre de types d'ESC ayant été ainsi définis, il restera à articuler les rapports qui peuvent exister entre eux et entre eux et l'extérieur en ce qui concerne les échanges nécessaires. Le choix portera de préférence sur un regroupement de types d'ESC correspondant à des paysages géoclimatiques susceptibles d'être voisins dans la configuration géographique de la planète. Une somme de nécessité d'importations de cette grappe d'ESC se dégagera ainsi, importations en provenance de l'extérieur, considéré jusqu'ici comme une boîte noire et dont nous allons maintenant tenter de cerner l'existence.

Nous garderons le terme d'ESC pour ce système à dominante industrielle dont l'activité principale est d'effectuer l'élaboration de matériaux et leur transformation en fabricats. La réflexion sur ce type d'ESC étant encore embryonnaire, nous nous bornerons ici à en indiquer les tendances.

4. L'ESC INDUSTRIEL

On s'attachera d'abord à définir la production industrielle d'un tel ESC, la production de sa force productive étant, dans un premier temps, considérée (au moins sur le plan alimentaire) comme relevant de ses importations.

Une liste des produits "nécessaires" est, de toute évidence, bien difficile à établir à partir du catalogue des produits de la société industrielles actuelle. On fera le choix de prendre comme objets nécessaires l'ensemble des objets devant être importés par les ESC agraires pour leur propre fonctionnement. On étudiera les substitutions possibles entre ces différents objets afin de réduire les redondances d'usage.

Le choix de la production est donc renvoyée aux nécessités des ESC agraires et par là même, à la consommation stricte de la population. On pourrait, bien sûr, épiloguer ici sur une éventuelle opposition entre la pelle et la charrue ou entre l'animal de trait et le tracteur. Rappelons ici encore que les comparaisons en valeur (énergie, travail) permettront de lever les doutes et qu'elles restent l'un des critères de pertinence de cette étude.

Il apparait donc clairement qu'un ESC industriel se définit par rapport à la grappe d'ESC agraires qu'il alimente et ce, dans la production d'objets industriels exigeant une certaine concentration de moyens de production (effets d'échelle). Le germe d'un tel ESC est donc un catalogue de nécessités (qui sera en relation directe avec la catalogue de technologies évoqué plus haut).

Pour chaque type de nécessité, on déterminera alors, par une enquête critique sur les techniques actuelles réalisées ou réalisables :

- le mode de production le plus économique
- le plus petit module économique d'usage de ce mode de production.

Ce ci afin d'effectuer une mesure aussi précise que possible des désavantages éventuels de la décentralisation.

On envisagera ensuite le regroupement de tels modules au sein d'un ESC industriel à travers une interconnection des consommations et des productions de ces modules (récupération d'énergie, sous produits, éléments de base communs, etc...). Il est probable qu'une telle démarche conduira à des ESC industriels de taille différente correspondant à des degrés divers de centralisation.

Les matériaux et énergies renouvelables étant à la base de notre démarche, il convient de définir comment seront pris en compte les matériaux d'origine fossile pour lesquels aucune substitution n'aura pu être effectuée. On définira, pour ces matériaux, un cycle de circulation (cycle du fer par exemple). La notion de mine en tant que lieu localisé s'estompe ainsi, la source du matériau étant l'ensemble des lieux où il est utilisé sous forme de produit oeuvré. Dans cette optique, les ressources fossiles sont considérées comme destinées à compenser les pertes inévitables se produisant au cours du déroulement d'un cycle.

Contrairement aux systèmes industriels actuels, généralement implantés au voisinage de sources d'énergie et de matière première, un ESC industriel sera lié aux ESC agraires qu'il doit alimenter. Il sera alors intéressant de comparer les économies apportées par l'effet d'échelle aux coûts imposés par le transfert des produits.

5. CONCLUSION

Alors que s'achève cette brève description d'un projet de recherche qui n'est pas encore stabilisé, peut se poser la question de l'utilité pratique d'un ESC. En effet, si ce n'est pas le réel, ça lui ressemble; il nous faudra donc être prudent dans l'usage des résultats obtenus, en tenant compte de l'ambiguïté du langage qui nous a fait décrire les pièces du jeu comme des éléments du réel. Cependant, malgré l'absence volontaire de correspondance terme à terme entre le réel et un ESC, il y a entre les deux un certain homomorphisme et il est certainement apparu au lecteur qu'un ESC est une caricature du "fonctionnement plancher" d'un établissement humain.

A ce titre, et en tant que repère de comparaison un certain nombre d'usages peuvent déjà apparaître au niveau :

- de la création de nouveaux établissements humains, en particulier dans les pays en voie de développement.
- de l'étude de systèmes humains existants ou ayant existés et sur lesquels l'on dispose de données suffisantes.
- du test de divers types de restructuration de régions dites "deshéritées" dans les pays développés, en aidant ainsi à un rééquilibrage des activités dans un cadre national.

Hors le fait d'être production de connaissances, l'étude des ESC peut donc conduire à l'établissement d'un instrument d'aide à la décision, celle-ci étant, en dernier ressort, du domaine du politique qui est resté ici hors de notre propos.

PREMIERS ELEMENTS D'UN INVENTAIRE DE TECHNOLOGIES

LES CENTRALES SOLAIRES

Les centrales solaires ont déjà été présentées depuis deux ans dans de nombreux textes, il ne sera donc pas utile ici d'en redonner une analyse détaillée . Nous nous bornerons donc à citer les chiffres clefs qui définissent leur fonctionnement, ceci de manière à les comparer aux autres moyens de captation de l'énergie solaire, et notamment aux photopiles, aux fuels biologiques et aux capteurs plans.

1. CENTRALES HELIOSTATS + TOUR

Ces centrales se composent de miroirs orientables ou plans de plusieurs dizaines de mètres carré, qui renvoient l'image du soleil sur un point fixe situé en haut d'une tour. La concentration du rayonnement fournit une source de chaleur que l'on utilise dans un cycle thermodynamique pour produire de l'électricité. En pratique, la taille des centrales se trouve limitée par des considérations optiques. Une centrale type sera, par exemple composée de 2 000 miroirs de 50 m² et produira entre 10 et 20 MW crête. Toute puissance supérieure ne pourra être fournie que par juxtaposition de modules de cette taille.

Le rendement global de conversion d'une centrale solaire est voisin de 20%, ce qui signifie que l'on peut convertir en électricité environ le cinquième du flux solaire, de rayonnement direct, intercepté par les miroirs. Ainsi

dans une région où le flux de rayonnement direct intégré sur l'année est de 1 500 KWh/m², on pourra récupérer sous forme d'électricité environ 300 KWh par an et par mètre carré de miroir installé. Dans les régions tropicales où le flux solaire direct annuel atteint 2 200 KWh/m², on récupèrera 450 KWh/m². Pour que les miroirs ne se fassent pas ombre, il est indispensable de les espacer. La surface nécessaire à l'installation d'une centrale sera en moyenne 4 fois supérieure à la surface des miroirs installés. A titre d'exemple, la surface occupée dans le Sud de la France par un groupe de centrales solaires fournissant l'équivalent d'une centrale de 100 MW, ayant un facteur de charge de 60%, sera de 7 km².

En négligeant à ce stade le problème du stockage et de disponibilité saisonnière ou journalière de l'électricité, qui seront abordés ultérieurement, on peut montrer que les centrales solaires sont à la mesure des besoins des grands pays industriels. Ainsi, si l'on voulait fournir, grâce à des centrales solaires au Brésil et à l'Iran de l'électricité en quantité suffisante pour que ces pays aient par habitant une consommation comparable à celle de la France (4 000 KWh/an, toute utilisation cumulée), il faudrait recouvrir 4 dix millièmes du territoire du premier et 8 dix millièmes du territoire du second.

Il est à noter que certains projets hydroélectriques actuels mettent souvent en jeu des surfaces supérieures à celles que réclament les centrales solaires. Au Brésil, le barrage d'ITAIPU, qui fournira 12 500 MW recouvrira sous les eaux 1 460 km². Un ensemble de centrales solaires occupant la moitié de ce territoire aurait fourni une quantité comparable d'électricité, à un coût supérieur et à disponibilité inférieure, il est vrai.

L'obstacle territorial est donc moins sérieux que ce que l'on aurait pu craindre à priori. La surface nécessaire à la production d'électricité reste faible devant celle des produits agricoles. En France, où la surface

agricole utile est de 5 000 m² par habitant, il faudrait consacrer 50 m², soit le centième de cette surface à une centrale solaire, pour que les besoins de chaque habitant en électricité soient satisfaits.

Le coût actuel d'investissement d'une centrale solaire est compris entre 600 et 1 000 francs par KW thermique capté, en tenant compte d'un stockage sur 24 heures qui permet d'adapter la fourniture à la demande quotidienne dans des zones d'ensoleillement régulier ou dotées d'un réseau de distribution d'électricité. Le calcul prévoit un coût de KWe compris entre 15 et 30 centimes, suivant les zones géographiques et le taux d'intérêt ou d'actualisation choisi. Il est à noter que le capital étant fortement prédominant par rapport à l'exploitation, dans le cas des centrales solaires si ces taux s'annulent, le prix du KWh diminue pratiquement de moitié.

Comme dans tout cycle thermodynamique, la production d'électricité dans une centrale solaire s'accompagne d'un rejet de chaleur : toutefois, contrairement à ce qui se passe pour des centrales de très grande taille, les utilisateurs d'énergie étant proches du lieu de production, on peut facilement organiser l'emploi des calories perdues, ce qui diminue en fait le coût du KWe.

2. LES CENTRALES DISTRIBUEES

Les centrales à héliostat et tour conviennent dans le cas d'une certaine centralisation de la demande en énergie. Toutefois, dans de nombreux pays en voie de développement, on rencontrera des besoins qui s'opposeront souvent à l'installation d'unités de forte puissance ou d'un réseau de distribution d'électricité. Ces besoins se situeront dans une gamme de quelques dizaines de KW à quelques MW. Ils sont ceux de petites communautés agro industrielles

(besoins de dessalement, de réfrigération, de séchage, etc...) et sont susceptibles d'évoluer rapidement.

Technologiquement, on pourra les satisfaire par des centrales solaires distribuées, utilisant une concentration optique moindre, dans laquelle chaque collecteur est muni de sa propre chaudière. De nombreuses solutions technologiques ont été proposées pour ces centrales : divers modèles de cylindro parabolique, dotés de différents mouvements, des collecteurs à lame réfléchissante mobile, des paraboliques. Plusieurs types de stockage et de machine thermique ont aussi été étudiés. Tous ces systèmes ont en commun l'avantage d'une relative modularité. Les équipements sont susceptibles d'évoluer avec la demande électrique. Cette modularité se traduit, sur le plan économique, par la proportionnalité de l'investissement à la puissance.

Aucune optimisation réelle du coût des petites centrales solaires dans la gamme des 100 KW n'a eu lieu jusqu'à présent. Nous nous bornerons donc à donner les évaluations qui ont été réalisées dans le cadre du programme THEK, elles fourniront un ordre de grandeur valable pour l'ensemble de ces équipements. Les centrales du projet THEK sont constituées d'héliostats, munis de chaudière individuelle à thermofluide débitant sur un stockage thermique à eutectique. La conversion en électricité est assurée par un moteur à vapeur classique.

Une centrale solaire entièrement dimensionnée pour fournir une puissance maximum de 100 KW, susceptible de suivre une courbe de consommation classique occupera environ 1 ha et réclamera une quarantaine d'héliostats. Son prix, stockage compris, sera inférieur à 1 million et demi de francs. Le prix du KWh sera compris entre 30 et 40 centimes, ce qui, pour de très nombreuses zones isolées, est compétitif avec le prix du KWh fossile. Souvent, ce type d'équipement sera utilisé dans le cadre d'ensembles intégrés qui produiront

de l'électricité et des calories de chauffage, de l'eau douce.

LES UTILISATIONS ENERGETIQUES DE LA MATIERE VEGETALE :
COMBUSTIBLES VEGETAUX RENOUVELABLES ET MATERIAUX DE SUBSTITUTION.

