

AGU Sylvain
BONNEFOY Alain
DEVAUX Laurence
MOILLERON Thierry
TOURET Hélène

Ecole Supérieure d'Agriculture
55 rue Rabelais BP 748
49007 ANGERS CEDEX 01



AGRICULTURE ET EFFET DE SERRE
ADAPTATION DES PRATIQUES AGRICOLES
ALTERNATIVES ENERGETIQUES

DA Environnement
Michel PIDOUX

Décembre 2000

Résumé d'auteurs

Notice bibliographique

AGU Sylvain
BONNEFOY Alain
DEVAUX Laurence

MOUILLERON Thierry
TOURET Hélène

Promotion 1996

Suivi de l'étude par M. PIDOUX

Plan indicatif :

Etude proposée par l'association ALIZEE, et réalisée en partenariat avec F. FALLOUX, économiste de la Banque mondiale.

Proposition de mesures dans le domaine agricole, ayant pour but la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'accroissement des « puits de carbone ».

But de l'étude :

Etude de pratiques agricoles pouvant réduire les émissions de gaz à effet de serre, ou augmenter les puits de carbone

Etude au sein des exploitations agricoles sur les énergies alternatives émettant moins de gaz à effet de serre, et en particulier sur le bois déchiquetage et la valorisation du méthane.

Méthodes et techniques :

Bibliographie et entretien avec des personnes et ressources par rapport au sujet (ADEME, chambres d'Agriculture, F.FALLOUX)

Synthèse bibliographique

Résultats

Pratiques agricoles augmentant le stockage du carbone : extensification des productions, travail simplifié des sols, aération du lisier lors du stockage et du traitement.

Développement possible des énergies renouvelables issues de la combustion du bois d'entretien des haies de la ferme et de valorisation du méthane (étude économique et financière).

Mots clés :

Effet de serre

Agriculture

Stockage du carbone

Energies renouvelables

Aides financières

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés à la constitution de cette étude. Tout d'abord monsieur Michel PIDOUX notre professeur qui nous a consacré beaucoup de temps et de patience, ainsi que son assistante madame Carine CHEFSON.

Nous remercions également tous les organismes qui ont contribué au montage du dossier en nous apportant tous les éléments et les renseignements nécessaires. Parmi eux, l'association ALISEE, notre commanditaire à l'origine du sujet, représentée par Anne Claire DOUBLET, toute l'équipe de l'ADEME d'Angers ainsi que monsieur Christophe RANQUE de la Chambre Régionale d'Agriculture. Un grand merci également à monsieur FALLOUX de la Banque Mondiale pour les réflexions qu'il a su nous apporter

Pour finir, nous remercions tous les élèves du Domaine d'Approfondissement Environnement pour la bonne humeur et la convivialité dont tous ont fait preuve lors de cette dernière période d'étude à l'Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers.

SOMMAIRE

Résumé d'auteurs	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	7
Glossaire	8
Introduction.....	9
1. Agriculture et effet de serre	10
1.1. Etude : Proposition de mesures dans le domaine agricole ayant pour but la réduction des émissions des gaz à effet de serre et l'accroissement des « puits de carbone ».....	10
1.1.1. Contexte et enjeux.....	10
1.1.2. Problématique.....	12
1.1.3. Objectifs par étapes et méthodologie	12
1.1.4. Liste des principales activités agricoles agissant sur l'émission, le stockage ou le déstockage des gaz à effet de serre.	12
1.1.5. Choix des pratiques étudiées	13
1.2. L'effet de serre	15
1.2.1. Définition	15
1.2.2. Des gaz à très longue durée de vie.....	18
1.2.3. Des impacts à plusieurs niveaux, des conséquences diverses (voir figure 8).....	20
1.2.4. De la prise de conscience à nos jours : travail des scientifiques et des Etats	22
1.3. Agriculture : une contribution importante à l'effet de serre	26
1.3.1. Fonction "puits" de carbone de l'agriculture	27
1.3.2. Mesures des émissions: trop d'incertitudes	27
2. Pratiques agricoles et réduction de l'effet de serre.....	29
2.1. Introduction	29
2.2. Le stockage du carbone dans les sols	29
2.2.1. La variation des quantités de carbone stockées dans les sols.	29
2.2.2. La dynamique des matières organiques des sols.....	30
a- Protection physique de la matière organique.	30
b- Des vitesses de biodégradation variables de la MO.	30
c- Prévoir le comportement de la matière organique du sol	31
d- L'état de la recherche.	31
e- Des résultats surprenants.	32
f- Matières organiques, substances xénobiotiques et maladies des cultures.	32
g- Favoriser la séquestration du carbone et améliorer la fertilité du sol.....	32
h- Synthèse sur le comportement du carbone dans le sol (figure 10).....	34
2.2.3. Des pratiques agronomiques favorisant la séquestration du carbone dans les sols.....	35
a- Identification et évaluation des pratiques agricoles au niveau agronomiques et du stockage du carbone	35
• Biomasse : produire plus pour stocker plus de carbone ?.....	35
• Comment optimiser la séquestration du carbone dans les sols cultivés ?.....	37
• Les apports exogènes de matière organique.....	37
b- Synthèse sur les pratiques agronomiques favorables à une réduction de l'effet de serre.	39
2.2.4. Un exemple de pratique culturale favorable à la fixation durable du carbone dans les sols : le travail simplifié du sol.....	40
a- Aspects techniques des méthodes de travail du sol.	40
b- Influence de la simplification du travail du sol sur l'évolution des stocks de carbone.	42
2.3. Pratiques favorisant la réduction d'émissions de certains gaz à effet de serre : l'exemple du traitement des lisiers	44
2.3.1. Emissions carbonées et azotées d'origine agricole	44
a- Le méthane	45
b- Le protoxyde d'azote.....	45
2.3.3 Traitement des déjections animales	46
a- Le processus de digestion anaérobie	46
a- Le processus de dégradation aérobie	47
2.3.4 Résultats	48

a- Emissions carbonées	48
① Déjections sous forme liquide	48
② Déjections sous forme solide : fumiers, fientes, compost	50
b- Emissions de protoxyde d'azote lors du traitement aérobie	50
c- Influence du mode de ventilation	51
2.4. Mesures incitatives	54
2.5. Le reboisement agricole	54
2.5.1. Différentes façons d'utiliser le bois des forêts	54
2.5.2. Exemples de potentiels de stockage de bois d'une maison, d'un bâtiment agricole, et d'un bâtiment industriel :	55
2.5.3. Les différents types de boisement (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Rapport du Groupe « agriculture, forêts, déchets »	55
3 Energies alternatives et réduction de l'effet de serre	57
3.1 Bois énergie	57
3.1.1 La situation actuelle	57
3.1.2 Le système de production de plaquettes	59
3.1.3 Analyse du cycle de vie	61
3.1.4 Le déchiquetage du bois : aspect environnemental et économique	63
3.1.5 Le coût du kWh	65
3.2. Utilisation du biogaz comme ressource énergétique	68
3.2.1 Etats des lieux des besoins et des ressources	68
3.2.1. Les enjeux de la méthanisation	70
a- Enjeux environnementaux	70
b- Enjeux économiques	71
3.2.3. Les paramètres et les conditions de la méthanisation	71
a- Influence du substrat	71
b- Influence de la température	72
c- Influence du pH et de l'oxygène	73
d- Influence du brassage	73
e- Le problème des inhibiteurs	73
f- Les caractéristiques moyennes du biogaz	73
g- Les critères d'appréciation du rendement énergétique	74
3.2.4. Description des procédés de méthanisation	75
a- Les systèmes de digesteur	76
b- Choix du type de matériaux	79
c- Les systèmes de stockage	79
d- Les systèmes de chauffage et d'agitation	79
e- Les systèmes d'épuration	79
3.2.5. Aspects économiques	80
a- Coûts d'investissement (cf. étude de faisabilité)	80
b- Coûts d'exploitation	82
c- Coût global unitaire de l'énergie	82
c- Avantages économiques de la méthanisation	83
3.3 Le mode de financement	83
3.3.1 Les conditions générales actuelles	83
a- ADEME	83
b- Région	84
c- Chambre d'Agriculture et CTE	84
d- Le marché du carbone	84
3.3.2 Le bois énergie	85
a- Objectifs	85
b- Situation actuelle	85
c- Estimation du coût de mise en place d'une chaudière à bois déchiqueté	86
d- Stratégie d'élaboration d'une mesure type CTE	87
3.3.3 La valorisation énergétique du biogaz	89
a- Diagnostic actuel	89
b- Elaboration d'un projet de fiche C.T.E pour l'utilisation de la valorisation énergétique du biogaz	90
3.3.4 Les fiches CTE	91

<i>Conclusion</i>	94
<i>Bibliographie</i>	95

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : contexte et enjeux de l'étude.....	11
Figure 2 : L'effet de serre	15
Figure 3 : cycle du carbone en 1990 (en giga tonne de carbone).....	16
Figure 4 : Voies de devenir de l'azote et les principales sources de production de NO ₂	17
Figure 5 : Composition de l'atmosphère.....	18
Figure 6 : composition de la serre	18
Figure 7 : Contribution des divers gaz au réchauffement de l'atmosphère	19
Figure 8 : impacts potentiels du changement du climat en France au XXI ^e siècle.....	21
Tableau 1 : Objectif de réduction des émissions pour certains pays	24
Figure 9 : les contributions des différents secteurs à l'effet de serre en France (1989).....	26
Tableau 2 : Estimation globale des émissions annuelles de méthane.....	27
Figure 10 : Synthèse sur le comportement du carbone dans le sol.....	34
Tableau 3 : Performances des principales techniques de travail simplifié associées au semis.....	41
Tableau 4 : Evolution du stock de carbone et des sources de ce stock entre 1970 et 1987, en fonction des techniques de travail du sol sur les parcelles de l'essai longue durée de Boigneville mises en monoculture de maïs, dans l'horizon de surface correspondant à 400 kg de terre/m ²	43
Figure 11 : Emission de gaz polluants dans les systèmes d'élevage.....	44
Tableau 5 : Emissions de méthane issues d'un modèle de production animale : exploitation laitière du Sud-Ouest de l'Angleterre	45
figure 12 : Processus de dégradation anaérobie de la matière organique se produisant lors du stockage des effluents d'élevage (les étapes de la fermentation anaérobie).....	47
Figure 13 : Principales transformations du carbone et de l'azote des lisiers lors du traitement aérobie des effluents d'élevage.....	48
Tableau 6 : Emissions carbonés / carbone initial sur différents traitements	49
Tableau 7 : Emissions carbonés (CO ₂ , CH ₄) lors du stockage des déjections animales solides	50
Figure 14 : Devenir de l'azote au cours de différentes stratégies d'aération du lisier.....	51
Tableau 8 : émissions carbonées en fonction des différents types de ventilation.....	51
Figure 15 : Synthèse sur le traitement des déjections animales	53
Figure 16 : évolution schématique de la croissance d'un arbre en fonction du temps.....	55
Figure 17 : La biomasse ligneuse en France.....	57
Figure 18 : sources d'énergies renouvelables dans l'UE en 1997.....	58
Figure 19 : Système de production des plaquettes	59
Figure 20 : Le cycle de vie du CO ₂ et la filière bois	61
Tableau 7 : Emissions de CO ₂ par kWh de la source à l'usage final (kg) :.....	62
Tableau 8 : Investissements matériels à réaliser.....	64
Tableau 9 : Coûts de fonctionnement moyens (F HT/h machine).....	65
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des coûts	66
Figure 21 : Comparaison avec les autres modes de chauffage	66
Tableau 11 : les ressources mondiales en biogaz.....	68
Tableau 12 : les ressources françaises en biogaz.....	69
Tableau 13 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane.....	72
Tableau 14 : proportion de H ₂ S selon le type de substrat.....	72
Tableau 15 : caractéristiques moyennes du biogaz.....	73
Tableau 16 : présentation des critères d'appréciation de la méthanisation	74
Tableau 17 : rendement énergétique du biogaz en fonction de son utilisation	74
Figure 22 : schéma d'une installation biogaz.....	75
Figure 23 : diagramme du procédé Batch.....	77
Figure 24 : diagramme du système continu infiniment mélangé.....	77
Figure 25 : Diagramme du système continu avec accumulation de la biomasse active.....	78
Figure 26 : schéma récapitulatif des stratégies possibles	88

Glossaire

GES : Gaz à Effet de Serre

CTE : Contrats Territoriaux d'Exploitation

GIEC : Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du climat

OMM : Organisation météorologique Mondiale

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

CUMA : Coopérative des Utilisateurs du Matériel Agricole

Introduction

Les activités humaines entraînent un accroissement de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère provoquant un réchauffement du climat.

La sécurité des personnes et des biens, la santé, les écosystèmes terrestres et aquatiques et les systèmes socio-économiques (agriculture, exploitation forestière, pêche, ressources en eau,...), qui constituent des éléments essentiels du développement et du bien-être de l'humanité sont sensibles aux variations du climat. De nombreuses régions de la planète sont susceptibles de subir les effets négatifs de cette évolution. Certains de ces effets risquent d'être irréversibles. La société doit donc s'attendre à de multiples et profonds bouleversements auxquels elle devra s'adapter.

Face aux risques que fait courir la hausse de concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre émis par les activités humaines, il faut tenir compte des incertitudes scientifiques qui demeurent et de la grande inertie du système climatique. En effet, les conséquences des actions humaines réalisées jusqu'à présent vont se faire sentir tout au long du 21^{ème} siècle.

L'agriculture, à travers la culture des terres et l'élevage, émet en France divers gaz à effet de serre et en 1990, ces émissions s'élevaient à 50 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions peuvent être partiellement réduites par de bonnes pratiques, notamment au niveau du traitement des lisiers et fumiers, de la fertilisation ou des techniques de travail du sol.

Le stockage du carbone lié au boisement est également une solution. De plus, les résidus forestiers permettent de produire des combustibles pouvant se substituer à d'autres énergies fossiles de la même façon que le procédé de fabrication de biogaz par méthanisation. Le développement des énergies renouvelables sur les exploitations agricoles apparaît donc comme un nouveau facteur de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre.

Les exploitations agricoles sont maintenant considérées dans leur globalité et de manière intégrée dans le cadre des Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE). Des études complémentaires sont nécessaires pour que cette dimension visant la réduction des gaz à effet de serre par l'agriculture puisse être pris en compte dans les objectifs des cahiers des charges proposés par les CTE.

1. AGRICULTURE ET EFFET DE SERRE

1.1. Etude : Proposition de mesures dans le domaine agricole ayant pour but la réduction des émissions des gaz à effet de serre et l'accroissement des « puits de carbone ».

L'étude se décomposera en deux parties :

- étude de pratiques agricoles pouvant réduire les émissions des gaz à effet de serre, ou augmenter les puits de carbone.
- étude sur les énergies alternatives émettant moins de gaz à effet de serre au sein des exploitations agricoles, et en particulier sur le bois de déchiquetage et le méthane.

La première partie de l'étude est réalisée avec le partenariat de F. FALLOUX, qui a travaillé à la banque mondiale.

La seconde partie de l'étude nous a été proposée par l'association ALISEE (Association Ligérienne d'information sur l'Energie et l'Environnement), association régionale appartenant au C.L.E.R. (Comité de Liaison Energies Renouvelables).

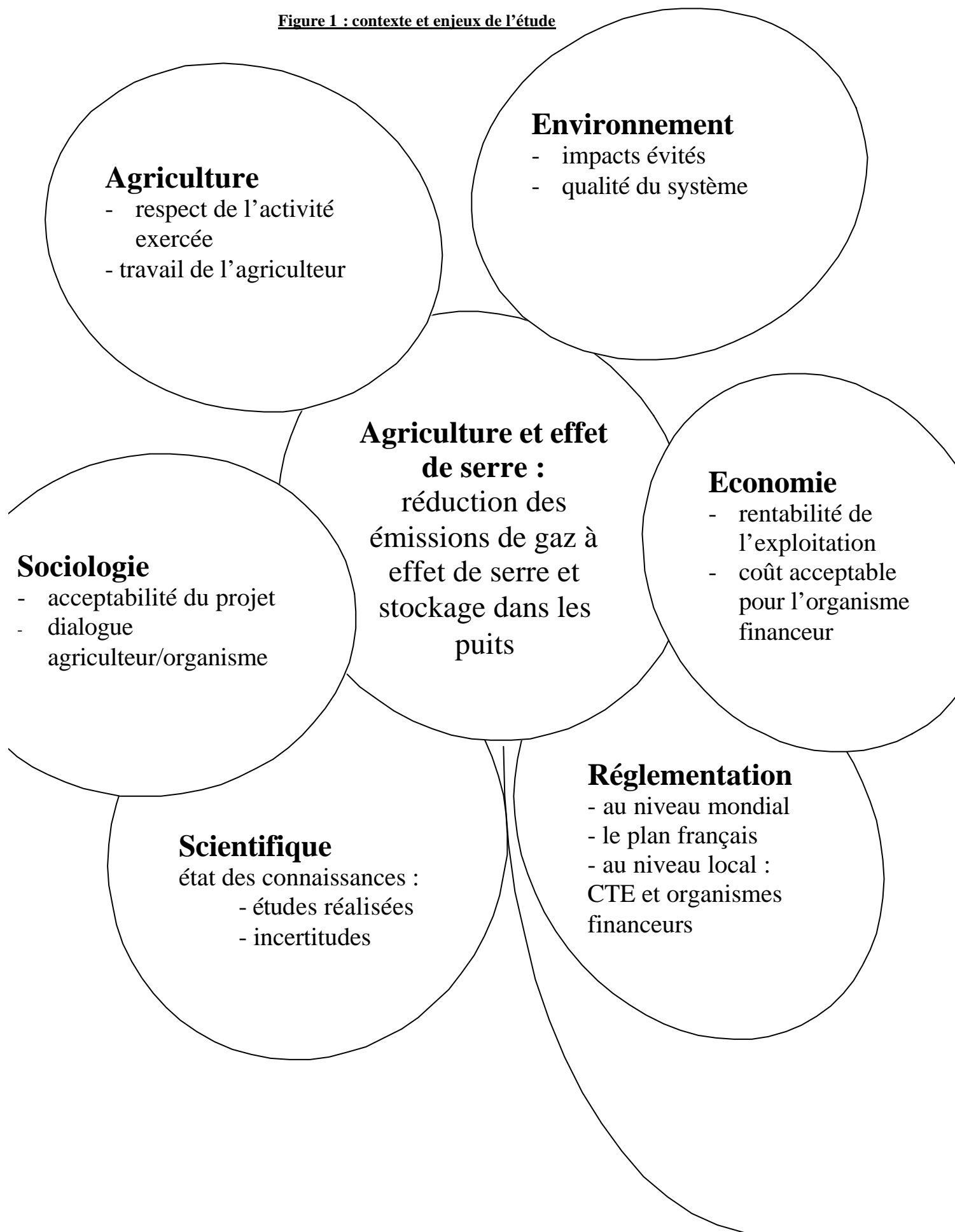
1.1.1. Contexte et enjeux

Notre étude se cadra dans un contexte comprenant 3 domaines d'enjeu :

- **environnemental** : l'enjeu général est de répondre aux objectifs nationaux fixés lors de la ratification du protocole de Kyoto, afin **d'éviter les impacts** globaux liés aux gaz à effet de serre, présentés dans la figure 8. Plus localement, et à l'échelle d'une exploitation agricole, il s'agit de réduire les émissions de gaz à effet de serre et/ou de favoriser le stockage du carbone.
- **économique** : les mesures choisies et mises en pratiques devront être **économiquement rentables**, pour que les agriculteurs et les organismes financiers puissent les supporter. L'agriculteur a en priorité un souci de rentabilité de son exploitation. L'état, de son côté, par l'intermédiaire des organismes financiers (Ademe, Chambres d'Agriculture), a un intérêt à optimiser le rapport qualité/coût des actions proposées, et donc un souci d'économie et d'efficacité.
- **social** : l'enjeu est de **faire accepter le projet** par les agriculteurs. Ceci implique une bonne communication avec eux, pour qu'ils comprennent les intérêts, contraintes et avantages du projet, dans le but de les convaincre de son utilité et de la mise en œuvre sur leur exploitation.

Ce problème comporte donc l'analyse de plusieurs critères, qui peut être résumé par le schéma suivant .

Figure 1 : contexte et enjeux de l'étude



1.1.2. Problématique

Comment ajuster les pratiques agricoles pour réduire l'effet de serre, tout en évitant d'induire d'autres nuisances pour l'environnement, et en respectant le contexte social, réglementaire et économique.

Comment développer à la ferme des filières d'énergies alternatives, pour contribuer à la réduction des émissions de GES ?

Proposer des solutions de financements de ces nouvelles sources d'énergie pour les agriculteurs, et rédaction de fiches CTE.

Ces trois points devront être traités en tenant compte du contexte économique et social des agriculteurs.

1.1.3. Objectifs par étapes et méthodologie

- Lister les pratiques agricoles jouant un rôle dans l'émission des gaz à effet de serre et dans le stockage du carbone (bibliographie).
- Proposer des évolutions de pratiques agricoles, réduisant l'émission des gaz à effet de serre et/ou augmentant les moyens de stockage du carbone, ou des solutions alternatives en terme d'énergie pour réduire l'émission des GES.
- Trouver des solutions alternatives pour réduire les émissions de gaz à effet de serre en agriculture.
- Proposer des fiches CTE (contrat Territoriaux d'Exploitation).
- Proposer ces fiches CTE à différents organismes afin d'obtenir des financements et qu'elles soient validées et applicables.

1.1.4. Liste des principales activités agricoles agissant sur l'émission, le stockage ou le déstockage des gaz à effet de serre.

- **travail du sol** (labour)
- **fertilisation** :
 - augmentation de la productivité ⇒ augmentation de la biomasse végétale ⇒ augmentation de la fonction puits de carbone
 - émissions de N₂O due à la fertilisation azotée
- **irrigation, drainage**, utilisation de produits **phytosanitaires**, sélection des **semences** : ⇒ augmentation de la biomasse végétale ⇒ augmentation de la fonction puits de carbone
- **jachères, prairies** : peu de productivité ⇒ faible fonction puits de carbone
- restitution au sol des **résidus de récolte, amendements organiques** dans le sol (fumier composté ou non, boues de station d'épuration, compost d'ordures ménagères...) ⇒ stockage de matière organique dans le sol
- stockage des **déjections animales**
- traitement des déjections animales : valorisation de l'énergie produite

- **forestation, déforestation**, gestion et **exploitation de la forêt**
 - **haies** : fonction puits de carbone, et fourniture de bois de taille
 - **exploitation du bois** comme biocombustible, produit de stockage à longue durée de vie (ossature bois des bâtiments agricoles ou des maisons d'habitation, meubles...)
 - **biocombustibles** : déchets ligneux ou ordures ménagères
-
- saturation de la porosité du sol par l'eau : baisse du stockage du carbone
 - anoxie du sol et valeur du pH (effet très probable mais non certain) : baisse du stockage du carbone
 - bandes enherbées dénitrifiantes le long des cours d'eau : émettrices de N₂O
 - combustions liées aux engins et à la machinerie
 - alimentation des ruminants : à ajuster pour réduire les émissions de CH₄

Classification selon les effets positifs ou négatifs face à l'effet de serre

Diminution de l'effet de serre	Augmentation de l'effet de serre
Fertilisation	Fertilisation azotée
Irrigation, drainage, produits phytosanitaires, sélection des semences	Jachères, prairies
Restitution des résidus de récolte et amendements organiques	Déjections animales
Valorisation énergétique des déjections animales	Déforestation
Reboisement et exploitation de la forêt	Saturation de la porosité du sol par l'eau (anoxie du sol)
Plantation et entretien de haies	Bandes enherbées
Utilisation de biocombustibles	Engins et machinerie
Ajuster l'alimentation des ruminants	

Parmi cette liste, et étant donné l'étendue du sujet, différents thèmes seront choisis pour entrer dans le cadre de notre étude.

1.1.5. Choix des pratiques étudiées

Les domaines que nous développerons ont été choisis parmi la liste des pratiques agricoles présentée dans le paragraphe ci-dessus, selon des critères de jugement différents :

- l'étude du stockage et du déstockage du carbone dans le sol,
- l'étude des émissions liées au stockage, traitement et épandage des déjections animales,
- évocation du rôle des forêts,
- la filière bois avec combustion dans une chaudière, et l'étude d'énergies alternatives (méthane).

Le choix d'étudier le stockage et le déstockage du carbone dans le sol a été fait en fonction de l'importance qui semble accordée à la fonction "puits" de l'agriculture au sein du problème.

Les déjections animales sont une part importante des émissions, sur laquelle des actions sont possibles.

Enfin, étant donné l'importance que le plan français de réduction des émissions de GES accorde aux forêts, en terme d'actions à mener, et le potentiel élevé de fixation de carbone qu'elles fournissent, le rôle des forêts dans ce problème sera mentionné également.

L'étude de la filière bois en tant qu'énergie, et l'étude d'énergies alternatives a été demandée par l'association Alisée, et sera donc étudiée dans une deuxième partie.

L'étude des émissions de N_2O par les champs a été laissée de côté, étant controversée par le fait que l'apport d'engrais azoté contribue à augmenter la biomasse et donc l'effet puits de carbone des plantes.

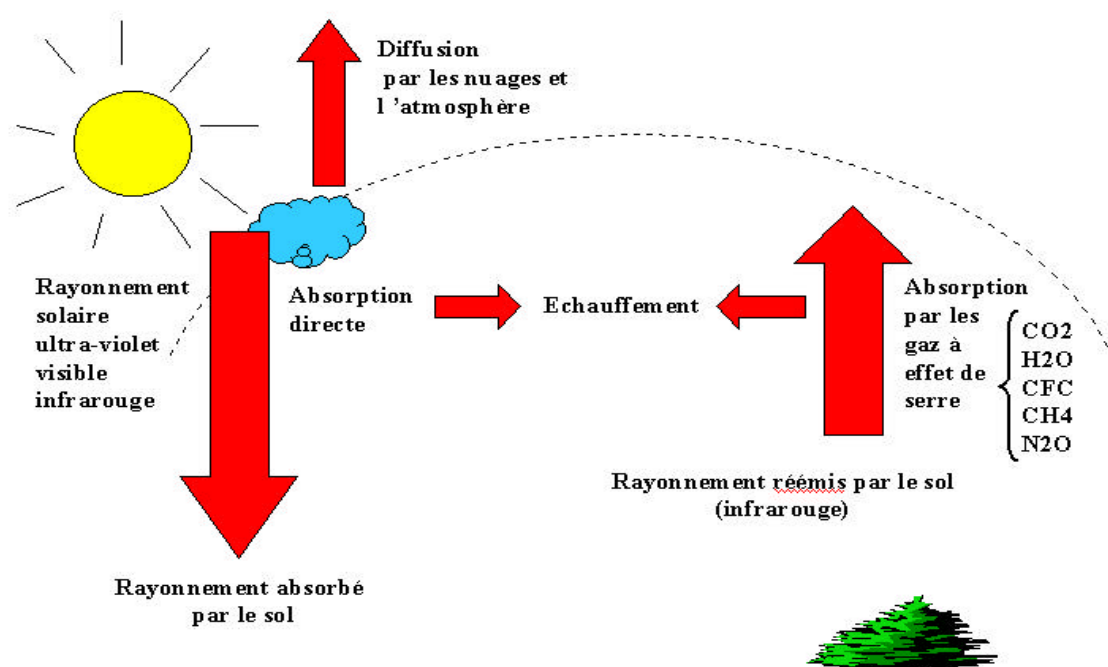
La saturation de l'eau par le sol, l'alimentation des animaux et l'intensité de l'élevage, ainsi que les bandes enherbées sont des problèmes mineurs comparés à ceux que nous avons choisis.

Enfin, l'étude de l'utilisation des machines agricoles n'a pas été retenue, ne constituant pas une pratique agronomique en tant que telle, mais apparaîtra dans l'étude et l'évaluation des techniques agronomiques choisies dans l'étude.

