

CEMAGREF

CENTRE NATIONAL DU MACHINISME AGRICOLE

DU GÉNIE RURAL, DES EAUX ET DES FORETS

ÉCHELON DU MIDI : MACHINISME AGRICOLE

AUTONOMIE ENERGETIQUE D'UN COMPLEXE
AGRICOLE DU SUD-EST AVEC LA CANNE DE PROVENCE

**ECOLE SUPÉRIEURE
D'INGÉNIEURS ET DE TECHNICIENS
POUR L'AGRICULTURE**

FONDÉE EN 1919

Rue Grande - 27100 LE VAUDREUIL

Gaëtan DEFFONTAINES

77^o Promotion

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont aidé lors de mon stage et plus particulièrement :

Armel Davenel, mon maître de stage au CEMAGREF

Jean Jacques Destenay, pour l'aide technique

Yves Lechevalier et le personnel du Grand Manusclat

Daniel Standmuller pour ses précieux conseils

Christian Mékikjian

Gaëtan Rozier

Catherine Grobet et Mireille Wallez pour la dactylographie
du mémoire,

ainsi que tout le personnel du Centre National de Machinisme
Agricole, du Génie Rural des Eaux et Forêts de Nîmes, qui a contribué,
directement ou indirectement, au bon déroulement de mon stage.

- <u>INTRODUCTION</u>	1
I - <u>STRUCTURE D'ACCUEIL</u>	
A - Historique	3
B - Les cultures	4
II - <u>LA MATIERE PREMIERE</u>	
A - La plante	
1 - <i>Ecologie</i>	6
2 - <i>Données agronomiques</i>	7
B - Conditionnement	
1 - <i>Le séchage</i>	9
2 - <i>Granulation</i>	10
C - Caractéristiques du combustible	
1 - <i>Composition de la récolte</i>	12
2 - <i>Caractéristiques du combustible canne</i>	12
3 - <i>Valeur énergétique</i>	14
III - <u>BESOINS ENERGETIQUES POUR LE COMBUSTIBLE</u>	
A - Le végétal, capteur solaire naturel	
1 - <i>Photosynthèse</i>	15
2 - <i>Facteurs limitants</i>	15
B - Rendement énergétique de la culture de la Canne de Provence	
1 - <i>Energie fossile utilisée sous forme de carburant</i>	16
2 - <i>Consommation indirecte</i>	18
C - Consommation énergétique pour le conditionnement de la récolte	
1 - <i>Le séchage</i>	19
2 - <i>La granulation</i>	21
3 - <i>Manutention pour le séchage</i>	21
IV - <u>CONSOMMATION ENERGETIQUE ET BESOIN DE BIOMASSE</u>	
A - Consommation en chaleur	
1 - <i>Le séchage de la luzerne</i>	22
2 - <i>Les serres et les locaux</i>	22
3 - <i>Le séchage de la canne</i>	23

B - Satisfaction des besoins par la biomasse	23
1 - Besoins en dehors de la période de récolte de la canne de Provence	24
2 - Besoins pendant la récolte	25
3 - Résolution du problème	25
C - Bilans énergétiques	
1 - Projet	29
2 - Autonomie énergétique pour les besoins actuels	30
3 - Equilibre actuel	32
V - <u>MISE EN PLACE DE L'INSTALLATION BIOMASSE SUR L'ANCIENNE</u>	
A - Stockage de la biomasse	
1 - Stockage de la récolte	36
2 - Silo tampon	37
B - Appareil de gazéification	37
C - Brûleurs	
1 - Sur le sécheur	38
2 - Chaudière	38
D - L'unité de déshydratation	39
E - Le matériel utilisé pour la canne	39
VI - <u>LE GAZOGENE A LIT FIXE, EN TIRAGE INVERSE ET BRULEUR ECUREUIL</u>	
A - Description du gazogène	40
1 - Alimentation en combustible	41
2 - Alimentation en air	42
3 - Refroidissement	43
4 - Injection d'eau	43
5 - Décendrage	44
6 - Dépoussiérage	45
7 - Sécurité	45
8 - Allumage	46
B - La gazéification	
1 - Principe des zones à l'intérieur de l'appareil	46
2 - Théorie	47
C - Chaudière pour chauffage des serres	
1 - Fonctionnement du brûleur	51
2 - Régulation	52
D - Brûleur du sécheur	
1 - Installation	53
2 - Réglage	54

E - Les incidents de l'installation	
1 - Le gazogène	54
2 - Le brûleur	54

VII - MESURE DU RENDEMENT ET DES PERFORMANCES DU GAZOGENE ET DES BRULEURS

A - Chaîne de mesure	
1 - La bombe calorimétrique	56
2 - Le chromatographe	58
3 - Appareil de mesure en continu de CO-CO ₂	60
4 - Mesure de la teneur en vapeur d'eau	61
5 - Mesure des débits	62
6 - Mesure des températures	64
7 - Compteur d'énergie	64
8 - Pesées	65
B - Exploitation des résultats	
1 - Energie du combustible	66
2 - Energie du gaz	66
3 - Energie de l'air de refroidissement	66
4 - Energie des cendres	66
5 - Débit énergétique de l'eau chaude	67
6 - Débit énergétique des fumées	67
C - Etude des serres	
1 - Protocole de mesure	68
2 - Etude comparative des modes de chauffage	68
3 - Mesure de la stratification	69
4 - Isotherme de surface	70
5 - Mise en marche des aérothermes	71

VIII- INTERET ECONOMIQUE DE L'OPERATION

A - Le projet	
1 - Coût de la culture	73
2 - Frais de conditionnement	74
3 - Marge brute de la culture remplacée	76
4 - Prix de seuil	76
5 - La paille	76
6 - Autres coûts entraînés par l'utilisation de la biomasse	77
7 - Total des charges supplémentaires pour le projet	78
8 - Dépenses en moins	78
B - Intérêt économique pour la situation actuelle	
1 - Séchage de la canne	79
2 - Prix de seuil	79
3 - Consommations supplémentaires	80
4 - Total des charges supplémentaires	80
5 - Achats en moins	81

C - Equilibre actuel	
1 - Besoin de biomasse "étrangère"	82
2 - Prix de revient de cette biomasse	82
3 - Total des charges supplémentaires	83
4 - Solde de l'opération	83
D - Investissements	
1 - Prix de l'équipement complet	83
2 - Annuités d'amortissement	85
E - Conclusion	87
- <u>CONCLUSION</u>	89
- <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	91
- <u>SOMMAIRE DES ANNEXES</u>	92

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les problèmes d'approvisionnement et l'accroissement du coût des énergies fossiles, ont favorisé l'étude et la promotion des énergies nouvelles et renouvelables.

Parmi celle ci, la biomasse est apparue sous un nouvel angle : la production d'énergie thermique et mécanique. C'est un convertisseur intéressant de l'énergie solaire grâce à la photosynthèse. Les " capteurs naturels" sont d'un investissement beaucoup plus faible que les capteurs physiques, permettent un stockage et sont susceptibles d'être transportés. Par ailleurs, cette matière première énergétique, contrairement à celle d'origine fossile, offre l'énorme avantage de se renouveler continuellement et de pouvoir ainsi permettre des programmes d'utilisation sans risque de pénurie pour les générations futures.

Malheureusement , l'importance de la biomasse comme source d'énergie est faible et son développement en France , comme en Europe , représentera une part marginale de la consommation : on peut estimer qu'il sera difficile d'atteindre , dans quelques années , une production équivalente à 12 ou 15 millions de tonnes de pétrole , sur le territoire national , contre 180 millions consommés .

La biomasse n'est pas un gisement considérable et ne sera pas la panacée a tous les problèmes énergétiques , si la vocation première de l'agriculture reste l'alimentation humaine . En effet , la production agricole est répartie en 3 secteurs :

- des produits végétaux ou animaux servant à l'alimentation des hommes et des animaux.
- les déchets ou sous-produits agricoles provenant de résidus inutilisés pour l'alimentation des populations et des animaux.
- des produits végétaux cultivés ou exploités pour l'utilisation industrielle autre qu'alimentaires dont une part représente les cultures énergétiques.

Dans la situation actuelle , il faut valoriser au mieux cette biomasse et prendre les produits qui ont un bilan positif pour la substitution des énergie fossiles . Pour cela , il faut étudier les différents aspects qui interviennent dans leurs transformations en énergie utilisable . Les postes sont nombreux : calcul des rendements énergétiques de la récupération ou des cultures énergétiques , rendements des appareils de transformation et seuil de rentabilité des différents investissements . Les données disponibles

concernant la biomasse sont trop souvent basées sur une approche non réaliste; en utilisant des mesures ponctuelles avec des conditions techniques optimales. Il faut voir plus loin et observer des réalisations "grandeurs natures".

C'est en fonction de ces considérations et de l'engouement général pour les énergies nouvelles qu'à été lancée, à la fin de 1979 une opération de démonstration dans le cadre de la valorisation de la biomasse. En l'occurrence, il s'agit de l'utilisation de la Canne de Provence et de sous produits agricoles pour tenter d'assurer l'autonomie énergétique d'un complexe agricole, situé dans le delta du Rhône.

Cette opération de démonstration, qui a pour objet principal de prouver la faisabilité des différentes séquences sera suivie pendant 5 ans :

- Sur le plan agronomique : par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
- Sur le plan de la mécanisation et de la production d'énergie : par le Centre National de Machinisme Agricole , du Génie Rural , des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) où j'ai effectué mon stage.

Le projet est prometteur et il est envisagé en plusieurs étapes :

- 1° temps : couverture totale des besoins de chaleur de l'exploitation, soit 87 % des besoins globaux, pour le séchage de la luzerne et le chauffage des serres et des locaux.
- 2° temps : fabrication de l'énergie électrique à partir d'un alternateur actionné par un moteur à gaz pauvre. Les besoins actuels de l'exploitation pourraient être largement couverts ce qui permet d'envisager une rétrocession à l'E.D.F.
- 3° temps : qui consisterait à satisfaire aux besoins des engins mobiles, n'est pas encore prévu mais elle est envisageable avec l'utilisation de gazogène portatif.

I- STRUCTURES D'ACCUEIL

Le domaine du Grand Manusclat où se réalise cette opération, est situé au coeur de la Camargue, à mi chemin entre Arles et le mer. Le Grand Manusclat et Boisverdun, regroupés en une seule exploitation, couvrent une superficie de 430 ha dont actuellement 330 sont cultivés. En outre, le domaine loue des terres en luzerne et encannier, soit une surface totale exploitée de 580 ha.

1 - Historique

Délaissant successivement la culture du riz, l'arboriculture et la vigne, pour cause de non rentabilité, l'entreprise a fixé son effort sur l'assolement céréale - luzerne.

En 1963, elle s'est dotée d'une installation de déshydratation et de serre florale. Les nouvelles activités ont permis un redressement financier et une complémentarité au niveau de l'emploi. Ainsi, en pleine période de dépeuplement et d'exode rural, elle a pu maintenir un potentiel humain dense, dans sa zone d'influence.

Engagée depuis 1969 dans le programme de recherches sur la canne de provence, en vue de son utilisation comme matière première dans l'industrie des pâtes à papier, l'entreprise a participé au programme pépinière et planté 30 ha.

Cette opération fut lancée à la suite d'une action concertée, par la DGRST. D'importantes études furent réalisées et avaient permis de mettre en évidence l'intérêt agronomique, industriel et économique de cette plante. Dans le même temps, certains agriculteurs, membres du syndicat des producteurs de canne de Provence, ont procédé à la mise en place d'environ 200 ha de pépinière, en vue de la plantation ultérieure d'une zone pilote de 2 à 3000 ha.

C'est alors que, sans argument convaincant et malgré l'évolution du déficit de notre balance commerciale des bois et dérivés, les partenaires industriels ont abandonné le projet, stoppant ainsi la promotion de la canne de Provence à des fins papetières.

Ainsi, considérant l'importance des données acquises, l'existence de pépinière, de parcelles immédiatement exploitables et d'un autre côté, la consommation énergétique importante du Grand Manusclat qui dispose d'un équipement complet de récolte, libre au moment opportun, il a été envisagé d'utiliser la canne de Provence dans le cadre d'une opération de mise en valeur énergétique.

Cette poursuite de l'opération, imprévisible au départ de l'action, permet aux chercheurs, aux constructeurs et aux utilisateurs potentiels de trouver réunies des conditions tout à fait exceptionnelles d'études, d'applications et de démonstrations. Toute fois, l'exploitation est contrainte de réaliser un équilibre comptable ce qui n'est pas le souci des "étrangers". Ceci provoque un manque à gagner lors de leurs essais ou des contre-temps que ne sont pas compensés financièrement et risque de provoquer des problèmes de trésorerie préjudiciables à l'avenir du mas.

2 - Les Cultures

a) Les grandes cultures

Depuis plusieurs années, l'assolement varie peu, sauf avec l'extension des caniers. Pour 1981, la répartition est la suivante :

- 118 ha de blé
- 137 ha de luzerne
- 33 ha de canne de provence
- 15 ha avec 1/3 canne et 2/3 maïs (entre les rangs nouvellement plantés)

D'autre part, 200 ha de luzerne et 50 ha de canne sont loués.

b) Les cultures florales

Cette production est effectuée sous des serres de verre, réparties en 4 blocs : 2 de rosiers et 2 de strélisias

- 3620 m² de rosiers
- 3380 m² de strélisias

c) Le parcellaire

Le parcellaire du domaine est très groupé (voir annexe) ce qui permet un gain de temps appréciable et une dépense énergétique plus faible pour les transports. Nous mettrons en évidence ces avantages par la suite.

d) Projet

Le plan de culture du projet prévoit un accroissement des surfaces de luzerne, de Canne de Provence et des serres. La répartition entre les différentes cultures seraient les suivantes :

- 130 ha de céréale
- 130 ha de luzerne + 270 ha en location
- 100 ha de canne de provence + le complément en location, nous le déterminerons plus loin.

3 - Descriptif technique

a) L'usine de déshydratation avant la biomasse

. Description du matériel

Sécheur de marque Promill - Type SET 5000

Capacité théorique d'évaporation : 5000 litres d'eau à l'heure

Brûleur de même marque utilisant du fuel lourd n° 2 d'une puissance de 4200 thermies/heure (consommation théorique de fuel à l'heure).

. Améliorations déjà apportées dans le cadre des économies d'énergie :

Dans un premier temps, l'entreprise a voulu tenir compte des informations recueillies dans le cadre du Syndicat des Déshydratateurs par l'Agence aux Economies d'Energies.

Au cours de l'hiver 1977-78, elle a effectué des modifications permettant de fonctionner à pleine capacité, afin d'améliorer le taux de CO₂ dans les gaz d'échappement. Pour cela, les performances des ateliers situés en aval du sécheur qui, visiblement, représentaient un facteur limitant, ont été corrigés :

- Atelier de broyage : modification de l'orientation et de la puissance du système d'évacuation des farines.
- Atelier de granulation : adjonction d'une nouvelle presse à agglomérer plus performante.

. Améliorations constatées

Pour le même temps de fonctionnement en 1977 et 78, la production est passée de 3012 tonnes de farine de luzerne déshydratée à 3872 tonnes, soit une amélioration de 28,5 %. La consommation était de 730 Kcal/kg d'eau évaporée.