INTRODUCTION

On sait que le taux de formation des combustibles fossiles est de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fois plus faible que leur taux d'exploitation par l'homme; cette situation entraîne un déséquilibre géochimique qui sera, dans les cinquante prochaines années à l'origine de pénuries graves. Il est tentant, pour dépasser ce stade d'épuisement progressif des ressources terrestres, de créer les bases technologiques de nouveaux rapports avec la nature, de nouveaux modes de production où l'essentiel des matériaux et de l'énergie utilisée par les sociétés humaines seront tirées de ressources renouvelables.

Dans cette optique, l'une des idées qui vient le plus rapidement à l'esprit est de remplacer le pétrole ou le charbon, ressources fossiles accumulées durant des millions d'années, par les matériaux végétaux qui sont à leur origine. Cette idée a donné naissance depuis quatre ans environ, à un grand nombre d'études et de rapports traitant de l'agriculture énergétique, de plantations énergétiques, de biofuels, de mise à profit de déchets végétaux, etc... Ces travaux proposent d'utiliser la matière végétale plus ou moins transformée (en gaz, en fuel synthétique, en charbon de bois) comme combustible, en remplacement du pétrole. Certains groupes de recherche

(BATELLE, SRI) ont été jusqu'à envisager de recouvrir des portions importantes du territoire Nord ou Sud Américain par des plantations énergétiques. De telles solutions peuvent paraître satisfaisantes, dans la mesure où l'agriculture représente une sorte d'équilibre où est mise à profit l'énergie solaire, dans le cadre de cycle d'éléments renouvelables, comme l'air et l'eau (si l'on néglige, en première approximation, le problème des engrais).

Avant d'étudier plus en détail la notion d'agriculture énergétique, il importe de rappeler quelques banalités :

- A l'échelon de la planète, la nourriture est à priori plus rare que l'énergie, les biofuels peuvent, dans certains cas, occuper de la terre fertile et un potentiel agricole qui pourraient être utilisés pour produire de la nourriture. Encore longtemps, cette nourriture restera une monnaie d'échange recherchée contre divers matériaux, notamment énergétiques.
- L'autosuffisance énergétique, totale ou partielle, obtenue sur la base de plantations énergétiques, ne sera évidemment valable que pour des pays disposant d'une vaste surface agraire par tête d'habitant, c'est à dire souvent des pays riches.
- La combustion de déchets végétaux représente une dégradation brutale de la matière organique, or il sera souvent plus intéressant d'utiliser cette matière organique sous sa forme la plus élaborée (matériau de construction, chimie, papier...) avant de la brûler. Idéalement, la combustion ne devrait représenter que le dernier stade d'une suite de transformations. Ceci est naturellement à pondérer par le fait que les diverses utilisations qui viennent d'être citées peuvent n'employer qu'une faible part de la matière végétale disponible.
- Si l'on travaille dans l'optique qui vient d'être définie, il est

clair que toute évaluation des potentialités de la matière végétale utilisée comme combustible, devra s'accompagner d'une étude sur les possibilités d'utiliser cette même matière végétale comme substitut d'autres matériaux. Le bois, par exemple, peut remplacer des éléments en acier, en béton, en matière synthétique dans la construction des maisons. Ce bois n'aura consommé que peu d'énergie pour son conditionnement et aura permis l'économie de produits à plus ou moins fort contenu énergétique. Le cas s'est réellement présenté pour l'alcool de paille, qu'il est considérablement plus intéressant d'utiliser dans l'industrie chimique en remplacement de l'alcool pétrochimique, dévoreuse de calories, plutôt que dans les véhicules automobiles.

- On devra, dans tous les cas, s'assurer que la culture des végétaux ne consomme pas plus d'énergie par l'irrigation, la culture mécanisée, les engrais, le broyage que l'on n'en récupèrera par la combustion de la matière organique. Cette exigence sera généralement largement satisfaite, toutefois elle pourra poser des problèmes dans les pays où il a fallu désaliniser ou pomper l'eau, et où cette dernière incorpore donc au litre un fort contenu énergétique.
- La notion de biofuels ou d'agriculture doit être maniée avec le plus grand soin : il ne faut pas oublier que l'un des principaux fléaux du Tiers Monde, particulièrement dans les zones arides, est justement l'utilisation du bois comme combustible. Cette utilisation a largement contribué à la désertification de nombreuses régions et il sera paradoxal de la favoriser dans le cadre d'une agriculture énergétique alors qu'on cherche justement à l'éviter par d'autres recherches sur l'énergie solaire (cuisinière solaire, en particulier).

On peut se demander, compte tenu de toutes ces réserves, pourquoi plusieurs états industriels, dont les USA et l'Australie, ont débloqué un potentiel de recherche non négligeable sur la bioconversion. Le premier élément de

réponse à cette question est que de telles études sont faites à tout hasard, dans le cadre du recensement systématique de toutes les ressources énergétiques et qu'elles pourraient servir dans le cadre d'une situation très tendue des échanges mondiaux. Par ailleurs, il est certain, au moins au niveau d'une certaine valorisation des déchets agricoles, que les fuels biologiques rendront des services.

Toutefois, ce qui apparait le plus net à la lecture des études américaines, c'est l'énorme potentialité agricole non exploitée des USA. Cette potentialité peut naturellement être utilisée à des fins énergétiques, mais il est bien plus probable qu'elle le sera pour produire toutes sortes de denrées agricoles qui font actuellement défaut à l'échelon mondial (céréales, soja), ces denrées pouvant ensuite servir de monnaie d'échange contre d'autres matières premières, comme le pétrole. Une telle perspective est à replacer dans le contexte défini par le récent rapport de la CIA sur les modifications climatiques. Le problème énergétique a été, pour les USA, l'occasion de recenser leur potentiel agricole et d'étudier le coût de la mise en culture des régions en friche. Les études sur les biofuels concernent en fait davantage la production agricole en général que les problèmes de l'énergie.

Cette remarque doit toutefois être pondérée par le fait que les augmentations du prix du pétrole ont profondément modifié le rapport du prix des denrées alimentaires et des matières premières énergétiques. Il n'est plus si sûr aujourd'hui que la valeur d'échange produite par un hectare de terre soit supérieure, dans le cas d'une production alimentaire, à celle d'une culture énergétique. Un rapide calcul le montre. Les céréales se vendent sur le marché américain aux environs de \$130 la tonne. Une terre bien irriguée du Sud des USA peut produire 20 à 30 tonnes par hectare de céréales, dont on peut tirer 9 à 12 tonnes de grain environ. Le revenu par hectare est alors d'environ \$1 000 à 1 600. Le même hectare de terrain peut produire environ 60 tonnes de matière végétale sèche. Si cette matière végétale est utilisée

directement comme combustible dans une centrale thermique, ce qui est une des hypothèses du rapport du SRI, on économisera environ 24 tonnes de fuel, soit 150 barils qui auraient coûtés \$1 500. Beaucoup de réserves sont à faire sur ce calcul; il prend en compte les chiffres de productivité donnés par le SRI, ces chiffres sont discutables, ils n'étudient pas la transformation de la matière végétale en un combustible réellement commode à transporter. Toutefois, il a le mérite de montrer que la valeur d'échange d'une plantation énergétique est comparable à celle d'une culture alimentaire. Sur le plan économique, les cultures énergétiques ne sont donc désormais plus pénalisantes par rapport à l'achat du pétrole sur le marché mondial. L'autosuffisance énergétique n'est plus seulement un vœu pieux, d'une certaine façon elle est devenue rentable. Pour cette raison les cultures énergétiques, ou plus généralement, la valorisation systématique de la biomasse méritent d'être étudiées.

I. PLANTATIONS ENERGETIQUES

1) Dans la mesure où les terres cultivables possèdent une extension limitée et où le coût de leur mise en culture est, en gros, proportionnel à leur superficie, l'une des préoccupations essentielles des chercheurs engagés dans l'évaluation des potentialités des plantations énergétiques a été de sélectionner les plantes possédant un rendement à l'hectare élevé. Pour fixer les idées, on peut retenir les chiffres suivants de rendement en matière sèche à l'hectare, obtenue sur des cultures communes. (voir tableau I

TABLEAU I

	Production		Apport solaire (approximatif)	Rdt brut $\frac{I}{II}$ en %
	T/ha x an (M.S.)	I TEP/ha x an équivalent calorifique	II TEP/ha x an équivalent calorifique	
Tournesol (Russie)	33,7	13,5	1 350	1,0
Sorgho (Porto Rico)	76,5	30,6	1 900	1,6
Kenaf (Floride)	50	20	1 600	1,3
Canne à sucre (Mississippi)	50	20	1 500	1,3
Canne à sucre (Texas)	125	50	1 700	2,9
Canne à sucre (Californie)	75	30	1 850	1,6
Eucalyptus (Californie)	60	24	1 850	1,3
Eucalyptus (Ethiopie)	53	21	1 850	1,3
Canne à sucre (Hawaï)	64	25,6	1 850	1,4
Pennisetum (Tropique)	80	32	1 900	1,7
Fourrage (Europe du Nord)	20	8	950	0,8
Conifères (Europe du Nord)	20	8	950	0,8
Céréales (P + G) (Europe)	12	4,8	1 000	0,5
Pommes de terre (Europe)	15	6	1 000	0,6
Forêt (Sud Canada)	10	4	1 050	0,4
Forêt Arctique	2	0,8	200	0,4

2) Investissement énergétique dans la culture des végétaux

Suivant les climats, les conditions de culture et d'irrigation, l'agriculture réclame une énergie primaire de 1/5 à 1/20ème celle que l'on obtiendrait en faisant brûler la biomasse sèche produite.

Cette énergie n'incorpore pas la chaleur qu'il aurait fallu fournir pour le séchage des végétaux, en toute rigueur il faut la faire figurer dans un bilan complet; notons que l'utilisation de l'énergie solaire permet de réaliser ce séchage à bas prix.

Si l'on dispose d'une source d'eau locale, une majorité de cette énergie primaire, de 50 à 70% environ, est nécessaire à la production de fertilisants et de pesticides, le reste est converti en travail mécanique pour l'irrigation, le transport, le traitement mécanique des champs et le conditionnement au niveau de la ferme. Dans le cas de la mise en culture d'une zone aride, avec transport d'eau important, l'investissement énergétique varie beaucoup avec la distance de la source d'eau disponible. C'est dans ce dernier point que réside d'ailleurs la faiblesse de nombreuses études sur les combustibles végétaux, le problème de l'eau n'est pas nécessairement abordé. (voir tableau II à la page suivante)

TABLEAU II

Consommation d'énergie de quelques cultures

	Consommation énergétique (TEP/ha x an)					Production	
	prep. du sol ()	Fertilis. et pestic.	irrigat.	Récolte	Total	T/haxan	TEP/haxan
Maïs (Fr)	0,11	0,37	—	0,09	0,57	14	5,6
Maïs (Fr)	0,12	0,53	0,23	0,09	0,97	20	8
Blé (Fr)	0,16	0,36	—	0,05	0,57	11	4,4
Luzerne (Fr)	0,03	0,11	—	0,08	0,22	8	3,2
Ray Grass fané 2 (Fr)	0,15	0,66		0,53	1,34	10	4
Plant. énerg. (USA, SRI)	0,21	0,87		0,28	1,36	70	30

(Les chiffres français proviennent d'une étude de

* M.HUTTER, INRA, Toulouse, cités par M.CHARTIER)

() y compris serres

3) Prix de production

Dans le cas très favorable d'une production de 75 tonnes à l'hectare, les rapports américains (SRI) estiment que le coût de production d'une tonne de matière sèche serait voisin de \$10.

Nous ne discuterons pas ici de la validité de l'hypothèse qui consiste à vouloir couvrir des milliers de km² par des plantations énergétiques. Ceci est peut-être envisageable aux USA, remarquons seulement :

1) que les plantations énergétiques réclament deux denrées qu'il est rare de rencontrer simultanément, l'eau et le soleil. Le Sud Ouest américain ne sera pas facile à irriguer et les rapports sont peu explicites sur ce point.

2) que la monoculture d'espèces à très haut rendement se heurtera à des problèmes écologiques de stabilité des espèces, d'épandage de pesticides et d'appauvrissement des sols, qui n'ont pas été pour rien dans le relatif échec de la révolution verte.

Les prix de matière végétale sèche cités sont, par conséquent, à considérer avec circonspection.