1.2. L'effet de serre

1.2.1. Définition

Figure 2 : L'effet de serre



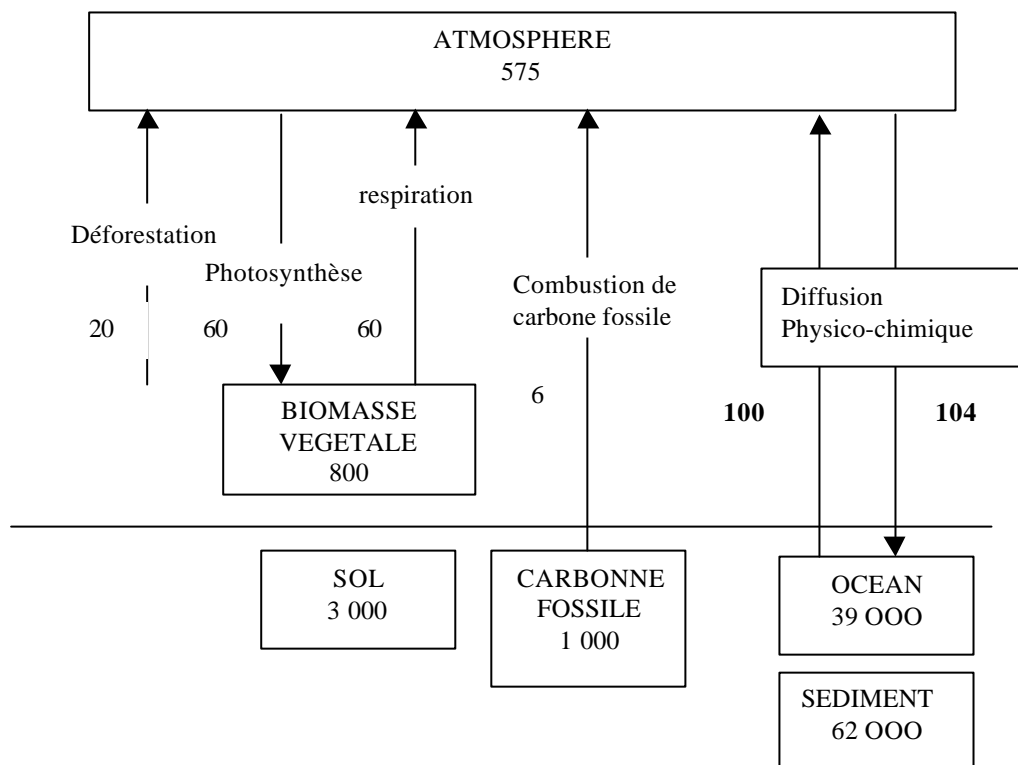
Source : Ademe , « l'effet de serre »

Le problème peut se résumer par un équilibre rompu du cycle du carbone à l'échelle planétaire. En effet, le carbone stocké (arbres, fossiles, sols) est destocké par les activités humaines et rejeté dans l'atmosphère. Quelques 6 milliards de tonnes de carbone (sous forme de CO₂) sont annuellement rejetés dans l'atmosphère du fait principalement de l'utilisation d'énergies fossiles non renouvelables (charbon, gaz, pétrole). Seule la moitié des émissions de gaz carboniques se trouvent biologiquement absorbés par les océans et par la végétation, le reste s'accumulant dans l'atmosphère. Le résultat est très net avec une augmentation de la concentration de CO₂ de 0,5 % par an.

Le dioxyde de carbone et le méthane sont les gaz dont les dégagements liés aux activités humaines sont les plus importants. On peut ajouter à cela les rejets de gaz connexes (CO, NO_x, HC) et d'autres formes de gaz comme les chlorofluorocarbures (CFC) créés par l'homme qui ont un impact équivalent voire plus important sur l'effet de serre.

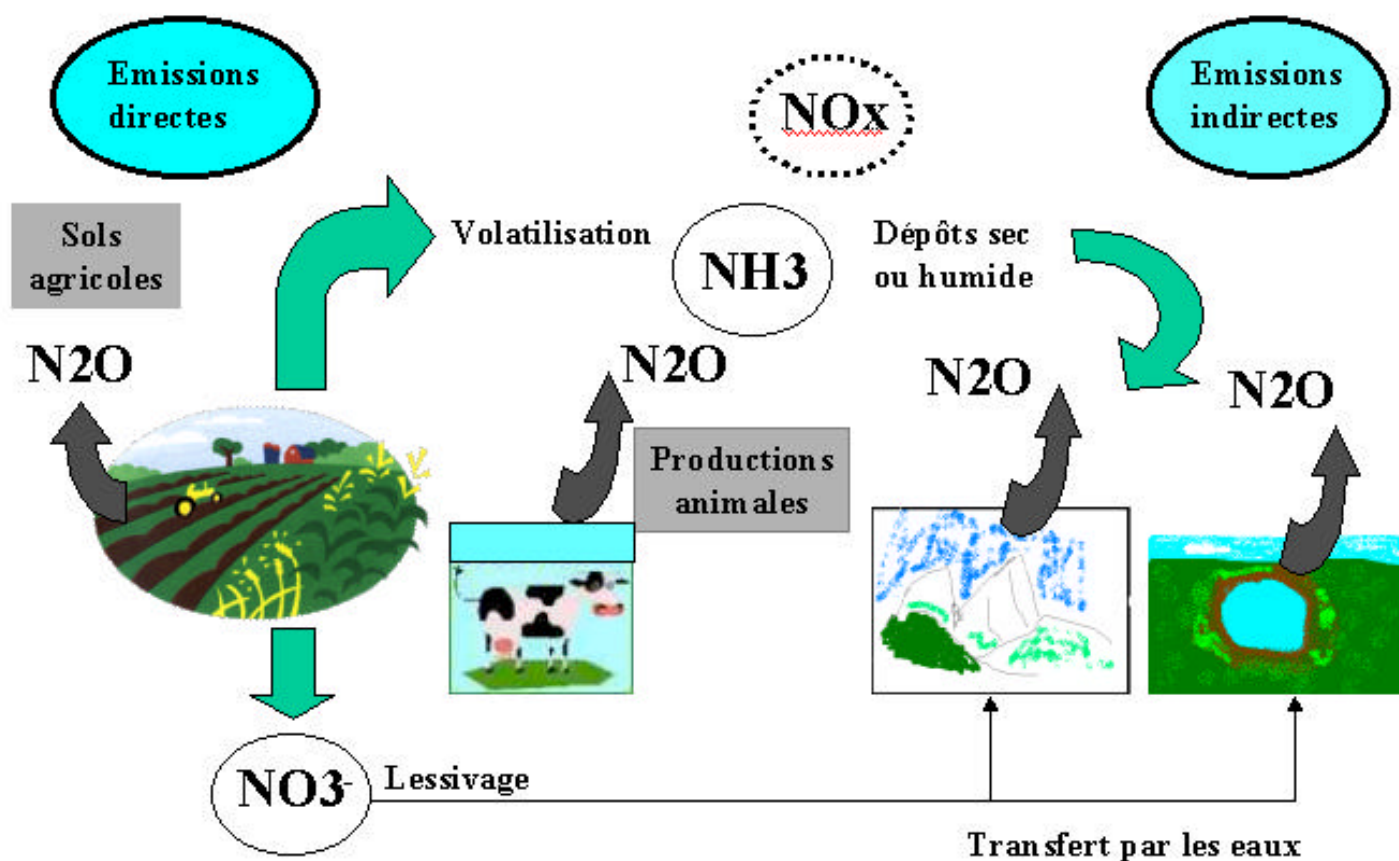
Les schémas suivants présentent les principales activités humaines responsables d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ainsi que les cycle simplifié du carbone et de l'azote.

Figure 3 : cycle du carbone en 1990 (en giga tonne de carbone)



Source : compte-rendu de l'Académie d'Agriculture

Figure 4 : Voies de devenir de l'azote et les principales sources de production de NO₂

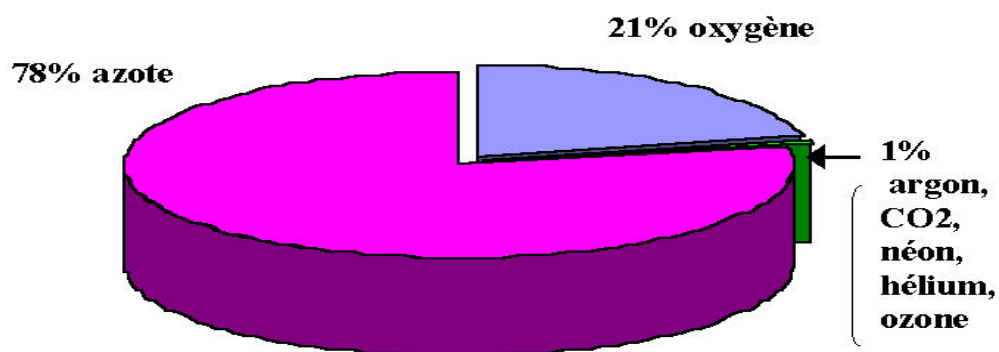


source : Comptes rendus de l'Académie de l'Agriculture

Les émissions de N₂O sont séparées en trois catégories (figure ci-dessus): les émissions directes depuis les sols agricoles, les émissions résultant des activités d'élevage et les émissions indirectes, c'est à dire principalement produites dans les hydrosystèmes et les écosystèmes naturels à partir de l'azote perdu par les systèmes agricoles par voie aérienne (volatilisation d'ammoniac et émissions de Nox) et redéposées sous forme sèche ou humide, ou par voie souterraine (lessivage de nitrates)

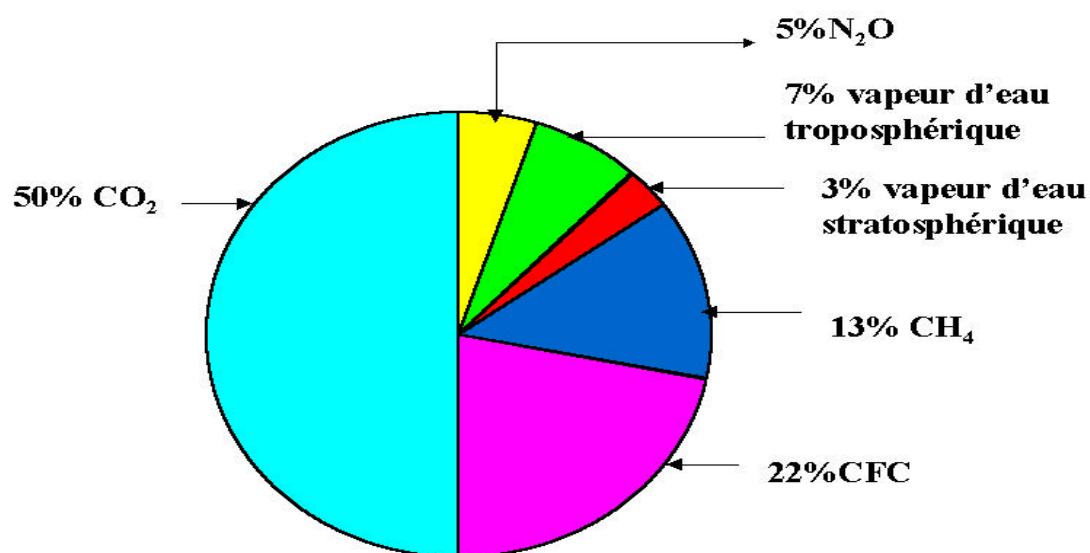
1.2.2. Des gaz à très longue durée de vie

Figure 5 : Composition de l'atmosphère



Source : Ademe : « L'effet de serre »

Figure 6 : composition de la serre



Source : Ademe « L'effet de serre »

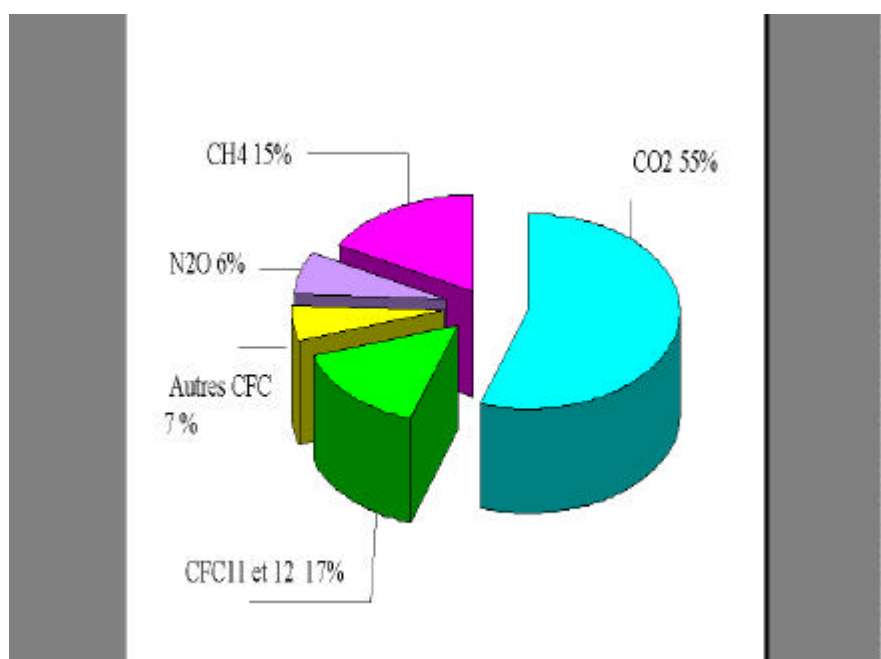
Résistants, certains de ces gaz ont une durée de vie très longue dans l'atmosphère. Elle peut aller de 10 ans pour le CH₄ à 120 ans pour le CO₂ ou 130 ans pour le CFC12. Pour stabiliser leur concentration dans l'atmosphère, il ne suffit pas de stabiliser les émissions. Il devient urgent de les réduire de manière conséquente : de 15 à 20% pour le CH₄, de 75 à 85% pour le CFC12 et de plus de 60% pour le CO₂.

Ces gaz ont aussi une capacité différente à absorber la chaleur.

Celle-ci peut en effet varier, sur une période de 20 ans, de 1 unité de rayonnement (CO₂) à 7000 (CFCF12). D'où une responsabilité inégale dans le réchauffement du climat, dont il faut tenir compte.

Au cours des années 80, des études ont permis d'évaluer la contribution des divers gaz au réchauffement du climat (voir figure 7).

Figure 7 : Contribution des divers gaz au réchauffement de l'atmosphère



Source : Ademe « l'effet de serre »

Bien que le CO₂ soit le gaz le moins efficace par kg émis pour piéger la chaleur, sa contribution au réchauffement global se révèle la plus forte du fait de l'ampleur de ses émissions.

Les polluants classiques ont leur part de responsabilité.

Les gaz produits dans les combustions en même temps que le CO₂ (CO, Nox, et les hydrocarbures) influent indirectement sur l'effet de serre. Ainsi, le CO contribue-t-il au maintien prolongé des molécules de méthane dans l'atmosphère, sans compter qu'il termine sa vie en se transformant en CO₂. Les Nox et les hydrocarbures, quant à eux, forment l'ozone troposphérique qui est lui même un gaz à effet de serre. L'efficacité de ces gaz sur le réchauffement du climat est toutefois encore assez mal connue.

:

1.2.3. Des impacts à plusieurs niveaux, des conséquences diverses (voir figure 8)

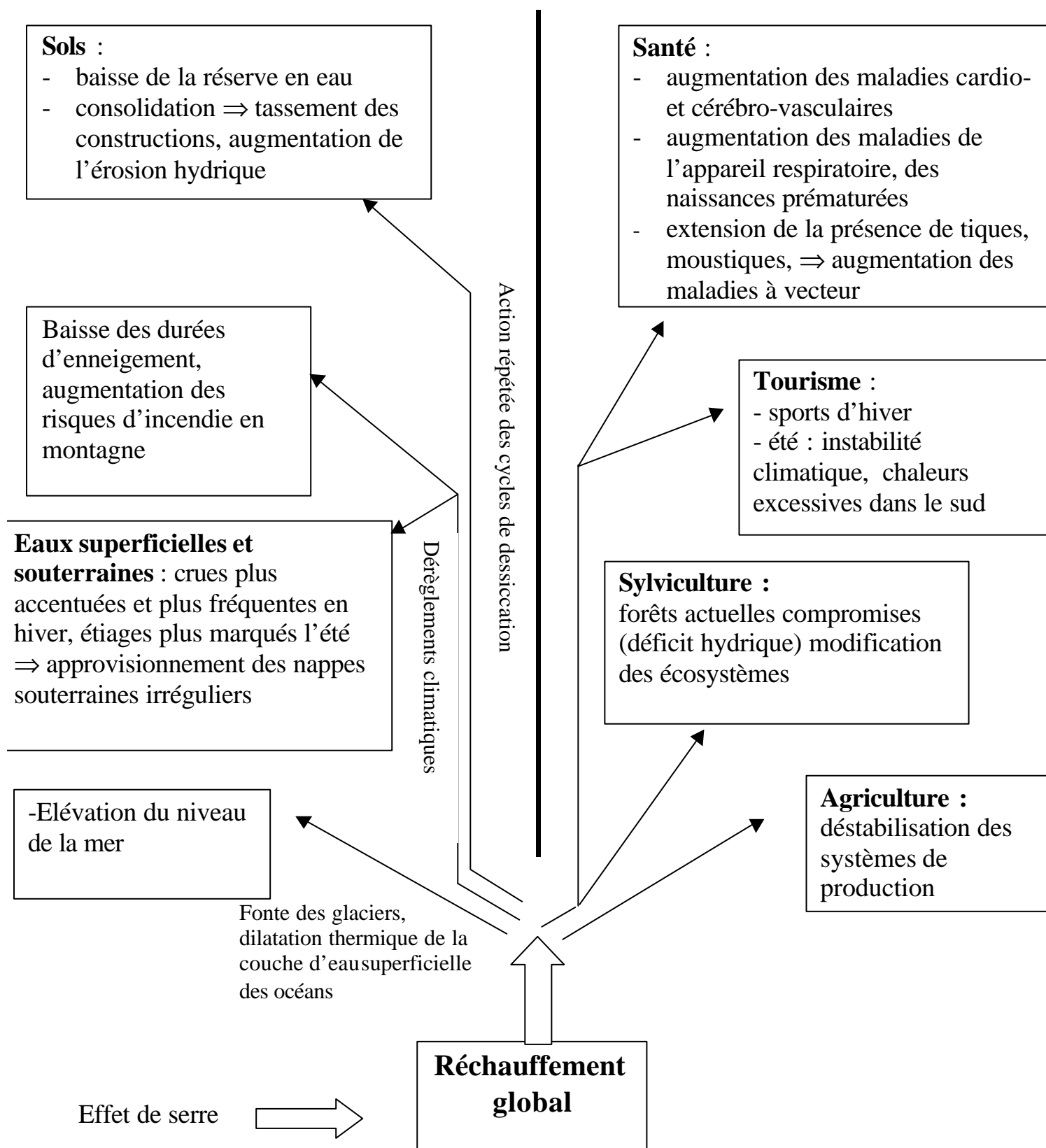
Cette augmentation de l'effet de serre est un phénomène préoccupant pour le maintien des conditions de vie sur Terre. Si nous ne réagissons pas rapidement, nous n'aurons pas la capacité d'adapter nos sociétés et nos écosystèmes aux nouvelles conditions qui en résulteront.

L'accroissement de l'effet de serre conduit à un réchauffement global de la température de la terre qui induit de nombreuses conséquences (variation de 0,4 à 0,8 °C selon les surfaces du globe).

¹Figure 8 : impacts potentiels du changement du climat en France au XXI^e siècle

EFFETS

IMPACTS



¹ Inspiré de : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, « Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle. »

Cependant, le réchauffement planétaire n'est pas un phénomène uniforme à la surface du globe terrestre et on enregistre des différences d'impacts à des degrés plus ou moins nuancés selon les régions. Par exemple, on remarque une forte tendance au renforcement de l'aridité dans certaines régions désertiques comme le Sahel ou en Asie Centrale. Inversement, en Europe Occidentale, la fonte des glaces entraînerait une évolution des courants océaniques responsables de la formation de grandes dépressions susceptibles de refroidir le climat de ces régions. L'évolution de la température sera plus forte aux pôles qu'à l'équateur. La fonte des glaciers pourrait également menacer l'existence de petits Etats insulaires.

Parallèlement, on a une répartition des impacts dans le temps et le réchauffement annoncé ne sera pas non plus uniforme dans le temps. Une région donnée pourra être affectée plus tardivement qu'une autre déjà fortement perturbée. Le phénomène de l'intensification de l'effet de serre est dû à de tels excès depuis plus d'un siècle qu'il est impossible d'y mettre un terme de façon radicale. L'inertie est ainsi tellement importante que de très nombreuses générations auront à en subir les conséquences. Une prise de conscience immédiate est donc nécessaire pour éviter d'aggraver le phénomène voire de le rendre irréversible.

Les activités humaines provoquant ces modifications, si nous ne modifions notre mode de vie, la concentration des gaz à effet de serre sera doublée d'ici 50 ans avec les conséquences que l'on connaît.

On peut classer les mesures à prendre en deux grandes catégories à savoir les mesures réglementaires, d'une part et les démarches volontaires d'autre part. Ces mesures sont :

- économie et maîtrise de l'énergie, c'est à dire préconiser la réduction des consommations d'énergie, son utilisation rationnelle et la diffusion de techniques plus économes (énergies renouvelables)
- arrêt de la déforestation et reboisement
- utilisation des mécanismes de développement propre (MDP), c'est à dire des financements de projets aboutissant à une réduction des émissions dans les pays en voie de développement et attribution en échange un crédit d'unités de réduction certifiée
- élaboration de taxe basée sur un prix de référence de la tonne d'équivalent carbone de 150 à 200 francs (écotaxe)
- maîtrise des transports
- limitation de la mise en décharge des déchets putrescibles

Toutes ces mesures ont été évoquées lors de la conférence de Kyoto consacrée au réchauffement planétaire en 1997 et concernent 160 pays.

1.2.4. De la prise de conscience à nos jours : travail des scientifiques et des Etats

1827 : première description de l'effet de serre : JB. Fourier décrit le phénomène du réchauffement climatique par effet de serre.

1873 : fondation à Vienne de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).
Début des observations météorologiques par les services nationaux .

1895 : Première analyse de l'effet de serre : le chimiste suédois S. Arrhénius suggère que les émissions de dioxyde de carbone, en renforçant l'effet de serre, pourraient entraîner une hausse de la température moyenne de la terre.

1957 : Mesures systématiques du CO₂ à Hawaï et en Alaska

1967 : Premières prévisions de réchauffement : deux scientifiques prédisent un doublement de la concentration de CO₂ d'ici au début du XXI^e siècle, et une élévation de la température moyenne de 2.5°C.

Premières actions mondiales

1972 : Conférence de Stockholm, organisée par les Nations unies.

1979 : Première conférence mondiale sur le climat, organisée à Genève par l'OMM.

1988 : Création du Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (**GIEC**), chargé de suivre le problème du réchauffement climatique.

1989 : Seconde conférence mondiale sur le climat : elle réunit 137 états plus la communauté européenne, dont **12 membres s'engagent à stabiliser leurs émissions de CO₂ au niveau de 1990 d'ici l'an 2000.**

1990 : **Création du Fonds pour l'Environnement Mondial.** Ce mécanisme financier des pays développés a pour objet d'aider les pays en développement à s'attaquer à 4 problèmes d'environnement, dont le réchauffement climatique.

1992 : Convention cadre sur les changements climatiques, signée à Rio de Janeiro dans le cadre du Sommet de la Terre. Son objectif : stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. les pays développés et les pays en transition inscrits dans l'annexe I de la convention, s'engagent à stabiliser leurs émissions d'ici l'an 2000 au niveau de 1990. Les pays développés et l'Union Européenne s'engagent à financer les coûts encourus par les pays en voie de développement.

Les conférences des parties (COP)

Définition : association de tous les pays ayant ratifié ou accédé à la Convention.

Elle est responsable du suivi des efforts des pays pour faire face aux changements climatiques.

1995 : Première COP à Berlin (Mandat de Berlin), reconnaît la nécessité d'un renforcement des engagements des pays développés, et prévoit d'élaborer des politiques et mesures.

1996 : Deuxième COP

1997 : Troisième COP : **Protocole de Kyoto** .

Il fixe des objectifs chiffrés de réduction des émissions des gaz à effet de serre d'ici 2008/2012 par rapport au niveau de 1990 :

Tableau 1 : Objectif de réduction des émissions pour certains pays

Union Européenne, la plupart des pays d'Europe centrale et orientale	8%
Etats-Unis	7%
Japon, Canada, Hongrie, Pologne	6%
Russie, Ukraine , Nouvelle Zélande	0%
Norvège, Islande, Australie	Droit d'augmentation

Source : Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture

Le protocole vise 6 principaux gaz à effet de serre :

- le dioxyde de carbone (CO₂)
- le méthane (CH₄)
- l'oxyde nitreux (N₂O)
- l'hydrofluorocarbones (HFC)
- l'hydrocarbures perfluorés (PFC)
- hexafluorure de soufre(SF₆)

Il prône le développement des puits de gaz à effet de serre , ainsi que la mise en place de politiques nationales de baisse d'émission de ces gaz.

De plus un marché des droits à polluer a été mis en place à Kyoto pour les pays industrialisés, et pour le secteur industriel. Ces droits une fois acquis permettront aux pays et aux entreprises d'émettre des quantités définies des gaz à effets de serre. Ces droits sont échangeables et négociables. Ce principe favorise avant tout les pays riches qui peuvent ainsi acheter facilement des droits à polluer aux pays en voie de développement qui ont malheureusement d'autres préoccupations majeures.

1998 : Quatrième session de la COP, plan d'action de Buenos Aires. Mise en place d'un calendrier de travail avec pour date butoir, la COP de novembre 2000. Plan d'actions unique pour les parties, celui de Buenos Aires.

1999 : Cinquième session de la COP, à Bonn : négociations sur le Plan d'actions de Buenos Aires.

Du 13 au 24 novembre 2000 : Les 16 pays signataires au protocole de Kyoto se sont retrouvés à la Haye, afin de prendre les mesures concrètes visant à son application.

Les négociations pour la mise en application du principe des marchés des permis d'émission ont échoué lors de cette conférence.

Un exemple : le plan français

Depuis le 19 janvier 2000, la France a son plan de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et a adopté un projet de loi autorisant la ratification du protocole de Kyoto. Etabli par la Mission Interministérielle sur l'effet de serre (MIES), il comprend 96 mesures visant à ne pas dépasser le niveau d'émission de 1996, soit 144 millions de tonnes

d'équivalent carbone (MteC), c'est à dire éviter d'émettre au moins 16 MteC (compte tenu des prévisions de la croissance).

Le plan prévoit que la moitié de l'objectif pourra être atteint par la **maîtrise de l'énergie**.

Le plan présente aussi l'extension de la taxe générale sur les activités polluantes des entreprises.

Les transports, pourtant premiers émetteurs de GES n'est touché que par de timides mesures.

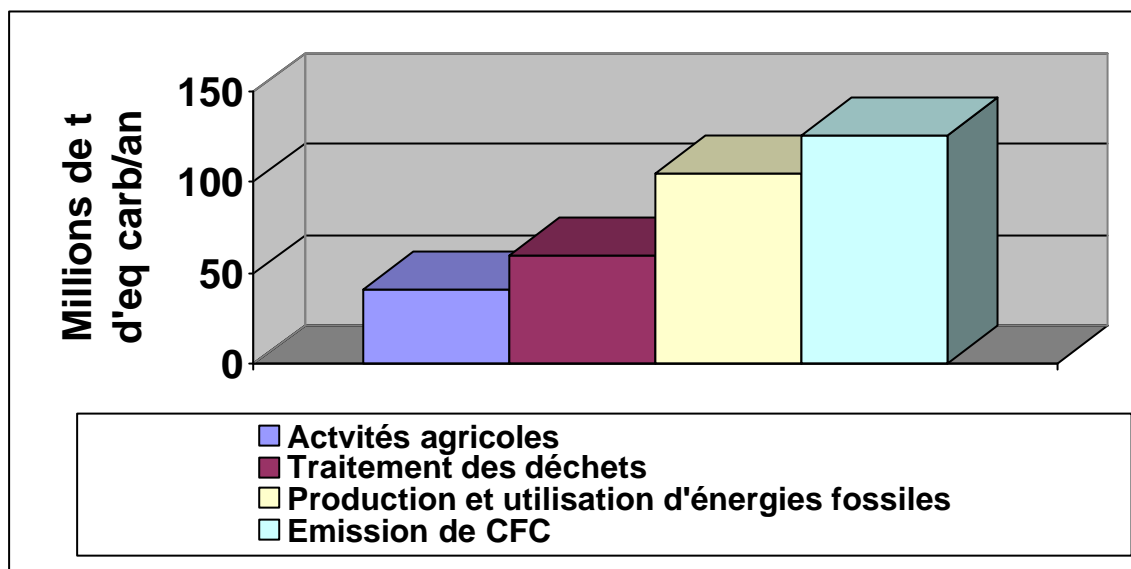
Le plan comprend un important volet touchant **le secteur agricole et en particulier les forêts**. L'agriculture représente 15 % des émissions de GES en France. Le plan prévoit donc un rythme de **reboisement** de 20 000 ha jusqu'en 2006. Des mesures incitatives à **l'utilisation du bois comme substitut aux énergies fossiles et aux matériaux de construction** seront mis en place. **Pour réduire les émissions de protoxyde d'azote, le gouvernement s'oriente vers la mise en place d'une redevance sur les excédents d'azote afin de limiter l'utilisation d'engrais azotés.**

Une étude réalisée par des chercheurs de l'unité d'économie et sociologie rurale de l'INRA montre **qu'une réduction significative des émissions nettes nationales d'origine agricole est envisageable à un coût intéressant**, étant donné les coûts individuels de réduction des émissions. Il est cependant nécessaire de **favoriser le stockage de carbone** pour que les résultats soient probants.