- Modifications envisagées :
 - recyclage des fumées
 - utilisation des deux presses
 - meilleur calorifugeage du tambour rotatif
- Ceci permettra une consommation de 690 kcal/kg d'eau évaporée.

b) Installation de chauffage des serres

L'installation d'origine, au fuel-oil domestique, a été abandonnée en 1975, en raison de son mauvais rendement énergétique et remplacé par un ensemble d'échangeurs à air chaud, répartis dans les différentes serres et alimentés à partir de 6 brûleurs à fuel domestique.

c) Equipement mobile

Pour mener à bien ces activités, le domaine dispose, outre les équipements courants (tracteurs, remorques ...), du matériel de récolte propre à la luzerne et utilisé également pour la canne.

- 1 récolteuse - hacheuse Promill, type Arollon, utilisée principalement pour la canne, munie d'une tête de récolte CNEEMA
- 3 récolteuses - hacheuses New Hollande - type 1880-1890-1895 munies de barre de coupe luzerne.

Les possibilités de récolte :

- en canne de Provence, chacune de ces machines peut récolter 1 ha en 2 ou 3 heures. Pour l'instant, 1 seule machine suffit mais, quand le projet sera réalisé, 3 machines seront nécessaires.
- en luzerne, chaque machine peut récolter 1 ha à l'heure, ce qui permet d'alimenter l'usine avec un bon rythme.

II LA MATIERE PREMIERE

A - La Plante

1 - Ecologie

Arundo Donax semble exister à l'état spontané ou subspontané dans la plupart des régions chaudes et tempérées du monde. Son origine, ainsi que l'époque de son introduction dans le bassin méditerranéen, où elle est très répandue, sont mal connues. Elle est abondante dans le sud de la France, surtout sur les bords de la Méditerranée : ses peuplements diminuent progressivement vers le Nord, pour disparaître au niveau de Valence et d'une manière plus générale, au dessus du 46° parallèle. Elle se rencontre encore dans l'extrême Sud Ouest, près de l'Atlantique.

Sa plante se présente sous forme de touffe dont les tiges dressées et rigides peuvent atteindre cinq à six mètres de hauteur et deux à trois centimètres de diamètre. Son appareil racinaire vivace colonise en permanence le sol grâce à ses bourgeons qui perpétuent la plante. Ces bourgeons donnent des tiges dont les premières sortent de terre fin Mars (dans le Sud Est). Puis apparaissent en permanence de nouveaux rejets dont l'élongation respective est variable. Toute croissance active cesse fin Septembre époque à laquelle se fait la mise à fleur.

Mais en tous milieux, et sans qu'on en connaisse la cause exacte, cette mise à fleur n'est pas régulière chaque année, sur toutes les tiges. De plus, la canne de Provence ne fructifie jamais en France : c'est un hybride.

La coupe des tiges se fait, normalement l'hiver, de décembre à mars.

Au Grand Manusclat, la récolte a commencé début février 1981 ce qui permet d'obtenir une plante plus sèche mais avec une baisse du rendement, par perte de feuilles.

Si les tiges ne sont pas récoltées, la plupart de leurs bourgeons axillaires entrent en activité, au printemps suivant, pour donner des ramifications qui s'allongent en été. Ces cannes de deux ans, dont la taille ne varie pas, ne fleurissent jamais, même si elles ne s'étaient pas mise à fleur l'année précédente. La plupart meurent au cours de l'hiver : certaines cependant, émettent de nouveaux rejets à partir des bourgeons et de leurs ramifications pour finalement mourir avec le retour des froids hivernaux.

Mais, pendant le second cycle végétatif, la deuxième année, de nouvelles tiges apparaissent au milieu des cannes de deux ans. Comme les précédentes, elles croissent, fleurissent ou non, émettent des ramifications pendant un ou deux ans si elles ne sont pas coupées, et meurent à leur tour.

Il est ainsi, difficile de préciser le cycle évolutif normal de la partie aérienne, tandis que la durée de vie de l'appareil souterrain semble indéfinie.

L'espèce paraît exigeante en chaleur, lumière et humidité : selon un vieux dicton provençal "La canne de provence doit avoir la tête au soleil et les pieds dans l'eau". Les canniers sauvages sont le plus souvent situés le long des ruisseaux, rivières ou canaux et aux bords des étangs et des marais. Par contre, les terrains marécageux ne lui conviennent pas : si les racines ont besoin d'eau, les rhizomes situés dans les vingt premiers centimètres du sol, sont très sensibles à l'asphyxie provoquée par une submersion prolongée.

Les terres alluvionnaires lui conviennent bien alors que les sols compacts, lourds et imperméables sont à proscrire. De même, les terrains salés ou saumâtres sont à rejeter, cette espèce étant peu tolérante au sel. Ainsi contrairement aux idées reçues, la canne de provence ne pourra pas valoriser toutes les terres laissées en friche, en Camargue.

Les exigences de la canne sur la nature chimique du sol indiquent le besoin d'un taux de matière organique élevé, d'un Ph neutre ou légèrement alcalin lié à une teneur en chaux et en potasse importante.

2 - Données agronomiques

Tous les travaux d'ordre agronomique déjà réalisés visent à l'obtention d'une productivité importante dans les meilleures conditions économiques et, depuis peu, énergétiques.

a) Aire de culture

Il est fort probable, tout au moins pour les écotypes méditerranéens, que l'aire de culture possible de la canne corresponde à l'aire actuelle des peuplements spontanés. L'espèce est exigeante en chaleur et en lumière : des températures élevées sont nécessaires au cours du Printemps et de l'été, pour favoriser la croissance rapide des tiges et des rhizomes. De même, la plante est très sensible aux gelées tardives de printemps, pour les parties qui sont en terre comme les bourgeons axillaires et les jeunes pousses.

C'est finalement dans une zone allant des Pyrénées Orientales à l'Italie, le long de la Méditerranée, sur une profondeur de 100 à 200 km, que devrait se situer l'aire de culture des types locaux de *Arundo Donax*.

b) Préparation des sols avant plantation

Un défoncement en profondeur de 50 à 70 cm (si le sol le permet) doit être réalisé à la fin de l'été ou au début de l'automne alors que le sol est profondément desséché. Il permet d'éclater le sol ce qui favorise la croissance du système racinaire.

Dans certains cas, comme au Grand Manusclat et pour certaines parcelles seulement, la pente existante doit être changée pour l'irrigation : la ligne de canne forme des buttes infranchissables par l'eau.

La suite des opérations de travail du sol, est commune aux autres cultures avec, en plus, épandage des fumures azotées et de fond et de fumier si le taux de matière organique est faible.

c) Fertilisation

La canne de provence n'ayant pratiquement pas été cultivée de façon rationnelle, nulle part dans le monde, les données concernant sa nutrition minérale sont peu nombreuses. Les observations de l'INRA effectuées sur la relation liant le rendement au niveau de fertilisation et le calcul des exportations annuelles lors de la récolte ont permis d'établir des ordres de grandeur.

Ainsi, après quinze ans d'expérimentation sur la nutrition azotée, la dose prescrite est de 200 - 300 unités par ha pour un rendement escompté de 20 à 25 tonnes de matière sèche/ hectare.

La canne a une bonne réponse à la fumure azotée jusqu'à un optimum de 280 U/ha pour une production de 25 tonnes de matière sèche. L'épandage de la fumure peut être réalisé en un seul passage sauf si la culture est irriguée où le fractionnement est préférable, de Mars à Juin.

Pour la potasse et l'acide phosphorique, les doses présentées sont de 250 à 300 unités/ha de K₂O (sachant que les exportations des parties aériennes sont de 13 unités/tonne de MS) et de 150 unités/ha de P₂O₅ (peu exporté, quelques unités).

Toutefois, l'épandage des cendres issues du gazogène seront suffisantes pour compenser les exportations.

d) Plantation

Exploitée annuellement, la culture est pérenne et sa durée de vie théoriquement illimitée. La fruitification n'ayant jamais lieu, l'installation de nouvelles parcelles ne peut se faire que par voie végétative.

Les plantations peuvent se faire soit avec des éclats de souche ou de rhizome, soit avec des tiges entières. Avec la première technique, les travaux sont effectués normalement en mars, tandis qu'il faut éviter les grands froids pour la seconde, c'est à dire, planter avant décembre avec des tiges de deux ans, qui comportent un plus grand nombre de bourgeons.

L'écartement séparant deux lignes doit être raisonné : une souche différencie en permanence de nouvelles tiges souterraines qui colonisent le sol. La vitesse de progression moyenne, dans un milieu favorable est de 20-30 cm par an, dans l'interligne et la zone originelle de la souche perd une grande partie de sa productivité après 3 ou 4 ans.

Le rendement devient maximum quand le sol est en grande partie colonisé mais, avec l'âge, les souches se lignifient, meurent et créent un obstacle pour le développement de nouveau rhizomes, faisant ainsi chuter le rendement. A ce stade, une régénération s'impose, éliminant la zone improductive et créant l'inversement des bandes, par rapport aux plantations initiales.

Le choix du type de plantation dépend donc de la rapidité d'obtention du rendement maximal (tout en gardant un régime élevé pendant une longue période), et de la fréquence des régénérations envisagées.

A la suite d'un compromis entre les différents facteurs, 2,5 mètres d'interligne semble satisfaisant (après essais étagés de 0,5 à 3 m) quand la canne est plantée seule.

Au Grand Manusclat, vingt hectares furent plantés cette année, avec des éclats de souche et 3,5 m d'interligne. Du maïs sera semé entre les lignes pour rentabiliser cette parcelle et ceci pendant les 2 premières années de plantation.

e) Désherbage chimique

Il s'impose pour les deux premières années d'implantation. Il évite la concurrence avec les adventices quand la canne de provence est encore sensible. Après cette période, la végétation exubérante des cannes étouffe les autres plantes.

Le traitement est fait à la Simazine (3-5 kg/ha) ou Simazine (1,5-4 kg/ha) + atrozine (1,5 à 4 kg). Il est effectué aussitôt après l'enfouissement des boutures ou des rhizomes.

f) Travaux annuels d'entretien

La première année, une à deux façons superficielles sont conseillées, entre les rangs. Par la suite, les interventions se réduiront à l'épandage de la fumure minérale en mars et à l'irrigation selon les conditions pedo-climatiques.

g) Régénération

Elle est effectuée par deux passages de rotavator qui détruisent les souches initiales, limitant ainsi la surface colonisée et facilitant le travail de récolte. Ce travail revient tous les 3 - 4 ans sur 30 % de la surface pour garder les mêmes interlignes, en détruisant un seul côté de la ligne (ce qui déplace la zone des souches productives).

h) Récolte

- Epoque : la plante peut être récoltée dès que les substances de réserves ont finies de migrer dans les rhizomes, pour permettre une reprise en végétation vigoureuse, au printemps suivant. En général, dès le 15 décembre, la coupe peut commencer. Elle pourra se poursuivre jusqu'au 15 mars, date de sortie des nouvelles tiges.

- Mode : La canne de provence ne peut être coupée qu'une seule fois dans l'année. Le seul moyen de la conserver en bonne condition, sans trop de perte de matière sèche est la déshydratation. Ceci influe sur le mode de récolte : les grands tronçons type "récolte de canne à sucre" ne suffisaient pas, le choix s'est arrêté pour les faucheuses-ensileuses. Les têtes de récolte existantes pour le maïs ou la luzerne n'étant pas adaptées le CNEEMA en a réalisé une. Son principe ressemble à la tête de récolte pour la canne à sucre, avec deux disques de grands diamètres horizontaux, qui coupent au ras du sol. Les tiges sont ensuite hachées en tronçons de cinq centimètres maximum, puis évacués par une remorque jusqu'à l'usine.

i) Rendement

Faible au terme de la première année (3 à 5 t/ha en moyenne) ne justifie pas une coupe. Le rendement croît avec la colonisation du sol. Dès la deuxième année, les quinze tonnes de matières sèches sont atteintes et à partir de la 4^e année, il tend à se stabiliser au dessus de vingt tonnes.

Sur dix ans d'exploitation, pour un espacement de deux mètres entre les lignes et dans des terres normalement fertiles et fraîches, on peut escompter un rendement moyen de vingt tonnes de matière sèche par hectare et par an. Cette production est fournie par le clone local Villeroy. Une collecte de souches d'origine mondiale a été observée à Montpellier, dans les mêmes conditions de milieu. Certaines ont produit 30 % de plus que le témoin, ce qui permet d'espérer une progression de la productivité et d'atteindre 25 tonnes par an de moyenne par hectare (annexe 3)

B - Conditionnement

A fin d'étaler la période d'utilisation de la canne, il est indispensable de stabiliser le produit pour le stockage. Les divers essais ont montré que les méthodes chimiques et biologiques étaient inadaptées, seul le procédé physique, par déshydratation, était acceptable. Il faut ramener le taux d'humidité de 55 % à 15 % d'eau. Cette opération est effectuée dans le sécheur prévu pour la luzerne.

Les tronçons des tiges sont ensuite stockés à l'extérieur, sur une aire bétonnée. Les essais menés en 1974-75 avaient déterminé l'humidité seuil, pour la conservation, à 15 %. Les pertes, à ce niveau, sont inférieures à 2 % sur 5 mois.

Les feuilles, une fois séparées des tiges, sont granulées dans une presse à filière et stockées dans les silos à luzerne, libre à cette époque.

Avec ce système de conservation séparée, l'utilisation des tronçons devancera celle des feuilles et les pertes engendrées par le stockage à l'air libre aura une faible incidence.

1) Le séchage

Comme nous l'avons vu au chapitre I, la capacité d'évaporation du sécheur est de 5000 l/heure, ce qui correspond au traitement d'environ 4,600 kg de matière sèche à l'heure, pour des copeaux ramenés à 15 % et des feuilles à 4 % (1,08 kg d'eau/kg de matière sèche) ou 5.240 kg pour des copeaux à 25 % et des feuilles à 7 % (0,95 kg d'eau/kg de M.S). Mais ces débits théoriques sont limités par l'écluse A (voir annexe) : son débit normal est de 40 m³/H, la densité du produit sec étant de 110kg/m³, le débit est réduit à 4,44 tonnes de matière avec 15 ou 25 % d'humidité.

L'écluse B qui ne reçoit que les feuilles a un débit pratique de 17 m³, ce qui suffit largement aux feuilles.

Le débit réel est donc de 3,9 tonnes de matière sèche à l'heure, inférieur à la capacité d'évaporation théorique (ceci pour 15 % d'eau). Il serait intéressant de changer la vanne A.

. Modification pour le séchage de la canne de Provence.

L'installation était prévue pour le séchage des fourrages et certaines modifications permettent de satisfaire pleinement au conditionnement de la canne de provence :

- Positionnement du volet du bac d'épierrage sur "vidange du bac"
- Installation d'un tapis de dégagement sous cette trape.
- Installation d'un convoyage pneumatique, en haut de tapis pour les copeaux.
- Montage d'une grille plus fine sur le broyeur, 6 mm.
- Montage d'une filiaire plus compressante (0,6 cm de diamètre au lieu de 0,8)
- Montage d'une alimentation en eau pour humidifier la farine des feuilles.