4) Les algues et les végétaux aquatiques

Il y a 25 ans la culture d'algues devait, espérait-on, résoudre une grande partie des problèmes posés par le manque de nourriture. Cet enthousiasme décrût rapidement vers la fin des années soixante, quand il apparut que la séparation des algues et de l'eau, et la transformation des algues en aliment s'avérait particulièrement coûteuse. On pourrait, pour cette raison, écarter la culture d'algues et de végétaux aquatiques des plantations énergétiques; toutefois, les algues présentent des avantages à priori qui en font des candidats intéressants pour la bioconversion.

Ces avantages sont les suivants :

a) On peut cultiver des algues dans de l'eau salée, les algues représentent donc une forte économie d'eau par rapport à tous les végétaux terrestres. Cette économie d'eau correspond à une importante économie d'énergie, dans le cas où l'eau a dû être épurée ou dessalée. Les algues seront peut-être une des seules plantations énergétiques envisageables dans les zones réellement arides.

b) Les algues poussent, de préférence, dans une eau enrichie en

déchets humains ou animaux, leur culture résoudra un problème de traitement des effluents.

c) La culture d'algues pourra éventuellement se faire sur des zones océaniques.

d) Certaines méthodes de conversion (méthanation, fermentation alcoolique) n'impliquent pas une séparation trop poussée des végétaux et de l'eau.

Les rendements estimés actuels sont les suivants :

plante	Rendement en matière sèche à l'hectare	Source
jacinthe d'eau (eau + effluent)	100 -150 tonnes	United Tech. Corp NASA
micro algue (eau douce ou marine + effluent)	50 tonnes	University of California
algue marine (pleine mer)	100 tonnes	Naval Undersea Lab

II. LES METHODES DE CONVERSION

Pour toutes les méthodes de conversion, nous ferons intervenir la notion de rendement énergétique, qui correspond au rapport de l'énergie de combustion du produit final sur l'énergie de combustion de la biomasse sèche.

1) Le brûlage direct

La plus simple des méthodes de conversion consiste naturellement à brûler la biomasse pour récupérer des calories qui peuvent servir au chauffage ou à la production de vapeur de process. On tire, dans ce cas intégralement partie du contenu énergétique de la biomasse et l'on a, en gros, l'équivalence : 1 tonne biomasse sèche = 0,4 tonne de pétrole.

On sait, aujourd'hui, réaliser sans problème des brûleurs à paille ou à sciure. La matière végétale peut être transformée sur le lieu même de la production en un matériau aisément manipulable (granulat, paille hachée etc...).

2) La production d'électricité

On peut envisager d'utiliser la biomasse à la production d'électricité; voyons, dans ce cas, les surfaces nécessaires à l'alimentation d'une centrale thermique classique de 1 000 MW, ayant un facteur de charge de 60% et un rendement thermodynamique de 30%.

Rendement à l'hectare en matière sèche	Surface nécessaire pour 1 000 MW
10 tonnes	3 400 km ²
30 tonnes	1 130 km ²
50 tonnes	680 km ²
70 tonnes	480 km ²

La centrale que nous venons d'évoquer réclamerait une alimentation de 9 000 tonnes/jour de biomasse sèche. Bien qu'importante, cette

quantité est voisine de celle que traite l'industrie papetière ou sucrière. Dans le Sud des USA, 26 usines à papier dépassent la taille de 1 000 tonnes/jour (en France, la plupart des sucreries atteignent 5 000 tonnes/jour). La coupe, l'acheminement et le traitement de grandes quantités de matière végétale sur des centaines de km² est une opération qui a déjà fait l'objet de réalisations industrielles et qui ne présente pas d'obstacle technologique. On peut chiffrer son coût avec précision.

D'après les évaluations américaines (SRI, MITRE), le coût de l'électricité produite serait compris entre 1,5 cents et 4 cents / kWh ?

La combustion de la matière végétale, à des fins de production d'électricité, ne paraît pas une utilisation optimale de cette ressource. En effet :

- on ne tire pas partie de la potentialité de la matière végétale à fournir un combustible transportable, très difficile à obtenir par d'autres techniques solaires.

- on occupe des surfaces très supérieures à celles que réclame une centrale solaire pour fournir une quantité équivalente d'électricité (il faut, en France, un ensemble de centrales solaires occupant 70 km² pour fournir la même énergie qu'une centrale de 1 000 MW ayant un facteur de charge de 60%).

Le principal avantage de la production d'électricité est de permettre rapidement une utilisation de la biomasse en l'absence de maturité des autres formes de conversion et de résoudre un problème de stockage, coûteux, dans le cas des centrales solaires.

3) Conversion en gaz par voie humide-méthanation

On sait, depuis plusieurs années, qu'il est possible de trans

former les matières végétales ou protéiques par fermentation dans une cuve étanche, maintenue à une température comprise entre 35 et 50 °C. On récupère comme sous-produit de cette opération un fertilisant de bonne qualité, débarrassé des germes pathogènes.

La conversion méthanique a fait l'objet de nombreuses réalisations (plusieurs milliers d'unités). En Inde, en France, en Algérie et en Allemagne, on dispose de multiples résultats expérimentaux, bien que l'on ignore, en partie, le mécanisme exacte de la fermentation. Les principaux problèmes posés par la fermentation méthanique sont les suivants :

- les résultats positifs obtenus dans certaines régions (Algérie) sont très difficiles à reproduire dans d'autres régions. La fermentation est très sensible au matériel végétal ou animal utilisé et au climat, pour ce qui est du maintien en température de la cuve.

- Dans les régions chaudes, il faut peu ou pas d'énergie pour assurer ce maintien. Dans les régions froides, il faut parfois utiliser plus de 25% du gaz pour chauffer la cuve.

- La méthanation est peu fiable. La digestion refuse parfois de démarrer.

- Le soin requis par une installation de méthanation est important.

Pour toutes ces raisons, de nombreux digesteurs installés dans le Tiers Monde, notamment en Inde, ont été abandonnés.

Le rendement énergétique de la méthanation est variable suivant les auteurs, les zones géographiques et le matériel biologique. Pour une tonne de matière végétale sèche, on produit environ :

Source	Thermie	KG de fuel	Rendement énergétique
ISMAN	1 100 1 375	100 125	de 25% à 31 %
CNEEMA	850 956	77 86	de 19% à 21%
Université Pennsylvanie Rdt maximum observé	1 760	160	40%

Ce dernier rendement a été observé pour une algue marine; il est le seul à être aussi important, les autres rendements fournis par le même organisme sont voisins de 20%. Remarquons que la méthanation implique au travers de la dilution dans l'eau, une certaine "dégradation" des propriétés énergétiques des végétaux à faible teneur en eau. Elle est, à priori, plus adaptée aux végétaux aquatiques fortement chargés en eau avec lesquels, en outre, le rendement paraît supérieur.

Sur le plan économique, on peut, à titre d'exemple, donner le coût d'une installation australienne qui traite le lisier fourni par 1 000 porcs, mélangé à de la paille, et délivre une quantité de gaz équivalente à 50 m³ d'essence. Ceci correspond, très grossièrement, au traitement de 2 tonnes de paille sèche par jour. L'installation est revenue, en 1972, à 45 000 francs et serait amortie en 2 ans.

4) Pyrolyse

Le terme de pyrolyse est assez ambigu, il recouvre des traitements de la matière végétale assez différents. On peut citer, entre autres :

- des distillations du bois comparables à celles qui étaient anciennement pratiquées.

- des hydrocracking utilisant une technique voisine de celle de l'industrie pétrolière et de la liquéfaction ou gazéification du charbon.

Les produits finaux peuvent être des combustibles gazeux liquides ou solides; on obtient fréquemment un mélange des trois.

En France, le CNEEMA étudie une unité de distillation du bois qui fournit du gaz, un liquide substituel au fuel lourd et du charbon de bois. L'énergie incorporée se partage à peu près également entre les trois produits obtenus; le rendement énergétique global pourrait atteindre 90%.

Le gaz peut être utilisé dans un moteur à gaz pauvre. Le charbon de bois et le jus pyroligneux constituent des combustibles utilisables dans des véhicules. Le prix d'une unité de distillation n'est pas connu, mais il ne devrait pas être très élevé, compte tenu de la simplicité du procédé. Il ne semble pas qu'il y ait d'obstacle à ce que ce genre d'équipement puisse être de petite taille, si nécessaire (quelques tonnes/jour).

Aux USA, une étude récente montre que des matériaux, ayant une capacité calorifique voisine de celle du bois, peuvent être convertis en un substitut du pétrole ayant un pouvoir calorifique voisin de 10 000 cal/g. Le procédé de liquéfaction utilisé est un hydrocracking en continu, basé sur une technologie disponible dans l'industrie pétrolière. On utilise un hydrocarbure liquide comme moyen de transfert et la réaction s'effectue à 450 °C entre 35 et 70 bars. On produit environ 2 barils 1/4, soit 350 litres de fuel par tonne de matière végétale sèche, ce qui correspond à un rendement énergétique brut de 87%. Si l'on tient compte de la consommation en chaleur, en électricité et en hydrogène de la réaction on montre que le processus a un rendement énergétique net compris entre 60% et 70%. Le rendement énergétique est, en gros, le même que lorsque

l'on produit un substitut de gaz naturel.

Actuellement, en matière de pyrolyse, on dispose de beaucoup de rapports et de peu de réalisations; ceci explique les variations considérables des chiffres de rendement et d'investissement fournis par les divers auteurs. Toutes les évaluations ont été, en général, faites par analogie avec des systèmes existants. Il est clair, toutefois, que les pyrolyses produisant des produits homogènes et définis sont plus coûteuses que les pyrolyses délivrant des mélanges de produits moins définis. L'effet d'échelle joue, par ailleurs, un très grand rôle. A titre d'exemple, on pourra retenir les chiffres suivants :

équipement	rendement énergétique	produit	investissement par tonne/jour traitée	taille des unités	sources
pyrolyse produisant du gaz	64%	gaz 2 700 kcal/m ³	114 500	1 000 t/j	MITRE
pyrolyse produisant produit lourd	60%	mélange fuel lourd et bitume 7 200 kcal/kg	6 400	1 000 t/j	MITRE
pyrolyse produisant du liquide	26%	fuel oil 6 000 kcal/kg	109 500	1 000 t/j	MITRE
pyrolyse produisant du liquide	65%	fuel oil 10 000 kcal/kg	41 000	1 000 t/j	Worcester Polytechnic Institute
pyrolyse produisant du liquide	65%	fuel oil 10 000 kcal/kg	100 000	100 t/j	Worcester Polytechnic Institute
pyrolyse produisant liquide, gaz et charbon de bois	90% ?	charbon de bois gaz pauvre jus pyrolygneux	?	?	CNEEMA

Les chiffres, assez optimistes il est vrai, fournis par le Worcester Polytechnic Institute, montrent que, si l'on a une matière première gratuite, le baril de pétrole synthétique vendu \$6 permet de rembourser 6,5% du capital par an. Si l'on doit produire la matière végétale, celle-ci ne devra pas revenir à plus de \$6 le baril, si l'on veut rester dans un ordre de prix qui permette de concurrencer le pétrole fossile. Le prix devra donc être de l'ordre de 50 francs la tonne de matière sèche. C'est l'ordre de grandeur du prix de production de la matière végétale sèche, fournie par le SRI (\$9,75).

5) La production d'alcool (cf. étude BERTIN)

On peut, par hydrolyse chimique ou enzymatique de la matière végétale, suivie d'une fermentation et d'une distillation, produire de l'alcool. C'est une des méthodes les mieux connues de production d'un substitut du fuel, en partant de produits végétaux. En France, trois procédés ont été développés pour la production d'alcool. Leurs rendements respectifs sont, par tonne de paille, à 10% d'humidité :

procédé	alcool/tonne de paille	rendement	investissement pour 1 000 t/j
		énergétique net	
MEUNIER	1,08 hl	14%	48 000 000
SCHOLLER	0,96 hl	12%	63 000 000
BERGINS	1,36 hl	17%	49 500 000

Ces faibles rendements s'expliquent, en partie, par le fait que, pour s'affranchir de toute source extérieure de combustible, une partie de la paille a été utilisé comme combustible. Si on avait eû à traiter une matière végétale qui, comme la betterave, n'est pas susceptible de servir de combustible, nous aurions été déficitaires en énergie; en effet, pour produire 1 calorie d'alcool de betterave, il faut dépenser

1,3 calorie fossile dans la culture ou le processus.