La France est le premier pays à présenter son plan de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre. Elle affiche ainsi sa volonté de faire avancer au plus vite les négociations, d'autant qu'elle a présidé l'Union Européenne lors de la conférence de La Haye.

1.3. Agriculture : une contribution importante à l'effet de serre

Figure 9 : les contributions des différents secteurs à l'effet de serre en France (1989)



Source : brochure de l'ADEME "L'effet de serre"

Les émissions brutes de GES dues à l'agriculture représentent actuellement environ **15% des émissions nationales**, toutes activités confondues (Emmanuel RIVIERE, « Le Bilan des sources et des puits de gaz à effet de serre : la part de l'agriculture et de la forêt en France »).

Au niveau mondial, la contribution des activités agricoles, pour les trois principaux GES, était en 1995 (GIEC) de :

- 63.7% pour le CO₂,
- 19.2% pour le CH₄
- 5.7% pour le N₂O.

Les activités d'élevage, à travers notamment la gestion et le devenir des déjections animales, contribuent aux émissions anthropogéniques des trois principaux gaz à effet de serre qui sont : le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère n'a fait qu'augmenter : de l'ordre de 30% pour le CO₂, 145% pour le méthane et 15% pour le N₂O. Globalement, l'agriculture contribue pour un tiers d'entre eux

Le méthane joue un rôle important dans la chimie de l'atmosphère par son influence sur la concentration en ozone et par son effet radiatif. Sa concentration dans l'atmosphère augmente actuellement de 1% par an en moyenne. Le méthane agricole représente une part importante de la production totale (tableau n°2).

Tableau 2 : Estimation globale des émissions annuelles de méthane

Origine	Flux	Références
Production totale	295 à 505	Dunglas, 1993 ; Crutzen, 1991
Production totale	386	Duxbury, 1994
Rhiziculture	70	Dunglas, 1993
Ruminants	110	Sauvant, 1992
Déjections animales	28	Saffley, 1992

Les émissions de CO₂ et de CH₄ sont dues à la décomposition des matières organiques : décomposition anaérobie dans les rumens, décomposition anaérobie des déchets et déjections animales.

Le protoxyde d'azote provient essentiellement des composés riches en azote : déjections, terres recevant des apports d'engrais azotés sous forme organique ou minérale. En 1990, environ 66% des émissions nationales de protoxyde d'azote (N₂O) provenaient de l'agriculture et du changement d'utilisation des sols (déforestation...).

1.3.1. Fonction "puits" de carbone de l'agriculture

Contrairement à d'autres secteurs comme l'énergie ou les transports, il est important, en agriculture, de considérer à la fois les émissions et les séquestrations de gaz à effet de serre. En effet, comme les océans, les biomasses et les sols constituent des puits de gaz carbonique. Dans la convention sur le climat, on entend par "puits" tout processus, toute activité ou mécanisme naturel ou artificiel, qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, alors qu'une source libère de tels gaz.

"Tant que l'on ne sera pas capable d'injecter, à des coûts acceptables, du gaz carbonique dans la croûte terrestre ou dans les océans, **l'agriculture**, la forêt ainsi que les produits renouvelables issus des biomasses **constitueront les seuls réservoirs de gaz carbonique susceptibles d'être augmentés par l'homme.**" (Arthur RIEDACKER, « Les stocks et les flux de gaz à effet de serre dans le domaine de l'agriculture, des forêts et des produits dérivés, en France et dans quelques autres pays industrialisés »).

L'augmentation du stock de carbone dans l'atmosphère entre 1850 et 1990 venait, pour 30% de la diminution des stocks de carbone contenus dans les couverts végétaux et dans les sols. En effet, au cours de l'histoire humaine, les déforestations ainsi que les travaux des sols (labour), ont conduit à des réductions de carbone dans les biomasses forestières et dans les matières organiques des sols.

1.3.2. Mesures des émissions: trop d'incertitudes

Les chiffres présentés dans la première partie sont à prendre avec beaucoup de précautions : en effet, les incertitudes concernant les mesures des émissions des GES du milieu rural sont encore importantes. De nouvelles méthodes de mesure sont actuellement en cours d'étude.

NO ₂	Incertitudes très élevées de l'ordre de 70 à 80%
CH ₄	Incertitudes de 20% pour la fermentation entérique des ruminants Plus ou moins 40% pour le fumier

Selon Christophe EWALD (« Les enjeux de la lutte contre l'effet de serre en milieu rural), il serait nécessaire d'analyser les causes de ces erreurs, et d'examiner les éléments les plus faciles à corriger.

2. PRATIQUES AGRICOLES ET REDUCTION DE L'EFFET DE SERRE.

2.1. Introduction

Pour concevoir les mécanismes d'implication de l'agriculture dans l'effet de serre, il est nécessaire de distinguer deux types de « sources » de gaz à effet de serre : celles provenant de **pratiques agronomiques** et celles issues des **activités d'élevage**.

La mise en œuvre de pratiques agronomiques a une incidence directe sur la **variation du stock de carbone** des sols. Les activités d'élevage sont elles avant tout responsables d'**émissions directes** de GES (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote). Cette double distinction entre les activités agricoles et leurs modes de contribution à l'effet de serre permet de délimiter le champ de la présente étude.

Dans un premier temps nous allons déterminer quelles sont les **pratiques agronomiques susceptibles d'accroître durablement les quantités de carbone stockées** dans le sol. Nous verrons ensuite, à l'aide d'un exemple (traitement des lisiers), qu'il est possible de **réduire les émissions de GES issues des activités d'élevage**. Nous finirons par évoquer le cas du reboisement agricole, qui se situe à l'interface agriculture - foresterie, et son impact sur le stockage du carbone atmosphérique. Ce dernier paragraphe permet d'établir la liaison avec la partie 3 de l'étude consacrée aux énergies nouvelles.

2.2. Le stockage du carbone dans les sols

2.2.1. La variation des quantités de carbone stockées dans les sols.

Les sols, dont la matière organique dérive des biomasses, constituent des « puits » et des « sources » de gaz carbonique. Le stockage net de carbone dans les sols est la résultante de deux processus antagonistes : l'incorporation dans le sol de carbone atmosphérique fixé par la végétation, et la minéralisation du carbone organique du sol par les micro-organismes. Toute variation des facteurs qui influencent l'un ou l'autre de ces mécanismes conduit à un stockage ou à un déstockage du carbone.

On peut distinguer deux types de causes de stockage de carbone dans les sols :

- **L'action directe de l'homme sur la végétation et le sol via son utilisation des terres** : par l'agriculture, la sylviculture et la gestion du territoire. Il contrôle (partiellement) la nature de la végétation, sa productivité carbonée, les restitutions au sol et les vitesses de destruction des matières organiques des sols.
- **Les variations spontanées du milieu ou les variations indirectes dues aux conséquences de l'anthropisation de la planète**. La teneur en CO₂, les dépôts azotés, les pluies acides, l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère affectent le cycle du carbone.

Flux entrant – flux sortant : une résultante : les quantités de carbone stockées.

Le stockage est d'abord déterminé par la production primaire (biomasse agricole) non exportée et les résidus ultimes des filières agricoles, effluents d'élevage et surtout les **racines** qui **apparaissent comme la source principale de carbone des sols**. Outre ces flux nets, le système Sol-Plante-Climat participe à la constitution des stocks carbonés des sols. Certains mécanismes sont d'ores et déjà bien connus par leurs effets sur le taux de fixation du carbone (effet de la température, de l'humidité). Par contre l'effet des caractéristiques pédologiques est plus complexe (caractéristiques physico-chimiques, quantité et nature minéralogique des argiles). La nature des composés présents est déterminante pour comprendre les processus de conservation de la matière organique dans les sols (BALESDENT Jérôme).

2.2.2. La dynamique des matières organiques des sols.

Ces matières organiques (MO) sont constituées essentiellement de composés végétaux (plus ou moins décomposés), de composés microbiens et des composés dits humiques, qui ont une structure macromoléculaire aléatoire. Les recherches de ces dernières années ont montré que la localisation des matières organiques dans la structure du sol et leurs interactions avec les minéraux du sol expliquent en grande partie les temps de résidence de ces composés organiques dans les sols, déterminant par là même la durée de fixation du carbone sur ces molécules complexes.

a- Protection physique de la matière organique.

La durée du stockage du carbone va dépendre en premier lieu de la capacité des matières organiques à résister à la biodégradation par les micro-organismes du sol. Les progrès de la recherche de ces dernières années ont permis de mettre en évidence une « **autoprotection** » des **matières organiques ralentissant leur minéralisation** due aux constituants du sol (CHENU Claire et *al.*). Le principe de la protection réside dans l'association de la MO aux minéraux du sol formant des agrégats plus ou moins stables. Il a été démontré (PUGET et *al.*) que **les agrégats les plus stables sont enrichis en carbone** « **jeune** » et que **les MO jeunes auraient donc un rôle privilégié dans la stabilité de la structure**.

Il apparaît donc que la stabilité structurale de la MO, et par conséquent la fixation du carbone dans le sol, va dépendre de la stabilité de ces agrégats stimulée par des apports de MO jeunes et favorisée par **l'absence de perturbation dans les horizons cultureux**.

b- Des vitesses de biodégradation variables de la MO.

La résultante de l'existence d'agrégats plus ou moins stables suivant la présence de MO jeunes permet de comprendre que les vitesses de biodégradation vont varier en fonction du degré d'humification de la MO et d'association à la phase minérale du sol. Une méthode de mesure du turnover du carbone dans les sols reposant sur le traçage naturel par l'isotope ^{13}C , a permis d'évaluer ces vitesses et d'établir une compartimentation du carbone du sol (BALESDENT Jérôme).

Dans le cas de l'horizon travaillé des sols limoneux sous cultures céréalières, on a obtenu une répartition du carbone en quatre compartiments homogènes :

- l'un est biodégradé dans l'année, sa quantité dans le sol est minime, mais il représente 75% de l'apport annuel.

Le reste est réparti en trois compartiments d'âges moyens :

- 4 ans (en moyenne 15 % du carbone du sol),
- 40 ans (en moyenne 65 % du carbone du sol),
- plus de 1 000 ans (en moyenne 20 % du carbone du sol).

Ces valeurs de pourcentage sont affectées par le type de sol et le climat.

L'interprétation de ces résultats montre d'une part que les processus de biodégradation proviennent surtout des apports en MO jeunes et que d'autre part la minéralisation des matières organiques plus évoluées (les plus anciennes) est lente. Les mécanismes « d'autoprotection » de la MO au sein des agrégats permettent l'évolution de leur composition chimique sous une forme insoluble et assurent leur stabilisation à long terme dans les sols.

c- Prévoir le comportement de la matière organique du sol.

Le paragraphe précédent a permis d'établir l'existence d'une compartimentation de la MO endogène du sol et la variabilité des vitesses de sa dégradation en fonction de sa composition chimique et de son âge. Il apparaît nécessaire de caractériser le comportement prévisible des MO exogènes pour à la fois les comparer entre elles et pour mieux connaître leurs impacts sur une séquestration durable du carbone. En généralisant cette caractérisation à l'ensemble des MO endogènes (provenant des processus de dégradation et d'humification de la biomasse produite par les sols) et exogènes (provenant des amendements), on parvient à identifier des compartiments plus ou moins aptes à la séquestration du carbone (rôle de "puits" des MO) et ayant une influence plus ou moins grande sur les propriétés du sol (rôle agronomique des MO).

L'évolution des matières organiques dans le sol étant principalement sous la dépendance de leurs constituants biochimiques, les méthodes permettant de caractériser la MO se basent sur leur séparation biochimique. Elles permettent d'**identifier les différentes fractions de la MO et d'en déduire la résistance à la biodégradation** (CHAUSSOD Rémi). Ces résultats ont un impact direct sur la connaissance des durées de stockage du carbone qui forme l'armature des macromolécules organiques du sol.

d- L'état de la recherche.

Il existe en France deux approches assez voisines permettant cette caractérisation de la MO : l'Indice de Stabilité Biochimique (I.S.B.) méthode développée par Monique LINERES et J.L DJAKOVITCH (1993) et la Caractérisation Biochimique de la Matière organique (C.B.M.) de D. ROBIN (1997).

Les résultats obtenus par ces méthodes, s'ils permettent une meilleure approche des phénomènes de biodégradation, ne prennent pas en compte les effets d'interaction des différents constituants biochimiques de la MO et présupposent un effet d'additivité des comportements de chacun des constituants élémentaires, ce qui n'est pas démontré. Ces

méthodes ne répondent donc pas complètement aux questions se posant sur les phénomènes de biodégradation des substrats et leur accessibilité aux micro-organismes.

La recherche se poursuit avec comme axe principal la détermination des facteurs influençant la biodégradation qui permettra de mieux comprendre l'évolution des matières organiques.

e- Des résultats surprenants.

La mise en œuvre des méthodes biochimiques a permis de constater l'**absence de corrélation généralement observée entre le rapport C/N des produits organiques dans leur ensemble et leur stabilité** (CHAUSSOD Rémi). Ce résultat montre que l'utilisation du rapport C/N comme critère de caractérisation d'une matière organique (compost, boues de station, terreau...) n'est pas le plus pertinent bien que la réglementation actuelle y fasse référence.

Ces méthodes ont également permis d'affirmer que **les produits les plus efficaces sur la structure d'un sol ne sont pas parmi les plus stables**. En d'autres termes, si l'on apporte des amendements organiques **pour améliorer la structure du sol et sa fertilité, on n'a aucun intérêt à choisir les produits les plus stables comme des composts mûrs**. Du fait de leur stabilité, ces matières organiques ne peuvent pas stimuler l'activité biologique et la synthèse des produits transitoires actifs sur la structure des sols.

Les principales propriétés agronomiques des MO sont liées à leur flux dans le sol et non aux stocks (MONNIER, 1965).

f- Matières organiques, substances xénobiotiques et maladies des cultures.

Une étude sur la dynamique des matières organiques serait incomplète s'il n'était pas fait mention de certaines de ses propriétés intrinsèques récemment démontrées. Selon Claire SERRA-WITTLING, outre l'intérêt qu'entraîne sur les propriétés physico-chimiques du sol l'incorporation de composts, il apparaît que leur épandage favorise la **rétenion des pesticides par la MO** et accroît la **résistance à certains pathogènes des cultures**.

g- Favoriser la séquestration du carbone et améliorer la fertilité du sol.

L'importance de la matière organique dans la fertilité des sols est unanimement reconnue et son rôle dans la séquestration du carbone prend toute son importance dans l'optique d'une mise sur le marché de droits d'émission de GES. La question posée aujourd'hui est de savoir si une augmentation du stock de carbone dans le sol, via la MO, est conciliable avec un maintien (ou une amélioration) de la valeur agronomique de ces mêmes sols.

La compartimentation de la MO permet de répondre à cette question et de comprendre que ces deux objectifs (stockage du carbone et amélioration de la fertilité du sol) sont dépendants :

- **de l'évolution de deux fractions différentes de la MO :**

- la matière organique jeune est favorable à l'amélioration (ou à conservation) des propriétés agronomiques du sol et donc à sa fertilité; **le principe d'action sera le flux de MO,**

- la matière organique plus évoluée (acides humiques et fulviques difficilement biodégradables) est plutôt favorable à la séquestration durable du carbone ; **le principe d'action sera le stock de MO.**

- **du flux des apports exogènes en MO.**

La séquestration du carbone et l'amélioration de la qualité agronomique des sols seront favorisées par les **amendements de matières organiques** (engrais organiques, effluents d'élevage (compostés ou non), les boues de station, les composts urbains...) et par la **production de biomasse** (biomasse racinaire, résidus de récolte).

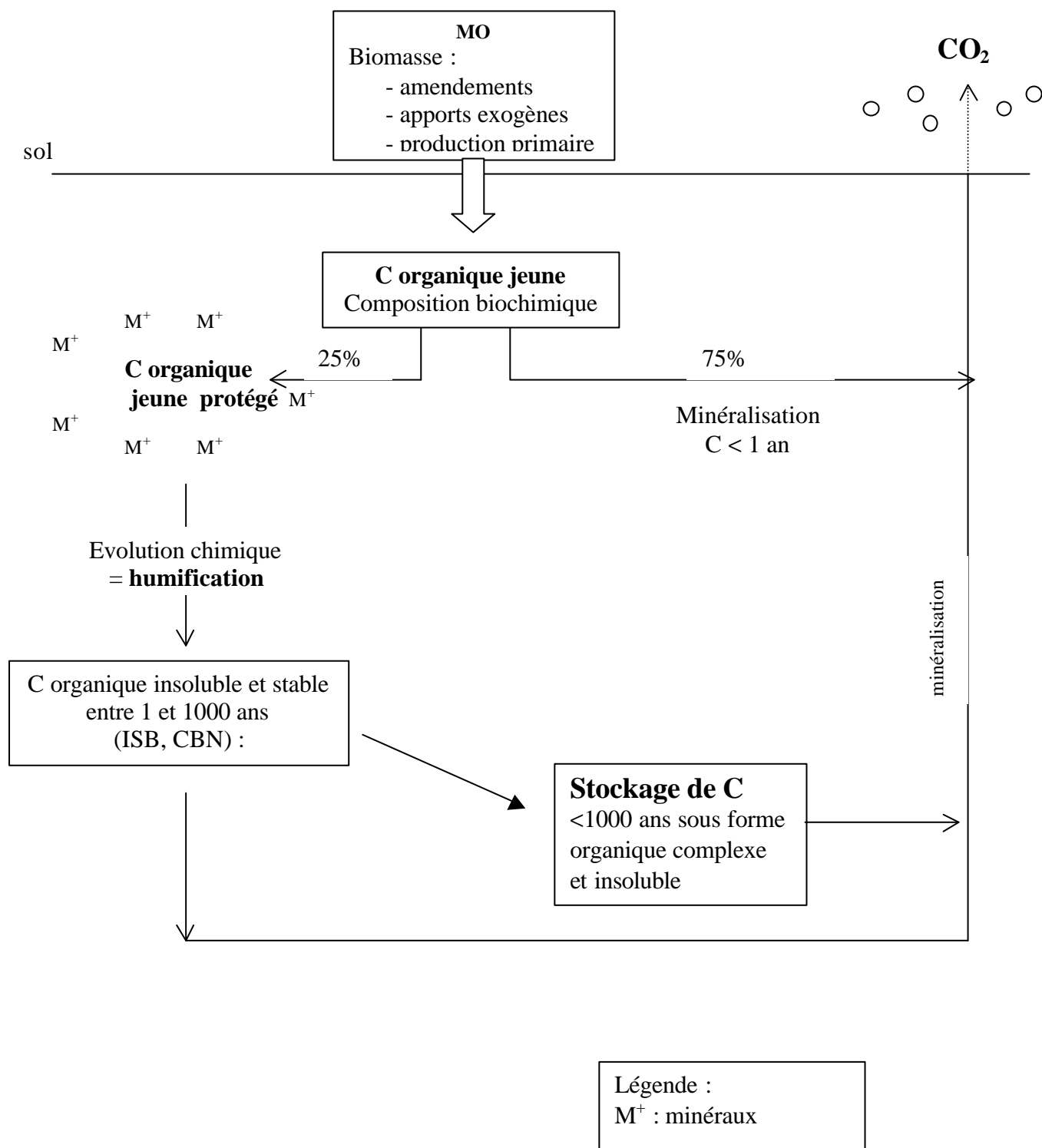
Il faut cependant faire remarquer que les objectifs recherchés (fertilité, séquestration) ne sont pas toujours conciliables (exemple : les amendements de MO stables (certains composts) n'ont pas d'impact sur la structure des sols mais ont un effet positif sur le stockage du carbone), et que la production intensive de biomasse peut avoir des effets pervers sur l'environnement (il en sera donné un aperçu dans la partie consacrée aux pratiques agronomiques).

Conclusion :

On déduit de ce qui précède qu'il est nécessaire de concilier stockage du carbone et amélioration de la fertilité des sols, par exemple avec un apport de MO partiellement compostée : la MO jeune représente donc un flux, et le pourcentage de MO humique représente un stock. Le choix des pratiques agronomiques s'effectuera en considérant ces deux critères et en gardant à l'esprit que l'adoption d'une pratique plutôt qu'une autre s'établira en fonction de **l'intérêt économique de l'agriculteur.**

h- Synthèse sur le comportement du carbone dans le sol (figure 10)

Figure 10 : Synthèse sur le comportement du carbone dans le sol



2.2.3. Des pratiques agronomiques favorisant la séquestration du carbone dans les sols.

« Une modification des pratiques agronomiques influençant le fonctionnement du sol peut s'inscrire dans une stratégie globale de maîtrise du climat » (GERMON J.C).

Qu'entend-on par pratiques agronomiques ?

On peut définir une pratique agronomique comme étant une méthode ou un procédé d'exécution permettant d'atteindre un objectif prédéfini. Les résultats recherchés en agriculture sont avant tout d'ordre économique et la mise en œuvre des pratiques doit concourir à optimiser les systèmes de culture ou d'élevage.

La demande nouvelle d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement concourt à faire évoluer des pratiques basées sur l'utilisation intensive des sols vers des processus cultureux intégrant la notion de durabilité et de préservation du sol, qui est une ressource non renouvelable (VILAIN Lionel).

Les pratiques agronomiques qui ont un impact sur la réduction de la concentration en CO₂ de l'atmosphère seront celles favorisant :

- **le piégeage** du carbone par les végétaux (production de biomasse)
- **la séquestration à long terme** du carbone provenant de cette production primaire
- **l'importation** de carbone par l'intermédiaire des amendements organiques.

a- Identification et évaluation des pratiques agricoles au niveau agronomiques et du stockage du carbone

- *Biomasse : produire plus pour stocker plus de carbone ?*

"L'agriculture intensive, avec une forte productivité primaire (consécutive notamment au développement de la fertilisation et aux améliorations végétales), **restitue en général plus de carbone au sol que des systèmes forestiers ou prairiaux"** (BALESDENT Jérôme).

Partant de cette constatation, il apparaît que toute pratique favorisant l'accroissement des rendements en matière sèche des cultures, participent à la réduction de la teneur en CO₂ atmosphérique.

Outre le changement d'affectation des terres (passage du système forestier au système prairial, passage du système prairial au système cultural) qui, en augmentant les surfaces emblavées à forte production primaire, favorise la production de biomasse, on distingue les pratiques agronomiques suivantes :

- la fertilisation, permettant l'adéquation entre potentiel des parcelles et rendements élevés
- le choix de variétés et de semences à haut potentiel de production

- le drainage des parcelles (aération des sols et introduction dans l'assolement de sols hydromorphes)
- l'irrigation (satisfaction des besoins en eau des cultures, amélioration de la germination et de la levée des semences)
- l'utilisation de substances xénobiotiques (pesticides, insecticides, fongicides, désherbant)
- la mécanisation et la suppression des haies.

Une étude réalisée au Canada de 1980 à 1996, concernant les émissions de CO₂ par l'agriculture, confirme qu'une gestion différente des sols basée sur l'intensification de la production a permis une réduction de ce gaz à effet de serre (OCDE).

La réduction des pertes nettes de dioxyde de carbone des sols agricoles s'explique principalement par la réduction de la superficie des jachères d'été, le développement de travail du sol anti-érosion et **l'application de plus grandes quantités d'engrais chimiques.**

L'évolution des quantités de carbone dans les sols canadiens, montre que les émissions totales de CO₂ des sols agricoles sont tombées de 9,3 millions de tonnes en 1980 à 1,8 millions de tonnes en 1996.

Le stockage primaire du carbone par la biomasse et par les sols par intensification des productions n'est donc pas un appoint négligeable dans une démarche globale de réduction de la teneur du CO₂ atmosphérique.

- *Les effets pervers d'une augmentation de la biomasse obtenue par l'intensification des systèmes cultureux.*

La biomasse obtenue par les activités de culture va être rapidement transformée et utilisée à des fins alimentaires et industrielles. **Le cycle de vie du carbone sous cette forme organique sera très court. Seuls les surplus de biomasse racinaire et les résidus de culture** engendrés par ce mode de production vont évoluer vers des formes plus stables favorables au stockage du carbone. En fin de compte la biomasse totale produite n'aura **pas d'impact durable** sur la quantité de CO₂ atmosphérique, par contre les modes de production utilisées en auront un sur l'environnement. **Les pollutions engendrées par l'intensification des systèmes de production vont concerner la qualité des eaux** (augmentation des taux de nitrates, de phosphore, de pesticides...), **les conditions de son stockage et de son écoulement** (niveau des nappes, assèchement des rivières en été, crues et inondations en hiver...), **le paysage** (destruction du bocage, accroissement de l'open field) et **la qualité des productions** (utilisation de semences obtenues par le génie génétique), malgré tous les efforts d'une agriculture raisonnée.

De plus, **ces pratiques ont souvent un impact négatif sur les stocks initiaux de matière organique des sols** avant mise en culture. Le gain de carbone obtenu par intensification est insuffisant à corriger une baisse du taux de matière organique dans les sols. L'irrigation, en assurant l'ajustement entre les besoins en eau des plantes et l'offre par l'intermédiaire de la réserve utile du sol, **stimule l'activité des micro-organismes** du sol en période estivale. Cette activité se traduit par la persistance de la **minéralisation** des matières organiques durant cette période avec pour conséquence un déstockage accru du carbone.

Pour concilier rendement de la culture et accroissement (ou maintien) du stockage du carbone dans les sols, **des pratiques limitant la minéralisation du stock de MO existant**

seront seules envisageables. Les seules restitutions par la biomasse racinaire sont insuffisantes à elles seules à maintenir le taux de MO. Le retour au sol des résidus de récolte est primordial pour stabiliser ce taux.

- *Comment optimiser la séquestration du carbone dans les sols cultivés ?*

La mise en culture des sols forestiers et/ou des prairies conduit à une diminution importante des stocks de matière organique des sols (ARROUAYS et *al.*). **Le changement d'affectation des terres** (reboisement ou réimplantation de prairies en remplacement des cultures) **est une des solutions permettant d'assurer durablement la séquestration du carbone.** Ceci n'étant possible que sur une partie des surfaces. Certaines pratiques agricoles peuvent être envisagées pour limiter ou annuler cette évolution du stock de carbone. Ce processus s'explique par la dé-protection physique à la biodégradation des matières organiques (voir plus haut) qu'engendre l'action de l'eau, du climat et des outils agricoles sur les agrégats (association de MO et de minéraux). **Toute pratique agricole favorisant le maintien de ces structures conduit à maintenir les taux de matières organiques dans les sols.**

Le travail du sol et la couverture des sols sont les principales pratiques agronomiques qui ont un impact direct sur la séquestration du carbone. Le travail simplifié du sol en substitution au labour sera évoqué au paragraphe 2.2.4. On note néanmoins ici que de nombreux outils de travail du sol ont un impact négatif sur le stockage du carbone. Ces instruments, en particulier les **herse rotatives**, ont un effet direct de rupture des agrégats et donc sur la dé-protection des MO. Mais c'est surtout le fait que le sol nu, en particulier le lit de semence, soit exposé aux pluies, aux dessèchements, et aux ré-humectations brutales, qui peut aboutir à une dispersion complète de la partie superficielle du sol, et à une destruction des microagrégats. Ceci expose la MO de ces agrégats à la minéralisation, induisant un déstockage du carbone.

La réduction du travail du sol et la couverture permanente du sol (implantation d'intercultures pouvant également servir de pièges à nitrates en hiver) apparaissent comme des **moyens efficaces pour préserver les stocks de MO des sols et ainsi pérenniser la séquestration du carbone.** On peut ajouter que la mise en culture des terrains nus en hiver (souvent après maïs grain) constitue une **méthode de lutte efficace contre l'érosion des sols et la désertification.**

- *Les apports exogènes de matière organique.*

« La mise en culture de parcelles forestières ou prairiales s'accompagne toujours d'une baisse du taux de MO du sol consécutive à la dé-protection des agrégats » (MONNIER G.). Pour maintenir et/ou augmenter le taux de MO dans les sols cultivés, l'apport de constituants organiques plus ou moins décomposés s'avère incontournable.

Préconisés en premier lieu pour améliorer les propriétés physiques et biochimiques du sol, l'importation de MO exogènes a un impact direct sur le taux de séquestration du carbone dans les sols.