. Fonctionnement d'ensemble

La canne suit le même chemin que la luzerne jusqu'au ventilateur principal puis les feuilles sont séparées des tiges par densité : dans la chute de la matière de l'écluse A au tapis de dégagement, les feuilles étant fluidisées par l'air à une vitesse plus faible, elles sont aspirées par le broyeur. Les tronçons tombent sur le tapis et sont stockés. Les feuilles continuent le circuit "luzerne" : broyées et pressées.

Effeuillage : les résultats sont acceptables pour un débit moyen mais, il est à craindre que lorsqu' l'unité de séchage marchera à plein, la surface de séparation ne sera plus assez grande (voir installation et mesure en annexe).

Pour l'instant, les feuilles et particules légères ne représentent que 2 % (en moyenne) dans les copeaux, en poids, ce qui suffit à une bonne utilisation dans le gazogène.

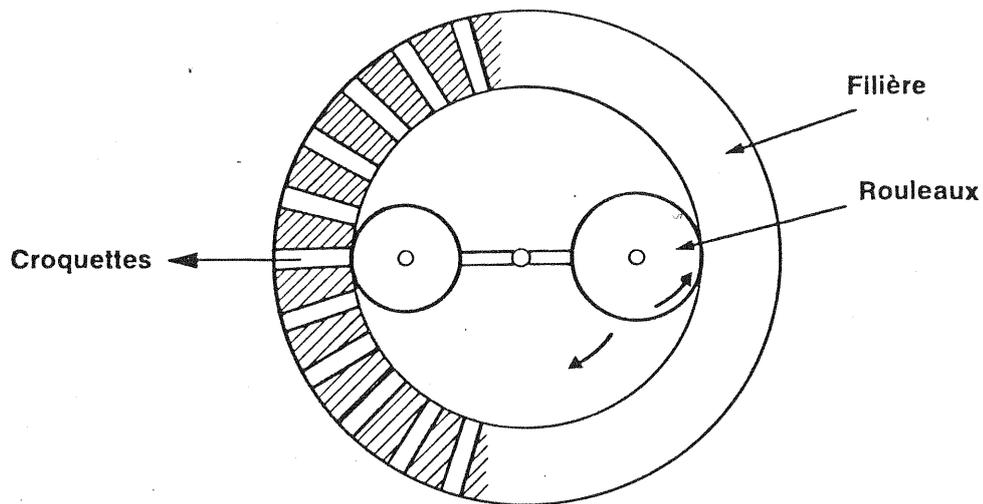
2) Granulation

Cet hiver, les essais ont eu lieu sur la granulation de la farine de feuille. La seule transformation énergétique envisagée actuellement étant la gazeification à lit fixe, la granulométrie du combustible doit être suffisante pour permettre le passage de l'air et du gaz.

Les facteurs intervenant sur la qualité du granulé ont été étudié : la compression, l'humidité et la finesse de la farine. De ces essais, on retiendra :

- 7 à 8 % d'humidité (seuil le plus haut, ne pouvant pas être minoré), tandis que l'on dispose de farine de 8 à 3 % d'humidité
- une filière avec un diamètre de 0,6 cm
- une grille de broyeur de 6 mm.

Parallèlement à ces paramètres, la presse utilisée réclame un débit minimum de 600 kg par heure, sinon une part importante n'était pas granulée.



Humidification : elle est assurée par une injection d'eau à l'entrée d'un mélangeur, situé en amont de la presse. Le temps de mélange est très court, inférieur à 10 secondes, ce qui ne permet pas une pénétration suffisante. Le temps de rétention devrait être allongé pour éviter une grande fragilité des granulés en sorti de filière. Cette opération peut être réalisée par une légère modification d'une mélangeuse adjacente à la presse. Le temps optimal se situerait au delà de 15 minutes.

Usure de la filière : cette farine est plus abrasive que la luzerne, de part sa teneur importante en silice (étude réalisée pour la fabrication de pâte à papier). Les conséquences pour la granulation sont :

- une élévation de la température de la filière, de 60-90° C contre 30 à 40° C pour la luzerne
- une usure sous doute plus rapide mais, pour l'instant, aucune détérioration importante n'est à noter.

Tenue des granulés : les granulés sont de qualités variables mais généralement correctes. Une bonne proportion se fractionne lors du convoyage, en sortie de presse mais, lorsqu'ils sont refroidis, ils deviennent très résistants (sans doute, quand l'eau est bien assimilée). La poussière est triée et réintégrée dans le circuit de farine. Dans l'ensemble, la technique est au point, seul son coût pourra la discréditer (voir annexe 8).

Avenir : il est envisagé d'utiliser une presse à piston où les feuilles seraient compactées avec un liant, pour l'obtention des briquettes. Elles seraient suffisantes pour la gazéification et seraient d'un coût de revient au kg plus faible. De tels matériels sont déjà

utilisés pour les fourrages en brin long.

C - Caractéristiques du combustible

1) Composition de la récolte

- . Tiges : 75 % du poids de produit sec (copeaux d'une longueur moyenne de 4 cm, voir histogramme annexe 9-10)
- . Feuilles : 25 % du poids du produit sec.

Cette composition varie avec l'âge de la plantation, la date de récolte, les conditions climatiques (une grande partie de feuilles tombe avec le mistral) et enfin de la production. On peut estimer ces variations de 10 à 35 % du poids sec de la canne récoltée.

- Densité

	: Humidité	: densité (kg/m ³)		: volume d'une tonne en m ³	
		1	2	1	2
: - Produit brut	: à 55 %	: 170	: 220	: 6	: 4,5
: - Tiges (copeaux)	: 15 %	: 170	: 200	: 6	: 5
	: 25 %	: 200	: 240	: 5	: 4
: - Feuilles	: 3 à 8 %	: 60		: 16,5	
: - Granulé	: 7 %	: 680	: 680	: 1,5	: 1,5

Pour la densité et le volume d'une tonne, la colonne 1 représente le produit non tassé et la 2 en le tassant à la main avant la mesure. Ces chiffres résultent de la mesure sur 80 litres.

On peut remarquer les densités relativement faible de la canne sous ses différentes formes, exépté pour le granulé. Ceci rend son transport difficile et couteux sur des grandes distances. Son utilisation doit rester proche de la zone de production.

2) Caractéristique du combustible canne.

- Composition :

L'analyse élémentaire ne fait apparaître que de faibles variations d'un produit végétal à l'autre, aux taux de cendre près. La matière organique a la composition moyenne suivante (en sec) :

- carbone 50 %
- hydrogène 6 %
- oxygène 44 % (source CNEEMA)

Pour la canne de provence, nous allons considérer les mêmes valeurs. Pour plus de sureté, nous avons demandé au CEMAGREF d'Antony de déterminer avec précision le pourcentage d'hydrogène. Ce chiffre est important pour la détermination du Pci, il est de ^{5,6} % .

Il est également intéressant de connaître le taux de cendre pour prévoir la cadence de décentrage du gazogène. Ce taux est de :

- 5,59 % pour les feuilles
- 3,28 % pour les tiges

- Matières volatiles :

L'indice de matières volatiles est le pourcentage en poids perdu par le combustible, par un chauffage à plus de 250°. Pour les matériaux ligno-cellulosiques, ce pourcentage est en moyenne de 80 % ce qui influence fortement la technologie de transformation.

Il importe à ce niveau d'insister sur le fait que le dégagement de matières volatiles n'est pas maîtrisable par des moyens de régulation et n'est régi que par les lois du transfert de chaleur. En ce qui concerne la gazéification, un bon gazogène à produits végétaux devra pouvoir éliminer complètement les goudrons et les pyroligneux issus de ces matières. En effet, leur présence dans les gaz produits entraîne :

- une perte de rendement, car ils sont riches en carbone
- dans le cas d'une utilisation dans un moteur, il provoque une pollution des eaux de lavage du gaz (phénols) et des troubles de fonctionnement du moteur (bouchage et corrosion des conduits, collage des soupapes...)

- Pouvoir calorifique :

Compte tenu de la finalité de cette culture, la connaissance de son pouvoir calorifique est fondamentale.

Le pouvoir calorifique d'un corps est sa chaleur de combustion rapporté à son unité de masse (le kg). Pour les gaz cependant, cette mesure est souvent ramenée au m³ normal (comme nous le verrons pour le gaz pauvre).

Le pouvoir calorifique des produits naturels se définit comme le résultat d'une mesure calorimétrique, à l'aide d'une bombe calorimétrique. Cette mesure se fait en pratiquant par l'allumage électrique, la combustion complète d'un à deux grammes de combustible dans une atmosphère d'O₂

pure sous pression de 30 bars.

Après plusieurs mesures, nous avons un PCI moyen (pouvoir calorifique inférieur) :

- tiges à 15 % d'humidité	4144 hcal/kg de matière sèche
à 25 % d'humidité	4084 hcal/kg de matière sèche
- 3/4 tige (15 % H ₂ O)/+ 1/4 feuille (7 % H ₂ O)	4118 hcal/kg de matière sèche
- 3/4 tige (25 % H ₂ O) + 1/4 feuille (7 % H ₂ O)	4074 hcal/kg de matière sèche
- feuilles à 7 % d'humidité	4042 hcal/kg de matière sèche

La méthode et les résultats de ces mesures sont répertoriées en annexe.

Les autres produits disponibles pour la gazéification ont fait l'objet des mêmes mesures

3) Valeur énergétique

En considérant un rendement moyen de 20 tonnes de matières sèches par hectare et 4118 thermies par tonne, la valeur énergétique globale de la biomasse ressort à :

$$4118 \times 20 = 82360 \text{ th/ha (8,236 tep/ha)}$$

Ce chiffre est la production brute par hectare, sans tenir compte des consommations intermédiaires de la culture, du séchage et du rendement des filières thermochimiques.

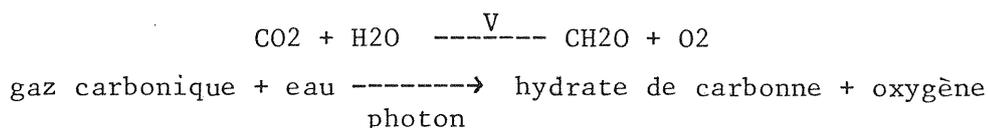
La production de 8,24 tep (terme équivalent pétrole) par hectare est de beaucoup supérieur aux productions des végétaux de Camargue et des autres régions françaises. (annexe 11) Seul les zones tropicales et équatoriales peuvent rivaliser, à ce niveau et la dénomination de culture énergétique est vraiment fondée. Les seuls végétaux qui ont toujours été utilisés pour leur énergie, le bois, ne produisent pas plus de 5 tonnes de matière sèche quand ils sont bien exploités soit 2,4 tep/ha et par an.

Dans l'état actuel des connaissances seules les plantes aquatiques cultivées dans les zones méditerranéennes (jacinthe d'eau...) pourront produire plus.

III - BESOINS ENERGETIQUES POUR LE COMBUSTIBLE

A - Le végétal, capteur solaire naturel

1) Les plantes, les algues, les végétaux de manière générale, accumulent dans leur cellules de l'énergie solaire sous forme de liaisons chimiques carbone-hydrogène. La photosynthèse réalise la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique selon la formule générale :



Le mécanisme essentiel conduit à une accumulation de la matière végétale qui constitue ce que l'on appelle la biomasse. Les végétaux réalisent donc, en fait, la captation de l'énergie solaire qu'ils reçoivent, et son stockage. Ce sont de véritables convertisseurs chimiques dont le rendement peut néanmoins paraître médiocre comparé à celui des capteurs physiques (voir annexe 12):

- Le tiers environ du rayonnement solaire reçu est réellement impliqué dans le processus de bioconversion (seule la partie visible du spectre est utile et la réflexion et la transmission au sol réduisent d'autant l'absorption par le feuillage).

- La conversion photochimique des végétaux supérieurs et des algues met en jeu huit photons pour réduire une mole de CO₂; le rendement de conversion ne dépasse pas 30 % à l'échelle cellulaire.

- A l'échelle de la culture, le rendement théorique maximum de la production photosynthétique de la biomasse n'est plus que de 6 % (Source COMES).

2) L'existence de facteurs limitants naturels conduit à constater des rendements réels souvent très inférieurs :

- à l'échelle de l'année, le rendement ne dépasse pas 2 % dans le cas de la canne à sucre. Il est souvent compris entre 0,4 et 1 % pour les cultures de nos régions et inférieur à 0,2 % pour nos forêts tempérées.

- avec un flux moyen pour la France de 1100 tep/ha et par an, le rendement pour la canne de Provence est voisin de 0,76 % pour les parties aériennes récoltées.

En milieu terrestre, la sécheresse et les basses températures sont les principaux facteurs limitants de la production photosynthétique, les co-extrêmes étant les déserts tropicaux ou les régions polaires.

B - Rendement énergétique de la culture de la Canne de Provence.

Comme nous l'avons vu dans la partie concernant la culture de la canne, cette plante ne pousse pas à l'état sauvage mais nécessite un certain nombre d'opérations. Ces travaux sont effectués pour une grande part grâce aux produits pétroliers plus ou moins directement.

1) Energie fossile utilisée sous forme de carburant.

Pour déterminer les consommations des engins à moteur, et compte tenu de la difficulté de mesurer chaque remplissage des réservoirs des tracteurs et de la récolteuse, j'ai considéré des consommations moyennes par rapport à la puissance du moteur et à la pénibilité du travail (sauf pour la récolteuse où la consommation fut réellement mesurée et ramenée à l'heure de travail). Ces chiffres sont issus des études réalisées en France et à l'étranger (voir annexe 13-14). A partir de cette consommation horaire, j'ai établi la consommation par hectare, le temps étant réellement mesuré sur le champ ou résultant d'informations données par l'utilisateur.

. Plantation : les différentes phases de mise en place de la culture commencent avec le terrassement des parcelles et se terminent au traitement chimique, soit par hectare :

- terrassement, 7 heures d'engin à 20l/h	140
- labour profond, 4 heures à 10l/h	40
- épandage des fumures	10
- discage, 2 heures à 8 l/h	16
- ouverture et fermeture de sillon, 2 heures à 7 l/h	14
- hersage, 1 heure à 8 l/h	8
- rotobèche pour déterrage de rhizome, 1/4 d'heure	2
- plantation, 3 heures à 5 l/h	15
- désherbage, 1/2 heure à 6 l/h	3

248 litres.

Ces 248 litres de fuel représentent :

$$248 \times 8475 = 2101862 \text{ kcal/ha}$$

. Entretien

Ces opérations sont restreintes :

- épandage de fumure, l'azote tous les ans, 1/2 heure à 6l	3
- régénération : une tous les trois ans qui s'effectue par un passage de rotobèche, 1 heure par ha à 9 l/h	3
	<hr/>
	6 litres

9 litres du fuel domestique : 50944 kcal/ha

. Récolte : il faut considérer deux consommations, celle de la récolteuse qui reste sur le champ et le transport par remorque agricole vers la ferme.

- récolte, 2 heures 15 par hectare à 31 l/heure	70
- débardage	23
	<hr/>
	93

soit 788198 kcal/ha

Ces chiffres sont élevés mais ils résultent de plusieurs facteurs négatifs :

Pour la récolte, l'engin utilisé doit satisfaire au broyage en petits tronçons (tiges résistantes) et aux conditions hivernales de récolte. Le terrain n'ayant pas une bonne portance et l'automotrice tractant une remorque à quatre roues, l'effort est important.