Remarquons que, pour une plantation énergétique, l'énergie nécessaire pour cultiver les végétaux représente entre le tiers et la moitié de l'énergie disponible sous forme d'alcool. Le rendement global d'une plantation énergétique alcooligène est donc inférieur à 10%.

Au vu de ces chiffres, on peut se demander quel est l'intérêt de la production d'alcool; pour un investissement comparable à certaines opérations de pyrolyse, la même tonne de matière végétale donne 4 fois moins de combustible en équivalent pétrole sous forme d'alcool que par pyrolyse. Cette production d'alcool n'a même pas l'avantage, comme c'est le cas pour la méthanation, d'être utilisable à petite échelle. Il est clair que, si l'on dispose de paille et que l'on désire un carburant, on aura très nettement à choisir la pyrolyse.

Pourquoi, malgré un tel handicap, continue-t-on à étudier en détail la production d'alcool? Remarquons d'abord que l'alcool utilisé dans des moteurs à explosion classique ne produit, par kg, que 60% de l'énergie délivrée par le même poids d'essence et dans un moteur spécialement conçu, à taux de compression élevé de 75 à 80%, mais que l'alcool mélangé à l'essence, dans une proportion de $\frac{1}{10}$ permet d'augmenter le rendement et que, dans ce cas, 11 d'alcool permet d'économiser 1,5 litres d'essence.

Ensuite, il faut noter que l'alcool, d'origine végétale, peut être substituée à l'alcool produite dans la pétrochimie. Or, cette alcool de synthèse réclame une quantité importante de combustible liquide primaire. La production d'1 calorie d'alcool de synthèse réclame 3,2 calories sous forme d'énergie fossile. On voit ainsi que la production d'alcool de paille a un rendement énergétique faiblement positif, que la

production d'alcool de betterave a un rendement faiblement négatif, que la production d'alcool de synthèse a un rendement très négatif. Donc, si le produit final recherché est de l'alcool pour la synthèse de molécules organiques, l'alcool de paille et l'alcool de betterave représentent une importante économie de combustible primaire. Cette substitution peut être envisagée naturellement parce que le prix de l'alcool produite par fermentation de la biomasse est voisin de celui de l'alcool de synthèse (198 francs contre 152 francs par hectolitre).

utilisation	économie de combustible primaire (si 1 tonne de paille donne 1,5 hl d'alcool)
1 tonne de paille utilisée comme combustible	~ 0,4 tonne
1 tonne de paille, convertie en alcool, utilisée dans des moteurs à alcool	~ 0,1 tonne
1 tonne de paille, convertie en alcool, utilisée en mélange à 9/10 d'essence	~ 0,200 tonnes
1 tonne de paille, convertie en alcool, utilisée dans la pétrochimie	~ 0,25 tonnes

On voit ici apparaître un fait fondamental, l'économie de combustible primaire, réalisée par une mise à profit de la biomasse, dépend fortement de l'utilisation finale de cette biomasse. Cette dernière peut permettre une économie de produits énergétiques primaires plus grande lorsqu'elle est utilisée pour remplacer des produits coûteux en énergie que lorsqu'elle est utilisée sous forme de combustible. Il est donc essentiel, au niveau d'une économie nationale de comparer ces deux utilisations : "énergétique direct" (combustible) et "énergétique indirect" (substitution)

CONCLUSION

On a vu que, compte tenu du prix actuel du pétrole, le profit à tirer d'une plantation énergétique se rapprochait de celui qu'assure les cultures alimentaires. Par ailleurs, les différentes méthodes de conversion permettent d'obtenir un combustible dont le prix est de l'ordre de celui du pétrole fossile. La production de biofuels n'est donc pas déraisonnable sur le plan de l'économie financière. Toutefois, on peut montrer que les utilisations "traditionnelles" des végétaux sous forme de matériaux de structures ou de produits chimiques de base correspondent souvent à une économie de combustible primaire, supérieure à leur utilisation comme combustible.

Comment, dans cet ensemble de possibilités, opérer un choix entre les différentes solutions? L'optimisation de l'emploi de la matière végétale dépend beaucoup du niveau auquel est posé le problème de l'autosuffisance énergétique et des contraintes financières de départ.

Dans le cas d'une zone isolée qui demande de l'énergie sous diverses formes, électricité, chaleur, force motrice ou combustible transportable pour véhicule, on choisira la pyrolyse classique qui se prête bien à une exploitation à petite échelle et possède un meilleur rendement et une meilleure fiabilité que la méthanation. Si le problème posé est la fourniture d'un carburant pour un parc automobile existant et homogène, on choisira la pyrolyse hydrocracking à grande échelle. Si on désire assurer une diminution de l'importation d'hydrocarbure au niveau national, on pourra choisir soit la pyrolyse, soit la production d'alcool pour la chimie, soit diverses substitutions. Ces substitutions devront naturellement se justifier sur le plan économique; remarquons que l'on a vu, ces dernières années, une progression très importante de panneaux de particule qui correspond à une forte compétitivité des produits à base de végétaux,

face au mobilier métallique.

Les trois utilisations citées plus haut s'équilibreront en fonction des exigences du niveau national. Pyrolyse et production d'alcool réclament des investissements importants et la fourniture d'une matière végétale très homogène poussant en culture sur des dizaines de milliers d'hectare. Les différentes formes de substitution peuvent s'effectuer par mise en place progressive de petites unités de production, fondées sur des végétaux locaux. Il est clair que la seconde solution est plus souple financièrement, biologiquement et écologiquement que la première, toutefois la production de carburant s'imposera parfois.

Depuis quelques années, plusieurs chercheurs anglo-saxons (CHAPMAN, MACKILLOP...) ont étudié sous l'angle de l'analyse énergétique divers types d'habitat (habitat traditionnel, préfabrication légère, lourde, etc...) de façon à poser non seulement les problèmes énergétiques de l'usage d'un bâtiment (chauffage, conditionnement...), mais également ceux qu'implique la production de ce bâtiment (coût énergétique de l'ensemble, "rendement" énergétique de l'isolation...). Ces études ont, marginalement, abordé le problème de la matière végétale qui est esquissé dans la partie biofuels du présent texte (substitution de bois à du métal).

Il est très intéressant d'appliquer les méthodes de l'analyse énergétique à la production du bâtiment avec contribution de l'énergie solaire.

Résumons quelques axes d'une recherche actuellement en cours :

- l'habitat traditionnel (maison normande à colombage, hutte, log cabin américaine, adobe mexicain...), contrairement à l'habitat moderne, ne fait intervenir que très peu d'énergie fossile. Pour l'essentiel, cet habitat a nécessité du travail humain et de l'énergie solaire, sous sa forme photosynthétique (poutre en bois, toit de chaume) ou thermique (séchage voire cuisson de briques, de mur en terre...).

___ l'habitat traditionnel est bâti sur un territoire en utilisant, pour l'essentiel, des ressources renouvelables (végétaux) ou des ressources abondantes (terre, argile), contrairement à l'habitat moderne qui implique une dépense importante d'énergie (production de ciment) et des mouvements importants de ressources (profilé d'aluminium, matière synthétique).

- l'habitat traditionnel présente donc une limite écologique relative

à la quantité qui peut en être construit, sans bouleverser les équilibres naturels sur un lieu, mais il a l'avantage de permettre une indépendance locale en énergie et en matériaux.

Pour cet ensemble de raisons, il a paru intéressant de comparer divers modes de construction d'habitat traditionnel avec la production d'habitat moderne équivalent sous l'angle de l'énergie fossile incorporée, du temps de travail de production, des capitaux nécessaires et du territoire de base nécessaire à la production d'un habitat traditionnel défini (par exemple, quelle densité de mètre carré habitable peut-on construire par hectare?).

Cette étude s'effectue conjointement à une analyse des qualités mécaniques et thermiques des matériaux de construction traditionnels.

Parallèlement, on étudie la production de matériaux de construction à l'aide de l'énergie solaire : séchage de brique en terre, cuisson de brique et de ciment dans des fours solaires, séchage et traitement de matière végétale.

Ces études pourraient conduire à la définition d'habitats adaptés, à bas coût énergétique.

ENERGIE SOLAIRE ET TRANSPORT

Jusqu'ici l'existence de sources abondantes et bon marché d'énergie ainsi que la distribution de cette énergie par de grands organismes centralisés (Compagnie pétrolière, Compagnie d'électricité) ont conduit les utilisateurs industriels ou domestiques à adapter l'utilisation finale (chauffage force motrice) au vecteur disponible. Cette situation a aboutit parfois à des états de fait physiquement absurdes, bien que pouvant être justifiés par certains calculs économiques. C'est le cas du chauffage électrique qui utilise 2 à 3 fois plus de combustible primaire que le chauffage au fuel ou au charbon.

L'énergie solaire peut être captée sous une grande variété de formes (végétaux, basse température, haute température, conversion thermique en électricité, conversion directe...). Il est particulièrement important de définir une méthodologie qui, pour un usage défini, permette de choisir le mode de conversion le plus adapté, en tenant compte de toutes les contraintes locales, climatiques, financières, impératifs de production locale, surface disponible, etc... On sera ainsi amené à étudier la production par énergie solaire de froid, d'eau douce, de matériaux de construction, de vecteur énergétique utilisable dans le transport.

Afin de comparer les différents moyens de captation, on pourra, par exemple se ramener à des productions unitaires par mètre carré de capteur installé par mètre carré au sol occupé, par franc investi, par franc de matériel importé investi, par kWh investi, etc... Cette méthodologie est,

naturellement, très réductrice, toutefois, elle a l'avantage de fournir des échelles de comparaison.

A titre d'exemple méthodologique, nous avons cherché à répondre à la question : combien de km passager peut-on produire par mètre carré au sol occupé, en associant différents moyens de captation et différents moyens de conversion ? Nous avons ainsi étudié les combinaisons :

- centrale solaire électrogène + véhicule électrique.
- centrale solaire productrice d'hydrogène par électrolyse + véhicule électrique à pile combustible, ou véhicule à moteur à explosion.
- plantations énergétiques produisant fuel, méthane ou alcool + véhicule à moteur à explosion.

Insistons sur le fait que la comparaison est très grossière, que les solutions étudiées ne sont souvent pas utilisables sous le même climat, que tous les problèmes de la chaîne de distribution de l'énergie (pompe à essence ou station de changement d'accu) n'ont pas été abordés en détail. Nous avons simplement cherché à obtenir des ordres de grandeur permettant de voir comment deux moyens de captation d'une énergie renouvelable, qui seront opérationnels sous peu, se placent l'un par rapport à l'autre, pour ce qui est la satisfaction d'un besoin concret, le transport de passagers.

Les résultats sont les suivants (voir tableau page suivante) :

Pour 1 m ² de surface au sol		
Mode de conversion	Kilomètres passager produit annuellement	
	Véhicule léger 4 personnes	Autobus 50 places
Centrale électrosolaire		
vecteur accumulateurs électricité	800	2 500
vecteur hydrogène		
pile à combustible	600	1 875
moteur à explosion	208	650
<u>Culture énergétique</u> (20 tonnes par hectare de matière sèche)		
Méthane	12	37,5
Pyrolyse	36	112,5
Alcool	9	28

Le résultat le plus frappant du calcul est que, dans le meilleur des cas, à surface de terrain occupé égal, on produit 20 fois moins de km passager grâce à la bioconversion que grâce à l'utilisation de centrale électrogène. Ceci se traduit, au niveau d'une comparaison plus générale, par le fait que sur le plan économique, la mise en oeuvre d'une plantation énergétique dev avoir, par km², un coût annuel 25 fois plus faible que celui d'une centrale solaire pour que l'on ait intérêt à utiliser cette solution (compte tenu ou non d'une actualisation, naturellement). Le calcul peut également être rapporté à des investissements énergétiques ou à la productibilité locale de l'infrastructure technologique nécessaire.

Notons que le calcul que nous venons de réaliser n'a pas un pur intérêt académique. Pour certaines nations, le problème de la production par voie solaire d'énergie utilisable pour le transport sera réellement posé.