Lorsque l'on parle d'apport exogène de MO, on distingue :

- les apports provenant de l'exploitation agricole (recyclage de la MO par le système agricole), que constituent les **effluents d'élevage** (lisier, fumier, compost) et les **résidus des récoltes** (parties aériennes des cultures : pailles, cannes...),

- les apports provenant de l'extérieur du système (importation brute de MO), que constituent les **achats de paille** et de fourrages riches en matière sèche, les **composts urbains**, les **boues de station d'épuration** et de potabilisation de l'eau, les **engrais organiques** (sous-produits animaux issus des abattoirs et des équarrissages).

Une partie des matières organiques produites sur les exploitations est souvent considérée comme un déchet.

Les effluents d'élevage sont souvent considérés comme des déchets à éliminer au moindre coût. L'absence de plan de fumure, comptabilisant les apports de MO, constitue un frein quant au bilan entrée-sortie annuel.

La répartition homogène des épandages, des déjections animales, sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation (plan d'épandage réduisant les compensations à l'échelle de la sole exploitée), contribue à la reconstitution des stocks du carbone libéré lors de la minéralisation en phase culturale.

Ces apports de MO brutes vont évoluer, après décomposition par les micro-organismes du sol, en MO stables sous forme d'agrégat. Le "rendement" de l'humification dépend étroitement de la richesse en azote et en lignine des apports.

La composition initiale en carbone des effluents d'élevage va induire des processus de biodégradation différents. Ainsi le lisier (riche en eau et en minéraux solubles) se comporte comme un engrais minéral qui n'a pratiquement pas d'impact sur le taux de carbone du sol. Par contre les fumiers et composts agricoles pailleux vont contribuer à alimenter le stock de carbone. Le choix de la production de l'une ou l'autre de ces déjections par l'éleveur (choix stratégique possible lors de la mise aux normes des bâtiments d'élevage), va influencer directement le taux de séquestration du carbone sur ses parcelles.

La restitution des résidus de récolte, après broyage, est une pratique essentielle permettant le maintien du niveau de stockage du carbone. La pratique du brûlage des pailles "pour assainir la terre" est un non sens agronomique. Elle a un impact négatif sur le recyclage de la MO et sur la stabilité structurale de l'horizon superficiel par dé-protection des agrégats.

Des importations de MO à faible coût mais difficilement acceptées.

Les boues de station d'épuration et de potabilisation de l'eau, et les composts, provenant de la partie fermentescible des ordures ménagères, sont riches en MO mais peuvent contenir des métaux lourds, des pathogènes et des refus de la dégradation. La composition de ces produits ne répond pas toujours aux objectifs de qualité des cahiers des charges mis en place. La prise de conscience des consommateurs des risques sanitaires encourus et la systématisation du principe de précaution entraînent une suspicion croissante

envers ces produits. L'acceptabilité de leur incorporation dans le sol par les agriculteurs et par la société est fragile et soulève le problème de la gestion future de ce flux de MO, riche en carbone.

Le non retour dans le système agricole implique, soit une mise en décharge de ces produits (supprimée d'ici 2002), soit l'incinération, d'où relargage du carbone dans l'atmosphère et coût énergétique accru. L'amélioration de la qualité de ces produits et la transparence, des processus de leur production et de leur contrôle, sont les seuls moyens qui permettront dans l'avenir d'incorporer durablement dans les sols le carbone qu'ils contiennent.

L'importation nette de MO extérieure à l'exploitation agricole et/ou son recyclage interne dans le système agro-pastorale, participe au maintien et/ou à l'amélioration de la fertilité et de la séquestration du carbone du sol.

Les produits les moins évolués (fumier, compost jeune, boue) vont favoriser la formation d'agrégats stables améliorant la structure des sols et stimuler l'activité biologique dans les horizons travaillés. Par leur flux régulier, ils contribuent à la fertilité des sols.

Les produits les plus stables (compost évolué) vont accroître la quantité de carbone séquestrée dans le sol. Leur rôle est plus incertain dans la fertilité des sols.

b- Synthèse sur les pratiques agronomiques favorables à une réduction de l'effet de serre.

On retiendra que globalement, sur le long terme, **le système prairie permanente stocke durablement plus de carbone dans les sols**, malgré une production de matière organique inférieure au système culture. La reconversion des terres arables en prairies permanentes dans la conduite des exploitations d'élevage favorise donc la séquestration du carbone dans les sols.

Les pratiques agronomiques liées à l'intensification et à l'augmentation des rendements en matière sèche sont à proscrire. En effet, d'une part l'augmentation de la biomasse du sol ne comble pas les pertes de MO provoquées par l'accroissement de la minéralisation et d'autre part, ce système de production a des impacts négatifs sur l'environnement.

Les pratiques agronomiques ayant un impact positif sur la séquestration du carbone seront celles qui préserveront la structure des sols (couverture permanente des sols, travail du sol protégeant physiquement l'horizon cultural) **et celles qui augmentent le taux de matière organique dans les sols** (apports de MO exogènes, restitution au sol des résidus de récolte).

2.2.4. Un exemple de pratique culturale favorable à la fixation durable du carbone dans les sols : le travail simplifié du sol.

a- Aspects techniques des méthodes de travail du sol.

- *Un rappel des fonctions du travail du sol :*

Les opérations de travail du sol doivent permettre l'implantation, la croissance et le développement des cultures jusqu'à leur maturité, elles assurent :

- la création d'un état structural favorisant les échanges de gaz et de chaleur, maîtrisant les flux d'eau
- l'incorporation au sol des fertilisants et amendements (y compris les résidus de la récolte précédente)
- le contrôle des adventices.

- *Les principales pratiques de préparation du sol :*

- Préparation superficielle sur ameublissement profond.

Le travail profond est réalisé avec une charrue (labour) ou avec un chisel². Le nivellement et la préparation du lit de semence sont effectués à l'aide d'outils animés ou non

- Le travail superficiel.

Il n'y a aucun travail en profondeur (préservation de l'horizon colonisé par les racines), les interventions mécaniques ne touchent que l'horizon superficiel. Le nombre de passage dépend du choix des outils de travail du sol et du mode de semis.

- Le semis direct.

L'action mécanique se réduit à l'emplacement du dépôt des semences. Cette pratique est fortement conditionnée par les caractéristiques pédologiques du terrain, les exigences de la culture, le précédent cultural.

- Le travail superficiel avec décompactage.

La nature des sols (tassement, prise en masse par excès d'eau) peut obliger à décompacter le sol en profondeur. On cherche à fissurer le sol sans avoir recours au retournement par labour.

- *Quelles simplifications possibles du travail du sol ? :*

Le choix d'une technique de travail du sol dépend des caractéristiques permanentes des sols d'une exploitation (type de sol, vitesse de ressuyage) ou non permanentes (état fonction du précédent) mais aussi du matériel disponible. Selon le parcellaire de l'exploitation il sera possible ou pas de supprimer le labour. On peut ainsi définir deux niveaux de simplification du travail du sol : l'un partiel et l'autre total.

² outil à dents, de profondeur de travail : 50 cm

- Simplification partielle.

Elle consiste à **limiter le nombre de passages d'outils** et surtout à **supprimer le labour quand il n'est pas indispensable** pour le remplacer par un travail plus superficiel complété, si nécessaire, par une fissuration profonde.

- Simplification totale.

Elle correspond à la **suppression totale du labour** pour l'ensemble des cultures de la rotation et à son remplacement par un travail superficiel du sol ou un semis direct.

Les performances des techniques simplifiées comparées au labour.

Les techniques de simplification du travail nécessitent l'utilisation de matériels souvent spécifiques, onéreux et exigeants en puissance tracteur. Plus ou moins faciles à mettre en œuvre, elles permettent, par rapport au système avec labour, de gagner du temps et d'économiser du carburant (voir tableau 3).

Tableau 3 : Performances des principales techniques de travail simplifié associées au semis.

	Temps/ha	Gas-oil/ha	Puissance mini	Main d'œuvre
Semis et labour	3 h	42 l	100 ch	2 UTH
Semis et travail superficiel	45 mn	18 l	130 ch	1 UTH
Semis direct :				
monograines	45 mn	12 l	100 ch	1 UTH
petites graines	20 mn	6 l	80 ch	1 UTH
Semis sur travail superficiel plus décompactage				
un passage	1 h	24 l	130 ch	1 UTH
deux passages	2 h	30 l	130 ch	1 UTH

(Source : MONNIER *et al.*)

- *Les points faibles des pratiques simplifiées de travail du sol : les freins au développement de la méthode.*

Bien que les rendements obtenus par simplification du travail du sol (en conditions expérimentales) soient équivalents à ceux atteints avec les pratiques traditionnelles incluant le labour, on dénote plusieurs impacts négatifs quant aux conséquences de sa mise en œuvre.

Comparativement au labour classique deux aspects caractérisent la simplification du travail du sol : l'absence de retournement et l'absence de fragmentation des horizons superficiels.

Impacts du non retournement :

- irrégularité du terrain (fonction aplanissement du labour)
- difficulté de la maîtrise des adventices (augmentation des traitements herbicides et phytosanitaires)
- déchaumage nécessitant des passages répétés
- accumulation des résidus de récolte en surface (évolution différente des MO en surface et après enfouissement)
- accumulation en surface des éléments minéraux (P, K) et des pesticides susceptibles de se fixer aux MO situées plus profondément dans le sol (risques accrus de pollution des eaux de surface par ruissellement à partir des sols cultivés).
- Diminution de la précision des semis due à l'irrégularité du terrain (semis de précision betteraves)
- Nécessité de travailler dans des conditions d'humidité optimales : réduction des créneaux de travail possible.

Impacts de l'absence de fragmentation :

- Evolution de l'horizon anciennement travaillé vers une structure plus ou moins continue
- Diminution de la porosité de la couche anciennement travaillée
- Limitation des transferts gazeux
- Réchauffement retardé du sol
- Infiltration plus lente des eaux de pluie dans le sol

On note que la mise en place d'un état structural relativement compact après mise en œuvre de pratiques simplifiées de travail du sol n'induit pas forcément une réduction de sa fertilité.

b- Influence de la simplification du travail du sol sur l'évolution des stocks de carbone.

Il est scientifiquement établi (GUERIF.J, MARY.B, INRA de Laon) que les pratiques de travail simplifié du sol augmentent la quantité de carbone dans le sol. **La quantité moyenne de carbone susceptible d'être stockée de 0,15 t C/ha/an** peut être prise comme base de calcul. Ce gain se fait essentiellement par une **baisse de la minéralisation de la matière organique liée à une plus faible aération du sol.**

L'estimation moyenne du stock de carbone dans les sols français étant de 50 à 70 t C/ha (Source : INRA), l'augmentation du taux de carbone dans les sols, par la mise en œuvre de pratiques et de travail simplifié, serait de 0,2 à 0,3 % par an.

- *Comparaison de l'évolution du stock organique et des sources de ce stock en fonction des pratiques de travail du sol :*

Les techniques simplifiées de travail du sol entraînent un enrichissement en MO des horizons de surface par ralentissement de la minéralisation (tableau 4).

Tableau 4 : Evolution du stock de carbone et des sources de ce stock entre 1970 et 1987, en fonction des techniques de travail du sol sur les parcelles de l'essai longue durée de Boigneville mises en monoculture de maïs, dans l'horizon de surface correspondant à 400 kg de terre/m².

	1970	1987		
		Méthode de travail du sol		
	Sol au départ	Labour	Semis direct	Travail superficiel
Profondeur (cm)	0-27	0-3	0-26	0-28
Carbone total (kg/m ²)	3,6	3,7	3,95	4
dont:				
Carbone initial	3,6	2,65	3,15	2,8
Carbone des résidus	0	1,1	0,8	1,2

(BALESDENT *et al.*,1990). (Source : MONNIER *et al.*).

Le ralentissement de la minéralisation du stock de MO a été mis en évidence lors de la mise en culture de sols riches de la prairie américaine (MONNIER *et al.*). On a pu observer, après 16 ans de mise en culture, que **le temps de demi-vie du carbone de la MO, initialement de 142 jours, est réduit à 76 jours en semis direct et à 57 jours en sol labouré.**

Conclusion sur les pratiques de travail simplifié.

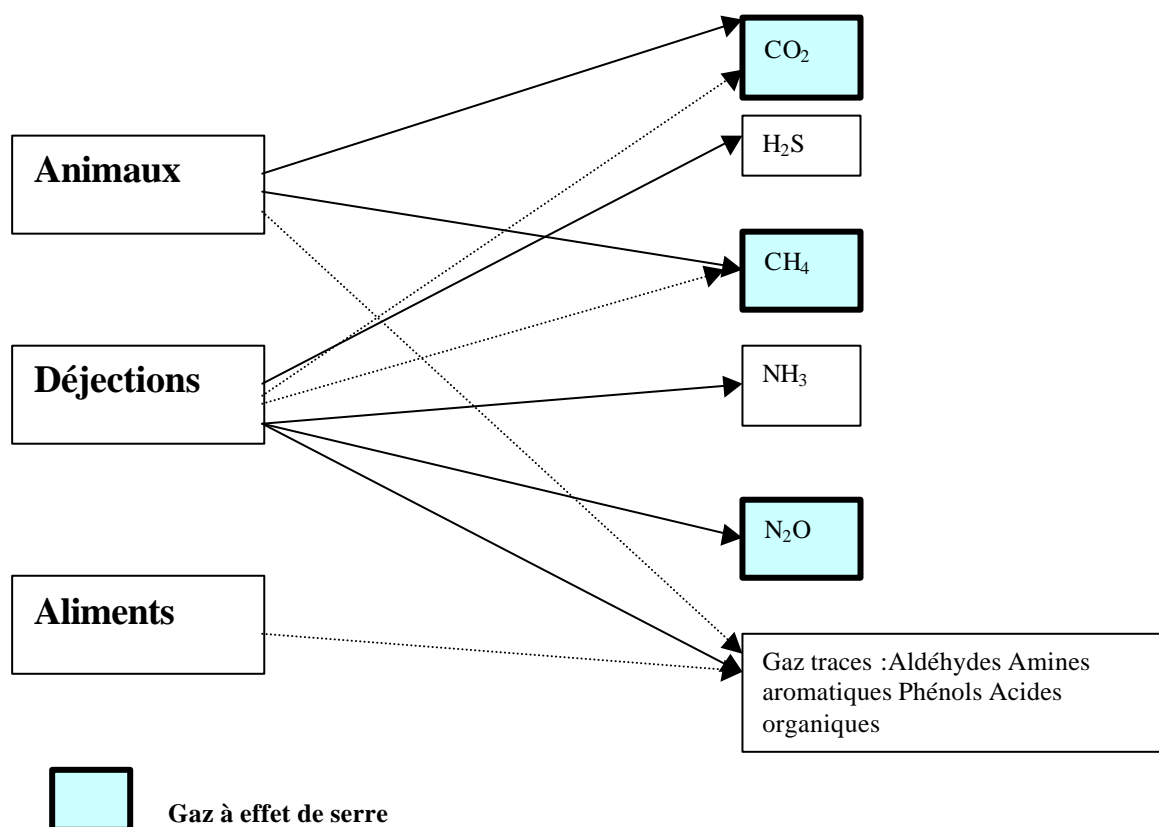
Les pratiques de travail simplifié en respectant la structure des horizons superficiels permettent une augmentation du piégeage du carbone dans le sol. Ces pratiques, alliées à **l'implantation d'intercultures**, semblent les plus aptes à accroître la participation de l'agriculture à la lutte contre les G.E.S. et en particulier le gaz carbonique. Leur mise en œuvre nécessite cependant plus de technicité que la méthode traditionnelle du labour, des matériels spécifiques et des puissances de tracteur importantes. La durée des temps de travail par hectare est moindre avec les pratiques simplifiées que pour les labours. La consommation en énergie non renouvelable (fuel) est donc inférieure avec les pratiques de travail simplifié du sol, malgré une demande en puissance plus forte en traction. La nature des sols peut constituer un frein au recours de ces pratiques, et leur développement est soumis à l'acceptabilité sociologique de l'agriculteur, qui devra remettre en cause ses façons de travailler.

2.3. Pratiques favorisant la réduction d'émissions de certains gaz à effet de serre : l'exemple du traitement des lisiers

2.3.1. Emissions carbonées et azotées d'origine agricole

Dans une agriculture avec élevage, la majorité des gaz émis provient des déjections animales. La figure 11 présente les principaux gaz et leur origine. Le dioxyde de carbone (CO_2) provient principalement de l'air expiré par les animaux mais également de la décomposition des déjections stockées sous les animaux ou à l'extérieur. Le méthane (CH_4) est également produit au cours de la fermentation anaérobie de la matière organique et notamment des composés cellulosiques. Toutefois, la majeure partie des émissions de méthane d'origine agricole provient des ruminants.

Figure 11 : Emission de gaz polluants dans les systèmes d'élevage



Source : Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France

a-Le méthane

La part des émissions de CH₄ liée aux déjections animales varie selon les estimations entre 20 et 35 millions de tonnes, ce qui représente donc 5 et 10% des émissions totales. Le méthane est considéré comme l'un des principaux gaz à effet de serre, contribuant à lui seul pour plus de 20% au réchauffement de l'atmosphère. Les émissions de méthane liées aux activités d'élevage ont deux origines. On distingue d'une part, le méthane d'origine entérique (produit par la digestion de la cellulose par les ruminants) et, d'autre part, le méthane produit par la fermentation anaérobie des déjections animales.

Des auteurs cités par le CEMAGREF (Jarvis et Pain 1994) ont tenté d'établir les différentes sources de méthane à l'échelle d'une exploitation d'élevage (tableau 3).

Tableau 5 : Emissions de méthane issues d'un modèle de production animale : exploitation laitière du Sud-Ouest de l'Angleterre

	Pertes totales de carbone sous forme de méthane en kg	Pertes totales (%)
Pertes ruminants	6775	56
Pertes stockage	2285	19
Pertes ensilage	2596	22
Pertes eaux blanches	332	3
TOTAL	11988	100

source : CEMAGREF de Rennes, d'après JARVIS et PAIN , 1994

Exploitation de 165 UGB, production de 210 l de méthane par jour, soit 41,1 kg de carbone sous forme de méthane par an par UGB ; stockage de 120 jours
1,35 kg de carbone sous forme de méthane produits par mètre cube de lisier

b- Le protoxyde d'azote

Parmi les gaz indésirables liés à la gestion des effluents d'élevage, on distingue également le protoxyde d'azote (N₂O) qui est à la fois un gaz à effet de serre et un gaz impliqué dans la dégradation de l'ozone stratosphérique. Les émissions de protoxyde d'azote sont issues des processus de nitrification puis de dénitrification, transformations qui se déroulent naturellement dans les sols ou qui sont mises en œuvre dans le cadre de procédés de traitement aérobie du lisier. D'après certaines estimations, en Europe, 50% des émissions anthropogéniques de protoxyde d'azote seraient d'origine agricole. La dénitrification biologique a été clairement identifiée comme une source d'émissions de protoxyde d'azote.

2.3.2 Stockage des déjections animales

Les élevages hors sol avec collecte et stockage des déjections animales sous forme liquide (lisiers) sont à l'origine d'émissions gazeuses. Ces sous-produits sont stockés durant des périodes de plus en plus longues en raison des périodes d'utilisation possible en épandage pour la fertilisation des cultures. Actuellement, la réglementation impose un stockage de quatre mois, mais différentes incitations encouragent les éleveurs à stocker durant des périodes de six mois ou plus, afin de mieux gérer leurs lisiers.

Lors de ce stockage, les produits entrent en anaérobiose poussée et sont à l'origine d'importantes émissions gazeuses carbonées (CH_4 et CO_2) et azotées (NH_3 notamment). Les émissions gazeuses se produisent dans les dispositifs de collecte (caniveaux sous les animaux) et dans les stockages à l'extérieur. Les gaz produits dans le bâtiment sont en général évacués par les systèmes de ventilation des bâtiments. Pour les stockages extérieurs, en général non couverts, les émissions sont directes dans l'atmosphère.

Les déjections animales sont composées principalement de matières organiques et d'eau. La proportion de ces matières organiques susceptible d'être décomposée par les micro-organismes est la partie volatile, désignée par matière volatiles solides (MVS). Dans certaines conditions, une partie de ces solides volatils est convertie en méthane.

Les bactéries hétérotrophes (principales responsables de cette dégradation) peuvent se classer en aérobies, anaérobies ou aérobie-anaérobies, selon leur besoin en oxygène. La dégradation des déjections animales peut se dérouler soit en conditions aérobies, soit en conditions anaérobies.

2.3.3 Traitement des déjections animales

a- Le processus de digestion anaérobie

La fermentation anaérobie est l'un des processus qui contribue à la dégradation des matières organiques mortes, végétales ou animales' et à leur transformation en éléments simples, gazeux et minéraux. Ainsi s'entretiennent les cycles biologiques où « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».

Elle se réalise en absence d'oxygène, ce qui permet de stabiliser les matières organiques en les transformant le plus complètement possible en gaz (méthane et gaz carbonique). C'est le résultat d'une activité microbienne complexe qui se divise en quatre étapes principales :

- **Hydrolyse**, par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en éléments plus simples ; le déchet solide est ainsi liquéfié et hydrolysé en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation ; on parle de «solubilisation» des matières organiques : par exemple, la cellulose est transformée en sucres solubles tels que le glucose ou le cellobiose.

- **l'acidogenèse**, qui transforme ces molécules simples par l'action de bactéries en acides de faible poids moléculaire, tel l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate ...) ; parallèlement sont produits des alcools de faible poids moléculaire, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire.

- **l'acétogenèse** : tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autres que l'acétate, CH_3COO^- , le bicarbonate, HCO_3^- et l'hydrogène moléculaire, H_2 , nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, productrices d'hydrogène sulfuré, H_2S .

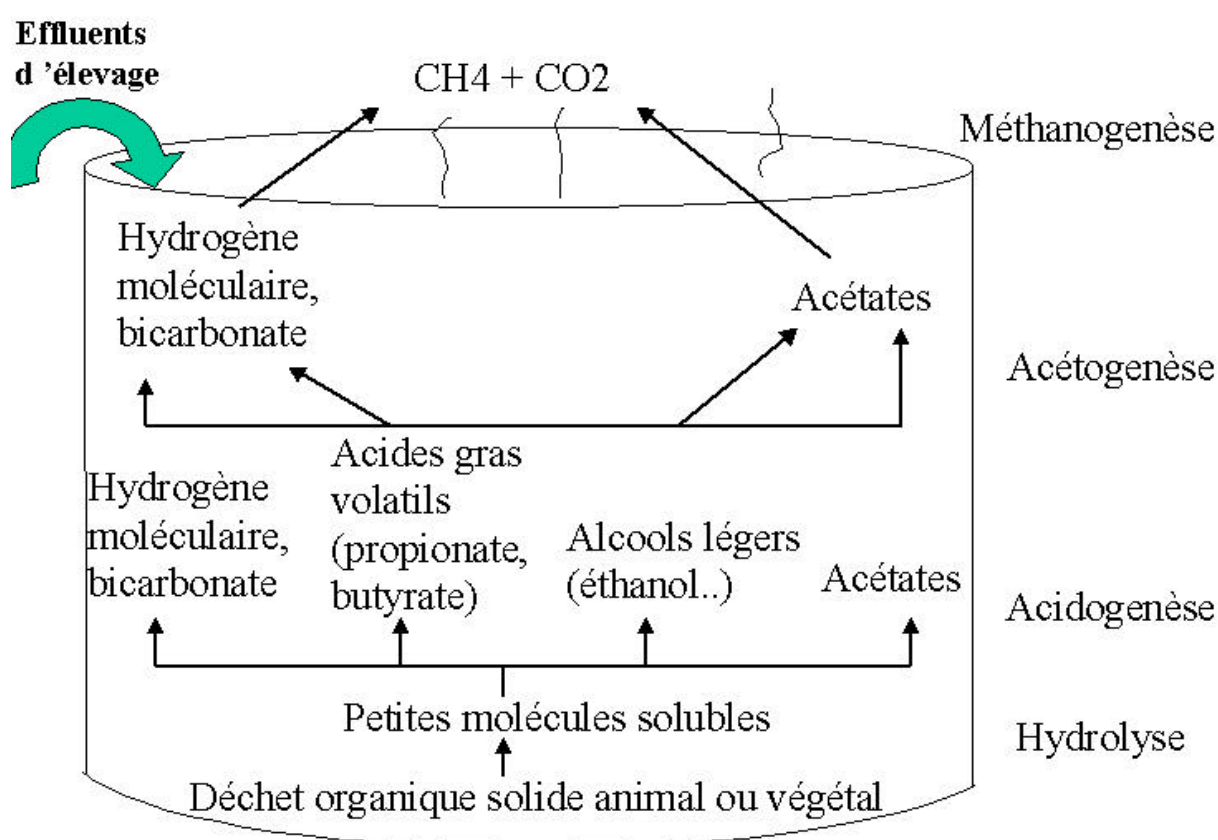
- **la méthanogenèse** : phase, au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate, CH_3COO^- en méthane, CH_4 ,

et en bicarbonate, HCO_3^- . Les secondes, hydrogéntrophiques, réduisent le bicarbonate, HCO_3^- , en méthane.

Des réactions chimiques précédentes, il résulte que le biogaz produit est généralement composé :

- de moitié aux trois quarts de méthane, CH_4
- de un quart à la moitié de dioxyde de carbone, CO_2

figure 12 : Processus de dégradation anaérobie de la matière organique se produisant lors du stockage des effluents d'élevage (les étapes de la fermentation anaérobie)



Source : ADEME

a- Le processus de dégradation aérobie

Un processus adéquat d'aération consiste à dissoudre suffisamment d'oxygène dans le lisier afin de remplacer un environnement en forte anaérobiose (fortement réducteur) en environnement aérobie permettant une activité microbienne intense. Consécutivement, la matière organique est rapidement oxydée sous forme de dioxyde de carbone et d'eau.

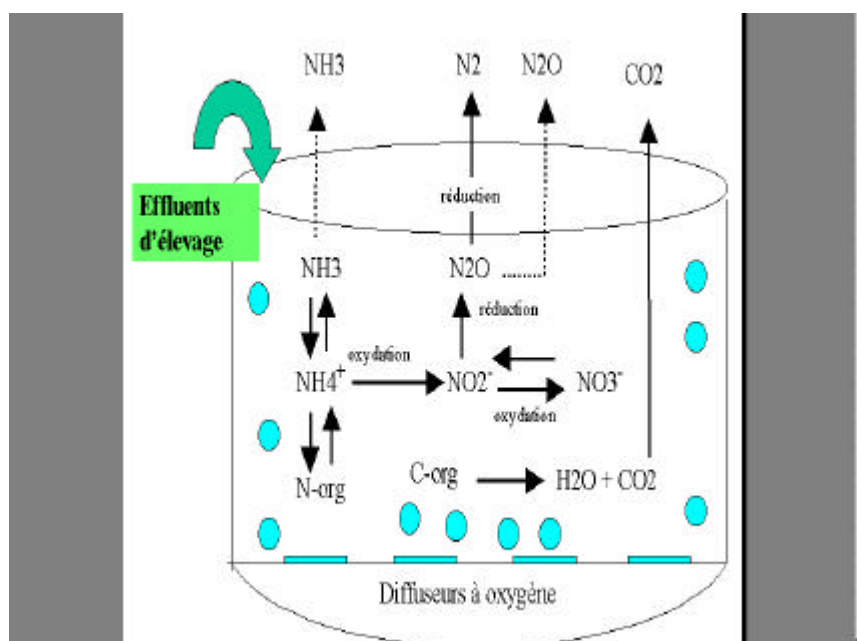
L'apport en oxygène nécessaire aux micro-organismes est assuré par l'oxygène dissous dans le liquide.

Les systèmes de traitement biologique sont caractérisés par le développement contrôlé d'une

Culture bactérienne aérobie qui se nourrit de la matière organique dans le lisier.

En présence d'oxygène, les bactéries hétérotrophes assimilent une partie de la matière organique contenue dans le lisier. En présence d'oxygène, les bactéries assimilent une partie de la matière organique grâce à l'énergie fournie par l'oxydation d'une autre partie de la matière organique pouvant conduire jusqu'au dioxyde de carbone (CO_2) et à l'ammonium (NH_4^+). Les besoins énergétiques des bactéries autotrophes sont assurées par une oxydation de l'ammonium en azote nitrique. Elle s'effectue en deux étapes : la nitrification et la nitratisation (figure 13). L'oxydation entraîne une acidification du milieu. En milieu anoxique, une grande partie des bactéries aérobies réduisent les nitrates en azote moléculaire et oxyde d'azote afin de couvrir leurs besoins énergétiques.