Le débardage consiste au trafic des remorques : le tracteur amenant les vides et prenant les pleines. Les canniers sont installés sur le mas à 600 m de la ferme en moyenne et à huit kilomètres pour les autres. J'ai pris comme poids moyen par chargement de 4,9 tonnes soit 9 voyages par hectare. Il faut donc 4 l par hectare pour le mas mais 42 l pour les canniers loués .

. Irrigation : elle varie naturellement suivant les années mais 2 passages, de 15 mm chacun, semble la dose moyenne.

Grâce au dispositif disponible, la dépense d'énergie est faible : il suffit de prendre de l'eau dans un canal pour l'introduire dans le circuit qui convoie l'eau par gravité. La station de pompage à un débit de 500 l/s, pour une puissance de 50 kw. Il faut 23,9 kcal/m³ soit 7167 kcal/ha. La pompe est actionnée par un moteur électrique.

2) Consommation indirecte.

Elle concerne l'énergie consommée pour la fabrication de l'azote (la fumure de fond, en PK et en minéraux, est assurée par l'épandage des cendres), les herbicides, la construction et l'entretien du matériel :

- azote, 200 unités par ha x 18160 kcal/u	3632000 kcal
- herbicide : 2,5 kg de simazine + 2,5 atrazine à 26110 kcal/kg, 1 fois pour 10 ans	13055 kcal
- matériel : c'est le poste le plus délicat à prendre en compte. Les chiffres que je vais donner sont une adaptation des études réalisées (annexe 13) qui permettent de la déterminer en fonction du poids des engins. J'ai simplifié les paramètres en considérant qu'un tracteur pesait 4500 kg (avec l'équipement) et fonctionnait pendant 7000 heures et 5000 kg pour l'ensileuse avec 5000 heures. Si l'on prend comme besoin $20,6 \times 10^3$ kcal/kg d'équipement pour la construction et l'entretien et comme temps de travaux 7 h 30 pour le tracteur et 2 h 15 pour la récolte, il faut	145671 kcal
	<hr/>
	3790726

soit 3790726 kcal/ha

Conclusion :

La consommation énergétique pour la culture de la canne de provence est de 4847×10^3 kcal/ha et la place dans la moyenne des autres cultures pratiquées en France (annexe 15) .

Le poste le plus gourmand est de très loin la fabrication de l'azote, suivie par la consommation directe du fuel pour la récolte. Il est difficile de réduire ces deux postes, la canne ayant une très bonne réaction à l'azote et le type de récolte actuel étant, pour l'instant, le plus adapté.

Ainsi, l'énergie nette disponible rendue à la ferme est de :

$$8,2360 \times 10^3 - 4847 \times 10^3 = 77513 \times 10^3 \text{ kcal}$$

soit 7,75 tep/ha

C - Consommation énergétique pour le conditionnement
de la récolte

Comme nous l'avons vu, il faut sécher et granuler la canne récoltée, pour son utilisation dans le gazogène.

1) Le Séchage

Il englobe deux consommations bien distinctes : en chaleur, pour l'évaporation de l'eau et un électricité pour satisfaire à la demande des moteurs électriques de l'installation. Pour déterminer ces grandeurs nous disposons, d'une part du rendement du brûleur, basé sur la consommation ultérieure de fuel et compte tenu des améliorations apportées (ou en voie de l'être) et d'autre part, d'un compteur électrique spécifique à l'installation, mis en place pour les mesures.

. Chaleur : nous avons deux cas de figure :

- le séchage des tronçons à 15 % d'humidité, accompagnés des feuilles à 4 % d'humidité (qu'il faut ramener à 7 % pour la granulation), pour l'utilisation en dehors de la période de récolte des cannes.

Il faut évaporer 1,079 tonne d'eau par tonne de matière sèche, avec une humidité initiale de 55 %. Le rendement du sécheur étant de 690 kcal/kg d'eau, il faut :

$$1,073 \times 690 = 744,8 \text{ th/t de M.S}$$

Le PCI par tonne étant de 4118 th, l'énergie nécessaire ou stockage représente 18 % de l'énergie du produit.

- le séchage des tronçons à 25 % d'humidité et des feuilles à 7 % d'humidité, utilisé pour le séchage de la canne et le chauffage des serres pendant la récolte.

Il faut évaporer 0,935 tonne d'eau par tonne de matière sèche. Dans les mêmes conditions que précédemment, la consommation est de :

$$0,935 \times 690 = 657,8 \text{ th/t de M.S}$$

Le PCI étant de 4074 kcal/kg de M.S, l'énergie nécessaire ou séchage représente 16 % de l'énergie du produit.

Remarque :

- la différence entre les besoins énergétiques des deux formes de séchage et les productions respective d'énergie vient :

. du rendement du sécheur, où l'énergie de vaporisation de l'eau est supérieure aux besoins théoriques, comptabilisés dans la différence des PCI.

. du phénomène aberrant, mais obligatoire (actuellement) du mouillage de la farine des feuilles après séchage, pour la granulation.

- Les besoins énergétiques prennent en compte le rendement du brûleur, mais non celui de la gazéification de la biomasse. Nous ferons ce deuxième calcul après la détermination du rendement de gazéification du gazogène utilisé.

. Electricité

- Installation de séchage : la consommation mesurée comporte tous les moteurs de l'installation auquel j'ai enlevé la part utilisée pour la granulation que l'on verra après.

Cette mesure a été effectuée sur 22 heures d'affilées, en englobant l'éclairage. L'étude de consommation ne peut se faire sur une très longue période, certains appareils fonctionnant en "parasite" sur l'installation de séchage.

Sur 22 heures, la consommation fut de 151 kwh soit 6,34 kwh par tonne (5,45 th/tonne). Cette consommation est faible, comparée à la luzerne, le temps de passage de la canne étant beaucoup plus court.

- Production de chaleur

Il faut ajouter à la consommation du séchage, l'électricité utilisée pour les gazogènes, les ventilateurs de combustion du brûleur et le réchauffage du fuel.

La consommation réelle n'a pu être mesurée et, nous allons faire une approximation en fonction de la puissance installée. Celle-ci est de 150 kw mais, les moteurs fournissent 3/4 de leur puissance au régime nominal et la puissance installée pour le réchauffage du fuel est de 30 kw (pour 440 kg de fuel lourd à l'heure) tandis que l'installation transformée n'en consomme que 15 % soit :

- 94,4 kwh/h pour l'ensemble

Si l'on ajoute la manutention du combustible, de l'aire de stockage aux gazogènes, nous pouvons arrondir à 100 kwh/h.

En considérant 5 tonnes à l'heure, comme débit de matière sèche, nous avons 20 kwh/t de matière sèche.

2) Granulation

Seule la consommation électrique est prise en compte, le séchage étant commun aux tronçons. Pour la mesure de la puissance consommée par les moteurs, deux compteurs étaient installée : 1 sur le broyeur et l'autre sur la presse.

Après une mesure sur une longue période, nous arrivons aux chiffres suivants :

- pour 67470 kg de granulés : la presse à consommé 1522kw/h
le broyeur à consommé 1625 kw/h
- au kg de granulés, nous avons 0,046665 kw/h à 7 % d'humidité et 0,05016 kw/h par kg de matière sèche soit respectivement :
40,13 th/tonne et 43,14 th/tonne de matière sèche

Sachant que le PCI des granulés de 4042 kcal/kg,, le coût énergétique représente 1,07 % de l'énergie contenue.

Pour le séchage et la granulation, nous avons une consommation de :

$$6,34 + 20 + 1/4 (50,16) = 38,85 \text{ kwh/t de matière sèche}$$

$$(33,41 \text{ th/tonne})$$

Remarque : Nous avons considéré, jusqu'à maintenant, le séchage de la canne de Provence avec une installation ayant un rendement d'évaporation de 690 kcal/kg d'eau. Si nous prenons l'installation existante, avec un rendement de 730 kcal/kg d'eau, la consommation électrique sera la suivante :

- Pour le séchage et la granulation, la consommation est équivalente à la situation précédente.

- Pour la fourniture de l'énergie, elle augmente :

$$6,34 + 21,16 + 1/4 (50,16) = 40,01 \text{ kwh/t}$$

3) Manutention pour le séchage

La manutention consiste à alimenter l'usine en produit vert à l'aide d'une pelteuse, le transport du produit sec vers le stockage étant pris en compte par le compteur général de l'installation de séchage. La consommation par l'engin est de 6 litres à l'heure, avec un temps de travail par tonne de 5 minutes
soit 0,3 l / t et 2,542 th / t avec 8475 th / M3 de fuel

IV - CONSOMMATION ENERGETIQUE ET BESOIN DE BIOMASSE

A Consommation en chaleur

Nous allons d'abord considérer la part des besoins qui peuvent être satisfait par la biomasse (canne et sous produit). Le projet prévoit la production de 5000 tonnes de luzerne, le chauffage d'un hectare de serre et des locaux.

Il faut ajouter à celà la part qui revient au séchage de la canne pour la conservation.

1 - Le séchage de la luzerne

a) caractéristique de l'installation

Nous allons considérer, en premier lieu, l'installation complètement modifiée, qui aurait une consommation de 690 kcal/kg d'eau évaporée. Ce rendement devra être obtenu, le bilan énergétique du mas dépend beaucoup du séchage (luzerne et canne) et l'investissement pour les modifications sera vite récupéré.

b) Les besoins

Il faut ramener la luzerne de 80 % à 10 % d'humidité soit, par tonne de produit à 10 %, 3,5 tonnes d'eau.

- Pour 5000 tonnes : $3,5 \times 5000 = 17500$ tonnes d'eau

- besoins en énergie calorifique : $17500 \times 690 = 12075000$ th

Cette énergie sera fournie par des tronçons de canne, des granulés de feuilles et de pailles. D'autre part une contrainte technique impose encore 15 % de fuel lourd n° 2 :

1 811 400 th par le fuel

10 264 600 th par le gaz pauvre

2 - Les serres et les locaux

a) caractéristique de l'installation

Nous allons considérer la consommation énergétique pour le chauffage des serres et des locaux (ateliers et bureaux). Nous prendrons comme références la consommation constatée avec l'installation initiale,

fonctionnant au fuel domestique.

b) Besoins

La consommation mesurée est de 40 l de fuel au m², à 8475 th/m³ × pour les serres et 10 000 litres pour le chauffage des ateliers (mécanique et de triage de fleur) et des bureaux.

Les besoins totaux sont de :

$$8475 \times (0,04 \times 10000 + 10) = 3\ 474\ 750 \text{ th}$$

L'énergie sera fournie pour 1/3 par des tronçons à 15 % d'humidité et des granulés de canne et pour les 2/3 restant, chauffés pendant la récolte de canne, seuls des tronçons à 25 % d'humidité seront utilisés.

Les raisons de l'utilisation de la canne à cette humidité ont déjà été vues, on peut rappeler qu'elle permet une production d'énergie proportionnellement plus importante que la canne séchée à 15 % d'humidité et que son utilisation ne pose aucun problème pour le gazogène (observation)

3 - Le séchage de la canne

Avec la même unité de séchage que pour la luzerne et même rendement de 690 kcal/kg d'eau, nous avons besoin de :

- pour de séchage de 55 % à 15 %, il faut 744,8 th/tonne de matière sèche.

- pour le séchage de 55 % à 25 %, il faut 657,8 th/tonne de matière sèche.

Pour ce séchage, 15 % de l'énergie consommée vient également du fuel lourd.

B Satisfaction des besoins par la biomasse

La production de chaleur est réalisée par la combustion du gaz pauvre dans des brûleurs mixtes. Ce sont des gazogènes à lit fixe qui produisent ce gaz pauvre.

Pour calculer les besoins en biomasse, il faut connaître le rendement de ces appareils. Celui ci varie naturellement en fonction du régime, de la température extérieure ... et nous allons prendre une moyenne, calculer sur plusieurs mesures.

Rendement global biomasse - eau chaude, avec récupération de l'air de refroidissement : 65 %

Rendement du gazogène, pour le sécheur, avec récupération de l'air de refroidissement : 78 %

1 - Besoin en dehors de la période de récolte de la canne de provence.

a) Séchage de la luzerne :

Nous disposons de 120 ha de paille à 3,5 tonnes à l'hectare et à 3300 kcal/kg soit :

$$120 \times 3,5 \times 3300 = 1386000 \text{ th}$$

Le reste provient - des tronçons de canne à 15 % d'humidité, 4144 kcal/kg de matière sèche

- des granulés de feuilles à 7 % d'humidité, 4042 kcal/kg de matière sèche.

Les besoins de séchage de la luzerne en tenant compte du rendement du gazogène et des 15 % de fuel sont de :

$$13.159.700 \text{ th}$$

b) Le 1/3 des besoins de chauffage

Nous disposons des mêmes combustibles que précédemment pour produire 1.158.250 th et en tenant compte du rendement, il faut :

$$1.781.900 \text{ th}$$

c) Besoin de la période

Si nous retranchons l'apport de la paille, il faut 13555600 th en canne, granulés et tronçons.

Nous prendrons T 15 pour désigner le nombre de tonnes du mélange canne à 15 % d'humidité et les granulés correspondant. De plus, nous disposons des granulés issus de la séparation des tronçons pour le restant du chauffage et le séchage de la canne à 15 et 25 % d'humidité.

2 - Besoins pendant la récolte

a) Les 2/3 pour le chauffage

Nous utiliserons exclusivement des copeaux de canne à 25 % d'humidité, les granulés étant stockés. En tenant compte du rendement global, il nous faut :

3.476.900 th

Le PCI des tiges est de 4084 kcal/kg de matière sèche

Il faut $3.476.900 : 4084 = 851,3$ tonnes de matière sèche de tige = T'25

b) Le séchage de la canne

Le séchage de la canne à 15 % pour les tiges et 4 % pour les feuilles exige 744,8 th/tonne de matière sèche mais en tenant compte de la part du fuel et du rendement du gazogène, il faut :

811,6 th/t avec T''25, nombre de tonnes utilisées.

- Pour celui de la canne à 25 % et les feuilles à 7 %, il faut 657 th/tonne de matière sèche et en prenant les mêmes conditions que précédemment :

716,8 th/tonne avec T'''25, nombre de tonnes utilisées

Il faut également compter son propre séchage.