UN MODELE STATIQUE POUR L'ETUDE PHYSIQUE
DES CIRCULATIONS DE TRAVAIL, ENERGIES,
MATIERES DANS LA PERSPECTIVE DU RENOUELABLE

Un modèle, en tant que système formel, est destiné à représenter, à simuler certains aspects, certaines portions, du réel préalablement délimités par l'analyse. Chaque modèle est ainsi, de fait, rattaché à une problématique (pour ne pas dire une idéologie) - corpus de connaissances préalables et d'idées directrices - qui le motive et guide à la fois l'analyse de délimitation des phénomènes, le choix des composants du modèle et l'usage (descriptif, explicatif, prospectif,...) qu'on en fera.

L'aspect du processus économique envisagé ici est constitué par les bilans globaux sur une année, en termes physiques de travail, énergies, matières, des productions, importations, exportations, consommations d'un territoire déterminé ; et la problématique qui motive le modèle est, comme dans [1], celle d'une prospective en économie physique du renouvelable. Ainsi, le niveau d'analyse est le même que dans le modèle de Leontief fermé ⁽¹⁾, mais l'approche s'en écarte notablement, en ce sens, que dans un but de totalité, on prend en compte l'espace (le territoire), l'énergie et les recyclages.

Le texte comporte quatre paragraphes : dans le § 1, on présente la problématique en question et on donne un schéma ante formulas du modèle et de ses perspectives d'applications. Dans les § 2 et 3, on introduit formellement les termes constitutifs du modèle et on en discute laborieusement la signification. Et dans le § 4, après une récapitulation et une confrontation au modèle de Leontief fermé, on reprend, formellement, les perspectives d'applications.

Ce texte n'est qu'un préliminaire (théorique) destiné à

(1) Voir [2] (I et II) ou [3] (alinéa 10.5; p. 253).

préparer les études numériques, en particulier études à long terme de régimes stables (comme celles projetées dans [1] ⁽¹⁾).

1.- PROBLEMATIQUE ET SCHEMA DU MODELE

On se limite aux traits les plus pertinents pour les études envisagées de manière à essayer d'éviter que des considérants idéologiques ne limitent trop le champ d'applications du modèle : bien que motivé par des études à long terme en économie du renouvelable, le modèle peut aussi servir pour des analyses actuelles, ... (voir 1.5).

1.1.- Le processus économique est envisagé sous l'aspect purement physique des circulations de travail (humain et animal), énergies, matières (ressources naturelles et produits fabriqués) sans considérations de prix. Ainsi, le phénomène étudié est constitué par ces circulations dissociées de leurs moteurs (financiers, sociaux, culturels), l'humain (et l'organisation socio-politique) n'étant pris en compte qu'en termes de force de production, via les consommations strictement nécessaires à l'entretien de cette force d'une part, et les consommations d'excédents, d'autre part (voir 1.3(ii), 1.4, 1.5, 2.5, 3.3, 4.4(c), ainsi que [1], intr. et 1.12).

Ne poussant pas ici l'analyse physique jusqu'à des bilans-matières exhaustifs satisfaisant au principe de conservation des masses ⁽²⁾, on se situe au niveau beaucoup moins détaillé qui est celui des modèles d'échanges interindustriels en termes de quantités physiques. Le principe de conservation qui s'exprime à ce niveau (via les coefficients techniques de consommation intermédiaires) fournit des contraintes précises dont il s'agit de faire des bilans.

Dans cette perspective, le point de vue adopté est statique

(1) L. Bretton et Y. Dhont de la Société coopérative Interdis mènent actuellement, en liaison avec les auteurs, une étude de ce type dans les Cévennes ; étude qui est, en partie, à l'origine du présent travail théorique.

(2) Voir [4], [5] et [6] à ce sujet.

en ce sens que l'on s'intéresse aux balances entre consommations productions et échanges avec l'extérieur (du territoire envisagé ; voir 1.2) pendant une période courte (cycle naturel d'une année en général). Et on ne cherche pas à faire de prédiction.

1.2.- L'espace, le territoire, dans lequel s'inscrit le processus économique, est explicitement pris en compte, aussi bien en ce qui concerne l'exploitation des ressources naturelles qu'en ce qui concerne les consommations requises par l'entretien de l'écosystème. En fait, l'inscription spatiale joue un rôle de base dans la démarche envisagée, en ce sens que c'est relativement à un territoire (considéré comme système physique et spécifié au niveau des superficies par son potentiel d'exploitation et ses besoins d'entretien ; voir 2.1, 3.2, 3.4) que sont envisagées les circulations de travail, énergies, matières (circulations internes et échanges extérieurs) et que sont faits les bilans mentionnés en 1.1. Par cette introduction du facteur spatial, la problématique envisagée s'écarte notablement de celle des modèles de Leontief (voir 4.2).

L'accent qui est mis sur l'espace n'implique pas que l'on se limite à des systèmes économiques sous-développés industriellement. Il correspond plutôt à une tentative pour faire figurer dans les bilans envisagés une totalité d'interactions entre l'activité industrielle et la terre qui l'alimente. Cette tentative a pour but de permettre une analyse quantitative de la dépendance (du territoire envisagé) vis-à-vis des ressources non renouvelables (exploitées sur place ou importées), analyse qui rejoint évidemment celle de la stabilité du système (voir 1.4).

1.3.- Le modèle envisagé est destiné à permettre l'étude des contraintes s'exerçant entre des variables (spatiales et économiques), ces contraintes résultant du principe de conservation et d'un ensemble de données.

Les données sont constituées par :

- (i) le territoire spécifié par les superficies des divers types de sols (types incluant les considérants climatiques).
- (ii) le standard d'entretien spécifiant les consommations stric-

tes, consommations considérées comme nécessaires à l'entretien, d'une part du territoire et d'autre part du potentiel de travail de la population.

(iii) le standard des technologies considérées comme disponibles lequel indique ce que sont les consommations intermédiaires (d'espace, de travail, énergies, matières) par rapport aux productions.

Les variables sont constituées par :

- (j) la répartition des terres selon les diverses utilisations compatibles avec le territoire (i), cette répartition conditionnant la production de matières végétales conformément au standard de technologies(iii).
- (jj) le potentiel de travail de la population (humaine et animale).
- (jjj) les productions d'énergies et de matières fabriquées.
- (jv) les importations-exportations de travail, énergies, matières.

Chaque spécification du multiplet de ces variables sera appelé un descriptif (voir 3.1).

1.4.- Le principe de conservation s'écrit alors :

$$(*) \quad \text{prod} + \text{import} - \text{export} - \text{consom} \geq 0.$$

Et le premier membre représente l'excédent dont dispose la population du territoire. Cet excédent est fonction, lorsque les données sont spécifiées, du descriptif. La définition précise de cette fonction - la fonction d'excédent - en termes des données est l'objet de base du modèle (voir 4.1).

La structure de l'excédent d'un descriptif en rapport avec celle de ce dernier et celle des données exprime au niveau du modèle les dominantes du système économique en cause (répartition des objets, importances relatives des objets et des matières alimentaires,...). Les affectations de l'excédent (qui expriment l'organisation socio-politique sous-jacente) échappent (puisque le descriptif ne dit rien sur elles) à la démarche envisagée, de par sa conception même (voir 1.1) ; mais le découplage n'empêche évidemment pas de prolonger la démarche en analysant ces affectations [voir 1.5(A)].

Par ailleurs, au-delà du caractère statique du modèle, l'étu-

de de l'excédent d'un état de régime, comparé aux échanges extérieurs et aux consommations d'entretien, peut fournir des indications quantitatives sur la stabilité du système économique ainsi représenté, sur sa vulnérabilité aux aléas internes et externes (voir 4.5).

1.5.- L'étude peut être menée, entre autres, dans les deux directions suivantes :

(A) dans une démarche analytique, on peut prendre des données représentant un ensemble (économique) historique, d'aujourd'hui ou d'autrefois, considérer le descriptif (voir 1.3) exprimant son fonctionnement mesuré (i.e. tel que le fournissent les statistiques économiques), calculer l'excédent correspondant, et l'interpréter des divers points de vue envisagés en 1.4 (consommations du secteur tertiaire, consommations d'investissement, consommations militaires,...).

(B) dans une démarche de projection (et non de prédiction) en économie physique du renouvelable, on peut, à partir de données actuelles ou projetées, étudier les descriptifs, vérifiant le principe de conservation (*), pour lesquels la dépendance vis-à-vis de l'extérieur est minimale et l'excédent maximal ; puis, parmi ces descriptifs, chercher ceux qui optimisent un critère interne, par exemple l'excédent relatif de travail humain, ou un critère externe défini par une valorisation des échanges extérieurs. Cette démarche est celle qui est envisagée dans [1] (voir 4.4 ci-dessous et [1], 2.2).

Chacune de ces démarches peut être envisagée pour des territoires d'étendues et de types économiques variables (un canton rural, une zone industrielle, l'hexagone français,..., la planète). Cependant, l'utilisation du modèle la plus raisonnable concerne des territoires restreints et relativement homogènes (l'exemple le plus simple étant celui d'un canton rural). Pour de grands territoires aux activités diversifiées, le modèle ne permet pas de prendre en compte les échanges entre sous-territoires différenciés. Afin de pallier cet inconvénient, on peut mettre en place un modèle du type en cause ici pour chaque sous-territoire, et coordonner ces divers modèles locaux par un modèle global des échanges (communications et transports) entre sous-territoires.

Ces considérations ante formulas vont être précisées dans

la suite par l'introduction progressive et la discussion des termes formels du modèle.

2.- DESCRIPTION DU MODELE : REPRESENTATION DES GRANDEURS EN CAUSE ET PRINCIPE DE CONSERVATION

On commence par introduire les éléments spatiaux et les quantités des divers biens (parmi lesquels figurent les variables ; voir 1.3 et 3.1) dont l'étude des relations mutuelles fait l'objet du modèle.

2.1.- Un territoire est représenté par un vecteur $B = (B_i)_{1 \leq i \leq s_0}$ de $\mathbb{R}_+^{s_0}$ (1), s_0 étant le nombre de types de sols envisagés (surfaces agricoles utilisables plus ou moins bien exposées ou arrosées, sols en pente, pierriers,...), et, pour $i = 1, 2, \dots, s_0$, la composante B_i de B représente la superficie de sols de type i dans le territoire considéré.

La répartition des sols entre les diverses utilisations possibles selon le standard technologique retenu [voir 1.3(iii) et 3.4] est représentée par une matrice $S = (S_i^j)_{1 \leq i \leq s_0, 1 \leq j \leq s_1}$, à s_0 lignes et s_1 colonnes, s_1 étant le nombre d'utilisations possibles (cultures alimentaires ou énergétiques, jachères, forêts, centrales solaires, zone minière, dépôt de déchets, zone urbaine,...) et, pour $i = 1, \dots, s_0$ et $j = 1, \dots, s_1$, le coefficient S_i^j de S représente la superficie de sols de type i et d'utilisation j . Pour chaque telle matrice S , on notera \bar{S} le vecteur -territoire (élément de $\mathbb{R}_+^{s_0}$) défini par :

$$(2.1) \quad \bar{S}_i = \sum_{j=1}^{s_1} S_i^j \quad (i = 1, \dots, s_0).$$

Ainsi, la compatibilité de la répartition S avec le territoire B s'exprime par,

$$(2.2) \quad \bar{S} = B.$$

(1) \mathbb{R}_+^n désigne le sous-ensemble de l'espace Euclidien \mathbb{R}^n formé des vecteurs $X = (X_i)_{1 \leq i \leq n}$ dont toutes les composantes X_i sont ≥ 0 . On écrira alors $X \geq 0$.

2.2.- Les biens dont on va étudier les circulations sont répartis en quatre catégories :

- * le travail [humain et animal], indice θ ;
- * l'énergie utilisable, indice ε ;
- * les produits bruts d'origine végétale [y compris l'énergie brute au sortir des capteurs solaires], indice μ ;
- * les produits fabriqués, indice φ , répartis en matières (minerais, métaux, combustibles fossiles, produits chimiques,...), indice φ' , et objets manufacturés (à l'échelle artisanale ou industrielle), indice φ'' .

Dans chacune de ces catégories, les quantités en cause (productions, consommations, échanges) sont multi-dimensionnelles, leurs composantes étant mesurées en unités physiques standards : on désigne par d_α le nombre de composantes des vecteurs représentatifs de catégorie α ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi, \varphi', \varphi''$), le mode de représentation étant choisi de telle sorte que toutes ces composantes soient, a priori, indépendantes.