Figure 13 : Principales transformations du carbone et de l'azote des lisiers lors du traitement aérobie des effluents d'élevage



Source : Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France

2.3.4 Résultats

a- Emissions carbonées

① Déjections sous forme liquide

Influence de la composition du lisier :

Des expériences de José Martinez et col montrent une influence du taux de matière sèche initial sur les émissions carbonées ($\text{C-CH}_4 + \text{C-CO}_2$) se produisant lors du stockage de lisier de porc. En effet, les résultats montrent que le pourcentage de carbone dégradé diminue

lorsque le taux de matière sèche du lisier augmente. Ces résultats semblent bien confirmer le rôle de l'anaérobiose stricte sur le processus de méthanogénèse.

Le travail sur les émissions carbonées issues du stockage des déjections animales a permis, dans un premier temps, d'identifier les situations les plus à risque vis-à-vis des émissions de méthane. **Il apparaît que la gestion des déjections sous forme liquide, qui présente de nombreux avantages du point de vue manutention et temps de travail, s'accompagne d'émissions de méthane plus importantes que celles issues de produits solides pailleux ou de produits sur litière.**

Influence du traitement préalable du lisier :

Deux essais ont été réalisés afin de comparer les émissions carbonées (CH_4 et CO_2) pour des lisiers bruts, tamisés et aérés. Les deux essais ont conduit à des observations similaires, à savoir une réduction considérable des émissions carbonées, notamment de méthane, lorsque le lisier a été préalablement traité par aération.

Tableau 6 : Emissions carbonées / carbone initial sur différents traitements

	Brut ou tamisé	Aéré
Emission carbonées/au carbone de départ (%)	18% à 19%	4%

Concernant les émissions de méthane, les résultats décrits par les comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France sont les suivants :

	Brut	Tamisé	Aéré
Emission de CH_4 (kg de CH_4 / m^3 de lisier)	1,8	1,4	0,020

D'autres études publiées par le CEMAGREF, comparent trois types de lisiers et obtiennent les résultats suivants :

	Lisier brut	Lisier tamisé	Lisier aéré
Emission carbonées en pourcentage du carbone de départ	18,9	18,5	3,4
Emission de CO_2 par rapport au CH_4	$\text{CO}_2 < \text{CH}_4$	$\text{CO}_2 < \text{CH}_4$	CO_2 uniquement
Pourcentage des émissions de méthane par rapport au carbone de départ	10%	10%	0%

On peut souligner, concernant le lisier traité par voie biologique (aération), une **absence d'émission de méthane**.

Concernant les additifs chimiques trois additifs ont été testés : Stalosan, NX23 et biosuper, en mesurant les émissions carbonées lors du stockage sur une période de 50 jours, les résultats ont démontré une réduction significative de 20% à 30% des émissions de méthane (voir tableau ci-dessous).

	Lisier brut	Lisier traité
Emissions de CH ₄ (kg de CH ₄ / m ³ de lisier)	1,3	0,5-0,7

② Déjections sous forme solide : fumiers, fientes, compost

Une série d'essais a été réalisée pour déterminer les émissions carbonées issues de différents types de déjections animales, notamment déjections avicoles brutes ou compostées, et déjections bovines.

Pour la plupart de ces produits, on constate que les émissions carbonées sont essentiellement sous forme de gaz carbonique avec des valeurs relatives à la période étudiée (50 jours) qui varient entre 2 et 6 kg de CO₂ par tonne de produit brut stocké. La part du méthane est relativement faible ; moins de 10% des émissions.

Tableau 7 : Emissions carbonées (CO₂, CH₄) lors du stockage des déjections animales solides

Type de déjections	Kg de C-CO ₂ par tonnes de produit	Kg de C-CH ₄ par tonne produit	% du carbone de départ
Compost (avicole)	3,7	0	1,4
Litière avicole	3,3	0	2,3

La part des émissions de méthane est relativement faible comparé aux émissions de gaz carbonique. De plus les émissions de CH₄ par des déjections solides sont nettement plus faibles que pour des déjections liquides, en comparaison avec le tableau précédent.

b- Emissions de protoxyde d'azote lors du traitement aérobie

Différentes stratégies d'aération ont été testées en condition de pilote de laboratoire :

- aération continue avec différents niveaux d'oxygène dissous,
- aération séquentielle avec différentes séquences d'anoxie et d'aération

Une élimination d'azote, de l'ordre de 70% de l'azote total du lisier brut, a été mise en évidence au cours de ces essais incluant l'aération ainsi que le stockage ultérieur du lisier aéré (deux mois de stockage).

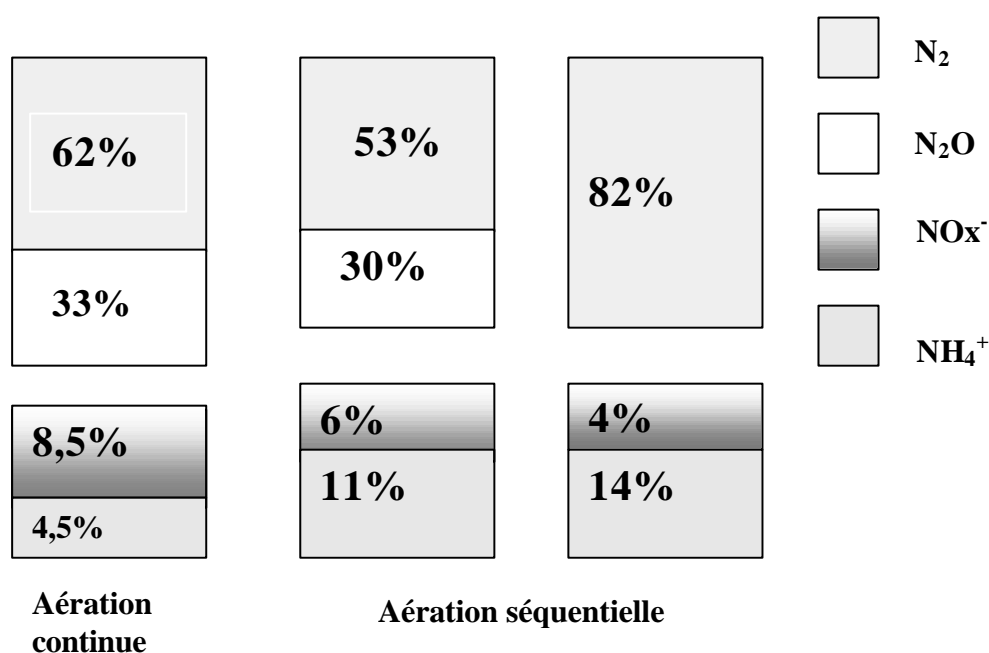
L'aération continue conduit à une élimination de 95% de l'azote ammoniacal du lisier, dont les deux tiers sous forme d'azote gaz moléculaire (N₂).

De même, l'aération séquentielle du lisier conduit à une élimination azotée importante (80% à 85% de l'azote ammoniacal de départ), mais les formes azotées émises varient selon

les séquences d'aération et d'anoxie choisies. Ainsi, en prolongeant la période d'anoxie pour permettre une réduction complète du protoxyde d'azote, on obtient une élimination sans fuites indésirables de N_2O .

L'aération permet donc une diminution des émissions carbonées, mais il faut souligner qu'elle ne diminue pas forcément les émissions de N_2O . Des études sont en cours qui permettront de voir l'impact de l'aération et l'influence du mode d'aération sur le dégagement du protoxyde d'azote. Il n'est pas prouvé que l'aération soit une solution efficace concernant la diminution des émissions de tous les gaz ayant un impact sur l'effet de serre.

Figure 14 : Devenir de l'azote au cours de différentes stratégies d'aération du lisier



source : Comptes rendus de l'Académie de l'Agriculture

c- Influence du mode de ventilation

Tableau 8 : émissions carbonées en fonction des différents types de ventilation

Traitement sur 50 jours	Emission carbonée / au stock de carbone de départ (CH4 et CO2)
Ventilation naturelle (50 jours)	20%
Réacteurs confinés	13%
Renouvellement périodique de l'air (tous les 263 jours) au dessus du lisier en volume (%)	entre 12.5 et 27% selon la mesure (méthode pas fiable)

Conclusion du tableau 8: d'après ces résultats, les réacteurs confinés sont la meilleure méthode pour éviter des émissions carbonées.

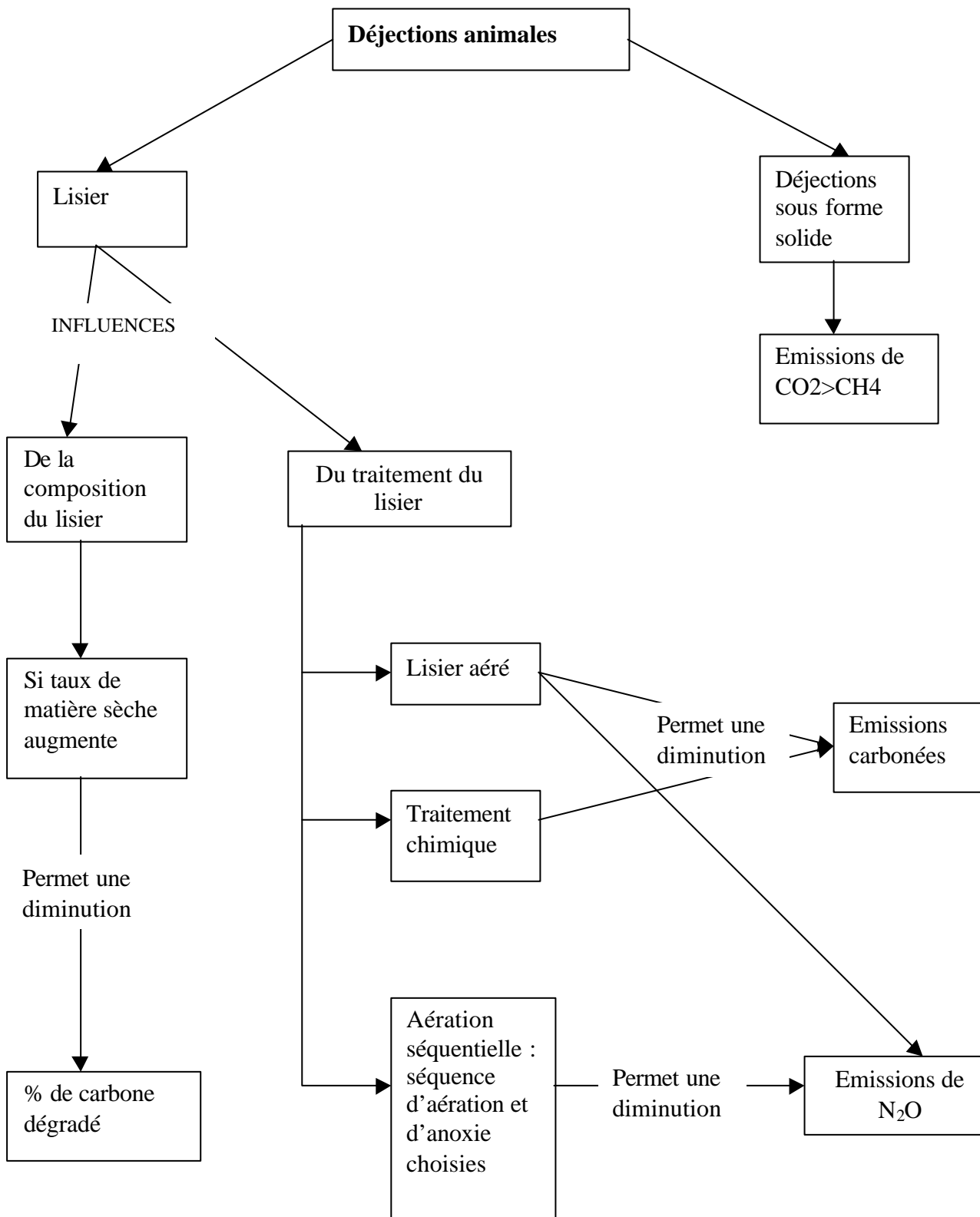
Conclusion (voir figure 15) :

Les émissions carbonées émises à partir de lisiers de porc au cours du stockage ont montré, sur la période étudiée (50 jours), des pourcentages de carbone total émis (C-CH₄+CO₂), par rapport au carbone total de départ dans le lisier, qui varient entre 3% et 20% selon le type de lisier et les conditions de stockage. La part du méthane dans les émissions carbonées totales varie entre 30% et 60%. Les taux journaliers de méthane émis s'établissent entre 8 et 73 grammes de C-CH₄ par mètre cube de lisier et par jour selon les essais et la composition du lisier.

L'aération préalable du lisier permet une réduction des émissions carbonées de l'ordre de 70% et 80%. D'autres études vont dans le même sens à savoir que les émissions de carbone s'établissent en moyenne sur la durée de l'essai à 59 g de carbone par mètre cube de lisier et par jour pour le lisier brut, 48 pour le lisier tamisé et 6,4 concernant le lisier aéré ; et parmi ces émissions carbonées, **la part respective du méthane par rapport au carbone total émis s'établit à 60% pour le lisier brut ou tamisé et à 6% pour le lisier aéré.**

Par ailleurs, le traitement chimique du lisier par ajout d'additifs (Stalosan, NX23, et Biosuper) s'accompagne d'une réduction des émissions carbonées lors du stockage de l'ordre de 20% à 30% et notamment d'une réduction des émissions de méthane. Lors de l'étude du stockage de différents types de déjections avicoles et autres produits solides (fumier, compost, tamisa de lisier de porc), on note des émissions carbonées relativement faibles (2% à 4% du stock de carbone de départ) et principalement sous forme de CO₂ (92% des émissions). Deux essais au champ ont été effectués pour quantifier les flux de méthane à la suite d'épandage de lisier. Les émissions de méthane ainsi mesurées se situent entre 1,8 et 4,2 kg C-CH₄/ha, soit 0,04% à 0,12 du carbone total apporté par le lisier. Le traitement aérobique est une technique qui permet, d'une part, de réduire les excédents d'azote (50% à 80% de l'azote total du lisier) et, d'autre part, d'éviter les émissions de méthane lors du stockage ultérieur. **Cependant, ce type de traitement peut aussi être une source potentielle d'un autre gaz à effet de serre, le protoxyde d'azote (N₂O).** Il apparaît que des conditions de traitement appropriées (choix des séquences d'aération) permettent d'éliminer l'azote sous forme moléculaire (N₂) et donc sans transfert de pollution atmosphérique.

Figure 15 :Synthèse sur le traitement des déjections animales :



2.4. Mesures incitatives

Pour assister à la mise en pratique des mesures citées précédemment, permettant soit de stocker le carbone, soit de réduire des émissions de GES, il est nécessaire qu'il existe pour l'agriculteur un intérêt économique en même temps qu'un conseil technique.

On peut donc penser à établir un contrat territorial d'exploitation par pratique agronomique, pouvant être financé par des organismes publiques ou parapubliques (principe développé dans les chapitres suivants).

On peut également penser à un processus comparable aux permis d'émission évoqués lors de la conférence de Kyoto pour le secteur industriel. Une prime, basée sur le nombre de tonnes de carbone stocké, où le nombre de tonnes de GES non émis par rapport à une technique traditionnelle, serait reversé à l'agriculteur. Ce fonds pourrait être approvisionné par des entreprises privées, qui gagneraient ainsi des droits d'émission en échange d'une aide financière aux exploitations volontaires, mais aussi par différents organismes, comme des banques. On peut également penser à instaurer un marché des droits d'émissions dans le milieu agricole, où les permis d'émettre s'échangeraient entre coopératives d'agriculteurs.

2.5. Le reboisement agricole

Définition : d'après le dictionnaire Robert, «reboiser, c'est planter d'arbres un terrain qui a été déboisé, c'est-à-dire dégarni des bois qui le couvraient. »

La forêt française couvre plus du quart de la superficie du pays, et donne de nombreuses interfaces avec l'agriculture.

La filière «forêt-bois» française représente un puits de CO₂ important, estimé à environ 10% de nos émissions (Benoît LESAFFRE, comptes rendus de l'Académie de l'agriculture de France). Elle stocke environ 700 millions de tonnes de carbone : 430 millions dans les tiges et 258 dans les houppiers et racines. **L'accroissement moyen d'un jeune peuplement est de 0.5 à 1 tonne de carbone par hectare et par an.** C'est pourquoi il semble tout de même important de l'évoquer, bien qu'étant à l'interface de l'agriculture et de la sylviculture.

La gestion des forêts est essentielle pour que celle-ci conserve sa fonction «puits de carbone» : les forêts vierges d'Amazonie, par exemple, ne constituent pratiquement plus des puits de carbone ; il se détruit par oxydation presque autant de biomasse qu'il s'en produit. Le stock total de biomasse, donc de carbone, n'augmente plus ; il faut alors utiliser le bois qui a été produit pour retrouver la fonction «puits de carbone» de la forêt.

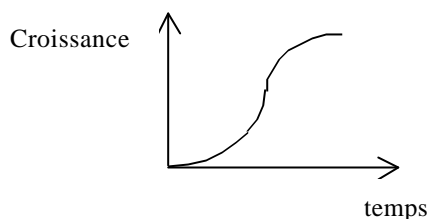
Depuis 1990, 15000 hectares de forêts ont été planté par an en moyenne, effectif qui devrait doubler après l'an 2000.

2.5.1. Différentes façons d'utiliser le bois des forêts.

L'absence de récolte de bois conduirait à supprimer la fonction puits des forêts. Il est donc essentiel de dynamiser les filières bois et d'accroître les débouchés.

Les arbres ont une courbe de croissance en S (voir figure 16).

Figure 16 : évolution schématique de la croissance d'un arbre en fonction du temps



L'idéal pour maximiser la production est d'exploiter les arbres quand l'accroissement moyen commence à diminuer. Le remplacement des vieux peuplements par de jeunes peuplements à croissance plus forte permettra d'augmenter la fonction puits de ces arbres. L'exploitation du bois récolté évite par ailleurs sa décomposition, source de gaz carbonique, comme il se produit dans les forêts amazoniennes, situées trop loin des villes pour que le bois soit exploité.

Le bois pourra être utilisé en tant que biocombustible, dont l'utilisation évitera des émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile. Il peut être utilisé aussi dans l'habitat, les immeubles du secteur tertiaire, ce qui constitue un stockage de carbone, dans des produits à longue durée de vie.

2.5.2.Exemples de potentiels de stockage de bois d'une maison, d'un bâtiment agricole, et d'un bâtiment industriel :

- une maison :
30 à 40 l/m² soit 3 à 4 m³ dans la charpente d'une maison de 100 m²
60 à 90 l/m², soit 6 à 9 m³ dans l'ossature bois d'une maison de 100 m²
- un bâtiment agricole :
55 à 70 l/m² dans l'ossature bois
- un bâtiment industriel :
30 à 75 l/m² dans l'ossature bois

2.5.3. Les différents types de boisement (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Rapport du Groupe « agriculture, forêts, déchets »

- boisement forestier traditionnel : stockage de 0.15 à 0.3 million de tonnes de carbone par an.
- boisement à forte productivité du type taillis à courte rotation : permet d'obtenir des niveaux de séquestration annuelle plus importants, **susceptibles de dépasser 2 tonnes par hectare.**

Cependant, ces peuplements ne peuvent pas être soutenus avec la même vigueur que les boisements traditionnels, présentant une diversité réduite d'espèces. Ils pourraient néanmoins être retenus dans le cadre d'un passage des reboisements annuels de 15.000 hectares à 30.000 hectares après l'an 2000. On pourrait suggérer, par exemple, que la moitié des aides pour les reboisements supplémentaires puisse être réservée à des boisements ayant la possibilité d'atteindre ces niveaux de productivité. Ces peuplements pourraient intéresser à la fois les industriels de trituration du bois, les consommateurs de biocombustibles et les bénéficiaires de crédits de carbone, c'est-à-dire l'état et éventuellement des investisseurs privés.

- boisement spontané de terres agricoles

Pour pouvoir être pris en compte dans le comptage des boisements supplémentaires, ces peuplements devront faire l'objet d'intervention sylvicoles ; par exemple des plantations à plus ou moins large espacement dans ces friches qui permettraient d'y produire également du bois d'œuvre, du bois de feu et du bois de trituration. Des techniques sylvicoles simplifiées, par exemple des enrichissements en feuillus précieux qui préservent aussi les espèces spontanées, peuvent être envisagées.

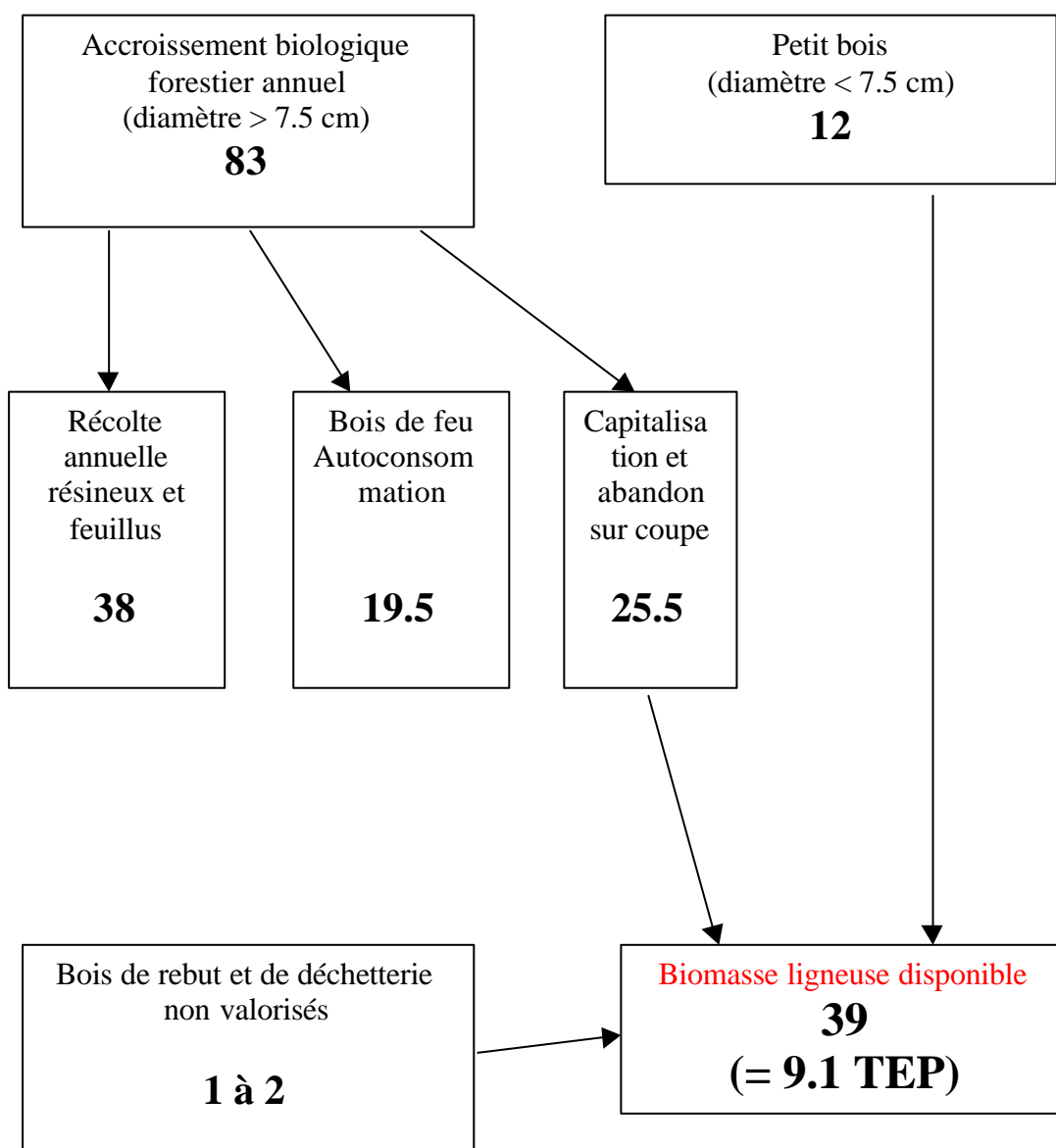
3 ENERGIES ALTERNATIVES ET REDUCTION DE L'EFFET DE SERRE

3.1 Bois énergie

3.1.1 La situation actuelle

Figure 17 : La biomasse ligneuse en France

unité utilisée : millions de m³ équivalent de bois rond

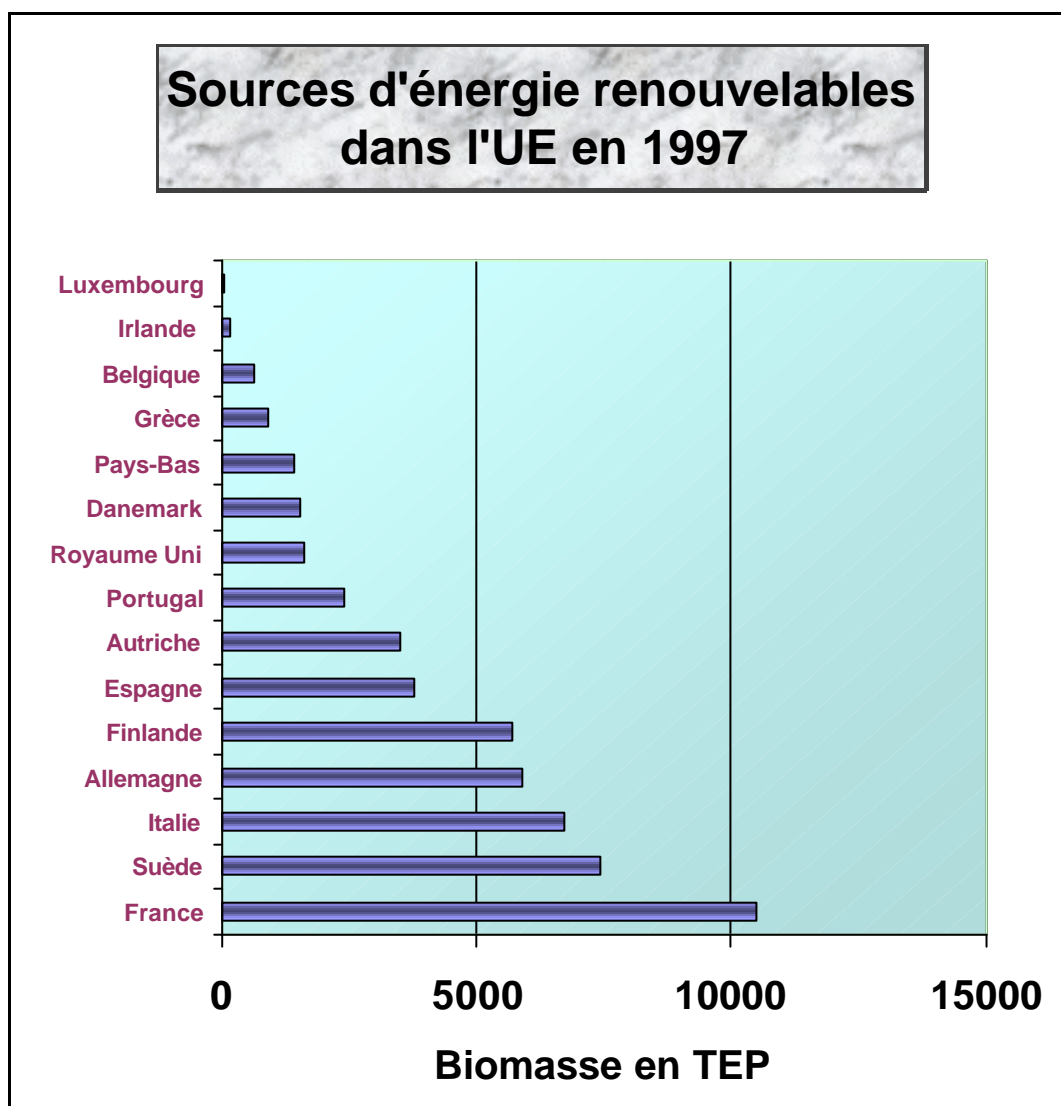


Source ADEME 1999

Il y a donc 39 millions de m³ de bois rond, soit 9.1 TEP, actuellement disponibles en France et potentiellement utilisables en tant que biomasse productrice d'énergie.