3 - Résolution du problème

$$- 4/3 (T'25 + T''25) \times 716,8 = (4084 - 716,83) T'''25$$

$$T'''25 = 0,2838 T''25 + 241,647$$

$$- T25 \times 811,64 = T''25 \times 4084$$

$$T25 = 5,0318 T''25$$

$$- 13555600 = (4118 \times T25) + 1/3 \times 4042 \times (T'25 + T''25 + T'''25)$$

$$= 20720,9 T''25 + 1729,706 T''25 + 1472563,9$$

$$T''25 = 538,2 \text{ tonnes de matières sèches}$$

$$T25 = 2708,1 \text{ tonnes de matières sèches}$$

$$T'''25 = 394,4 \text{ tonnes de matières sèches}$$

$$T'25 = 851,3 \text{ tonnes de matières sèches}$$

Pour connaître le total de la matière disponible, il faut également comptabiliser les granulés. Ce tonnage représente 1/4 du total des cannes traitées à 25 % d'humidité soit :

1271,7 tonnes de granulés
 1783,9 tonnes de tronçon à 25 %
 2031 tonnes de tronçons à 15 %

 5086,6 tonnes de cannes a récolter soit 254,3 ha

Si nous considérons l'installation existante, sans aucune transformation :

Calcul des besoins en thermie

	Théorique (besoins)	En biomasse	avec le rendement
: 4000 t de luzerne	: 10 220 000	: 8 687 000	: 11 371 800
: 0,73 ha de serre	: 2 559 450	: 2 559 450	: 3 937 615
: et locaux	:	:	:

Ces besoins d'énergie sont comptabilisés en thermie

- Le sécheur a un rendement de 730 kcal/kg d'eau évaporée
- 15 % de fuel

Nous ventilons les différents besoin d'énergie selon l'époque, comme précédemment

a) Séchage de la luzerne

Nous retranchons également la part de la paille
 soit 9 985 800 th de biomasse canne

b) Serre et habitation hors récolte

$1/3 \text{ de } 3\,937\,615 = 1\,312\,538$

c) Séchage de la canne à 15 %

Il faut 787,98 th/tonnes de matière sèche mais 858,7 th de biomasse par tonne séchée à 15 % d'humidité et les feuilles à 4 % (T''25)

Il faut 695,9 th/tonne de matière sèche mais 758,4 th de tronçons de canne à 25 % d'humidité (T''25)

d) Serre et habitation pendant la récolte

2/3 de 3937615 : 2625077 th avec T' 25 tonnes
de copeaux à 25 % d'humidité (en MS)

e) Résolution

- T'25 = 642,8 tonnes de matière sèche
- $4/3 (T'25 + T''25) \times 758,4 = (4084 - 758,38) T''' 25$
- $T'' 25 \times 4084 = 858,7 \times T 25$
- $11298338 = (4118 \times T 25) + 1/3 \times 4042 \times (T'25 + T''25 + T'''25)$

T''25 : 476,5 tonnes de matière sèche
T 25 : 2266,1 tonnes de matières sèches
T'''25 : 340,4 tonnes de matières sèches
T'25 : 642,8 tonnes de matières sèches

Nous obtenons au total, en tenant compte des granulés :

1053 tonnes de matière sèche de granulés
1459 tonnes de matière sèche de tronçons à 25 %
d'humidité
1699 tonnes de matière sèche de tronçons à 15 %
d'humidité

4212 % tonnes de matière sèche de biomasse canne
soit 211 ha.

Récapitulation :

- pour le projet

<u>Besoins en biomasse</u>	:	<u>moyens</u>
. été 13.159.700	:	1272 x 4042 = 5.138.778 th en granulés
. hiver 9.067.400	:	1784 x 4084 = 7.285.860 th encanne à 2
-----	:	2031 x 4144 = 8.416.460 th en canne à 1
22.227.100 th	:	20.841.098
	:	420 x 3300 = 1.386.000 th de paille
	:	-----
	:	22.227.100 th
	:	soit 5087 tonnes de cannes et 420 tonne
	:	de paille (254 ha de canne, 120 de
	:	paille)

<u>Besoin en fuel lourd</u>	:	<u>moyens</u>
. été (luzerne) 1.811.250	:	188,7 x 9600 = 1.811.250
. hiver (canne) 537.240	:	56,0 x 9600 = 537.240
	:	soit 245 tonnes de fuel lourd n° 2

C - Bilans énergétiques

1) <u>Projet</u> (5000 t de luzerne, 1 ha de serre)							
	: Fuel		: Fuel lourd		: Electricité		: autre (th)
	: domestique(m3)	(en t)		(en t)	: (kwh)		:
	: en +	: en -	: en +	: en -	: en +	: en -	: en +
Culture canne	: 31,45:	:	:	:	: 2116:	:	: 962844
Séchage canne	: 1,53:	:	: 56	:	: 197630:	:	:
Serre	:	: 410	:	:	: 90030:	:	:
Séchage luzerne	:	:	:	: 1069	: 287500:	73312:	:
Paille (récolte et granulation)	: 0,71:	:	:	:	: 19599:	:	: 15930
Total	: 33,7:	410	: 56	: 1069	: 596875:	73312:	964437
Solde	: - 376	:	: - 1013	:	: + 523563	:	: 964437
En th	: 3186600	:	: 9724800	:	: 450264	:	: 964437

Solde total + 11496600 th \approx 1149,7 TEP

Le bilan énergétique est largement excédentaire, par la diminution de la consommation de fuel, lourd et domestique.

L'augmentation de l'électricité provient du fonctionnement des gazogènes .

La part de la consommation en énergie indirecte (engrais, matériel...) n'est considérée que pour la culture de la canne de Provence et le ramassage de la paille. Le calcul pour l'unité de déshydratation s'avère trop complexe et d'autre part, sa finalité première ne concernait que la luzerne.

Remarque : Avec la nouvelle installation de chauffage, par aérothermes, la consommation énergétique au m² de serre va fortement diminuer : d'après une étude du CTGREF sur la consommation des serristes qui produisaient des roses dans la zone méditerranéenne, le besoin en fuel est de 25 l/m². Pour cela, il faut quand même prévoir un supplément d'isolation. Cette consommation tient compte des rendements des brûleurs à fuel et doit être minorée si l'on considère la production d'eau chaude. La consommation de biomasse sera inférieure aux chiffres calculés.

2) Autonomie énergétique pour les besoins actuels
(4000 t de luzerne, 0,73 ha de serre)

	: Fuel		: Fuel lourd		: Electricité		: autre (th)
	: domestique(m3)	: (t)	: (t)	: (t)	: (kwh)	: (kwh)	
	: en +	: en -	: en +	: en -	: en +	: en -	:
Culture canne	: 26,1	:	:	:	: 1758	:	: 799842
Séchage canne	: 1,3	:	: 49	:	: 168520	:	:
Serre	:	: 302	:	:	: 66315	:	:
	:	:	:	:	:	:	:
Séchage luzerne	:	:	:	: 904,6	: 243300	: 59608	:
	:	:	:	:	:	:	:
Paille	: 0,7	:	:	:	: 19599	:	: 15930
	:	:	:	:	:	:	:
Total	: 28,1	: 302	: 49	: 904,6	: 499492	: 59608	: 815772
	:	:	:	:	:	:	:
Solde	:	: 273,8	: 855,6	:	: 439884	:	: 815772
	:	:	:	:	:	:	:
En th	:	: 2320455	: 8213760	:	: 378300	:	: 815772

Soit un solde positif de 9340143 th \approx 934 TEP

Cette fois encore, l'économie d'énergie pétrole vient du remplacement du fuel. Nous pouvons touté fois remarquer une consommation supplémentaire d'électricité plus que proportionnelle au nombre de tonne, par rapport au

tableau précédent. Ceci est dû à la durée de fonctionnement plus longue des gazogènes. Ils doivent fournir plus d'énergie, le rendement de séchage étant plus faible (1,64 t de luzerne à l'heure contre 1,75 t précédemment).



- Canne -

3) Equilibre actuel

Nous venons d'aborder l'autosuffisance en énergie d'un mas de Camargue, avec l'utilisation de la canne de Provence et de la paille de ses cultures de blé. Nous avons comptabilisé toutes les dépenses énergétiques qu'entraîne une telle orientation et la surface importante qui est gelée par la production de culture énergétique. Le grand avantage, qu'il ne faut pas dénigrer, est la sécurité d'approvisionnement. Nous essaierons d'en calculer l'intérêt économique, dans le chapitre IX. Mais, avant d'arriver à cette situation, l'exploitation est dans une période de transition où la biomasse est en majorité fournie par l'extérieur. Actuellement, les sous-produits végétaux ne sont pas encore valorisés dans la région où ils sont abondants et d'un prix modéré, en voici quelques uns, déjà utilisés ou en voie de l'être.

a) Les rafles de maïs

Elles ont déjà servies pour le chauffage des serres, en début de campagne. Leur utilisation n'entraîne aucun problème majeur si ce n'est la proportion élevée de poussière et de feuilles qui provoque parfois des voutes.

Ces rafles sont fournies avec un taux de siccité élevé, les épis étant séchés avant l'égrenage, par l'usine qui s'en débarrasse. Le problème concerne le transport, la densité est de l'ordre de 120 kg/m³ et la distance à parcourir est supérieure à 50 km.

b) Noyau de pêche

Ils sont issus d'une conserverie de fruit et ils sont livrés très humides. Leur séchage est rendu facile car la période de disponibilité coïncide avec l'été : leur seule exposition sur l'aire de stockage, en faible couche suffit pour leur utilisation dans le gazogène.

Le grand intérêt de ce produit est son homogénéité qui permet une

manipulation facile alliée à une densité élevée. Ceci diminue les frais de transport et de manutention.

Ces noyaux ont servi lors de la mise en route du gazogène et ont donné entière satisfaction.

c) La paille

Le mas dispose de 120 ha de paille et peut envisager en récupérer un tonnage important dans son entourage proche. En effet, la Camargue utilise peu la paille, excepté pour les exploitations qui disposent d'animaux (très minoritaire). Les autres la brûlent pour nettoyer les parcelles de certaines adventices et sans souci pour le taux de matière organique des sols.

Ainsi, il serait facile de prévoir tout un chantier de récolte entièrement mécanisé. Le prix d'achat pourrait être inférieur au marché national pour deux raisons : la demande du marché est faible et les matières minérales ne subissant pas de dommage dans le gazogène, elles pourront être récupérées par les vendeurs.

Pour son emploi, la paille doit être granulée. Dans un premier temps, l'installation de granulation de l'usine de déshydratation serait utilisée (on considère une consommation électrique voisine de celle des granulés de canne) mais un pressage en brin plus long, pour la formation de briquettes serait suffisant et moins chère.

d) Les sarments

La Camargue dispose encore d'un nombre non négligeable d'hectare de vigne et de verger.

Le CEMAGREF s'est d'autre part intéressé à la récupération de sarments issus de la taille en vue d'une utilisation énergétique. Le chantier de récolte expérimenté est très simple : il consiste à utiliser une presse à fourrage munie d'un pick-up, pour la fabrication de balles

parallépipédiques.

Une fois récoltée, ces sarments sont stockés à l'air libre. D'après les mesures en cours, ce séchage sommaire permet de ramener en quelques mois l'humidité de 60 % à moins de 30 %. Ils seraient dès lors, utilisables dans le gazogène, après un hachage des bois les plus longs.

e) La sciure de bois

Suite à l'expérimentation du ligno-brûleur en Juillet 1980, le Grand Manusclat disposait d'un stock important de sciure, directement utilisable pour la combustion dans cet appareil.

Après les ennuis que nous savons, ce produit restait inemployé. La seule voie pour son utilisation était sa granulation préalable. Des essais se sont mis en oeuvre cet hiver mais ce produit nécessite deux choses :

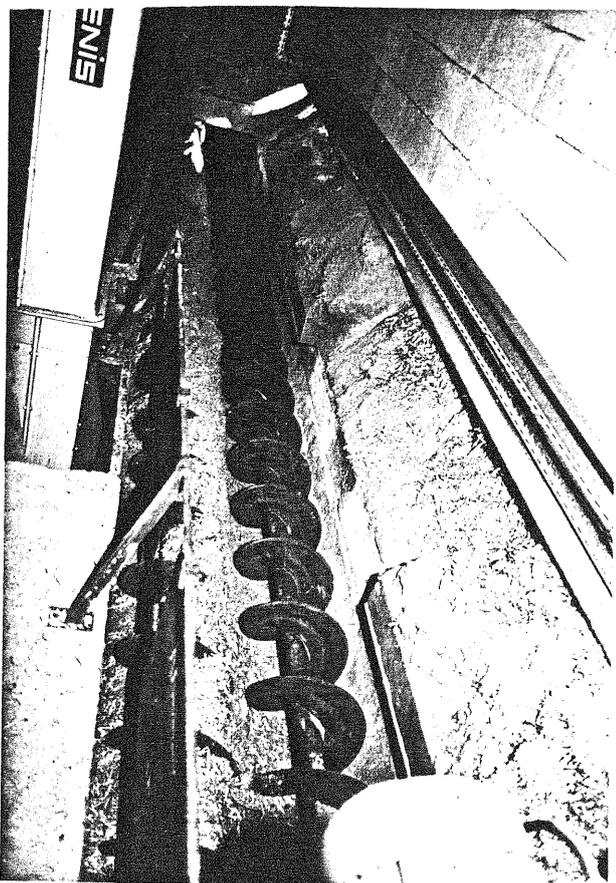
- un séchage pour diminuer son humidité, très hétérogène
- une humidité très précise de granulation, à 11 ou 12°% d'H₂O.

Devant la difficulté de réguler son humidité de sortie, face à l'hétérogénéité d'entrée, tant en humidité que par l'essence du bois (mêlée en sciri), son utilisation a été momentanément abandonnée.

CONCLUSION

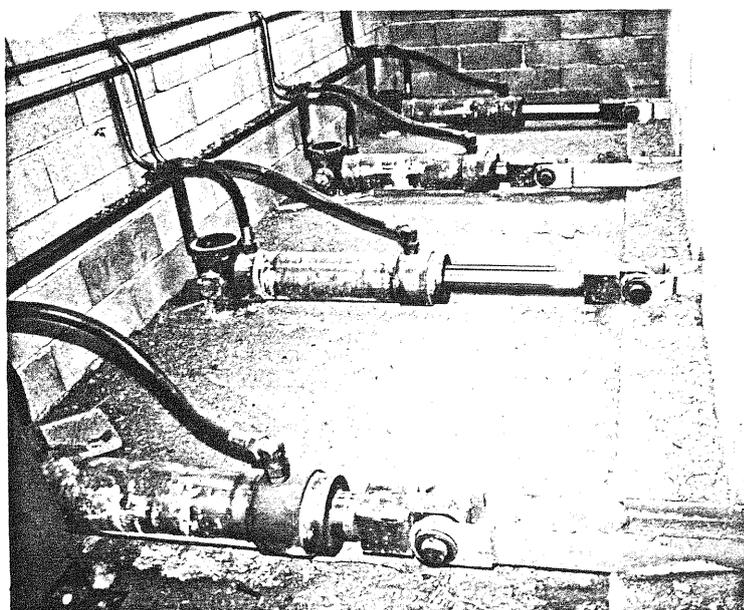
Nous venons de le voir, la disponibilité en sous-produits est grande. Mais pour certains, cette situation est momentanée : les industriels attendent que les appareils de valorisation de leur sous-produits soient fiables pour s'équiper (rafles et noyau). Il faut éviter que le mas ne deviennent complètement dépendant pour son énergie, des apports extérieurs, équivalent à l'utilisation des énergies d'origine fossile.

Pour celà, il doit diversifier ses approvisionnements et compter sur sa production propre (canne de Provence et paille). La paille est tout de même assez abondante pour permettre une sécurité des apports externes.



Déstockage silo tampon

Verrins pousseurs et pieds de l'élévateur



V - MISE EN PLACE DE L'INSTALLATION BIOMASSE SUR L'ANCIENNE

A - Stockage de la biomasse

Nous aborderons avec ce sujet, l'un des freins les plus importants, avec le transport, au développement de cette énergie. Contrairement aux énergies fossiles, la concentration énergétique est faible, en poids mais surtout en volume.

Si l'on compare un fuel à 8500 kcal/l avec des tronçons de canne à 800 kcal/l la capacité de stockage doit être 10 fois plus importante.