2.3.- Les dimensions d_α ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi, \varphi', \varphi''$) peuvent être plus ou moins grandes selon le niveau d'agrégation retenu :

(θ) On doit avoir,

$$(2.3) \quad d_\theta \geq 2,$$

avec, au moins, les composantes "travail humain, travail animal", mesurées en heures ou journées de travail ; mais une grille plus fine peut être utile.

(ε) On peut se contenter de prendre, grossièrement,

$$(2.4) \quad d_\varepsilon = 1,$$

en comptant chaque énergie utilisable en équivalent fuel pour la produire nominalement. Mais il est plus intéressant de prendre,

$$(2.5) \quad d_\varepsilon = 4$$

avec les composantes "chaleur basse température, chaleur haute température, force motrice, électricité spécifique", toutes mesurées en unités physiques.

(μ) La cohérence entre le découpage du territoire et la mesure de sa production végétale suggère que,

$$(2.6) \quad s_1 \leq d_\mu \leq s_0 \times s_1,$$

la relation $s_1 \leq \mu$ exprimant que l'on peut distinguer les modes d'utilisation de la terre par leur production, et la relation $d_\mu \leq s_0 \times s_1$ que l'on ne distingue pas plus de catégories de produits qu'il n'y a de cultures différentes. Afin de respecter l'indépendance des composantes du vecteur production, les différents produits d'une même culture ne sont pas à distinguer à ce stade, puisqu'ils sont dans des rapports supposés constants (ces rapports faisant partie des données ; voir 3.4).

(φ) La dimension d_φ correspond au nombre des branches (ou des produits) dans un tableau d'échanges inter-industriels (17,29,77 sont des valeurs actuelles en France ; en un premier temps, il faudra agréger davantage). Pour chaque élément X de \mathbb{R}^d_φ , on note X' l'élément de $\mathbb{R}^d_{\varphi'}$ qui regroupe les composantes "matières" de X , et X'' l'élément de $\mathbb{R}^d_{\varphi''}$ qui regroupe les composantes "objets" de X (ces composantes étant mesurées en tonnages, volumes ou nombres d'objets).

Les produits de l'élevage (viande, laitages,...) sont comptés comme matières fabriquées (catégorie φ'), et non comme produits de la terre (catégorie μ), ainsi que tous les fertilisants (y compris les composts).

2.4. - A la suite de 2.2, pour chaque $\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$, on considère les vecteurs, X_α , $C_{\alpha\beta}$ ($\beta = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$), E_α de \mathbb{R}^d_α , et le vecteur Z_α de \mathbb{R}^d_α ayant les significations suivantes, relativement au territoire et à la période considérés (voir 1.1 et 1.2), et relativement aux biens de catégorie α :

- * X_α représente la production locale (production résultant de l'activité économique ayant lieu sur le territoire considéré).
- * $C_{\alpha\beta}$ représente la consommation intermédiaire (de biens de catégorie α , au moins pour $\alpha = \epsilon, \mu, \varphi$; voir 2.5) requise par la production des biens de catégorie β .
- * E_α représente la consommation requise par l'entretien du territoire.
- * Z_α représente le bilan des échanges du territoire avec l'extérieur, en ce sens que,

(2.7)

$$Z_\alpha = Z_\alpha^{\downarrow} - Z_\alpha^{\uparrow}$$

où Z_{α}^{\downarrow} et Z_{α}^{\uparrow} , éléments de $\mathbb{R}_+^{d_{\alpha}}$, représentent respectivement les importations et les exportations.

En outre, on considère les vecteurs R_{φ}^+ , R_{φ}^- , éléments de $\mathbb{R}_+^{d_{\varphi}}$, R_{θ}^- , élément de $\mathbb{R}_+^{d_{\theta}}$, et R_{ε}^- , élément de $\mathbb{R}_+^{d_{\varepsilon}}$ ayant les significations suivantes concernant les recyclages, relativement au territoire et à la période considérée :

* R_{φ}^+ représente les quantités de matières récupérées.

* R_{θ}^- , R_{ε}^- , R_{φ}^- représentent les quantités (de travail, énergies, matériel) consommées dans le processus de récupération.

La récupération fournissant essentiellement des matières,

on a :

$$(2.8) \quad R_{\varphi}^{+''} = 0.$$

On pose pour la suite,

$$(2.9) \quad R_{\theta} = -R_{\theta}^- , \quad R_{\varepsilon} = -R_{\varepsilon}^- , \quad R_{\mu} = 0 , \quad R_{\varphi} = R_{\varphi}^+ - R_{\varphi}^- .$$

2.5.- En ce qui concerne le travail θ , on interprète X_{θ} ("production locale de travail") comme le potentiel de travail de la population locale (humaine et animale) pendant la période considérée (sans préjuger de l'affectation de ce potentiel), et on interprète $C_{\alpha\theta}$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$) comme une consommation stricte concernant seulement un certain minimum assurant l'entretien du potentiel de travail X_{θ} , du point de vue alimentation, habitat, communication, santé, éducation, ... (voir 1.1, 1.3(ii), 3.3).

La population elle-même (hommes et animaux de trait) peut être considérée comme proportionnelle à son potentiel de travail : par exemple si on prend $d_{\theta} = 2$, avec les composantes X_{θ_1} (travail humain) et X_{θ_2} (travail animal), mesurées en journées de travail, les populations actives seront $p_1 = X_{\theta_1}/m_1$ et X_{θ_2}/m_2 , où m_1 et m_2 sont les nombres de jours de travail (respectivement des hommes et des animaux de trait) pendant la période considérée. Et les populations inactives, considérées comme des fractions fixes des populations actives, sont seulement à prendre en compte dans l'évaluation des consommations d'entretien $C_{\alpha\theta}$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$; voir 3.3).

En ce qui concerne les consommations d'objets fabriqués, les quantités $C_{\varphi\alpha}$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$) sont supposées inclure toutes les consommations (d'objets) pour l'entretien du parc de matériel pen-

dant la période considérée afin de le maintenir en état (réparation avec remplacement de parties usées, ou remplacement complet du matériel en fin de course). Et le recyclage porte sur toutes les récupérations correspondantes.

2.6.- Chaque spécification du multiplet,

$$(2.10) \quad S, (X_\alpha, Z_\alpha, R_\alpha, E_\alpha)_{\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi}, (C_{\alpha\beta})_{\alpha, \beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi},$$

représente un état de régime de l'activité économique envisagée. Et l'objet du modèle est d'étudier les contraintes qui conditionnent les états de régime possibles.

L'origine de ces contraintes est le principe de conservation qui se traduit ici par les inégalités,

$$(2.11) \quad Z_\alpha^\downarrow + X_\alpha + R_\alpha \geq \sum_{\beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi} C_{\alpha\beta} + E_\alpha + Z_\alpha^\uparrow \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi),$$

(somme vectorielle et inégalité dans l'espace \mathbb{R}^{d_α} (1)).

Ou encore, en vertu de (2.7),

$$(2.12) \quad Z_\alpha + X_\alpha + R_\alpha \geq \sum_{\beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi} C_{\alpha\beta} + E_\alpha \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

Que le principe de conservation soit traduit par des inégalités [(2.11) ou (2.12)] correspond au fait que l'on n'a pris en compte ci-dessus que les consommations strictes de la population. Cette démarche permet de dissocier de ces consommations strictes les excédents (voir 1.4) : l'excédent de biens de catégorie α est représenté par le vecteur F_α défini par l'égalité,

$$(2.13) \quad Z_\alpha + X_\alpha + R_\alpha = \sum_{\beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi} C_{\alpha\beta} + E_\alpha + F_\alpha \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

En vertu de (2.12), on a, $F_\alpha \geq 0$; ce qui fait que F_α peut être interprété comme une consommation supplémentaire. Le jeu que permettent ces excédents est un élément important du modèle (voir 4.4 et 4.5).

(1) La relation $X \geq Y$ entre vecteur $X = (X_i)$, et $Y = (Y_i)$ signifie que $X_i \geq Y_i$ pour tout i .

3.- DESCRIPTION DU MODELE : VARIABLES ET DONNEES ; FONCTIONS DE PRODUCTION ET D'ENTRETIEN

On va maintenant préciser comment les données (voir 1.3) interviennent pour régler les rapports entre productions et consommations. Formellement, cela réclame de préciser, parmi les grandeurs introduites au § 2, lesquelles sont prises comme variables indépendantes, et comment les autres en sont fonction, ces fonctions - les fonctions de production et d'entretien - étant les données de base du modèle.

3.1.- Les variables sont les quantités multidimensionnelles (voir 2.1 et 2.4),

$$(3.1) \quad S, X_{\alpha} (\alpha = \theta, \varepsilon, \varphi), Z_{\alpha} (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

Le multiplet de ces variables,

$$(3.2) \quad V = (S, (X_{\alpha})_{\alpha = \theta, \varepsilon, \varphi}, (Z_{\alpha})_{\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi})$$

est appelé descriptif (voir 1.3).

Les quantités X_{μ} , $C_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$), R_{α} et E_{α} ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$) vont dépendre des variables via les fonctions de production et d'entretien qui sont introduites dans les alinéas 3.2 à 3.5 ci-dessous. Ainsi, le multiplet (3.2) des variables va être exhaustif du multiplet (2.10) de toutes les quantités en cause ; la dénomination de descriptif donné à (3.2) rappelle son caractère exhaustif tout en le distinguant de (2.10).

3.2.- En ce qui concerne l'entretien du territoire, on admet qu'à chaque territoire, représenté par le vecteur $B = (B_i)_{1 \leq i \leq s_0}$ de $\mathbb{R}_+^{s_0}$ (voir 2.1), correspond, pour chaque catégorie α , une consommation bien déterminée ; i.e.,

$$(3.3) \quad E_{\alpha} = e_{\alpha}(B) \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi),$$

les fonctions $e_{\alpha} : \mathbb{R}_+^{s_0} \rightarrow \mathbb{R}_+^d$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi$) étant des données qui représentent le standard d'entretien requis [voir 1.3(ii)]. On note que, compte tenu de (2.2), (3.3) s'écrit,

$$(3.4) \quad E_{\alpha} = e_{\alpha}(\bar{S}) \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

3.3.- En ce qui concerne l'entretien de la population, on admet que les consommations strictes $C_{\alpha\theta}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$; voir 2.5) sont déterminées par le potentiel de travail X_θ à entretenir ; i.e.,

$$(3.5) \quad C_{\alpha\theta} = c_{\alpha\theta}(X_\theta) \quad (\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi),$$

les fonctions $c_{\alpha\theta} : \mathbb{R}_+^{d_\theta} \rightarrow \mathbb{R}_+^{d_\alpha}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) étant des données qui indiquent le mode d'évaluation de ce qui est considéré comme le minimum nécessaire (y compris en ce qui concerne les services ; voir 2.5). Ainsi, la fonction $c_{\theta\theta}$ représente l'évaluation du travail requis pour l'entretien domestique et les services (éducation, santé,...) ; la fonction $c_{\mu\theta}$ exprime les rations alimentaires retenues (pour ce qui est des produits de la terre consommés directement) ; et les fonctions $c_{\epsilon\theta}$ et $c_{\varphi\theta}$ correspondent (toujours en ce qui concerne l'entretien domestique et les services) respectivement à l'évaluation du nécessaire en énergie et en produits fabriqués (pour le chauffage et l'entretien des locaux, les transports de personnes,...).

La détermination de ces fonctions est un point à la fois délicat et crucial de la démarche envisagée, en particulier en ce qui concerne la part à attribuer à la population inactive et aux services. Le secteur tertiaire, qu'il est dans la logique de la démarche de ne pas représenter directement, est partiellement en cause ici ; mais partiellement seulement car les consommations de ce secteur relèvent aussi des excédents. On souligne à ce sujet que les consommations strictes $C_{\alpha\theta}$ (ou les fonctions d'entretien $c_{\alpha\theta}$ qui permettent de les évaluer) ne sont pas à considérer comme une mesure du niveau de vie effectif de la population (dans le modèle), car ce dernier résulte aussi de la consommation d'une partie des excédents [voir 1.4, 2.6, 4.4(c)].