Etat des lieux des énergies renouvelables à partir de la biomasse en Europe :

Figure 18 : sources d'énergies renouvelables dans l'UE en 1997



Source Biomasse Normandie 1999

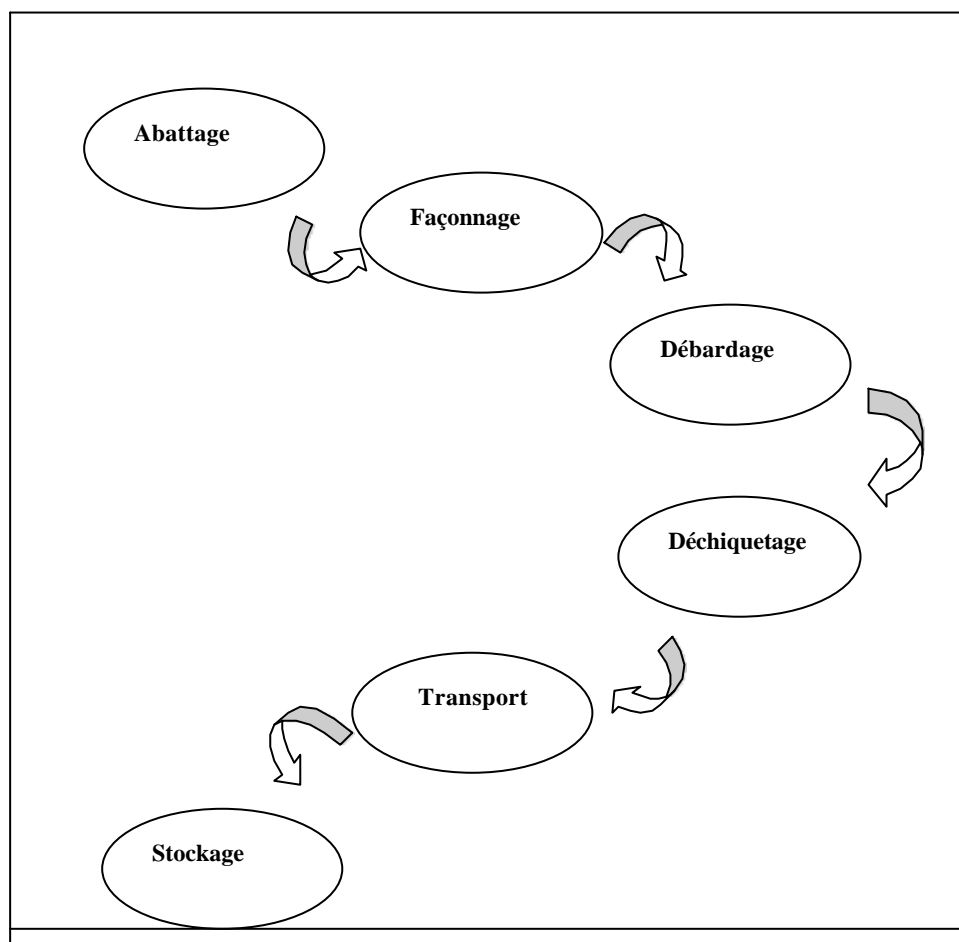
Etat des lieux du bois-énergie en France en quelques chiffres :

- **42 millions de m3 de bois rond** consommés par an soit **9.8 millions de TEP**
- 4% des besoins énergétiques nationaux
- 7 millions de foyers consomment plus de 8 millions de TEP
- 1000 chaufferies industrielles absorbant 0.5 millions de TEP
- 420 chaufferies résidentielles consommant 0.15 millions de TEP
- 320 chaufferies installées de 1994 à 1999 pour un investissement de 500 millions de francs subventionné à 80 millions de francs par l'ADEME.

La France peut donc encore aisément développer la filière bois-énergie, compte tenu des quantités de bois disponibles. De plus, cette forme d'énergie renouvelable ne couvrant que 4% des besoins énergétiques nationaux, elle est fortement appelée à prendre de l'importance dans l'avenir. Pour cela, de nouvelles filières de déchetage du bois inutilisé afin de produire des plaquettes sont à mettre en place.

3.1.2 Le système de production de plaquettes

Figure 19 : Système de production des plaquettes



Source ADEME 1999

Le façonnage consiste à préparer le bois qui a été débardé, c'est à dire à ébrancher et à recouper en bouts de plus petite taille.

On considère que les plaquettes sont le résultat d'un déchetage des sous-produits de la filière bois.

Dans le cas des exploitations agricoles, ces sous-produits susceptibles d'être transformés en combustible pour chaufferie automatique par déchetage sont issus de plusieurs sources :

- entretien des haies sur l'exploitation
- entretien de lisières de forêt, bords de routes et ripisylves
- entretien d'arbres isolés et de vergers

Caractéristiques générales des plaquettes :

Les plaquettes sont des bois coupés (par opposition aux broyats qui sont éclatés) et la découpe est franche. La granulométrie (taille des morceaux, forme des grains) varie selon les caractéristiques de la déchiqueteuse ainsi que l'essence et l'humidité du bois.

On peut définir la taille des plaquettes à partir de trois cotes qui sont la longueur (dans le sens des fibres), la largeur et l'épaisseur. Selon les caractéristiques de la chaufferie bois et du système d'alimentation automatique, la longueur des plaquettes varie de 2 à 10 cm.

➤ **L'humidité du bois** utilisé en chaufferie peut avoir des taux divers. Néanmoins, pour avoir de bons rendements de combustion, l'humidité moyenne des plaquettes de bois varie de 25% à 40%.

➤ **La densité des plaquettes de bois** varie selon l'humidité, de 0,25 à 0,3 soit 3 à 4 m³ de plaquettes par tonne.

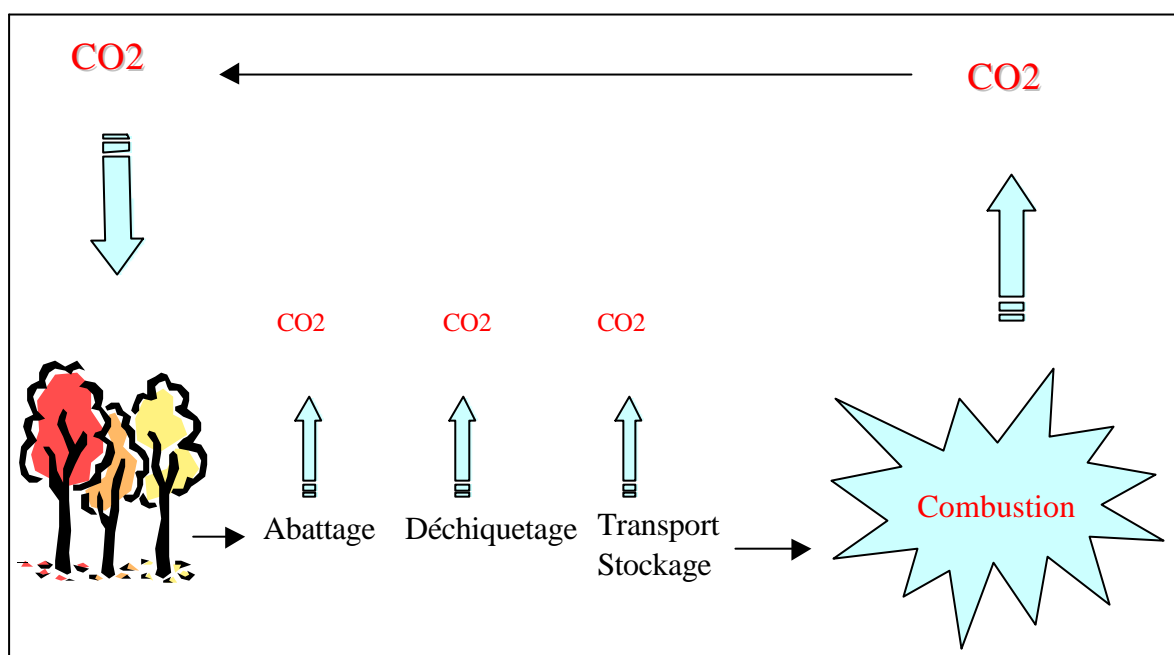
➤ **L'origine du bois** peut être très variable, on utilisera indifféremment des feuillus ou des résineux, des bois tendres et des bois durs.

Plaquettes à 25 % d'humidité
<p>PCI de 3600 kWh/tonne</p> <p>3 tonnes de plaquettes = 1000 litres de fuel</p>
Plaquettes à 40 % d'humidité
<p>PCI de 2800 kWh/tonne</p> <p>4 tonnes de plaquettes = 1000 litres de fuel</p>

PCI = Pouvoir Calorifique Inférieur, c'est à dire l'énergie produite par la combustion d'un combustible donné si l'on ne tient pas compte de la chaleur latente de vaporisation contenue dans la vapeur d'eau produite.

3.1.3 Analyse du cycle de vie

Figure 20 : Le cycle de vie du CO₂ et la filière bois



On considère que le dioxyde de carbone émis par combustion du bois est réincorporé par les arbres. Le bois libère dans l'atmosphère le carbone nécessaire à sa croissance et ne contribue donc pas à l'augmentation de l'effet de serre. En effet, les arbres intègrent du CO₂ pour synthétiser de la matière organique et on boucle donc le cycle du CO₂. **De plus, le CO₂ dégagé se substitue à celui émis par l'oxydation lente qui transforme en gaz carbonique tout le bois mort abandonné en forêt.** Dans le cycle naturel du carbone, l'utilisation énergétique valorise donc un processus inéluctable. En replantant au fur et à mesure l'équivalent du bois-énergie utilisé, le gaz carbonique émis est recyclé, puisque les végétaux l'absorbent.

- L'impact de la combustion du bois sur l'effet de serre est donc nul.
- Les arbres contribuent même à respecter l'équilibre du carbone nécessaire à la vie existant entre la biosphère et la biomasse

Le bois, dans le cadre d'une gestion raisonnée et non intensive des ressources, est donc très avantageux par rapport aux énergies fossiles. Ce dernier type d'énergie, non renouvelable, émet lors de la combustion du dioxyde de carbone qui ne sera en aucun cas réincorporé.

L'exploitation du bois par l'homme est logique puisque le cycle de vie des arbres est à **l'échelle de l'homme**.

Les énergies fossiles par contre ont un cycle de vie à beaucoup plus grande échelle (**échelle géologique**) et donc l'exploitation intensive de ces ressources par l'homme est une grave incohérence.

Mais, dans l'exploitation de la filière bois-énergie, il reste des sources d'émission de CO₂ autres que la combustion. L'utilisation de carburant lors du travail de fabrication des plaquettes (tronçonneuses, déchiqueteuse, tracteurs,...) va en effet provoquer des émissions de gaz à effet de serre. Mais on peut considérer que l'extraction et la purification des différents types d'énergies fossiles non renouvelables provoquent aussi des émissions.

On peut donc affirmer que le bois, en tant qu'énergie renouvelable dans le cadre d'une gestion raisonnée, contribue nettement moins à l'émission de gaz à effet de serre que les énergies fossiles.

Tableau 7 :Emissions de CO₂ par kWh de la source à l'usage final (kg) :

SOURCE D'ENERGIE	EMISSION DE CO ₂ (KG)
Fioul domestique	0.35
Gaz naturel	0.28
Charbon	0.36
Electricité	0.12
Bois	0

Source Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

3.1.4 Le déchetage du bois : aspect environnemental et économique

L'unité de mesure des plaquettes de bois est le **mètre cube apparent de plaquettes (map)**.

- 1 map = 330 kg
- 1 map = 0,7 m³ de bois
- PCI = 730 kWh/map

SUBSTITUTION

La combustion moyenne de 1 m³ de bois :

a consommé 0,015 TEP

a substitué 0,1 TEP fossile utile



**a donc évité l'émission nette de 0,085 TEP utile
soit 0,3 T de CO₂**

La combustion moyenne de 1 map de plaquettes de bois :

équivalent à la combustion moyenne de 0,7 m³ de bois



**a donc évité l'émission nette de 0,0595 TEP utile
soit 0,21 T de CO₂**

On considère que le déchetage pour une petite structure telle que la CUMA va nécessiter un ensemble de petite capacité et non pas un système lourd réservé aux professionnels.

Cet ensemble est constitué d'un tracteur agricole, d'une déchiqueteuse et d'une remorque. Il est bien entendu destiné à une utilisation saisonnière, étant donné que le tracteur sert à d'autres activités en dehors de cette période.

La productivité enregistré pour une petite machine alimentée par de petits bois de type rémanents de façon manuelle par deux hommes est de l'ordre de 3 à 6 map par heure.

Deux hommes avec un petit ensemble et travaillant deux mois par an sont donc capables d'approvisionner une chaufferie consommant 600 à 1500 map par an, soit 126 à 315 tonnes de CO₂ évitées par an.

Investissements à réaliser :

➤ Déchiqueteuse sur attelage 3 points, prise de force tracteur :

* petite capacité ($\varnothing < 15\text{cm}$) :	60 à 100 000 F
* moyenne capacité ($15 < \varnothing < 20\text{cm}$) :	100 à 150 000 F
* forte capacité ($\varnothing > 20\text{cm}$) :	150 à 300 000 F

➤ Remorque agraire basculante simple : 30 à 40 000 F

➤ Tracteur agricole 4x4 :

* 75 CH :	170 000 F
* 120 CH :	250 à 300 000 F

Tableau 8 : Investissements matériels à réaliser

TRACTEUR 4X4 75 CH	170 KF
Petite déchiqueteuse	95 kF
Petite remorque agraire	35 kF
Total	300 kF

Coûts de fonctionnement :

L'ensemble des coûts de fonctionnement comprend les éléments suivants :

- carburant
- lubrifiants et huile hydraulique
- pièces
- réparations
- usure des pneus
- affûtage des couteaux
- remplacement des couteaux
- hydraulique et mécanique

Tableau 9 :Coûts de fonctionnement moyens(F HT/h machine)

Ces chiffres sont valables pour une production allant de 3 à 6 map par heure.

Tracteur 75 CH 4x4	30 à 35 F/h
Petite déchiqueteuse portée	20 F/h
Remorque	<5F/h

Source ADEME 1999

3.1.5 Le coût du kWh

Pour pouvoir comparer le bois déchiqueté par rapport aux autres modes de chauffage, il est nécessaire de connaître le coût du kilowatt/heure. Pour cela, il faut récapituler l'ensemble des coûts pour un ensemble de production donné. Dans notre cas (CUMA), on considère un ensemble de petite capacité

Pour calculer le coût d'utilisation horaire de l'ensemble constitué par le tracteur, la déchiqueteuse, la remorque et les deux hommes, on prend en compte les éléments suivants :



- les frais fixes : amortissements, frais financiers, assurance,...
- les frais de fonctionnement
- les frais de personnel avec charges
- les frais généraux (environ 15% du total)

On obtient ainsi, dans le tableau ci-dessous, des coûts allant de 355F/h pour une production de 1500 map/an, à 403 F/h pour une production de 600 map/an (Source ADEME).

Remarque : les charges salariales sont prises en compte dans ce calcul alors qu'il n'y en aura pas forcément sur l'exploitation agricole car le travail sera réalisé en saison morte par les exploitants eux-mêmes.

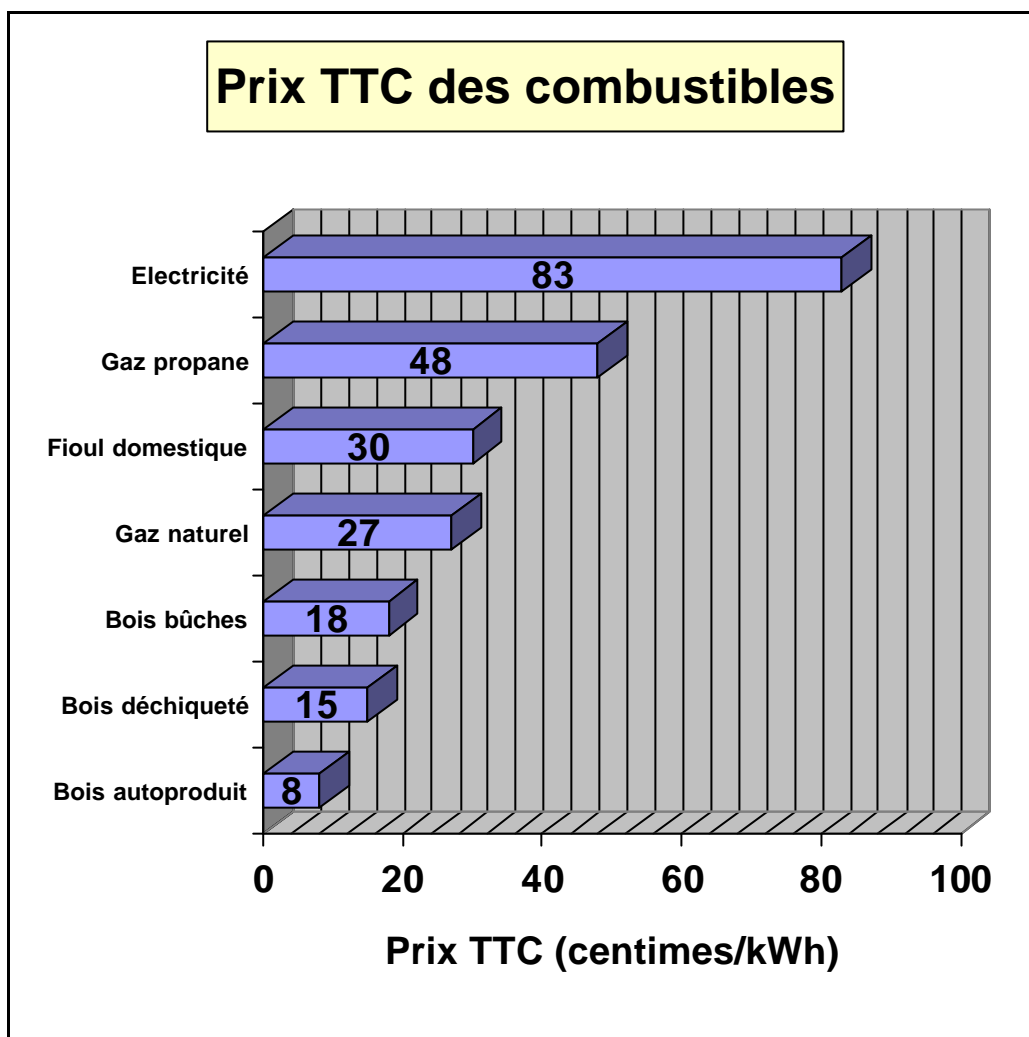
Tableau 10 :Tableau récapitulatif des coûts

(1map=330kg ; PCI=730kWh/map)

	Ensembles de petite capacité (petite déchiqueteuse portée)	
		
Nombre d'heures de travail affectées à la déchiqueteuse	200	500
Production moyenne (map/h)	3 à 4	3 à 4
Volume de plaquettes conditionnées (map/an)	600	1500
Tonnage de plaquettes (t/an)	210	525
Prix moyen du matériel neuf (kF)	300	300
Coût d'utilisation horaire de l'ensemble (F/h)	403	355
Prix de revient d'un map bord de route (F/map)	115	100
Coût du transport (F/map)	0*	0*
Total livré (F/map)	115	100
Prix de revient de l'énergie livrée au silo (centime/kWh)	15.8	13.8

* livraison directe au silo dans un rayon de moins de 5 km.

Figure 21 : Comparaison avec les autres modes de chauffage



source ADEME et Ministère de l'Economie et des Finances

En comparaison avec les autres énergies, le bois déchiqueté reste très compétitif.

3.2. Utilisation du biogaz comme ressource énergétique

Le biogaz est un gaz combustible résultant de la dégradation anaérobie des matières organiques végétales ou animales. Il est composé de gaz carbonique et de méthane. Cette dégradation appelée aussi méthanisation est un phénomène naturel qui permet de transformer les molécules complexes appartenant à la matière organique en molécules simples et gazeuses.

Ce procédé est essentiel aux cycles biologiques de la vie « où rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Les produits issus de la méthanisation naturelle ne sont pas contrôlables et ne peuvent être récupérés par l'homme. Un exemple concret de cette production naturelle est l'existence des phénomènes de feu-follets dans les cimetières ou dans les marais..

La méthanisation peut devenir un phénomène contrôlé si elle est conduite à l'aide de digesteurs dans lesquels les réactions sont optimisées et surveillées.

La méthanisation n'a pas été utilisée tout de suite comme traitement énergétique. Elle servait déjà depuis un siècle comme moyen pour désodoriser les boues des stations d'épuration. Il faut attendre les début des années soixante-dix et la crise résultant des chocs pétroliers pour qu'on s'intéresse à la valorisation énergétique de la méthanisation.

3.2.1 Etats des lieux des besoins et des ressources

Il est impossible aujourd'hui de donner une réelle estimation de la quantité de biogaz exploitée dans le monde, ni de son gisement potentiel. Toutefois, pour donner un ordre de grandeur, on peut dire que le gisement total de biogaz dans le monde représente près de 2 000 Mtep / an. Mais selon les contraintes socio-économiques des sites d'exploitation, seulement 300 Mtep / an peuvent être récupérables pour le bilan énergétique mondial (cf. tableau 12)

En France, la quantité d'énergie valorisée par la méthanisation des stations, des décharges et des autres déchets organiques peut être évaluée entre 2,6 et 5 millions de TEP, ce qui représente 11 % de la consommation française en gaz naturel.

Tableau 11 : les ressources mondiales en biogaz

Ressources mondiales en biogaz	Biogaz produit (MTEP / an)	Biogaz Valorisable (MTEP / an)
Déchets solides urbains et industriels	750	60 à 100
Eaux usées urbaines et industrielles	50	40 à 50
Sous produits agricoles	1000	40 à 150
TOTAL	1800	140 à 300
Biogaz / cons. Mondiale de gaz naturel	100 %	8 % à 17 %

(source E. NYNS in *le biogaz et sa valorisation*, publication ADEME)

Tableau 12 : les ressources françaises en biogaz

Ressources françaises en biogaz	Biogaz Valorisé actuellement (TEP / an)	Biogaz valorisable potentiellement (TEP / an)
Stations d'épuration urbaines	65 000	150 000
Stations d'épuration indus. et indus. agro- aliment.	64 000	800 000
Décharges	19 000	300 000
déchets solides ménagers et assimilables	1 900	1 000 000
Digesteurs agricoles	100	1 000 000
TOTAL	150 000	3 250 000
Biogaz / cons. Française de gaz naturel	0,5 %	11 %

(source Solagro / Eden in *le biogaz et sa valorisation*, publication ADEME)

Il existe en Europe une cinquantaine d'usines de traitement de déchets par méthanisation qui peuvent traiter une capacité de 1,5 millions de tonnes de déchets par an. Le pays le plus développé dans ce domaine est l'Allemagne qui possède 40 % du parc industriel. Viennent ensuite le Danemark, les Pays-Bas, l'Espagne, la France, la Suisse et la Suède. La capacité moyenne de traitement des déchets des usines est égale à 20 000 t / an. La plupart des usines trient leur déchets avant l'arrivée dans les digesteurs mais les entreprises de grandes tailles sont généralement des usines de traitement de déchets non triés (comme l'usine d'ordures ménagères d'Amiens pouvant traiter 85 000 t / ans). Ces usines actuelles correspondent généralement à des pôles urbains supérieurs à 50 000 habitants qui est le bassin de population minimum à la valorisation d'une unité de méthanisation dans les conditions actuelles.

Cependant, de nombreuses petites unités de méthanisation se sont créées en Europe à la fin des années soixante-dix et surtout pendant les années 80, principalement dans le milieu agricole. Ce phénomène peut se comprendre aisément lorsque l'on considère que 3 élevages (bovins, porcins et volailles) rejettent en France 8 fois plus de déchets que la population humaine. L'intérêt de la méthanisation pour l'agriculture n'est donc plus à démontrer.

Un programme expérimental français d'installation et de suivi technique d'unité de méthanisation établi dans 95 exploitations d'élevage agricole a ainsi été mis en place entre 1979 et 1983 par l'organisme ANRED remplacé aujourd'hui par l'ADEME. Dix ans plus tard, seules 10 exploitations sont encore opérationnelles, les connaissances et la situation politique de l'époque n'étaient pas satisfaisantes au regard de leur rentabilité. Mais aujourd'hui, le contexte est différent, les connaissances et les réussites apportées par nos pays voisins que sont le Danemark et l'Allemagne nous donnent de nouvelles perspectives. Les procédés tendent à s'uniformiser et deviennent de plus en plus stables et performants.

3.2.1. Les enjeux de la méthanisation

Les enjeux de la méthanisation sont multiples et concernent plusieurs acteurs selon leurs points de vue. Les collectivités locales et autres sociétés de services, les industriels et même les agriculteurs voient la méthanisation comme un moyen de traiter leurs déchets à faible coût mais sont peu réceptifs à la valorisation énergétique pour différentes raisons (coût, problèmes d'exploitation, manque d'information). La méthanisation semble être, par contre, un enjeu important et de long terme pour l'ensemble de la société en ce qui concerne le bilan énergétique global et les problèmes écologiques dus à l'effet de serre résultant de l'utilisation des énergies fossiles. On peut néanmoins considérer que les enjeux sont de deux types :les enjeux environnementaux et les enjeux économiques.

a- Enjeux environnementaux

Le monde rural a connu depuis plusieurs années une évolution dans la gestion des effluents. Le mode intensif et la surproduction caractéristique de nos systèmes d'exploitation ont en effet conduit à une augmentation importante des déchets d'élevages, augmentant les problèmes de nuisances et de pollution. La gestion des déchets et leur traitement sont ainsi devenus des enjeux économiques et écologiques forts où la valorisation de l'effluent joue un rôle capital. Pour ce qui concerne l'environnement, les enjeux sont les suivants :

- **la méthanisation permet de stabiliser les déchets organiques et de résoudre différents problèmes de pollution (désodorisation, dégradation...).**

Le taux de réduction de la demande chimique en oxygène varie entre 50 et 60 %. Le produit résiduel ne peut néanmoins moins pas être rejeté n'importe où sans traitement complémentaire car la méthanisation n'a aucun effet sur les nitrates. Par contre, la méthanisation permet d'effectuer une désodorisation efficace.

- **la méthanisation permet de valoriser les déchets qui sont, selon leur terminologie, à l'origine des éléments inutiles et embarrassants pour la société**
- **l'utilisation du biogaz résultant de la méthanisation permet de remplacer les énergies fossiles par une énergie issue de la biomasse et donc incorporée au cycle de l'équilibre biologique global.**

La méthanisation contribue ainsi à l'effet de serre car le gaz qu'elle rejète dans l'atmosphère appartient à la biomasse qui a su l'assimiler pour sa croissance (cf. annexe : analyse de cycle de vie du carbone).

En définitive, l'utilisation du méthane a un impact positif sur notre environnement et propose des solutions à des problèmes écologiques graves et dont l'importance ne fera qu'augmenter au cours des années.

b- Enjeux économiques

Les enjeux économiques de la valorisation du biogaz sont :

- **la méthanisation permet de stabiliser les déchets organiques à moindre coût.**
- **elle donne ainsi une valeur économique à la production de déchets organiques.**

La valorisation du biogaz résultant du traitement de la matière organique, permet ainsi de compenser les coûts nécessaires à ce traitement et de donner une rentabilité économique à la production de déchets.

- **elle permet aussi de produire une énergie renouvelable et locale.**

Elle contribue ainsi à préserver les ressources non renouvelables et améliore la balance énergétique globale. Elle est d'autant plus un atout vu la hausse du prix des énergies fossiles.

Etant donné le contexte, les différents enjeux et en considérant l'énorme potentiel de déchets organiques disponibles en son sein, il est évident que l'agriculture a un rôle non négligeable à jouer dans le développement de l'utilisation du méthane.

3.2.3. Les paramètres et les conditions de la méthanisation

La méthanisation est un phénomène naturel où les réactions sont connues et peuvent être contrôlées. Toutefois, la production de gaz, ses caractéristiques et l'efficacité de la fermentation nécessitent certaines conditions et peuvent varier selon plusieurs facteurs.

a- Influence du substrat

Le substrat a une influence sur la composition du biogaz et sur le rendement de la réaction. Un lisier de porc ou un effluent de volaille donnera un gaz beaucoup plus riche en méthane qu'un fumier moins riche en azote obtenu à partir d'un élevage de bovins. Ainsi le rapport C/N caractéristique de chaque substrat est un facteur de la composition du biogaz obtenu. Plus celui-ci est petit et plus le gaz résultant est riche en méthane.

Or, la proportion de méthane exerce une grande influence sur le pouvoir calorifique du biogaz. En effet, celui-ci augmente quand cette proportion est plus importante.

Tableau 13 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane

Proportion en CH ₄ (%)	PCS *(kWh / m ³)	PCI ** (kWh / m ³)
50	4,8	4,3
60	5,7	5,1
70	6,7	6,0
80	7,6	6,9
90	8,6	7,8
100	9,5	8,6

* Pouvoir Calorifique Supérieur

** pouvoir Calorifique Inférieur

(source : Le Biogaz / Bertrand de La Farge)

De même, selon la qualité du substrat (cf. Tableau 15), le gaz obtenu sera plus ou moins riche en hydrogène sulfuré (H₂S) qui mélangé à l'eau et au dioxyde de carbone rend le biogaz beaucoup plus corrosif, nécessitant pour certains un système de traitement et d'épuration du gaz.