De plus, la récolte ne dure que 3 mois (en général) et il faut la stocker pour le reste de l'année, contrairement au fuel qui est livré régulièrement, du moins, jusqu'à maintenant.

1 - Stockage de la récolte

a) Les tronçons

Ils sont stockés sur une grande aire bétonnée. Pour l'instant, la surface équipée représente un rectangle de 28 m sur 95 m de long. Elle est formée d'une dalle de béton ayant une pente de 10 cm de part et d'autre de son milieu, pour l'écoulement de l'eau. Cette surface devrait être doublée pour la suite du projet.

Cette année, le tas de tronçons est mal conçu, par manque de matériel de manutention ce qui provoque une infiltration d'eau de pluie en profondeur. Les humidités effectuées, pendant le premier mois de stockage, montre une descente parfois égale à 1m.

Quand l'exploitation de la canne de provence sera en régime de croisière, la manutention des copeaux permettra, par un tapis roulant disposé au centre de l'aire, dans le sens de la longueur, de réaliser

un tas de 10 m de haut de forme vraiment conique. Ainsi, l'eau coulera en surface, sans pénétrer.

La capacité de stockage est actuellement de 13300 m³ soit 2660 tonnes de canne à 15% d'humidité, ou 150 hectares de canne à 20 tonnes / ha (en ne prenant que les copeaux).

Avec le doublement de la capacité, nous arriverons à 300 ha.

b) Stockage du granulé

Les granulés sont envoyés directement dans les silos, occupés généralement par les granulés de luzerne mais dont une partie est libre pendant l'hiver.

Avec le retour du printemps et en fonction du besoin de place, l'énergie utilisée pourra être des tronçons ou des granulés de feuilles de canne.

2 - Silo tampon

Le gazogène est alimenté automatiquement en combustible, à partir d'un silo tampon de 400 m³. Le silo est rempli directement pendant la récolte de canne, sans transit sur l'aire de stockage.

Pendant la récolte, le reste de l'année, une bande transporteuse convoie la matière à partir du centre de l'aire de stockage.

Les granulés sont acheminés de la même manière mais il doivent d'abord être prélevés dans les silos à luzerne.

B - Appareil de gazéification

L'entreprise est équipée avec un gazogène P 1050, à lit fixe, de marque Pillard, depuis Septembre 1980. La capacité théorique

est de 1800 th/heure.

Pour la campagne de luzerne 1981, un deuxième gazogène est monté par la même firme mais avec une puissance de 2000 th/heure.

A l'origine, le projet prévoyait l'emploi d'un ligno-brûleur pour alimenter le sécheur en remplacement du brûleur à fuel. Son principe était la combustion directe, dans un cylindre court, des particules de biomasse. La matière était entraînée par un mouvement cyclonique, avec l'air de combustion. Les avantages étaient sa faculté de brûler les feuilles sans granulation et son prix achat relativement faible.

Mais, bien qu'ayant eu un bon comportement pendant les essais, il ne supporta pas la cadence de l'utilisation industrielle : les cendres, liquides, jouant le rôle de fondant sur le réfractaire.

Le deuxième gazogène associé au premier, permettra son remplacement, pour le séchage de la luzerne.

Pour le séchage de la canne, le besoin énergétique des serres étant important la nuit, le débit de matière sera inférieur à la capacité théorique d'évaporation(la nuit seulement) .

C - Brûleurs

1 - sur le sécheur

Le brûleur Promill puis le ligno-brûleur ont été remplacés par un brûleur KG Pillard, fonctionnant au gaz pauvre et au fuel lourd. l'adaption s'est très bien réalisée et n'a nécessité aucun aménagement sur le foyer.

2 - Chaudière

L'installation antérieure étant de caractère provisoire, il a fallu repensé toute l'installation. De gros changements sont donc intervenus avec la biomasse mais elle n'a fait qu'accélérer la transformation.

La nouvelle chaudière est munie d'un brûleur KG, gaz pauvre, fuel oil et gaz riche. L'eau chaude est utilisée dans les serres par 48 aérothermes.

D - L'unité de déshydratation

Les modifications concernent la transformation du circuit normal de la luzerne et le montage de certains équipements propres à la canne.

Les transformations ont été effectuées par la main d'oeuvre du mas en collaboration avec le CEMAGREF de Nimes et des constructeurs de l'installation existante.

E - Le matériel utilisé pour la canne

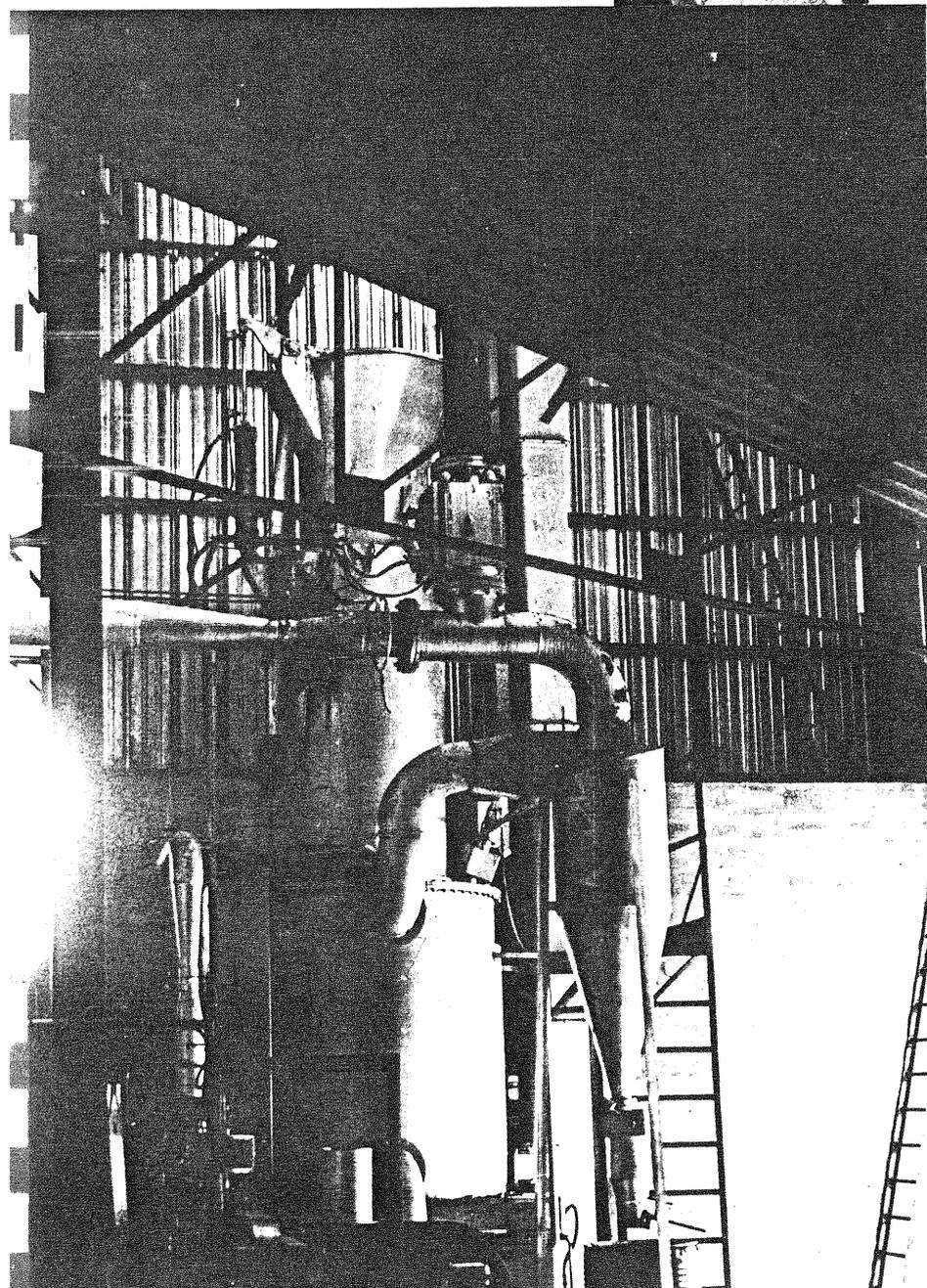
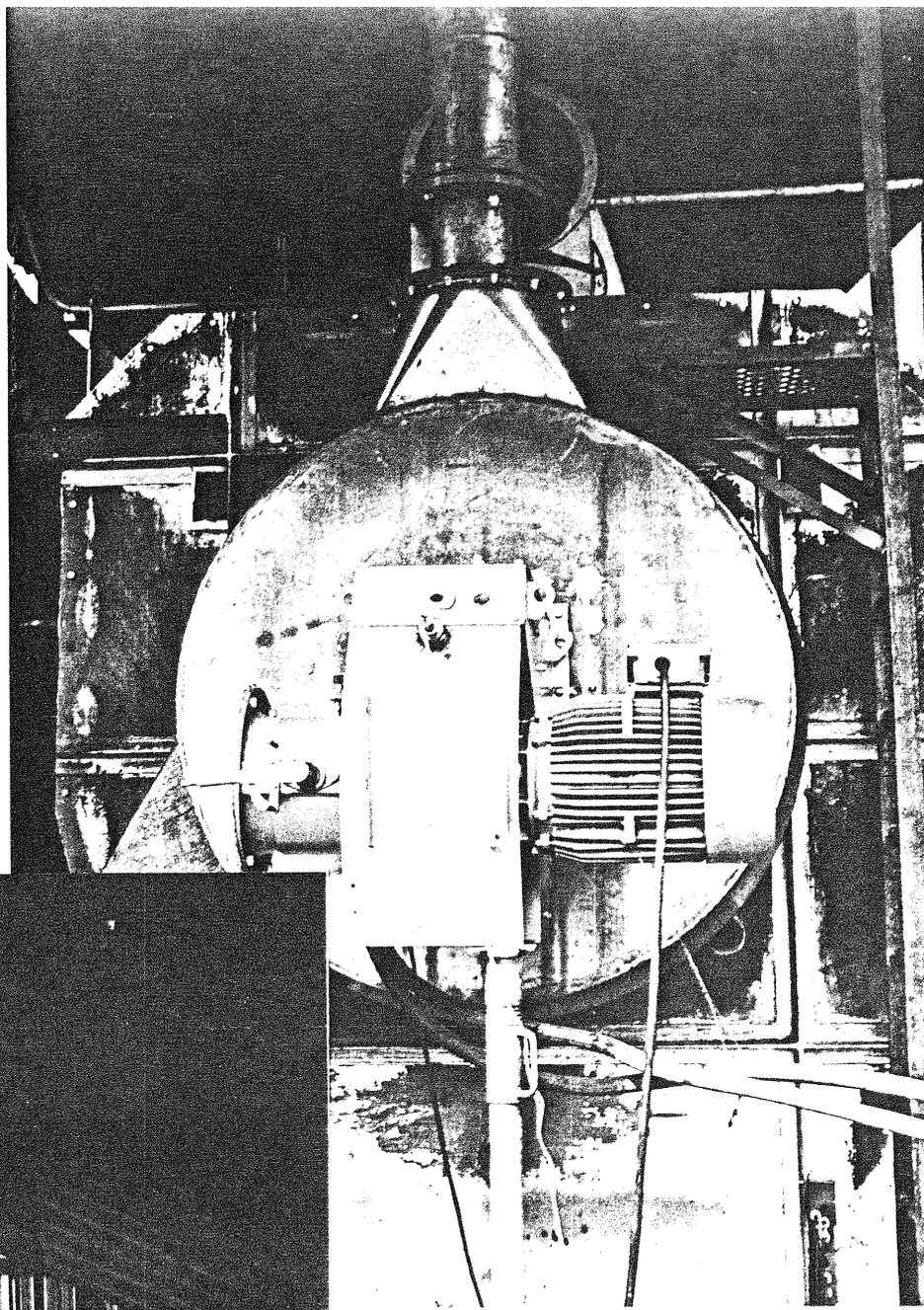
Excepté la tête de récolte spécifique, montée sur les ensileuses, le reste du matériel d'entretien et de plantation n'est pas spécialisé et il était utilisé pour les autres travaux du mas.

Conclusion :

Nous pouvons apprécier la bonne intégration de l'utilisation de la biomasse dans cette entreprise et en particulier, des cultures énergétiques.

Mais cette exploitation possédait déjà un caractère industriel, par la production de luzerne déshydratée. Nous verrons, dans la partie économique, la faisabilité et l'intérêt de la production de biomasse dans une entreprise quelconque et sa valeur commerciale (annexes 16 17 plan)

BRULEUR DU SECHEUR



GAZOGENE

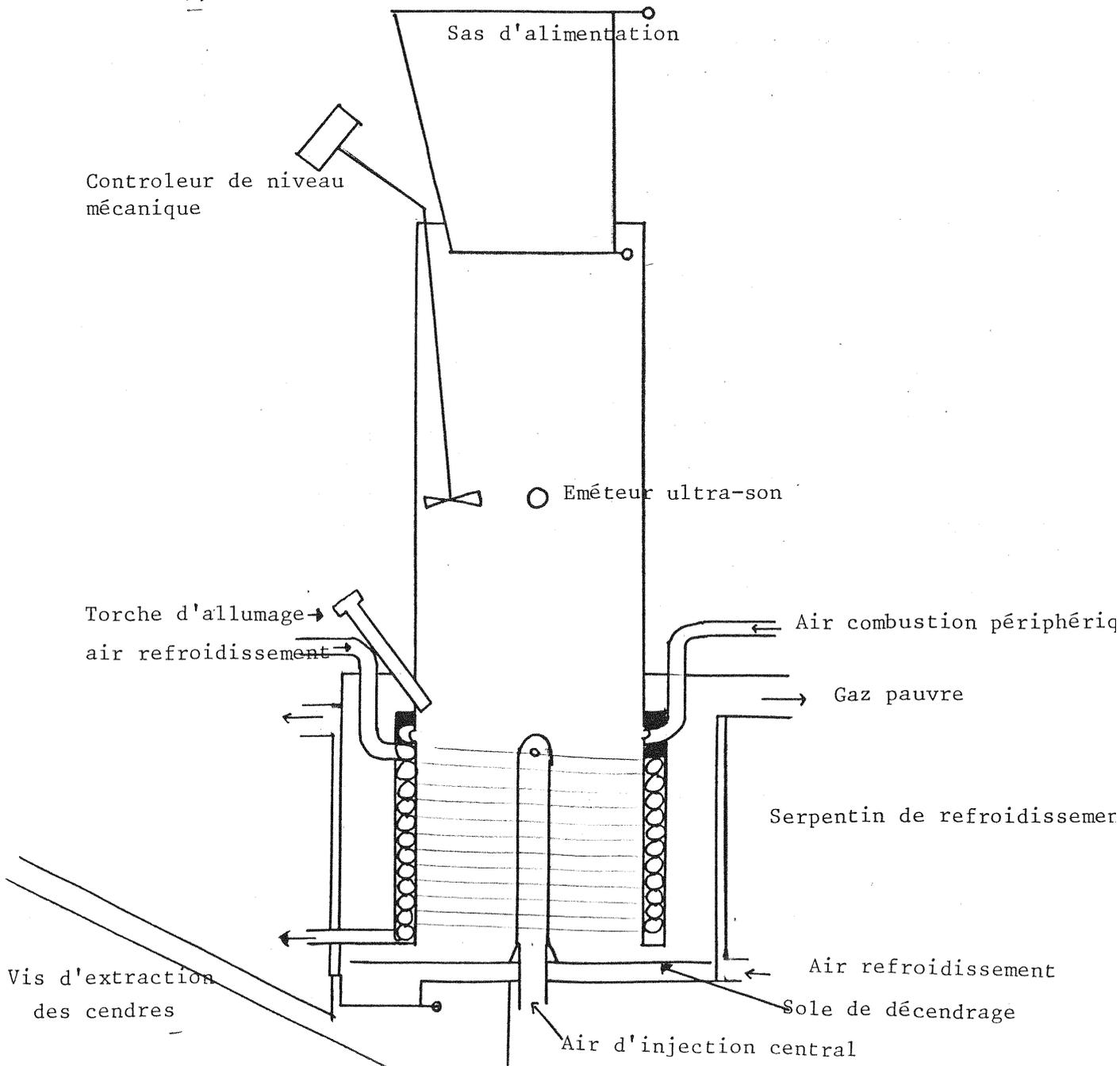
VI LE GAZOGENE A LIT FIXE, EN TIRAGE INVERSE ET BRULEUR ECUREUIL

A - Description du gazogène

C'est un ligno-gazogène, constitué d'un appareil compact pour la gazéification de produits végétaux, ligno-cellulosique, de moyenne granulométrie.