3.4.- En ce qui concerne les produits de la terre, on admet que la production X_μ , et les consommations intermédiaires $C_{\mu\beta}$ ($\beta = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) sont déterminées par la répartition S des sols ; i.e.,

$$(3.6) \quad X_\mu = b^\#(S), \quad \text{et,}$$

$$(3.7) \quad C_{\alpha\mu} = c_{\alpha\mu}(S) \quad (\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi),$$

les fonctions $b^\# : \mathbb{R}_+^{s_0} \times \mathbb{R}_+^{s_1} \rightarrow \mathbb{R}_+^{d_\mu}$ et $c_{\alpha\mu} : \mathbb{R}_+^{s_0} \times \mathbb{R}_+^{s_1} \rightarrow \mathbb{R}_+^{d_\alpha}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$)

étant des données qui forment le standard des technologies rurales supposées disponibles [voir 1.3(iii)]. Cette hypothèse correspond aux données que fournit l'agronomie : pour une technologie donnée, à chaque type de sol et à chaque type de culture correspondent des rendements de production et des consommations unitaires [de travail ($\alpha = \theta$), d'énergies ($\alpha = \epsilon$) de semences ($\alpha = \mu$), de fertilisants ($\alpha = \varphi'$) et de matériels ($\alpha = \varphi''$)].

3.5.- En ce qui concerne l'énergie et les produits fabriqués, on admet que les consommations intermédiaires $C_{\alpha\epsilon}$ et $C_{\alpha\varphi}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) sont déterminées par les productions correspondantes ; i.e.,

$$(3.8) \quad C_{\alpha\epsilon} = c_{\alpha\epsilon}(X_\epsilon) \quad (\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi),$$

$$(3.9) \quad C_{\alpha\varphi} = c_{\alpha\varphi}(X_\varphi)$$

les fonctions $c_{\alpha\epsilon} : \mathbb{R}_+^{\epsilon} \rightarrow \mathbb{R}_+^{\alpha}$ et $\mathbb{R}_+^{\varphi} \rightarrow \mathbb{R}_+^{\alpha}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) étant des données qui représentent le standard des technologies (artisanales ou industrielles) supposées disponibles [voir 1.3(iii)]. Par exemple, la fonction $c_{\mu\epsilon}$ regroupe les rendements de conversion de matières végétales (et d'énergie brute au sortir des capteurs solaires ; voir 2.2) en énergies utilisables ; et la fonction $c_{\varphi\epsilon}$ inclut à la fois (par ses composantes de catégorie φ') les rendements de conversion des combustibles fossiles en énergies utilisables, et (par ses composantes de catégorie φ'') l'évaluation de la consommation de matériel requis par la production d'énergie. La démarche est identique à celle du modèle d'interdépendances industrielles de Leontief (voir 4.2).

3.6.- Enfin, en ce qui concerne le recyclage, on admet que les quantités R_φ^+ de matières qui sont récupérées, et les quantités $R_\theta^-, R_\epsilon^-, R_\varphi^-$ consommées dans le processus de recyclage (voir 2.4) ne dépendent que des quantités totales $Z_\mu + X_\mu$ et $Z_\varphi + X_\varphi$ de produits végétaux et de produits fabriqués qui sont consommés (cela via les seules composantes "objets fabriqués" de $Z_\varphi + X_\varphi$; voir ci-dessous) ; i.e.,

$$(3.10) \quad R_\varphi^+ = r_{\varphi\mu}^+(Z_\mu + X_\mu) + r_{\varphi\varphi}^+(Z_\varphi + X_\varphi)$$

$$(3.11) \quad R_\alpha^- = r_{\alpha\mu}^-(Z_\mu + X_\mu) + r_{\alpha\varphi}^-(Z_\varphi + X_\varphi) \quad (\alpha = \theta, \epsilon, \varphi) ,$$

les fonctions $r_{\varphi\beta}^+ : \mathbb{R}_+^{\beta} \xrightarrow{d} \mathbb{R}_+^{\varphi}$ ($\beta = \mu, \varphi$) et $r_{\alpha\beta}^- : \mathbb{R}_+^{\beta} \xrightarrow{d} \mathbb{R}_+^{\alpha}$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \varphi$, $\beta = \mu, \varphi$) étant des données qui représentent des technologies de recyclage).

Ainsi, les résidus végétaux sont comptés comme produits fabriqués (en catégorie φ'), de même que les matières récupérées [conformément à (2.8)] ; i.e.,

$$(3.12) \quad r_{\varphi\mu}^+(\cdot)'' = 0 \quad \text{et} \quad r_{\varphi\varphi}^+(\cdot)'' = 0.$$

On suppose, en outre, que $r_{\varphi\varphi}^+(Y)$ et $r_{\alpha\varphi}^-(Y)$ ($Y \in \mathbb{R}^{\varphi}$; $\alpha = \theta, \varepsilon, \varphi$) ne dépendent que de Y'' (autrement dit, seuls les objets sont récupérés). D'où il résulte, compte tenu de ce que $r_{\varphi\varphi}^+(Z_{\varphi} + X_{\varphi})'' = 0$, d'après (3.12), que $Z_{\varphi} + X_{\varphi}$ représente, via sa composante $(Z_{\varphi} + X_{\varphi})''$, la quantité totale de produits fabriqués qui sont recyclables (y compris ce que fournit la récupération).

On souligne la distinction qui est faite entre les consommations intermédiaires $c_{\alpha\mu}(S)$ et $c_{\alpha\varphi}(X_{\varphi})$ ($\alpha = \theta, \varepsilon, \varphi$), lesquelles ne dépendent que de la répartition du territoire et de la production locale, et les consommations $r_{\alpha\mu}^-(Z_{\mu} + X_{\mu}) + Z_{\alpha\varphi}^-(Z_{\varphi} + X_{\varphi})$ du processus de récupération, lesquelles dépendent des quantités totales qui sont consommées.

De façon analogue à (2.9), on pose pour la suite,

$$(3.13) \quad r_{\alpha\beta}^+(\cdot) = -r_{\alpha\beta}^-(\cdot) \quad (\alpha = \theta, \varepsilon ; \beta = \mu, \varphi),$$

$$(3.14) \quad r_{\alpha\mu}^+(\cdot) = 0 \quad (\beta = \mu, \varphi),$$

$$(3.15) \quad r_{\varphi\beta}^+(\cdot) = r_{\varphi\beta}^+(\cdot) - r_{\varphi\beta}^-(\cdot) \quad (\beta = \mu, \varphi).$$

Et, compte tenu de (2.9), (3.10) et (3.11) s'écrivent,

$$(3.16) \quad R_{\alpha} = r_{\alpha\mu}(Z_{\mu} + X_{\mu}) + r_{\alpha\varphi}(Z_{\varphi} + X_{\varphi}) \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

3.7. - Ainsi, les données du modèle (voir 1.3) sont constituées par,

- * le territoire B,
- * les fonctions de production et d'entretien,

$$(3.17) \quad e_{\alpha}^{\cdot}, \quad c_{\alpha\beta} \quad (\beta = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi), \quad b^{\#}, \quad r_{\alpha\beta} \quad (\beta = \mu, \varphi) \quad (\alpha = \theta, \varepsilon, \mu, \varphi).$$

En un premier temps, il est raisonnable de prendre ces fonctions

linéaires, ce qui ramène leur détermination numérique à celle de matrices convenables. En un second temps, on peut prendre en compte des effets (non linéaires) de taille et d'inhomogénéité en faisant dépendre des variables certains coefficients de ces matrices (par exemple la part à attribuer aux services peut croître de façon notable avec la taille et la centralisation du système envisagé).

La détermination des matrices en question constitue un travail considérable vu le caractère disparate des données à rassembler, lesquelles relèvent à la fois de l'analyse des besoins des populations (consommations individuelles et collectives), de l'analyse énergétique, de l'agronomie, et des études d'échanges interindustriels. Afin de vérifier la cohérence de ces données et de procéder à leur adaptation à la problématique en cause ici et à leur organisation (par des agrégations raisonnables) pour aboutir aux données précises du modèle, il est indispensable de les rassembler en des tableaux adaptés. Il est clair que le modèle envisagé ne prend son sens que par ce travail d'organisation préalable des données ⁽¹⁾.

4.- RECAPITULATION ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

On donne d'abord, en 4.1, une vue synthétique du modèle, récapitulant les éléments introduits dans les § 2 et 3, et on le compare, en 4.2, au modèle de Leontief fermé. Puis on examine brièvement, en 4.3 et 4.4, comment il peut servir de support formel aux études envisagées en 1.5.

4.1.- On récapitule d'abord la définition de la fonction d'excédent associée au modèle : à chaque descriptif V [défini par (3.2) en 3.1], la fonction d'excédent associe le multiplet

$(F_{\alpha})_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi} = f(V)$, élément de $\mathbb{R}^{d_{\theta}} \times \mathbb{R}^{d_{\epsilon}} \times \mathbb{R}^{d_{\mu}} \times \mathbb{R}^{d_{\varphi}}$, défini par les égalités (2.13), où E_{α} , X_{μ} , $C_{\alpha\beta}$ et R_{α} ($\alpha, \beta = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) sont donnés par les relations (3.4), (3.9) et (3.16) en fonction de V et en termes des données que sont les fonctions de productions d'entretien (lesquelles sont supposées ici déjà spécifiées ; voir 3.7).

(1) Voir à ce sujet [1], 2.1.

Ces égalités (2.13) qui, exprimant le principe de conservation, lient l'excédent $F = (F_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi}$ au descriptif $V = (S, (X_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \varphi}, (Z_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi})$, s'écrivent de façon développée,

$$(4.1) \quad Z_\theta + X_\theta = c_{\theta\theta}(X_\theta) + c_{\theta\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\theta\mu}(S) + c_{\theta\varphi}(X_\varphi) - r_{\theta\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\theta\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + e_\theta(\bar{S}) + F_\theta,$$

$$(4.2) \quad Z_\epsilon + X_\epsilon = c_{\epsilon\theta}(X_\theta) + c_{\epsilon\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\epsilon\mu}(S) + c_{\epsilon\varphi}(X_\varphi) - r_{\epsilon\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\epsilon\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + e_\epsilon(\bar{S}) + F_\epsilon,$$

$$(4.3) \quad Z_\mu + b^\#(S) = c_{\mu\theta}(X_\theta) + c_{\mu\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\mu\mu}(S) + c_{\mu\varphi}(X_\varphi) + e_\mu(\bar{S}) + F_\mu,$$

$$(4.4) \quad Z_\varphi + X_\varphi = c_{\varphi\theta}(X_\theta) + c_{\varphi\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\varphi\mu}(S) + c_{\varphi\varphi}(X_\varphi) - r_{\varphi\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\varphi\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + e_\varphi(\bar{S}) + F_\varphi.$$

On note la large indétermination du système d'équations précédents : il totalise,

$$(4.5) \quad d = d_\theta + d_\epsilon + d_\mu + d_\varphi$$

équations scalaires, tandis que les indéterminées V, F comportent $3d + s_0 \times s_1 - d_\mu$ dimensions. Et même, puisque $s_0 \times s_1 - d_\mu$ est en général > 0 [voir 2.3(μ)], le système est encore indéterminé si, fixant $Z = (Z_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi}$ et $F = (F_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi}$, on ne fait varier que (S, X) , où $X = (X_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \varphi}$ [en effet, on a alors $d + s_0 \times s_1 - d_\mu$ dimensions d'indéterminées pour d équations scalaires].