Tableau 14 : proportion de H₂S selon le type de substrat

Type de substrat	Proportion de H ₂ S dans le biogaz
Fumier de bovin	Moins de 0,3%
Lisier de porc	De l'ordre de 0,7 %
Fientes de volaille	Proche de 1 %

(source : Le Biogaz / Bertrand de La Farge)

Les caractéristiques du substrat utilisé pour la méthanisation s'avèrent donc être des paramètres importants de la valorisation énergétique de celle-ci. Il ne faut pas non plus oublier que les caractères physiques du substrat (état, température, viscosité...etc.) jouent beaucoup dans l'élaboration du procédé. Il faudra ainsi tenir compte de ces considérations pour le choix du système et adapter celui-ci aux différents paramètres du substrat valorisé.

b- Influence de la température

La fermentation anaérobie peut s'effectuer selon 3 gammes de températures adaptées à 3 flores microbiennes différentes.

Psychrophyle : 15-25 °C

Mésophyle : 25-55 °C

Thermophyle : 55-75 °C

La plupart des fermenteurs sont des digesteurs mésophyles et la fermentation thermophile est surtout utilisée pour les grosses unités de méthanisation.

L'intensité de l'activité des micro-organismes est très étroitement liée à la température. Celle-ci est quasiment nulle entre 0 et 15 °C, commence à partir de cette valeur et grandit de façon proportionnelle pour atteindre un optimum vers les 37-40 °C (valeur plus haute pour les réactions thermophylles). La température est donc un facteur prépondérant pour le rendement énergétique d'où la nécessité de placer un thermomètre dans le système d'installation.

c- Influence du pH et de l'oxygène

La stricte anaérobiose est indispensable au développement de la flore responsable de la méthanisation et le pH optimal est proche de 7.

d- Influence du brassage

L'influence direct du brassage sur l'activité de la méthanisation n'a pas encore été véritablement prouvée même si certains agriculteurs disent constater une amélioration dans l'efficacité de leur système.

Le brassage est néanmoins utile pour éviter les colmatages et les agglomérations et sert ainsi à simplifier l'entretien du système.

e- Le problème des inhibiteurs

La fermentation anaérobie peut parfois être ralentie par la présence d'inhibiteurs. Ces phénomènes sont généralement connus et évitables et sont souvent liés dans les élevages à l'utilisation massive d'antibiotiques et de désinfectants. Bertrand de La Farge, dans son livre déjà cité plus haut, souligne l'exemple d'un problème d'inhibition, dans des élevages de taurillons, causé par l'utilisation d'un facteur de croissance, *le Monensen*.

L'ammoniac peut parfois devenir un élément toxique pour l'activité bactérienne au delà d'une dose de 3 g/L.

f- Les caractéristiques moyennes du biogaz

Dans les conditions normales, c'est à dire à une pression de 1013 mb et à 0 ° C, elles sont exprimées par le tableau suivant :

Tableau 15 : caractéristiques moyennes du biogaz

Caractéristiques	Valeurs moyennes	unités
PCI	9,94	KWh/m ³
Poids spécifiques	0,68	Kg/m ³
Densité par rapport à l'air	0,55	
Limites d'inflammabilité dans l'air	7 à 14	%
Vitesse de déflagration	0,38	M/s
Température de liquéfaction	-161,60	° C

(source : Le Biogaz / Bertrand de La Farge)

g- Les critères d'appréciation du rendement énergétique

Tableau 16 : présentation des critères d'appréciation de la méthanisation

Paramètres usuels :	
Volume utile du fermenteur :	V (m ³)
Quantité de biogaz produit par jour :	G (m ³ /j)
Débit volumique du substrat :	Q (m ³ /j)

Paramètres utilisés	Définitions	Unités
Charge initiale (MO)	Concentration de l'effluent	g/L de MS, MO, DCO
Temps de séjour (TRH)	Temps de rétention hydraulique	
Taux de charge (CV)	Quantité de matière à dégrader introduite par jour et par de m ³ fermenteur	MO/V en kg de MS/ m ³ j
Production Volumique (GV)	Production de biogaz par de m ³ fermenteur et par jour	G/V en m ³ / j
Production spécifique (B)	Production de gaz par kg de matière introduite G/QxMO en m ³ / kg	m ³ /kg
Taux d'épuration	Matière dégradée par rapport à la matière initiale introduite	% de MS, MO, DCO

(source : Le Biogaz / Bertrand de La Farge)

Tous ces critères sont essentiels à l'estimation du rendement énergétique et sont les indicateurs de l'efficacité du système.

En outre, le rendement énergétique est directement fonction de l'utilisation du biogaz :

Tableau 17 : rendement énergétique du biogaz en fonction de son utilisation

UTILISATION	RENDEMENT
Combustion directe : chaleur	Supérieur à 80 %
Production d'électricité	Chaleur 65 % Electricité 25 %
Compréhension : automobile	90 % du rendement moteur

(source : cours *La méthanisation* / J.L. Böhm 1995)

On remarque que le rendement est intéressant pour le chauffage et beaucoup moins valorisant pour la production d'électricité.

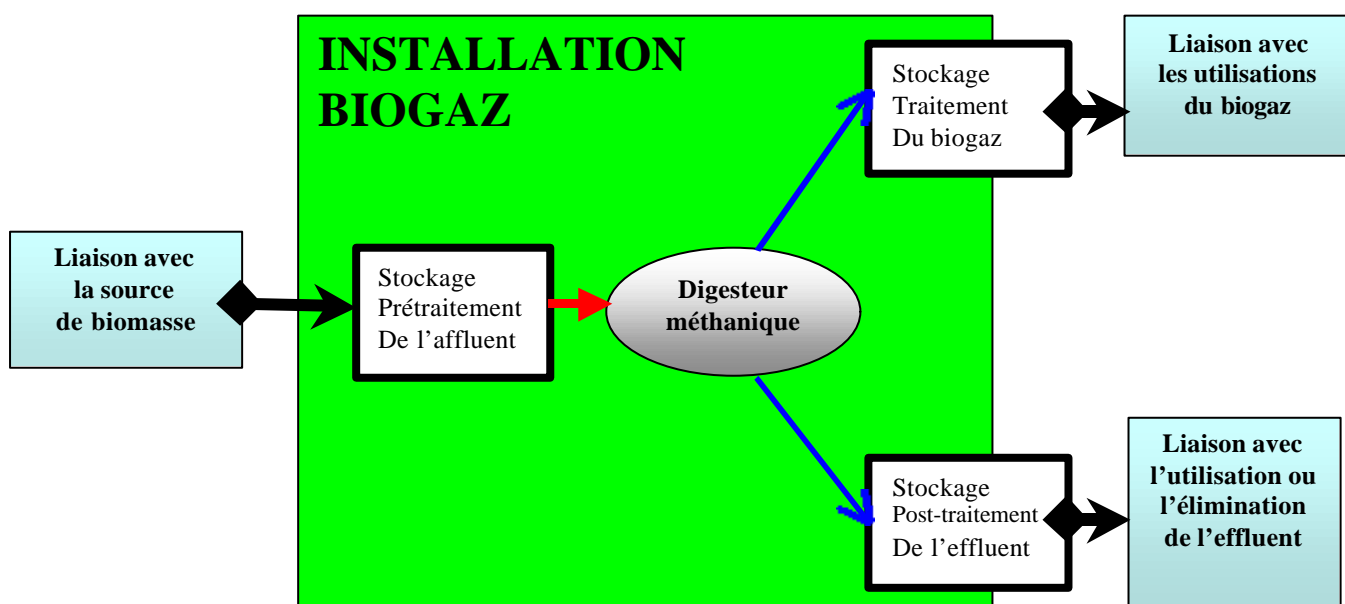
Pour résumer cette partie, on peut conclure que de nombreux paramètres sont intéressants et peuvent influencer les caractéristiques d'une installations de méthanisation. Il est donc important de bien considérer toutes les variables de votre système d'exploitation afin de les adapter au mieux aux choix du procédé et du matériel.

3.2.4. Description des procédés de méthanisation

Depuis la fin des années soixante-dix, il existe de nombreuses techniques en matière de méthanisation. En France, le développement des techniques a surtout été provoqué par le programme expérimental français établi dans le début des années 80. Le suivi technique rigoureux qui en a découlé a en effet permis d'établir de nombreuses et de précieuses informations sur les différents procédés de méthanisation. Malheureusement, le changement politique sur les énergies de la fin des années 80 a été suffisant pour enrayer le développement de ces nouvelles formes d'énergie. Enfin, depuis quelques années, les recherches et les expérimentations de développement sont de nouveau amorcées, catalysées par les succès danois et allemands.

Tout d'abord, on peut représenter schématiquement une installation biogaz de la façon suivante :

Figure 22 : schéma d'une installation biogaz



(source : *installations de biogaz en Europe* / Energies renouvelables, recherches auprès des communautés européennes)

Une installation biogaz peut donc se diviser 4 ateliers distincts :

- le stockage et le prétraitement des effluents
- le réacteur de méthanisation ou le digesteur
- le stockage du biogaz combustible obtenu
- le stockage et le traitement de l'effluent

Il existe de nombreux procédés et de nombreuses techniques développés autour de la valorisation de la fermentation anaérobie. La grande majorité de ces process est basée sur des principes et des recherches élaborés au début des années 80 (à l'initiative d'enquêtes et de suivis de nombreux programmes expérimentaux européens).

L'objectif de cette partie n'est pas de nommer et de décrire toutes les techniques mises en places autour de la méthanisation. Les livres énoncés dans la bibliographie et cités déjà plus haut sauront vous faire découvrir en détail toutes les connaissances de ce domaine à partir de nombreuses fiches techniques et des résultats expérimentaux. Le but de ce chapitre est plutôt de décrire les grandes familles de techniques, dans un premier temps, et de présenter quelques techniques parmi les plus efficaces et les plus utilisées dans un second.

Les différences de procédés varient surtout au niveau du digesteur. Il existe deux grandes familles de réacteurs de fermentation méthanique :

- **les réacteurs dits « à cellules libres »** : ce sont les réacteurs «de première génération ». La matière active issue de la biomasse n'est pas redistribuée à l'intérieur du digesteur, ce qui limite l'intensité de l'activité des micro-organismes.
- **les réacteurs dits à « cellules fixées »** : ce sont les réacteurs de seconde génération. La biomasse active est fixée par le digesteur et est redistribuée avec l'arrivée de la matière fraîche afin de maintenir l'activité bactérienne constante.

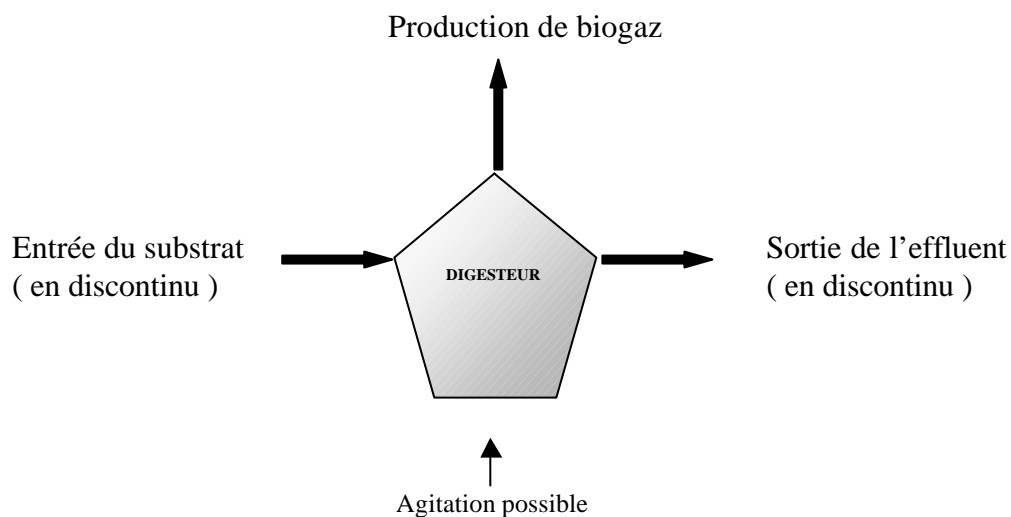
Les réacteurs peuvent aussi être continus (le flux de la biomasse reste constant) ou discontinus (la production de biogaz est variable et la matière est apportée de façon discontinue dans le digesteur).

a- Les systèmes de digesteur

- *le procédé Batch*

Le système Batch est le plus simple et le plus vieux procédé élaboré. C'est un système à digesteur discontinu surtout utilisé pour les déchets solides types fumiers. Ce déchet à traiter est placé dans une enceinte close pendant une durée comprise entre 8 semaines et 5 mois avec ou sans système d'agitation. La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lent à la fin). Ce système nécessite d'autre part beaucoup de main d'œuvre pour le transport de la biomasse et d'entretiens (d'où l'avantage de l'agitation).

Figure 23 : diagramme du procédé Batch

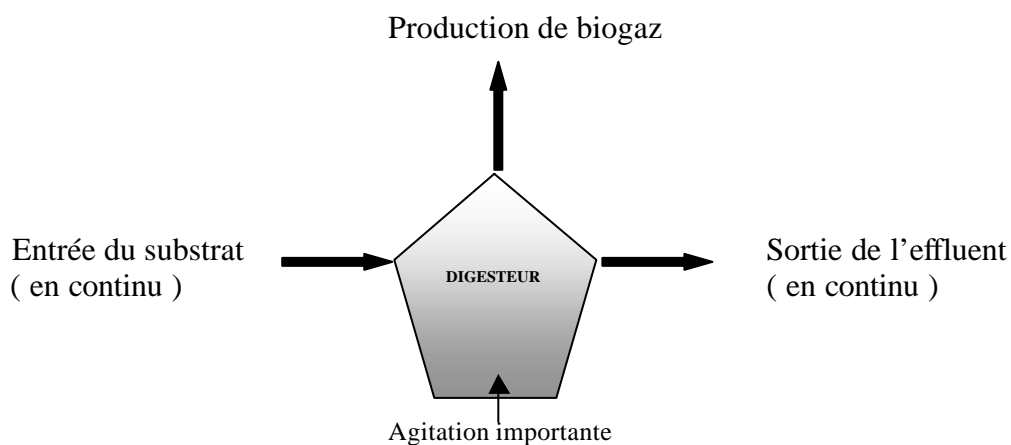


(source : *installations de biogaz en Europe / Energies renouvelables, recherches auprès des communautés européennes*)

- *Le système continu infiniment mélangé*

Ce système est le procédé le plus utilisé. Son agitation importante permet de conserver une vitesse de production de gaz permanente. La biomasse fraîche est apportée en continu et le résidu liquide de la digestion est éliminé régulièrement.

Figure 24 : diagramme du système continu infiniment mélangé



(source : *installations de biogaz en Europe / Energies renouvelables, recherches auprès des communautés européennes*)

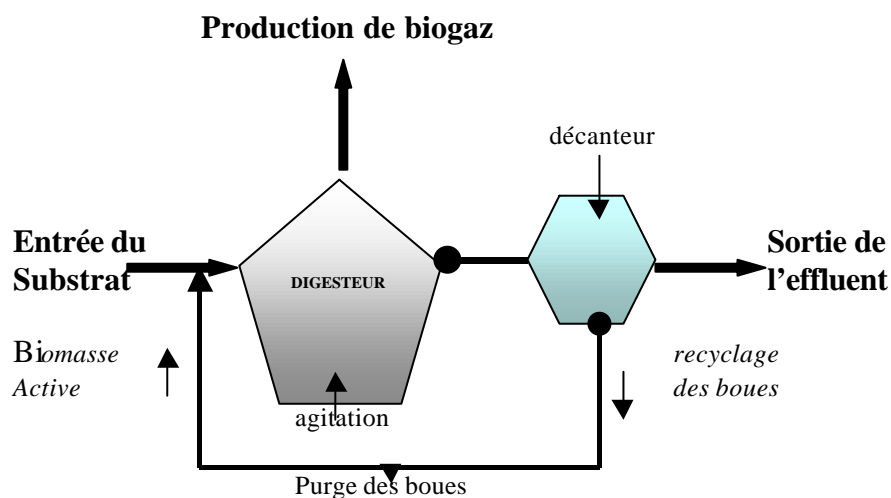
Ce système est néanmoins soumis à quelques contraintes. Ce procédé ne peut en effet accepter des substrats dont la matière sèche est supérieure à 100 kg par kg de biomasse apportée car au delà de cette limite, les déchets ne sont plus pompables. Ce type de système correspond ainsi bien aux lisiers de porcs.

D'autre part, ce système ne permet pas le maintien de la biomasse active car la grande majorité de celle-ci est évacuée à chaque élimination du résidu. Cette limitation de l'activité bactérienne a une influence sur le rendement de la production en biogaz. Elle est généralement constante mais jamais optimale. Une amélioration de ce phénomène peut être apportée en utilisant une agitation partielle (système continu partiellement mélangé).

- Système continu avec accumulation de la biomasse active

Ce procédé concerne les réacteurs de seconde génération. Il consiste à fixer la matière active à l'intérieur du digesteur afin de la redistribuer à la biomasse fraîche. Celle-ci est donc dès son arrivée dégradée par une flore méthanogène active. La production de biogaz est ainsi améliorée et le temps de séjour de la biomasse écourté.

Figure 25 : Diagramme du système continu avec accumulation de la biomasse active



(source : *installations de biogaz en Europe* / Energies renouvelables, recherches auprès des communautés européennes)

L'effluent sorti du digesteur est placé dans un décanteur pour séparer la matière active du reste des résidus. Cette matière est ensuite redistribuée au substrat qui est directement dégradé.

b- Choix du type de matériaux

En ce qui concerne le choix du type de matériau pour la fabrication du digesteur, les 3 matières utilisées sont le béton, l'acier et les constituants polymériques. L'acier et le béton sont néanmoins largement les matériaux les plus couramment utilisés.

Pour l'isolation, on distingue deux types de matériaux utilisés, le premier d'origine synthétique et le second d'origine naturelle. Le premier est le matériau le plus répandu. Il ne faut pas sous-estimer dans l'installation l'isolation car son efficacité est nécessaire pour éviter les fuites de gaz et les pertes de chaleur.

c- Les systèmes de stockage

Le stockage est indispensable à l'installation. Il doit être bien étanche et d'une distance pas trop éloignée du réacteur. Il existe deux systèmes de stockage : le premier à pression variable et à volume constant et le deuxième à volume variable et à pression constante. C'est le second qui est généralement le plus utilisé. On observe le plus souvent sur les installations, des ballons (gazomètres) ou bien, des cloches à gaz. L'enceinte de stockage peut parfois se retrouver à l'intérieur du digesteur.

Le stockage peut se faire à plusieurs gammes de pression (entre 4 et 200 mb) mais le stockage du gaz à haute pression n'est que très rarement utilisé.

d- Les systèmes de chauffage et d'agitation

Les systèmes de chauffages des digesteurs sont généralement des systèmes simples qui ne posent pas véritablement de problème. Le chauffage du réacteur est assuré soit par une circulation d'eau chaude, soit par une paroi chauffante ou bien grâce à un serpentin chauffant immergé dans le fermenteur.

Pour ce qui concerne le brassage, il peut soit être mécanique, soit être assuré par un bullage à gaz. Les deux procédés donnent tous les deux de bons résultats. Toutefois, le bullage à gaz est plus efficace pour les lisiers de porcs et le brassage mécanique par pompe donne plus de réussite pour les fumiers de bovins.

e- Les systèmes d'épuration

Beaucoup d'installations de méthanisation ne possèdent pas de système d'épuration (surtout pour les unités qui ont plus de 15 ans). Toutefois un système de traitement du biogaz avant utilisation peut s'avérer parfois indispensable dans certains cas.

L'eau est un des éléments les plus indésirables du biogaz. Elle peut en effet amorcer des phénomènes de corrosion mais elle peut aussi se condenser. En outre, l'humidité exerce une influence réductrice sur le pouvoir calorifique du biogaz. Celui-ci doit donc être séché avant son utilisation.

Il existe de nombreuses techniques d'assèchement parmi :

- piège à condensation
- passage sur dessicants (sels)
- filtration sur anneau de céramique
- filtration sur gravier, sable
- séchage par le froid

D'autres problèmes peuvent être provoqués par les gaz acides que sont le dioxyde de carbone et l'hydrogène sulfuré. Selon la concentration de ces gaz, un système de traitement est plus ou moins recommandé. Ils provoquent non seulement des corrosions mais l'hydrogène sulfuré est soumis à des normes de sécurité.

Il existe là aussi de nombreux procédés, soit par contact gaz-solide ou liquide, soit physiques, soit biologiques. L'objectif étant pour chaque technique de provoquer une oxydation des gaz acides.

3.2.5. Aspects économiques

Quand on décide de produire de l'énergie en utilisant du biogaz, on remplace une filière à faibles immobilisations et aux coûts de fonctionnement importants par une filière comportant un large investissement mais peu exigeante en matière de frais de fonctionnement.

a- Coûts d'investissement (cf. étude de faisabilité)

L'investissement relatif à l'installation d'une unité de méthanisation est difficile à évaluer parce qu'il est lié étroitement aux caractéristiques de l'exploitation (distance entre le fermenteur et la biomasse, besoins de l'exploitation...). Il dépend en outre des 3 facteurs suivants :

- le volume du digesteur
- la part de charge de travail par l'agriculteur
- la structure déjà mis en place

Il représente d'autre part la somme des valeurs des appareils suivants :

- digesteur
 - matériel de surpression
 - canalisation PEHD ou PVC
 - compteur volumétrique
- éventuellement :
- brûleur biogaz
 - appareil de traitements du biogaz

On peut remarquer que l'investissement d'une chaudière spécifique au biogaz n'est pas indispensable au bon fonctionnement de l'installation. Le système peut s'adapter aux brûleurs de chaudières déjà existantes si celui-ci opère un traitement du gaz pour éviter les risques de corrosion (chaudières à fuel par exemple). Il est néanmoins bien entendu possible de s'équiper d'une chaudière spécifique à ce mode de combustion.

En France, Il n'existe pour l'instant plus de sociétés capables de conceptualiser une installation biogaz du début jusqu'à la fin, le développement de la filière ayant cessé à la fin des années 80 pour raisons politiques. Mais les recherches engagées par le gouvernement allemand ces dix dernières années et les succès constatés dans les 1 000 unités de méthanisation construites pendant cette période motivent la politique et les entreprises énergétiques françaises à se diriger dans cette voie. De nombreux travaux sont réalisés en ce moment, notamment dans le sud de la France près de Toulouse sur des faisabilités financières et des suivis d'installations. Tous les éléments du contexte mêlés aux enjeux discutés plus haut dans l'étude indique un développement proche et conséquent de la filière.

En dépit de cette amorce, il est pour l'instant impossible de donner la valeur précise d'un investissement. Toutefois, modélisée par rapport au système allemand, un élevage de bovins de 70 bêtes désirant établir une installation de biogaz pour son chauffage et une partie de son électricité nécessiterait un coût d'investissement compris entre 500 000 et 600 000 francs selon le choix des procédés et sans tenir compte des structures déjà mises en place.

Les données économiques qui suivent sont issues du guide écrit par Bertrand de La Farge sur le biogaz. Ne tenant pas compte des éventuelles subventions et datant de 1992, elles sont, malgré tout, à mon avis, assez représentatives des prix actuels. Une baisse de l'investissement sera même sûrement envisageable dans les années qui suivent.

Le prix de l'installation d'un fermenteur est directement lié au volume de sa cuverie :

- jusqu'à **5 000 F / m³** pour l'achat d'un digesteur d'un volume proche de 35 m³
- et **1 430 F / m³** pour un volume supérieur à 90 m³.

Les investissements relatifs à la valorisation du biogaz sont aussi très variables et dépendent du mode de valorisation du biogaz :

- entre 16 000 et 90 000 F lorsque le biogaz est valorisé sous forme de chaleur
- entre 90 000 et 300 000 F lorsqu'il est valorisé pour la production d'électricité et d'eau chaude (source Le Biogaz de Bertrand de La Farge)

Bertrand de La Farge propose enfin un mode de calcul du coût d'investissement en fonction du volume de biomasse pouvant être fermenté par le digesteur selon l'équation de droite suivante :

$$I_v = 2,22V + 163$$

(I_v en kF, V en m³)

Cette équation nous donne comme investissement selon les volumes suivants :

- 230 000 F pour un digesteur d'un volume de 30 m³
- 345 000 F pour un digesteur d'un volume de 80 m³

Pour exemple de réalisations concrètes, une installation de 250 m³ de cuve disponible a coûté 600 000 F en 1981 à Saint-Symphorien et l'investissement est de 231 000 F en moyenne pour les installations ayant des fermenteurs de 30 m³ parmi les 95 exploitations du programme expérimental français énoncé plus haut.

b- Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation ou de fonctionnement sont généralement plus faibles que les autres énergies. Il correspondent principalement aux entretiens des installations et à la charge de travail équivalent au transport de la biomasse.

Ils sont d'autre part plus conséquents quand le biogaz est valorisé pour la production d'électricité. En effet, l'entretien consacré au groupe électrogène s'ajoute aux frais de fonctionnement habituels, ce qui diminue la rentabilité économique de la valorisation électrique du biogaz.

Selon Bertrand de La Farge, on peut considérer les coûts d'exploitations d'une production de chaleur par méthanisation comme équivalent entre **1 et 2 % de l'investissement par an**, ce qui correspond à une fourchette approximative de 2 300 à 4 600 F pour des fermenteurs de 30 m³. Ces valeurs sont corrélées avec les résultats d'exploitation allemand.

c- Coût global unitaire de l'énergie

Il varie selon le rendement de production des différents fermenteurs :

- Pour des fermenteurs discontinus, celui-ci peut varier entre 0,15 et 0,87 m³ / m³ / jour.
- Pour les fermenteurs continus, le rendement est supérieur à 1 généralement.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biogaz est variable lui aussi et dépend de la teneur en méthane ; plus cette valeur est haute plus le biogaz a un pouvoir calorifique important (cf. caractéristiques du biogaz).

En prenant la proportion moyenne de méthane dans les différents biogaz obtenus parmi les 95 installations du programme expérimental équivalent à 65 %, on obtient un PCI de **6,2 kWh / m³**. Une installation comportant un fermenteur discontinu de 30 m³ de rendement égal à **0,4 m³ / m³ / j** développerais une énergie de :

$$6,2 * 0,4 * 30 = \mathbf{74 \text{ kWh par jour.}}$$

En considérant un coût moyen de fonctionnement équivalente à 3 500 F / an (pour environ 400 000 F d'investissement) , on obtient un coût de l'énergie proche de **13 cts / kWh** pour le chauffage.

Une proportion de méthane supérieure à 80 % diminuerait le coût de l'énergie de 13 cts à 10,5 cts et avec une proportion supérieure à 90 % , on obtiendrait un prix unitaire de 9 cts du kWh.

Les résultats moyens obtenus par les 95 exploitations du programme expérimental sont compris entre 0,20 et 0,46 F pour le prix de revient du kWh thermique et entre 0,68 et 0,78 F pour le prix de revient du kWh électrique. Ces prix de revient tiennent compte des investissements réalisés.

c- Avantages économiques de la méthanisation

Enfin, il est important de considérer les économies réalisées par les traitements résultant de la méthanisation. En effet, la méthanisation permet de désodoriser efficacement le lisier de porc et de réaliser une économie proche de 20 000 F qui est normalement consacrée à l'investissement d'aérateurs ou d'un traitement chimique de désodorisation.

La méthanisation offre d'autre part une disponibilité d'amendement en matière organique et en azote qui peut améliorer la qualité agronomique des sols. Un plan d'épandage doit néanmoins être nécessaire selon le taux en azote. En outre, la méthanisation est un moyen simple et noble de se débarrasser des déchets sans provoquer un impact négatif sur notre environnement. Cette notion de valeur économique de dépollution ne doit donc pas être à mon avis négligée dans l'analyse économique globale.

De différents points de vue, qu'ils soient techniques, économiques ou autres, la valorisation énergétique de la méthanisation n'a donc rien à envier aux autres systèmes énergétiques. C'est une méthode simple, efficace, qui possède un aspect économique valorisant et qui a un impact intéressant pour notre environnement. Le plus grand défaut qu'on pourrait lui attribuer est le manque d'information et de connaissance actuel auxquelles elle est soumise.

3.3 Le mode de financement

3.3.1 Les conditions générales actuelles

a- ADEME

L'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie est aujourd'hui très impliquée dans le développement des énergies renouvelables sous toutes les formes : solaire, éolien, biomasse. Il s'agit d'un organisme public qui fait la promotion de ces nouvelles énergies respectueuses de l'environnement, et cela par la réalisation d'études, de publications, d'actions pédagogiques, de soutien et de montage de projets et également par l'attribution d'aides financières.

Ces aides financières sont attribuées dans le cas de montage de projets sur des thèmes proches de l'environnement et de l'énergie, dont les énergies renouvelables.

Les projets peuvent être des diagnostics, des opérations de démonstration, des opérations pilotes ou simplement sur des investissements matériels.