L'organe principal du gazogène peut être considéré comme un tube de 1,05 m de diamètre (1,2 pour le second) et de 3,7 m de hauteur, où chemine gaz et combustible. La matière et le gaz circulent parallèlement, vers le bas, c'est pourquoi il est appelé : "gazogène à tirage inversé".

La matière végétale ayant une vitesse de descente 1000 fois plus lente que la vitesse du gaz (2,75 m/s contre 4 m/h au régime maximal), on considère le lit comme fixe.



c) Séquence de chargement

Le signal de demande étant reçu, le clapet supérieur s'ouvre. Quand il est en bout de course, la vis placée à la sortie du silo et l'élévateur à godet se mettent en marche. Ces derniers sont toujours chargés de la même manière (les vérins d'extraction assurant une couverture constante) ce qui permet un débit constant dans le sas, et la charge peut être déterminée par unité de temps. Il suffit de déterminer un temps coé rant avec la matière pour établir un remplissage convenable. Pour la canne par exemple, 10 secondes suffisaient.

Le temps écoulé, l'élévateur s'arrête, le clapet supérieur se ferme. Arrivé en bout de course, il déclenche l'ouverture du clapet inférieur également temporisé pour l'écoulement complet du contenu du sas, puis il se referme pour une meilleure étanchéité de l'appareil et pour recevoir un nouveau chargement.

2 - Alimentation en air

Elle est assurée par un ventilateur équipé d'un moteur de 22 kw. Il propulse l'air dans deux directions : sur la périphérie du cylindre et au centre par un injecteur (voir schéma). Dans un gazogène à tirage inversé de faible puissance, une seule injection d'air suffisait mais quand la puissance s'élève, le cylindre augmente de diamètre et la vitesse de l'air ne suffit plus à propager tout le volume (la zone de "flamme" resterait périphérique).

L'injection d'air est assurée, à volume égal, sur la périphérie et au centre.

- sur le pourtour, par une couronne alimentant dix buses horizontales. L'air est réchauffé dans cette couronne qui est en contact avec le réfractaire, de la zone la plus chaude.

- au centre, l'air est injecté à l'extrémité d'un "champignon", en 2 niveaux voisins, de 4 buses horizontales. Là encore, l'air est réchauffé avant injection.

Le volume d'air injecté est réglé par l'appareil utilisant le gaz pauvre que nous verrons par la suite.

3 - Refroidissement

Les réactions chimiques qui ont lieu dans le gazogène ayant un bilan thermique positif, il faut refroidir l'ensemble, par les parois, pour éviter une détérioration de celle-ci (métaux et réfractaire), pour diminuer les pertes par rayonnement et convection et pour rester sous la température de fusion des cendres.

Pour cela, un système complet est installé qui utilise l'air comme vecteur, propulsé par un ventilateur de 30 kw :

- refroidissement de l'injection centrale par aller et retour de l'air dans deux tubes emboîtés.
- refroidissement des parois du foyer (partie basse du cylindre) par un serpentín entourant celui-ci.
- une enveloppe externe, en contact avec les gaz chauds, ce qui permet d'éviter des pertes importantes de chaleur vers l'extérieur.

Cet air chaud n'a pas été récupéré pendant l'hiver 80-81 pour diverses raisons, ce qui entraînait une perte de 5 à 10 % de rendement. Pour l'avenir, les conditions permettront de l'utiliser :

- injecté dans le brûleur lors du séchage de la canne ou de la luzerne
- utilisé pour chauffer une partie de l'eau de la chaudière pour les serres, à l'aide d'un échangeur air-eau. Si l'appareil s'avère trop cher, l'air sera conduit dans une serre par une gaine de ventilation calorifugée.

A la température de sortie (250°), moyenne des 3 niveaux, l'air est facilement et directement utilisable.

4 - Injection d'eau

Une sonde de température est placée en bas du gazogène, au niveau de la sole de décendrage, pour mesurer la température de sortie du gaz pauvre. Quand la température détectée est supérieure à 400°, une régulation permet l'ouverture d'une électrovanne pour l'injection d'eau. Le débit minimum est de 40 l/heure. Si la température continue à progresser, une deuxième puis une troisième électrovanne se déclenche. La température limite est de 650° qui provoque l'arrêt du gazogène, quand les 120 litres d'eau ne suffisent pas.

L'intérêt de ce type de refroidissement est multiple. Il faut préciser que si l'eau est introduite à l'état liquide dans le bas du champignon central, son débit faible permet son injection sous forme de vapeur, par les buses.

- consommation de chaleur importante, pour son réchauffage et sa vaporisation, 583,9 kcal/kg, de 25° à 100°.
- consommation de chaleur pour l'élévation de 100° à la température de gazéification de la biomasse.
- consommation de chaleur pour les réactions d'oxydation ménagées du carbone et du méthane et pour la dissociation en H₂ et O₂ (voir annexe 18)

Sous cette forme dissociée, l'oxygène remplace en partie celui de l'air est conduit à un gaz plus riche (l'air contenant beaucoup d'azote, non combustible).

L'inconvénient majeur vient de la vapeur d'eau en excès, présente dans le gaz pauvre et qui sera entraîné dans les fumées sans être condensée.

5 - Décendrage

Il est assuré par la rotation de la sole du cylindre principal. L'entraînement est effectué par un moteur électrique. La durée et la fréquence du décendrage sont programmées en fonction de l'allure et du produit utilisé. La durée de rotation est d'environ 5 secondes.

La modification de fréquence de décendrage en fonction du régime est automatique : 4 temporisations permettent des séquences différentes, déterminées par le volume d'air injecté dans le gazogène.

Il est à noter que le décendrage crée une chute de poussière qui a tendance à être fluidisée par le gaz. Ceci perturbe le dépoussiérage et conduit à un dépôt dans les canalisations et une mise en sécurité des brûleurs, dans le cas le plus défavorable.

L'extraction des cendres du cendrier est effectuée par une vis sans fin, toujours chargée, pour éviter la perte de gaz pendant l'ouverture du clapet du cendrier (voir dessin).

6 - Dépoussièrage

Il se pose en terme moins indispensable pour l'utilisation du gaz dans un brûleur que dans un moteur. Il faut, toute fois, rester sous un seuil d'impureté, pour éviter le colmatage des tuyaux et des foyers. L'installation existante dispose de :

- un cyclone en sortie de gazogène, avec trémie de stockage des poussières et sas, pour la vidange en marche.
- un multicyclone installé juste avant la chaudière avec le même dispositif de stockage et de vidange.

Pour le sécheur, seul le cyclone du gazogène est utilisé. Puisque l'utilisation dans un moteur est envisagée, il faudra laver les gaz à l'eau pour extraire tous les corps étrangers qui risqueraient d'entraîner des pannes et une détérioration rapide.

7 - Sécurité

L'appareil étant conçu pour fonctionner sans surveillance, plusieurs sécurités sont installées en cas d'incident :

- température sole : elle correspond à la température du gaz en sortie du gazogène. Deux niveaux de sécurité sont prévus : à 400° début d'injection d'eau et à 650° arrêt complet.
- température haute : il s'agit de la température du produit stocké dans la partie supérieure, au dessous des détecteurs de niveau. Elle doit rester inférieure à 150° C. Une valeur supérieure indique une panne de chargement ou une voute. Une sécurité est prévue à 200° C qui arrête l'appareil.

La mise en sécurité de l'appareil implique :

- l'arrêt de l'injection d'air
- mis à l'évent des gaz
- klaxon

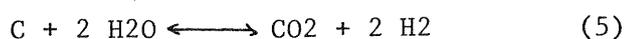
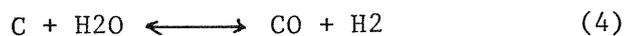
Pour éviter la formation de voute, 2 vibreurs sont prévus, l'un à percussion sur le cylindre cantral et l'autre par excentrique, pour faire vibrer la paroi du cylindre central.

vitessé de diffusion n'est que 2 fois plus rapide. Il en résulte que la cinétique est vite dépendante de la diffusion pour la gazéification. Nous pouvons aussi en déduire que la granulométrie doit être suffisante pour faciliter le passage de l'air et du gaz pauvre.

- Oxydation par l'oxygène de l'eau et du dioxyde de carbone.

L'action du CO₂ et de l'eau sur le carbone, du point de vue cinétique, présente de nombreuses analogies. Avec l'un et l'autre des agents, on se trouve en présence de réactions fortement endothermiques qui, du point de vue thermodynamique, sont favorisées par une élévation de température.

Nous avons déjà remarqué que, si l'oxydation par CO₂ se traduit stœchiométriquement par une seule équation, il n'en est pas de même de l'action de l'eau sur le carbone. On obtient des proportions variables de CO et CO₂ comprise entre les deux limites extrêmes représentées par les équations :



La tendance sera vers l'équation (5) si l'on est en excès de vapeur et vers la (4) dans l'autre cas, quand l'excès est nul.

Comme pour l'action de l'oxygène libre, la résistance physique inhérente à la diffusion se pose à partir des températures élevées. Cependant, l'oxydation étant endothermique, la réaction est beaucoup plus lente, à une température donnée, que la combustion. Les résistances chimiques peuvent conserver leur action déterminante à une température élevée. En règle générale, cette influence est d'autant plus marquée que la température est basse et la granulométrie élevée.

- Formation du méthane

A la complexité cinétique de l'oxydation du carbone s'ajoute encore des conséquences des réactions de pyrolyse. En fait, ce n'est pas du carbone pur que l'on oxyde mais des combustibles ayant subi, à un degré plus ou moins poussé, des réactions de pyrolyse. La structure de ces combustibles est complexe et on peut les considérer comme des agglomérats macromoléculaires d'hydrocarbure, très fortement condensés.

Des expériences ont montré que le méthane empreinte son hydrogène d'avantage au combustible qu'à l'eau : le pourcentage mesuré dans le gaz pauvre est fonction de la teneur en hydrogène du combustible.

Remarque :

Des nouvelles expériences menées par l'IRCHA ont déterminé que le cinétique de gazéification dépend avant tout du débit du mélange réactionnel qui traverse la matière à gazéifier (diffusion) et de la température de gazéification. L'état de division joue peu, ce qui permet de dire qu'il vaut mieux des particules de grands diamètres qui permettent une meilleure diffusion, sans ralentir la cinétique des réactions chimiques.

Il faut donc avoir une température la plus élevée possible, quand la production de gaz pauvre demandée est maximale tandis que l'on pourra se contenter d'une température plus basse quand le débit de matière est plus faible (la cadence de production faisant varier le temps de séjour de la matière dans le gazogène) .

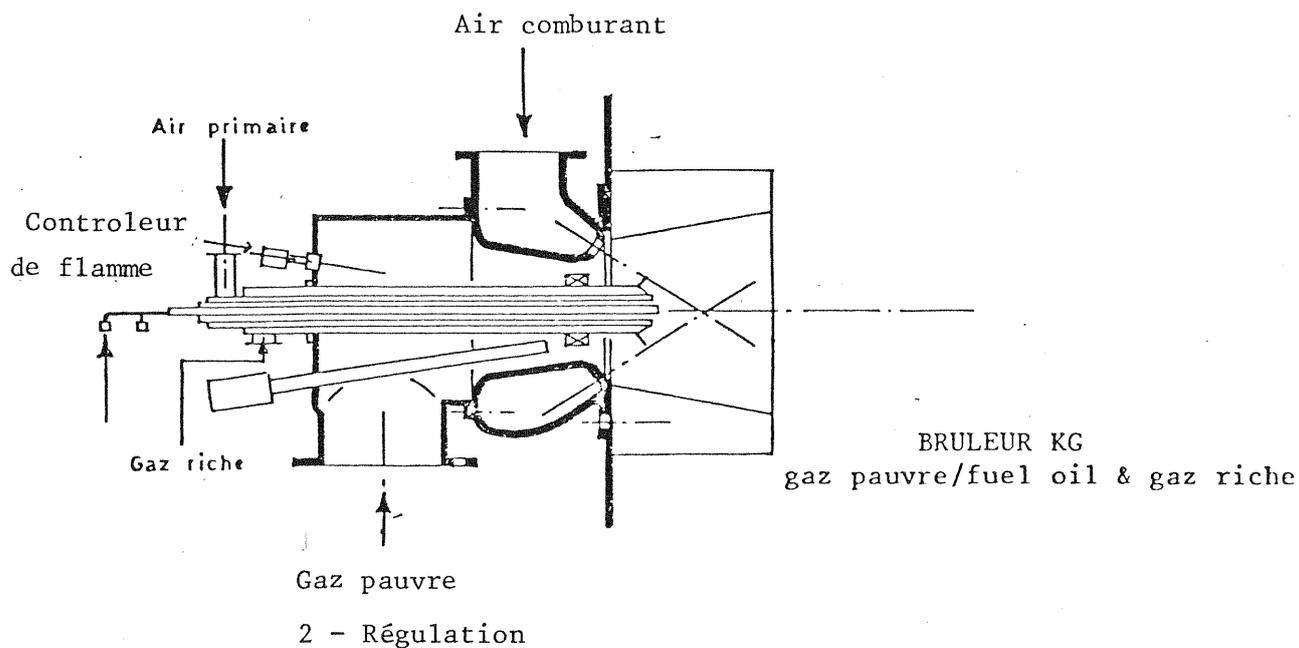
C - Chaudière pour chauffage des serres

C'est une chaudière de marque "TOTALUB", d'une puissance de 1900 th/h, avec un foyer prévu pour les flammes longues. Les caractéristiques du foyer sont les mêmes que pour celle utilisant des combustibles traditionnels. La pression de service est de 4 bars et la température de fonctionnement est de 110° au maximum (voir annexe 19) .

1 - Fonctionnement du brûleur

Le gaz est injecté en mélange avec l'air de combustion, dans un brûleur de type écureuil. Ce mélange est déterminé par la mesure de l'air injecté dans le gazogène (la production de gaz pauvre étant fonction de celui-ci). Pour des raisons de sécurité (éviter les décrochements de flamme), et pour l'allumage du gaz pauvre, une torche au propane brûle en permanence sur un point de la couronne du brûleur "Ecureuil".