4.2.- On peut situer comme suit le modèle envisagé par rapport à un modèle de Leontief fermé adapté au même découpage des biens en quatre catégories : dans la version la plus Malthusienne de ce modèle, les équations (4.1) - (4.4) peuvent être remplacées par les équations,

$$(4.6) \quad X_\theta = c_{\theta\theta}(X_\theta) + c_{\theta\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\theta\mu}^*(X_\mu) + c_{\theta\varphi}(X_\varphi) + E_\theta,$$

$$(4.7) \quad X_\epsilon = c_{\epsilon\theta}(X_\theta) + c_{\epsilon\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\epsilon\mu}^*(X_\mu) + c_{\epsilon\varphi}(X_\varphi) + E_\epsilon,$$

$$(4.8) \quad X_\mu = c_{\mu\theta}(X_\theta) + c_{\mu\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\mu\mu}^*(X_\mu) + c_{\mu\varphi}(X_\varphi) + E_\mu,$$

$$(4.9) \quad X_\varphi = c_{\varphi\theta}(X_\theta) + c_{\varphi\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\varphi\mu}^*(X_\mu) + c_{\varphi\varphi}(X_\varphi) + E_\varphi.$$

Les vecteurs E_α ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) et les fonctions $c_{\alpha\beta}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$; $\beta = \theta, \epsilon, \varphi$) ont ici les mêmes significations (discutées en 2.4, 3.3, 3.5) que dans les équations (4.1) - (4.4). Par contre, les fonctions de production agricole $c_{\alpha\mu}^*$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) indiquent les consommations intermédiaires $C_{\alpha\mu} = c_{\alpha\mu}^*(X_\mu)$ en fonction de la production locale, X_μ , et non plus en fonction de la répartition des sols S . Ainsi les variables sont les vecteurs $X_\theta, X_\epsilon, X_\mu, X_\varphi$ (avec les mêmes significations), la répartition des sols n'intervenant plus ; tandis que les données sont les fonctions de production et d'entretien $c_{\alpha\beta}$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$; $\beta = \theta, \epsilon, \varphi$) et $c_{\alpha\mu}^*$ ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$), et les consommations du territoire E_α ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$).

Ce modèle est tout à fait rigide en ce sens que le système (4.6)-(4.9) admet en général (au moins dans le cas linéaire) au plus une solution $X = (X_\alpha)_{\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi}$, laquelle est ainsi totalement déterminée par les consommations d'entretien E_α ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) (1). On peut l'assouplir et l'élaborer en y introduisant les importations-exportations, l'excédent et les recyclages, ce qui amène aux équations,

$$(4.10) \quad Z_\theta + X_\theta = c_{\theta\theta}(X_\theta) + c_{\theta\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\theta\mu}(X_\mu) + c_{\theta\varphi}(X_\varphi) \\ - r_{\theta\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\theta\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + E_\theta + F_\theta,$$

$$(4.11) \quad Z_\epsilon + X_\epsilon = c_{\epsilon\varphi}(X_\varphi) + c_{\epsilon\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\epsilon\mu}(X_\mu) + c_{\epsilon\theta}(X_\theta) \\ - r_{\epsilon\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\epsilon\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + E_\epsilon + F_\epsilon,$$

$$(4.12) \quad Z_\mu + X_\mu = c_{\mu\theta}(X_\theta) + c_{\mu\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\mu\mu}(X_\mu) + c_{\mu\varphi}(X_\varphi) + E_\mu + F_\mu,$$

$$(4.13) \quad Z_\varphi + X_\varphi = c_{\varphi\theta}(X_\theta) + c_{\varphi\epsilon}(X_\epsilon) + c_{\varphi\mu}(X_\mu) + c_{\varphi\varphi}(X_\varphi) \\ - r_{\varphi\mu}(Z_\mu + X_\mu) - r_{\varphi\varphi}(Z_\varphi + X_\varphi) + E_\varphi + F_\varphi.$$

Formellement, ce système est très analogue au système (4.1)-(4.4), les variables étant ici les X_α et les Z_α ($\alpha = \theta, \epsilon, \mu, \varphi$) ; et le mo-

(1) Dans le modèle de Leontief fermé proprement dit, les E_α sont nuls, et on impose au système (4.6)-(4.9) d'être dégénéré (voir [3], page 254). Les E_α jouent ici le rôle des consommations finales du modèle ouvert (voir [3], page 237) ; mais le modèle est fermé de par la place qu'occupe la production de travail X_θ .

modèle correspondant peut donner lieu aux applications discutées en 4.4 et 4.5.

4.3.- Pour schématiser les applications éventuelles du modèle, il est commode d'introduire des notations plus condensées : pour cela, on pose, comme ci-dessus,

$$(4.14) \quad X = (X_{\alpha})_{\alpha=\theta, \epsilon, \varphi}, \quad Z = (Z_{\alpha})_{\alpha=\theta, \epsilon, \mu, \varphi}, \quad F = (F_{\alpha})_{\alpha=\theta, \epsilon, \mu, \varphi},$$

et on désigne par \mathcal{X}^+ le cône $\mathbb{R}_+^{d_{\theta}} \times \mathbb{R}_+^{d_{\epsilon}} \times \mathbb{R}_+^{d_{\varphi}}$ que décrit X, par

\mathcal{U} l'espace $\mathbb{R}^{d_{\theta}} \times \mathbb{R}^{d_{\epsilon}} \times \mathbb{R}^{d_{\mu}} \times \mathbb{R}^{d_{\varphi}}$ que décrivent Z et F et par

\mathcal{U}^+ le cône $\mathbb{R}_+^{d_{\theta}} \times \mathbb{R}_+^{d_{\epsilon}} \times \mathbb{R}_+^{d_{\mu}} \times \mathbb{R}_+^{d_{\varphi}}$ des éléments ≥ 0 de \mathcal{U} ; et, pour chaque $Z \in \mathcal{U}$, on note $|Z|$ l'élément de \mathcal{U}^+ dont les composantes sont les valeurs absolues de celles de Z. On désigne de plus

par \mathcal{S}^+ le cône $\mathbb{R}^{s_0} \times \mathbb{S}^1$ que décrit la variable S, et par \mathcal{S}_B^+ le sous-ensemble convexe de \mathcal{S}^+ formé des éléments S de \mathcal{S}^+ tels que $\bar{S} = B$ (où B, élément de $\mathbb{R}_+^{s_0}$, représente le territoire donné).

Un descriptif V est alors identifié à un triplet (S,X,Z), élément de $\mathcal{S}^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$; et la fonction d'excédent $f : (S,X,Z) \rightarrow f(S,X,Z)$ applique $\mathcal{S}^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$ dans \mathcal{U} (lorsque les fonctions de production et d'entretien sont linéaires, il en est de même de la fonction f). On désigne enfin par g l'application $(S,X,Z) \rightarrow |Z|$ de $\mathcal{S}^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$ sur \mathcal{U}^+ (i.e. $g(S,X,Z) = |Z|$).

Avec le formalisme précédent, le principe de conservation se traduit seulement par,

$$(4.15) \quad f(S,X,Z) \in \mathcal{U}^+.$$

Et, de façon très générale, il s'agit d'étudier le sous-ensemble de $\mathcal{S}^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$ formé des éléments (S,X,Z) de $\mathcal{S}_B^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$ vérifiant (4.15).

Dans cette optique, la démarche analytique (A) envisagée en 1.5 revient à calculer l'excédent $F = f(S,X,Z)$ pour tel ou tel descriptif (S,X,Z), et à analyser en termes économiques ces excédents.

4.4.- Pour ce qui est de la démarche de projection 1.5(B), on peut envisager de procéder comme suit :

(a) On suppose donné un certain nombre de contraintes portant sur le vecteur d'échange Z ; et on désigne par Z le sous-ensemble \mathcal{U} formé des vecteurs Z vérifiant ces contraintes. Par exemple, on peut imposer les contraintes,

$$(4.16) \quad Z_{\theta} = 0 \quad , \quad Z_e = 0 \quad , \quad Z_{\mu} = 0,$$

qui expriment l'auto-subsistance du point de vue travail, énergie, produits végétaux. On peut aussi imposer que,

$$(4.17) \quad \forall_{\rho} (Z) \leq 0 \quad (\rho = 1, 2, \dots, p)$$

où les \bar{V}_{ρ} sont des fonctions de valorisation (formes linéaires sur \mathcal{U}) permettant de confronter importations et exportations relativement à des critères extérieurs à l'ensemble économique considéré.

(b) Il est alors naturel de s'intéresser aux descriptifs (S, X, Z) , avec $Z \in Z$, tels que $|Z|$ est le plus petit possible et $F = f(S, X, Z)$ le plus grand possible ; ce qui conduit à introduire le sous-ensemble \mathcal{P} de $\mathcal{S}_B^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$ formé des descriptifs (S, X, Z) , vérifiant $Z \in Z$ et $F = f(S, X, Z) \in \mathcal{U}^+$, qui sont extrémaux en ce sens que tout $(S', X', Z') \in \mathcal{S}_B^+ \times \mathcal{X}^+ \times \mathcal{U}$, vérifiant $Z' \in Z$ et $f(S', X', Z') \in \mathcal{U}^+$, est tel que, soit $|Z'| > |Z|$, soit $f(S', X', Z') < f(S, X, Z)$, sauf si $|Z'| = |Z|$ et $f(S', X', Z') = f(S, X, Z)$ [autrement dit, \mathcal{P} est l'ensemble de Pareto de $(-g, f)$ dans l'ensemble des (S, X, Z) tels que $Z \in Z$ et $f(S, X, Z) \in \mathcal{U}^+$].

(c) Parmi les descriptifs (S, X, Z) appartenant à \mathcal{P} , on peut chercher à maximiser le rapport $W(F)/X_{\theta h}$, où l'indice h correspond à la composante "travail humain" et où $W : \mathcal{U} \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction d'utilité exprimant des préférences entre les diverses composantes de l'excédent F .

(d) Les considérations précédentes peuvent être reprises en introduisant les contraintes supplémentaires qui consistent à fixer la population humaine (via son potentiel de travail ; voir 2.5) et tout ou partie des excédents (stipulant ainsi une certaine flexibilité).

4.5.- Parallèlement aux problèmes d'optimisation envisagés en 4.4, le modèle peut donner lieu à des études de stabilité (voir 1.4) : l'analyse, composante par composante, de la manière dont varie l'excédent en fonction des échanges Z pour (S,X) fixé, ou inversement en fonction de (S,X) pour Z fixé, peut fournir des indications sur la plus ou moins grande vulnérabilité d'un état de régime aux perturbations externes (difficultés d'importations) ou internes (accidents climatiques affectant, via une modification de S, la production agricole ; ou difficultés de production,...).

De plus, l'analyse de la manière dont varie l'excédent, le descriptif étant donné, (ou le descriptif, l'excédent étant donné) en fonction de telle ou telle modification des données peut fournir, non seulement les indications de stabilité, mais aussi des indications de validité des résultats obtenus, vu la marge d'incertitude qui affecte nombre de données ...

4.6.- Toujours en ce qui concerne l'indétermination des données, il faut remarquer que certaines d'entre elles correspondent à des choix tout à fait contingents dans une démarche de projection. Par exemple, pour ce qui est de la fonction $c_{\mu\theta}$ (voir 3.3), une même ration alimentaire peut être obtenue par des répartitions très diverses entre consommation directe de la production végétale et recours à l'élevage ; ou, pour ce qui est de la fonction $c_{\mu e}$ (voir 3.5), une même production d'énergie utilisable peut résulter de diverses répartitions de l'apport de matière brute entre les différentes techniques de conversion (centrales solaires, procédés de conversion en carburant des bio-masses,...). Ces données peuvent donc être considérées comme dépendant de variables techniques (représentant les choix entre diverses technologies disponibles), variables qui peuvent être adjointes aux variables extensives constituant le descriptif. Ainsi dans les exemples précédents, $c_{\mu\theta}(X_\theta)$ et $c_{\mu e}(X_e)$ sont à remplacer dans cette perspective par $c_{\mu\theta}(u_\theta, X_\theta)$ et $c_{\mu e}(u_e, X_e)$ respectivement, où u_θ et u_e sont les variables techniques en question. Les démarches envisagées en 4.4 et 4.5 ci-dessus peuvent être reprises en tenant compte de toutes les variables, extensives et techniques....

REFERENCES

- [1] Texte joint - Un projet de recherche : les éco-systèmes construits.
- [2] W.W. LEONTIEF - The structure of American Economy, 1919-1939 - 2ème édition, Oxford Univ. Press (1951).
- [3] R. DORFMAN, P.A. SAMUELSON, R.M. SLOW - Programmation linéaire et gestion économique - Dunod (1962).
- [4] R.U. AYRES & A.V. KNEESE - Production, consumption and externalities - Am. Economic Review, 6/1966, p. 282-97.
- [5] A.V. KNEESE, R.U. AYRES, R.C. d'ARGE - Economics and the environment. Resources for the future, Inc. John Hopkins Press (1970).
- [6] M. MANUEL - Modèles d'études des conséquences macro-économiques des mesures de lutte contre la pollution. Preprint CEPREMAP - 12/1975.

* * *