Au niveau de la promotion et de l'installation de nouvelles formes d'énergies alternatives, l' ADEME octroie des aides sur investissements qui peuvent monter jusqu'à 30% de la somme investie.

b- Région

Dans le but de développer de nouvelles filières dans lesquelles la France ou certaines régions ont accusées un certain retard, la mise en place d'une mesure d'incitation a été nécessaire.

C'est dans cette optique que l'Etat a mis en place en 1994 le plan « Bois énergie et développement local ». Il s'agit d'un moyen de financement par les régions des projets qui iront en faveur du développement de la filière bois-énergie.

Des projets sur ce thème tels que des études ou des diagnostics, des investissements matériels, la réalisation d'opérations pilotes ou de démonstration,...etc. peuvent donc être subventionnés par la région pour un montant allant jusqu'à 30% de l'investissement.

c- Chambre d'Agriculture et CTE

Les Chambres d'Agriculture de toute la France ont mis en place depuis deux ans un nouveau système de financement des exploitations agricoles. Il s'agit d'un Contrat Territorial d'Exploitation (CTE) que l'agriculteur signe de façon bénévole pour 5 ans et par lequel il s'engage à respecter les mesures auxquelles il a souscrit. En contrepartie l'agriculteur reçoit, sous certaines conditions, des aides financières qui sont variables en fonction des mesures qu'il s'est engagé à suivre.

Il y a deux volets à respecter dans la mise en place d'un CTE :

- le volet économique
- le volet environnemental

C'est à dire que l'agriculteur doit contractualiser sur des mesures qui relèvent de l'aspect économique et de l'aspect environnemental avec également un grand souci de diversification agricole.

Les Chambres d'Agriculture de chaque département proposent aux agriculteurs une liste de mesures types concernant les CTE dans laquelle les agriculteurs choisissent celles auxquelles ils veulent souscrire.

Parmi ces mesures, on trouve par exemple (Maine et Loire) :

- créer ou développer une activité agricole ou non agricole
- développer la commercialisation ou la transformation de produits
- améliorer la qualité des produits
- préserver et améliorer la qualité de l'eau
- préserver, mettre en valeur ou améliorer la qualité des paysages
- ...etc.

d- Le marché du carbone

Il est en train de se mettre en place actuellement au niveau mondial un marché du carbone qui consiste à mettre en place des droits à polluer en terme d'émission de carbone sous toutes les formes. Ce marché concerne actuellement essentiellement le domaine de

l'industrie et concrètement, cela signifie que les émissions de carbones sont limitées et soumises à des quotas. Un industriel qui voudra étendre son activité, dans le cas où cela implique une augmentation des émissions de carbone, devra d'abord acheter de nouveaux droits d'émission. Inversement, un industriel qui, par la modification de son activité, va réduire ses émissions, recevra des indemnités à la tonne de carbone évitée.

Il est envisageable que cela s'étende dans un futur proche au domaine de l'agriculture. Dans cette optique, la mise en place de nouvelles formes d'énergies alternatives sur les exploitations ouvrira des droits à des indemnités financières. En effet, dans le sens où seront substituées des énergies fossiles non renouvelables par des énergies renouvelables, les émissions de carbone seront réduites et les agriculteurs recevront des indemnités financières qui seront fonction du nombre de tonnes de carbone évitées.

Actuellement, on peut fixer le prix de la tonne de carbone à environ 200 F et donc pour plusieurs dizaines de tonnes évitées par la mise en place de nouvelles formes d'énergies alternatives, des sommes non négligeables sont vite atteintes.

3.3.2 Le bois énergie

a- Objectifs

Comme cela a été vu précédemment, le bois présente de nombreux avantages :

➤ **énergie propre** : le bois est une énergie naturelle et renouvelable, c'est à dire inépuisable à la condition de reboiser au même rythme que la consommation. De plus, en ne libérant dans l'atmosphère que le carbone nécessaire à sa croissance, il ne contribue pas à l'effet de serre.

➤ **énergie économique** : la filière bois-énergie permet de valoriser une énergie locale, de favoriser une économie de proximité et de garantir des emplois à long terme.

➤ **énergie compétitive** : le bois est financièrement très compétitif par rapport aux autres énergies.

Autant sur le plan environnemental que économique, le bois sous forme de plaquettes est très intéressant, il convient donc de développer un mode de financement pour inciter les agriculteurs à se tourner vers cette forme d'énergie renouvelable, ceci avec plusieurs objectifs :

- favoriser les utilisations collectives (CUMA)
- développer le filière de déchiquetage du bois
- favoriser des mesures environnementales comme l'implantation de haies, d'arbres, l'entretien des ripisylves,..etc.

b- Situation actuelle

Deux points principaux sont à signaler :

↳ l'existence dans le Maine et Loire de mesures types au niveau des CTE :

- planter des haies
- réhabiliter des haies existantes
- planter des noyers, des amandiers, des châtaigniers

Ces mesures types actuelles sont très intéressantes dans le sens où elles contribuent à inciter les agriculteurs à développer les espèces ligneuses sur leurs exploitations. Ces espèces ligneuses sont forcément productrices de sous-produits ligneux (taillis, branches,..) qui vont être valorisables grâce au procédé de déchiquetage du bois.

↳ les financements actuels existants par l'ADEME et par la Région grâce au plan « Bois-énergie et développement local » proposé par l'état en 1994. Ces financements sont des subventions réparties de la manière suivante :

<p>Achat d'une déchiqueteuse ou d'une chaudière</p> <p>→ subvention de l'ADEME pouvant aller jusqu'à 30%</p> <p>→ subvention de la région pouvant aller jusqu'à 30%</p>

Ces subventions sont cumulables, il est donc possible d'être subventionné à hauteur de 60% dans le meilleur des cas.

c- Estimation du coût de mise en place d'une chaudière à bois déchiqueté

Après avoir étudié le coût de mise en œuvre d'une activité de déchiquetage du bois sur des exploitations agricoles, il convient également d'étudier le coût de mise en place d'une chaudière à bois déchiqueté. En effet, il s'agit de chaudières techniquement différentes et entièrement automatiques, leur coût est donc plus élevé.

Chaudière :

Une chaudière de puissance de 30 kW, comprenant une trémie, une vis d'extraction un brûleur, un échangeur de chaleur et le tableau de commande coûte environ 40 000 F.

Prestations annexes :

↳ Remplacement de chaudière : coût de 8000F environ

↳ Adaptation du conduit d'évacuation de fumées: 4000 à 10000F

↓

COÛT GLOBAL : 52000 à 58000 F

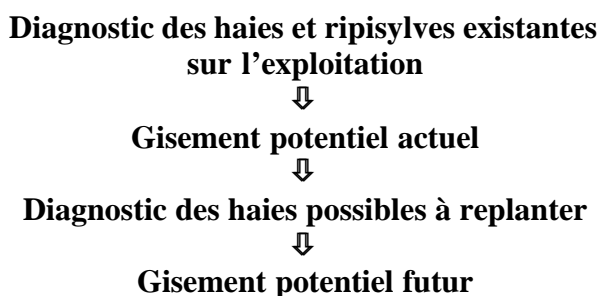
Pour des puissances allant de 30 à 100 kW, le prix des chaudières varie de 40000 à 100000 francs environ.

Le coût global d'investissement pour une chaudière varie donc, avec les prestations annexes, de 50000 à 120000 francs.

d- Stratégie d'élaboration d'une mesure type CTE

Afin d'intégrer toutes les données précédentes, il faut établir un plan de gestion globale dans le but d'établir une mesure type qui entre dans un Contrat Territorial d'Exploitation.

La Chambre Régionale d'Agriculture propose d'établir un schéma d'élaboration de cette mesure type CTE composé de la façon suivante :



On obtient donc ainsi un diagnostic des espèces ligneuses potentiellement productrices de bois au niveau de l'exploitation.

Il faut ensuite déterminer le volume de plaquettes de bois déchiquetées à produire et donc connaître la taille et la puissance de la ou des chaudières à installer.

Le gisement potentiel de bois sur l'exploitation va permettre de générer par an une certaine quantité de bois utilisable pour produire des plaquettes.

Deux scénarios sont alors possibles :

➤ **Scénario 1** : la production de plaquettes sur les exploitations concernées sera destinée à alimenter une ou plusieurs chaudières individuelles pour un ou plusieurs des exploitants concernés dans ce schéma. Cela signifie que le gisement potentiel de bois suffit à produire un volume nécessaire pour alimenter les chaudières qui seront propriété des exploitants ayant souscrit au CTE. Dans ce scénario, il y a donc adéquation entre chaudières individuelles et gisement potentiel des exploitations.

➤ **Scénario 2** : il y a adéquation entre la production de bois sur les exploitations concernées par la signature de la mesure CTE. Dans ce cas, les exploitants signent pour l'entretien et l'implantation de haies sur leur exploitation, mais le déchiquetage du bois ne sera plus à leur charge car il ne bénéficieront pas de la production de plaquettes de bois déchiqueté.

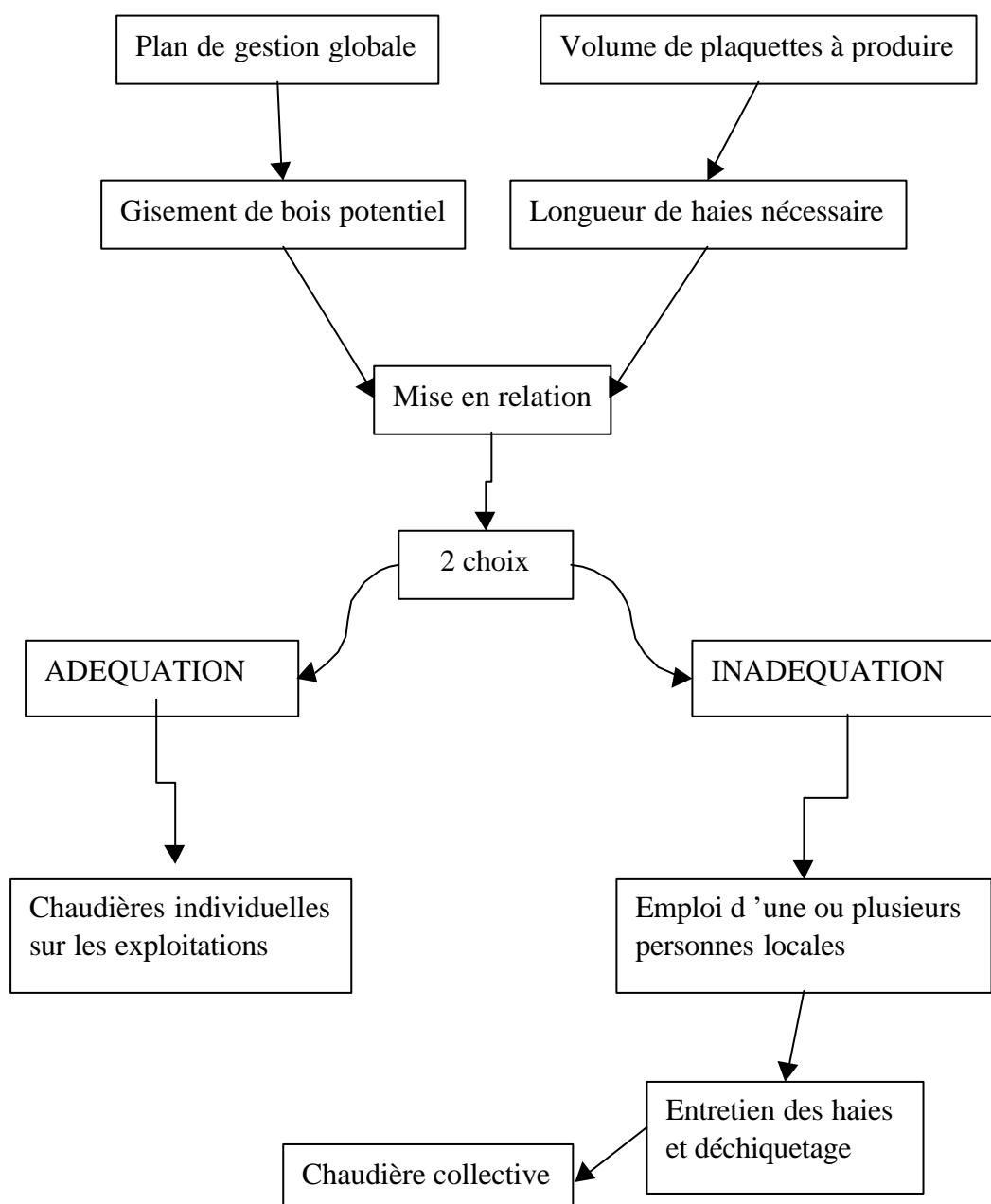
On peut imaginer dans ce cas la **création d'un emploi saisonnier** pour une ou plusieurs personnes locales étrangères aux exploitations. Ces personnes auront donc pour travail l'entretien des haies des exploitations concernées ainsi que le déchiquetage du bois issu de ces haies.

Les plaquettes produites serviraient alors à alimenter non pas des chaudières individuelles mais une chaudière collective. En effet, les collectivités locales pourraient profiter de cette production pour créer un petit réseau de chaleur alimentant des bâtiments publics tels que mairie, école, salle polyvalente,...etc.

Dans ce deuxième scénario, on a de multiples avantages :

- entretien et plantations de haies
- création d'emploi
- développement local
- promotion de la filière bois
- préservation de l'environnement

Figure 26 : schéma récapitulatif des stratégies possibles



3.3.3 La valorisation énergétique du biogaz

L'installation d'une unité de méthanisation, comme nous l'avons déjà précisé précédemment nécessite de larges investissements (plus de 100 000 F) qui compensent le coût de fonctionnement relativement faible. Il est donc important pour les agriculteurs de trouver des partenaires qui sauront élaborer une véritable stratégie de financement afin de les inciter à se lancer dans cette voie. Les enjeux et les impacts environnementaux de la méthanisation étant des éléments majeurs, il serait intéressant et cohérent d'intégrer le développement de son installation dans le système de subventions élaboré dans les Contrats Territoriaux d'Exploitation.

a- Diagnostic actuel

➤ En Allemagne

De nombreux pays européens dont la France se sont déjà lancés dans le développement de ce type d'énergie. Parmi ces pays, l'Allemagne est de loin le pays le plus qualifié et le plus promoteur en matière de méthanisation. Le système allemand possède en effet une filière déjà active et de nombreuses installations existantes et rentables (1 000 unités environ) et demeure ainsi pour tous les autres systèmes européens un exemple concret de réussite dans le domaine de la digestion anaérobie.

Le développement de petites installations de biogaz en Allemagne peut s'expliquer par plusieurs éléments :

- la réduction des investissements due à la conséquence du développement d'une filière, plus précisément, de la mise en place d'un appareillage en série et grâce à la concurrence de plusieurs entreprises compétentes.
- la réduction des coûts liés au progrès des paramètres et des conditions techniques
- l'accord de subvention par l'Etat (en moyenne 25% de l'investissement)
- une collaboration très étroite entre l'agriculteur et l'ingénieur biogaz pour une réelle adaptation de l'installation au système de l'exploitation.

➤ En France

Il n'existe pour l'instant aucune source de financement concrète destinée à subventionner des petites installations de méthanisation dans le milieu agricole. Ce problème de manque d'aides compensatrices peut s'expliquer aisément par le fait qu'il n'existe pas encore de filière spécialisée dans l'installation de petites unités.

Le développement de cette filière ne pourra pas se faire sans l'accord de subventions aux agriculteurs et les acteurs (politiques entre autres) doivent en être conscients. Certains projets ont dores et déjà été mis en route pour tester la faisabilité financière de certaines installations pilotes et expérimentales avec la recherche de plusieurs partenariats. L'organisme ADEME s'est montrée la plus intéressée en intégrant la méthanisation dans un projet de fiche C.T.E élaborée par l'association Alisee. L'ADEME se déclare ainsi prête à accorder des subventions jusqu'à 30 % de l'investissement total, pour toute installation développant la valorisation énergétique du biogaz. L'intégration de la valorisation énergétique du biogaz

dans des projets de fiche C.T.E. est une idée à développer pour élaborer une stratégie de financement pour l'installation d'une unité de méthanisation dans les fermes.

b- Elaboration d'un projet de fiche C.T.E pour l'utilisation de la valorisation énergétique du biogaz

➤ objectifs et intégration du problème au fiches C.T.E

L'objectif de cette fiche C.T.E est d'inciter les agriculteurs à installer une installation biogaz dans leur système d'exploitation dans le but de promouvoir le développement des énergies renouvelables qui ont un impact positif sur notre environnement. La finalité de cette fiche est l'accord de subventions selon les conditions générales des aides aux investissements apportées par ces fiches. En retour, l'agriculteur doit garantir la valorisation optimale de son système (utilisation de la biomasse stockée, épandage du résidu).

Il existe très peu de fiche C.T.E déjà rédigées sur les maîtrises et les économies d'énergie. Il est cependant intéressant de relier la constitution de cette fiche avec des fiches déjà existantes dans le but d'y apporter des améliorations en intégrant la valorisation énergétique du biogaz comme une solution d'un problème environnemental déjà soulevé par une fiche validée.

Une fiche C.T.E établie par la chambre d'agriculture du Maine et Loire peut rentrer dans cette optique. Il s'agit d'une fiche développée sur la suppression des apports de déjections animales en automne dans le but de réduire la pollution des eaux. Cette fiche oblige un stockage de la biomasse et donc une décomposition prématurée de la matière organique. Cette dégradation entraîne une émission de gaz incontrôlée et non valorisable qui peut avoir un impact sur la pollution de l'air.

La méthanisation peut ainsi en effet apparaître comme une solution à ce problème et être en relation avec les objectifs développés par la chambre d'agriculture.

➤ Les engagements de l'agriculteur

Pour répondre aux objectifs fixés par la Chambre d'Agriculture, l'agriculteur intéressé devra prendre plusieurs engagements qui seront fixés, comme dans un cahier des charges, dans le contenu du Contrat Territorial d'Exploitation.

Ces actions auront pour but de soutenir l'agriculteur à valoriser au mieux son système énergétique. Elles incluent :

- le calcul de la part de la biomasse valorisée sur le quantité de biomasse potentielle
- la valorisation optimale du digesteur
- le calcul de la proportion de l'énergie utilisée par rapport aux besoins énergétiques de l'exploitation
- le calcul de la quantité de biomasse stabilisée (résidus) épandue dans le sol par rapport à la quantité totale de résidus
- l'entretien du matériel subventionné

Ces actions ont pour but d'optimiser la rentabilité de l'installation mise en place et d'éviter les gaspillages et les problèmes de fonctionnement.

Il est d'autre part important d'organiser un suivi de l'installation mise en place afin de vérifier que l'agriculteur respecte bien ses engagements. Ce suivi est réalisé à partir de l'élaboration d'un cahier des charges où sont représentés les différents indicateurs vus précédemment (proportion de la biomasse et de l'énergie valorisées). Le plan d'épandage peut aussi être un outil d'observation intéressant pour contrôler les flux de biomasse.

Un inconvénient à l'établissement de cette mesure-type est la difficulté d'établir des actions collectives qui est pourtant l'un des objectifs de la chambre d'agriculture . Il n'est pour le moment en effet pas concevable d'imaginer, dans le contexte de notre époque, l'existence de grands digesteurs centralisés regroupant la biomasse de plusieurs agriculteurs et redistribuant l'énergie proportionnellement aux fermes qui y ont contribué. Ce type d'action ne peut être envisagé que par les collectivités ou les coopératives.

3.3.4 Les fiches CTE

(voir pages suivantes)

CTE Maine et Loire

FAVORISER LA MISE EN PLACE D'UNE ACTIVITE DE METHANISATION

❖ Description de l'action (éventuellement conditions d'éligibilité)

- Mettre en œuvre une installation de méthanisation destinée à la valorisation énergétique du biogaz et agronomique du résidu stabilisé

❖ Intérêts pour la collectivité

- Valorisation des déchets d'élevage
- Contribution à la diminution de l'effet de serre
- Traitement des effluents d'élevage

❖ Incidences sur l'exploitation

- Augmentation de l'autonomie énergétique
- Stabilisation des sous-produits d'élevage (fumiers, lisiers)
- Meilleure valorisation des déjections animales

❖ Liste des engagements de l'agriculteur (cahier des charges)

- Prévoir un plan d'installation de l'unité
- Etablir et remplir une grille relatant les résultats énergétiques de cette nouvelle technologie
- Calcul de la proportion énergétique valorisé par le système mis en place par rapport aux besoins totaux de l'exploitation
- Assurer un suivi technologique de l'installation (maintenance et entretien)
- Respecter les normes de sécurité (pour les gaz acides)
- Calcul et suivi des flux de biomasse (épandus et méthanisé)

❖ Coût pour l'exploitation

- Investissements en bâtiment et en équipement
- Economies réalisées sur les énergies classiques
- Economies liées à la dépollution
- Marché du carbone ?

❖ Indicateurs et suivi

- Facture
- Cahier et plan d'épandage
- Mesures des flux de biomasse et des caractéristiques énergétiques

❖ Partenariats

- ADEME
- Association ALISEE
- Chambre d'Agriculture et GAB

❖ Actions associées

- Suppression des apports de déjections animales en automne
- Maîtrise des énergies

CTE Maine et Loire

FAVORISER LE DEVELOPPEMENT DE LA FILIERE BOIS ENERGIE

❖ **Description de l'action (éventuellement conditions d'éligibilité)**

- Mettre en œuvre une activité de déchiquetage du bois issu de l'entretien des haies des exploitations avec valorisation énergétique des plaquettes de bois produites.

❖ **Intérêts pour la collectivité**

- Entretien du paysage sur les exploitations : haies, ripisylves, arbres isolés,...
- Valorisation d'une ressource locale
- Développement d'une activité nouvelle avec création d'emploi
- Contribution à la réduction de l'effet de serre

❖ **Incidences sur l'exploitation**

- Augmentation de l'autonomie énergétique
- Commercialisation possible d'un nouveau produit
- Valorisation des déchets ligneux

❖ **Liste des engagements de l'agriculteur**

- Diagnostic des espèces ligneuses de l'exploitation
- Entretien et plantation des haies
- Grille de suivi de l'installation
- Plan de déchiquetage en commun

❖ **Coût pour l'exploitation**

- Etude préalable
- Investissement pour l'achat du matériel de broyage
- Eventuellement achat d'une chaudière
- Temps de main d'œuvre
- Economies réalisées sur les énergies fossiles classiques
- Marché du carbone ?

❖ **Indicateurs et suivi**

- Calculs de rendements énergétiques
- Volume de bois produit par an

❖ **Partenariats**

- ADEME
- Association ALISEE
- Mise e commun du matériel (CUMA)
- Marché du carbone
- Collectivité locale pour l'écoulement de la production de plaquettes

❖ **Actions associées**

- Création d'emploi
- Mise en place de chaudières collectives à bois déchiqueté

Conclusion

Nous venons d'évoquer dans cette étude les relations qui affectent agriculture et effet de serre. L'agriculture, par le biais de ces activités, agit de façon significative sur l'augmentation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. L'élevage et les productions végétales sont sources d'émission, de même que les différents types d'énergies utilisées pour le fonctionnement des activités agricoles.

Mais il existe en agriculture un fort potentiel de réduction de l'émission de gaz à effet de serre. Les pratiques favorables à la séquestration du carbone dans les sols sont celles liées à l'extensification des productions (réimplantation de prairies permanentes, travail simplifié du sol,...) et au développement durable en agriculture.

La mise en œuvre de ces pratiques est conditionnée par les orientations de la PAC. La persistance de primes à l'intensification des productions et la perpétuation de la jachère constituent des freins à la réduction des taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Certains traitements du lisier (aération, traitement chimique) permettent de diminuer significativement les émissions carbonées. Cependant, certaines études récentes semblent démontrer que les dégagements du protoxyde d'azote aéré seraient plus conséquents que les estimations actuelles.

Le développement des énergies renouvelables au sein des exploitations agricoles est également une solution à développer. En effet, l'énorme potentiel de biomasse utilisable présent sur les exploitations (lisier, fumiers, déchets verts, bois,...) est à exploiter pour substituer les énergies fossiles non renouvelables. D'autres aspects, comme l'énergie solaire et éolienne, sont aussi à développer.

Plus généralement, si des primes sont offertes au titre du stockage du carbone et, si le boisement des terres mises en jachère dans le cadre de la PAC est autorisé, on peut s'attendre à un déploiement significatif des productions agricoles et ligneuses avec d'importantes conséquences sur la réduction de l'émission de gaz à effet de serre. Les aides publiques versées également dans le cadre des politiques en faveur de l'Environnement par le biais des CTE peuvent être un moyen d'incitation au développement d'activités à impacts plus réduits sur l'effet de serre.

Bibliographie.

Ademe édition « le biogaz et sa valorisation » Paris 1999

Ademe éditions, *Agriculture. Bâtiments à hautes performances énergétiques*, Paris 1996, 270 pages.

Ademe éditions, *Bois-énergie : « Chaufferies à alimentation automatique »*, Paris 1999, 155 pages.

Ademe éditions, *Bois-énergie : « Le déchiquetage en forêt »*, Paris 1998, 105 pages.

BESSIX Alain, «Effet de serre d'origine agricole. Quels outils pour le limiter? », *Environnement et technique*, mai 2000 numéro 196, Société Alpine de Publication, pages 19-20

Böhm J.L. « cours sur la méthanisation » E.S.A. 1995

CHAUSSOD Rémi, «Caractériser la Matière Organique » – Commentaires sur ISB, CBM et K1 », *Echo-MO* n°15 et n° 16, janvier-février-mars 1999, p3-p4.

CHENU Claire, BALESSENT Jérôme, LECLERC Blaise, «La protection physique et l'autoprotection des matières organiques du sol », *Echo-MO* n°24, juillet - août 2000, p3-p4.

CHENU Claire, BALESSENT Jérôme, LECLERC Blaise, «Quelques avancées récentes sur la dynamique des matières organiques dans les sols », *Echo-MO* n°25, septembre - octobre 2000, p3-p4.

Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, «Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural », Vol.85, n°6, 1999.

Conseil Economique et Social, «le suivi de l'effet de serre», les éditions des Journaux officiels, 2000.

De La Farge Bertrand « Le Biogaz » édition Masson 1995

DEMUYNCK Myriam et NYNS Edmond-Jacques « Installation de biogaz en Europe, un guide pratique de la commission des Communautés Européennes » Paris 1987

GERMON Jean-Claude, *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, «Le rôle régulateur du sol dans le changement climatique » nov 98, n°35, p43 à 49.

Installation de biogaz en Europe, Energies renouvelables, recherche auprès des communautés européennes Bruxelles 1983

ITAB, *Guide des matières organiques*, Paris, 1995.

Le courrier de l'INRA, «La production de méthane dans la biosphère : le rôle des animaux d'élevage », dec 92, n°18, p65.

LINERES M., DZAKOVITCH J.L., « caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. » In: Matières organiques et agricultures, actes des Quatrièmes Journées de L'analyse de Terre (GEMAS) et Cinquième Forum de la fertilisation Raisonnée (COMIFER), Blois, 16-18/11/93, DECROUX J. et IGNAZI J.C., Ed., pp 159-168, 1993.

MEDAOUI Laurence, «Le bois ne prend pas ! », *Environnement magazine*, septembre 2000 numéro 1590, pages 37-38.

Mission interministérielle de l'Effet de Serre, «Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle », seconde édition 2000.

Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Rapport du Groupe «Agriculture, forêts, déchets », partie «Agriculture, forêts-bois », du 36 mai 1999.

MONNIER G., THEVENET G., LESAFFRE B., «Simplification du travail du sol», INRA éditions, Paris, 1991.

MORTINEZ J., GUIZIOU F., GUEUTIEU V., Cemagref de Rennes, «Emissions de méthane au cours du stockage des déjections animale».

MUSTIN Michel, *Le compost (gestion de la matière organique)*, François DUBUSC, 1987.

OCDE (1998) Ensuring Compliance with a global Climate Changes Agreement, document d'information OCDE (ENV/EPOC (98) 5), OCDE, Paris, France.

PUGET et al, « Une méthode de fonctionnement des MO particulières des sols en fonction de leur localisation dans les agrégats. » Compte rendu de l'Académie des Sciences, paris t.332, série II a, pp 965-975, 1996.

RO Claude, «Bordereau d'envoi à l'ADEME », 25 mai 1999 ; Direction de l'Agriculture et des bioénergies.

ROBIN. D. « intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de MO stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organo-minéraux. » *agronomie*, 17, pp 157-171, 1997.

SERRA-WITTLING Claire, « Valorisation de composts d'ordures ménagères en protection des cultures », Thèse soutenue le 30 juin 1995 .

VIAUX Philippe, «Une troisième voie en grande culture», ed Agridécisions, 1999.

VILAIN Lionel «A la recherche du développement soutenable», février 1994.