La chaudière peut également fonctionner au fuel léger si le circuit de gaz est hors de service, le brûleur étant muni d'une canne à cet effet.



a) Montée en température de l'eau

Pour le fonctionnement au gaz, comme pour le fuel, la montée en puissance est progressive.

- Pendant les 6 premières minutes; la puissance est augmentée progressivement, 1/10 de la puissance désirée à chaque fois, toutes les minutes.
- Ensuite, une régulation automatique termine la montée en 4 autres pas, pour que la valeur de consigne et de production soient les mêmes, l'arrivée au maximum étant plus lente que le départ.

Cette méthode permet l'injection progressive de l'air dans le gazogène, ce qui évite les à-coups : mauvaise gazéification et passage d'air dans le gaz pauvre.

b) Régulation de la chaudière

Elle peut être effectuée de deux manières différentes, suivant le choix de l'utilisateur.

- En marche et arrêt intermittent : le brûleur s'arrête quand la température de consigne est atteinte et ne reprend que lorsque la chute de température de l'eau le réclame (écart réglable). Quand le brûleur s'arrête, l'injection d'air dans le gazogène s'arrête également.

Une autre disposition met le brûleur au minimum quand la température est atteinte, pour éviter différentes pertes de gaz et de chaleur (par exemple, gaz envoyé dans l'atmosphère lors de la mise à l'évent).

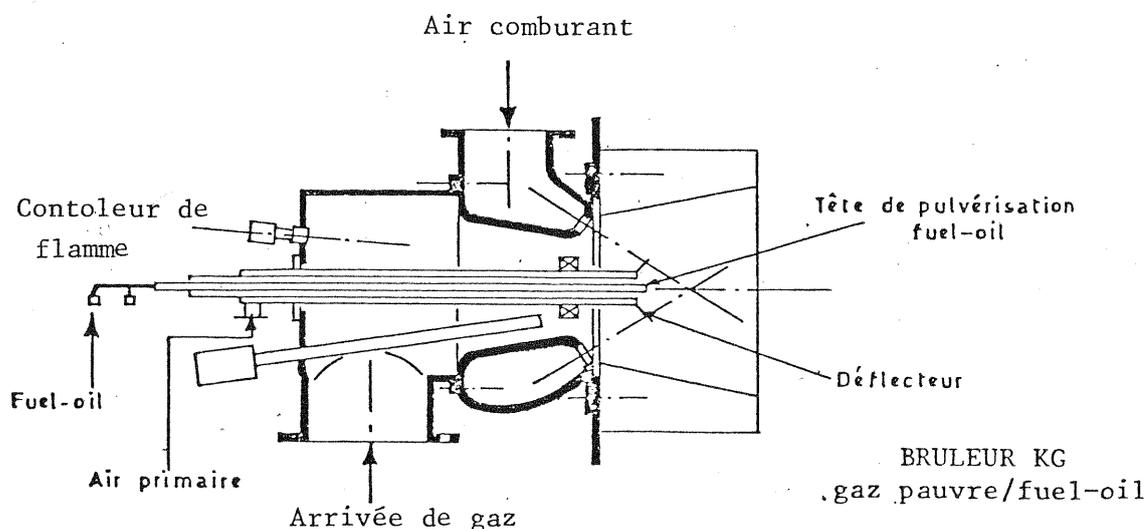
- Régulation automatique : quand la température de l'eau est atteinte, il est possible de passer en régulation automatique. A partir de cet instant, le brûleur module sa puissance en fonction du flux thermique, mesuré sur l'eau qui passe dans la chaudière. Cette modulation est effectuée sur l'air d'injection dans le gazogène.

L'eau est distribuée aux serres par 3 pompes, vers les aérothermes, munis individuellement de thermostat, ce qui permet une température homogène dans l'ensemble de la surface.

D - Brûleur du sécheur

1 - Installation

Le foyer du sécheur est de marque Promill, issu de l'installation d'origine, seul le brûleur a été changé . Il a été remplacé par un brûleur mixte avec canne d'injection de fuel lourd n° 2 et un brûleur écureuil pour le gaz. Il est muni de deux ventilateurs pour l'air de combustion, un par combustible (Fuel lourd n°2 et gaz pauvre) .



L'envoi de gaz sur le brûleur ne peut se faire que si le mazout est en fonctionnement, pour les mêmes raisons de sécurité vues précédemment, avec l'utilisation du gaz riche (propane) .

2 - Réglage

La puissance fournie est fonction du gazogène qui est réglé manuellement, pour une production constante. L'air de combustion est également réglé à vue.

E - Les incidents de l'installation

1 - Le gazogène

- Formation de voute : quand le produit est humide et qu'il comprend une proportion de particule légère, des voutes se forment à l'intérieur du cylindre central. Elles créent une obstruction du sas de chargement, un débordement et une montée de la température de la partie supérieure qui conduit à l'arrêt du gazogène.

- Blocage de la sole : souvent dû à des corps étrangers ou une colmatation des cendres. Cet incident entraîne l'extinction de l'appareil.

- Cassure du serpentín de refroidissement, provoquant l'introduction d'air dans les gaz. Ce phénomène devrait disparaître avec le montage du ventilateur d'air actuel plus puissant.

- Détérioration du réfractaire, au niveau de la zone de flamme, dû à la température trop élevée et au rôle de fondant des cendres. Cette attaque devrait diminuer avec le montage de buses d'injection d'air moins nombreuses, ce qui permettra d'éloigner l'effet chalumeau. L'air ayant une plus grande vitesse, il pénétrera d'avantage le lit (amélioration effectuée).

2 - Brûleur

- Déclenchement de la sécurité du brûleur de la chaudière dû à la poussière entraînée par le gaz. Elle masque la cellule photo-électrique de détection de flamme. L'adjonction du multicyclone diminue fortement

le nombre de ces arrêts.

Conclusion :

La conception de l'appareil est bien réalisée mais de nombreux problèmes ont vu le jour, pendant la période d'utilisation prolongée. C'est le premier appareil de cette puissance, construit par les établissements Pillard . Ils ont fait leur essai sur un gazogène moins puissant et certains incidents proviennent du changement d'échelles, d'autres de la mauvaise tenue des matériaux.

Depuis, de nombreuses modifications ont été réalisées qui devraient permettre de rendre cet appareil fiable. Le deuxième gazogène profite également de l'expérience acquise .

L'une des réussites de cette installation est sa simplicité de fonctionnement pour l'utilisateur, comparable à l'utilisation de fuel. Le seul travail supplémentaire reste le chargement du silo tampon, au maximum 1 fois par semaine.

VII - MESURE DU RENDEMENT ET DES PERFORMANCES DU GAZOGENE ET DES BRULEURS

Le rôle du bilan thermique dans le contrôle de la gazéification des combustibles, comme d'ailleurs dans celui de la combustion, est très important. Dans ces transformations, le bilan thermique est en quelques sortes une image, que l'on s'efforce d'obtenir aussi fidèle que possible.

La puissance est aussi importante à connaître, celle qui est annoncée par les constructeurs n'étant pas toujours vérifiée dans la pratique. Cette différence avec la réalité peut causer des catastrophes : manque de chauffage dans les serres ou retard dans la campagne de luzerne qui entraîne une diminution des marges de ces productions.

Pour mesurer ces deux grandeurs, il faut connaître :

- Le PCI du combustible biomasse
- Les chaleurs latentes des produits entrant et sortant des différents appareils (par mesure du PCI ou par analyse)
- Les chaleurs sensibles de ces mêmes produits
- Les pertes thermiques par les parois

A - Chaine de mesure

Le CEMAGREF de Nîmes ne disposant pas du matériel nécessaire, une partie de mon stage a consisté à choisir l'ensemble des appareils de mesure et de contrôle pour déterminer ces différents paramètres.

1 - Bombe calorimétrique

a) Définition

Le pouvoir calorifique d'un corps et sa chaleur de combustion, rapporté à l'unité de masse, qui est en pratique le kg. Pour le gaz, cependant, on rapporte le pouvoir calorifique au m³ normal, c'est à dire en quelque sorte, à une unité légale de masse, pour le gaz parfait à $\frac{M}{22,4}$ kg M étant la masse molaire.

Le pouvoir calorifique des combustibles naturels se définit comme le résultat d'une mesure calorimétrique, dans une bombe calorimétrique.

b) Mesure

Cette mesure se fait en provoquant, par allumage électrique, la combustion complète de 2 grammes environ du combustible dans une atmosphère d'oxygène pur, sous une pression de 25 atmosphères. L'obus dans lequel s'opère la combustion est disposé à l'intérieur d'un calorimètre. La substance à brûler est placée au centre de l'obus, dans une coupelle en silice.

Dans le fond de l'obus, on met 5 à 10 cm³ d'eau, pour absorber les petites quantités d'acide sulfurique et nitrique, formées à partir du soufre et de l'azote du combustible. La formation de ces acides entraîne une légère erreur, qui est corrigée par leur dosage avec des bases.

Cette définition du pouvoir calorifique est obtenue avec l'eau de combustion et de l'humidité du produit complètement condensée, la fin de l'essai étant à température ambiante et sous forte pression.

Ainsi s'introduit la notion de pouvoir calorifique supérieur par opposition au pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui correspond à un état final de combustion où l'eau est à l'état de vapeur. C'est cette deuxième valeur qui nous intéresse, l'eau issue d'une combustion, dans la réalité, étant sous forme vapeur.

c) Pouvoir calorifique

L'écart entre ces deux pouvoirs, supérieur et inférieur est donc égal à l'enthalpie de vaporisation de cette eau. Prenons par exemple QCI et QCS, les chaleurs de combustion inférieures et supérieures d'un corps chimiquement défini, dont la molécule contient n atomes d'hydrogène, on a :

$$- QCS - QCI = 10,770 \frac{n}{2} \quad (\text{à } 0^\circ)$$

10,77 étant l'enthalpie de vaporisation d'une molécule d'eau à 0°, en kcal

- soit H, la teneur pondérale du combustible en hydrogène par kg

$$PCS - PCI = 53,5 H$$

Cette formule d'un usage courant, permet le calcul du PCI en fonction du PCS.

D'autre part, dans la majorité des cas, le combustible, même séché, possède un certain pourcentage d'humidité. Soit h ce pourcentage :

$$PCS (\text{humide}) = \frac{100-h}{100} \times PCS (\text{sec})$$

Pour calculer le PCI du combustible humide, à partir de celui du combustible sec, il faut retrancher la chaleur de vaporisation standard

$$PCI (\text{humide}) = \frac{100-h}{100} \times PCS (\text{sec}) - 53,5 \times \frac{100-h}{100} \times H - 598 \times \frac{h}{100}$$

Pour la méthode exacte et les résultats, voir les annexe 20 à 22

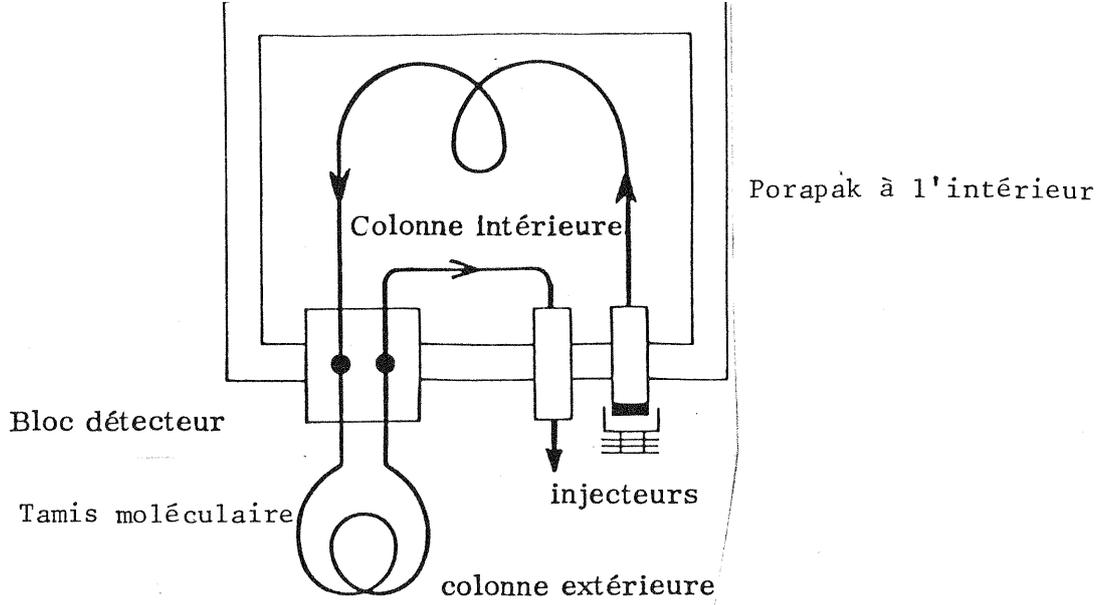
2 - Le chromatographe

Il sert à l'analyse des gaz pauvres, à la sortie du gazogène et pourrait être utilisé pour la détection des gaz de fumée.

Cette analyse permet le calcul du PCI des gaz et facilite la détermination de la qualité de gazéification.

a) L'appareil

Il s'agit d'un chromatographe en phase gazeuse, à catharomètre (filament au rhenium-tungstène) monté dans deux chambres disposées symétriquement. Il est équipé de deux colonnes, une à l'intérieur du four et l'autre à l'extérieur : l'une est un tamis moléculaire, l'autre une porapak.



b) Principe

La résistance électrique d'un filament varie en fonction de sa température. Le coefficient de variation est positif : la résistance du filament augmente avec la température.

Ce filament est placé dans une cellule traversée par le débit capté en sortie de colonne, de telle sorte que sa température reste constante tant que la colonne ne débite que du gaz vecteur pur; le filament est donc en état d'équilibre entre pertes et apports de calories. Il suffit qu'un composé soit élué par la colonne pour que la conductibilité thermique du gaz qui traverse la cellule dans laquelle se trouve le filament, varie en fonction de la concentration de ce composé dans le vecteur. Les pertes de calories de la part du filament varient, et la variation de température résultante provoque un changement de la résistance du filament. Ce changement est à l'origine du signal de détection par thermoconductibilité.

Le gaz vecteur est l'argon. Il a été choisi en fonction de sa conductivité, différente des autres gaz présents dans le gaz pauvre.

c) Mesure

Le signal de détection se traduit par un pic sur l'imprimante, de hauteur proportionnelle à la concentration de ce corps. Le temps de rétention des colonnes est constant pour chaque gaz, pour les mêmes conditions de température et de débit de gaz vecteur.

Pour l'analyse de l'échantillon, il suffit de rapporter chacun de ses constituants au gaz étalon dont les différentes proportions sont connues de manière précise, avec une vitesse et l'ordre d'élution constant.

La formule du gaz étalon a intérêt à être la plus proche possible de l'échantillon à analyser. Nous avons pris :

CO : 9,2 - CO₂ : 18,8 - H₂ : 4,78 - CH₄ : 4,73 N₂ : 62,49 en % du volume.

Exemple de résolution :

Le gaz étalon contient 9,2 % de CO et une hauteur de pic de 8 cm. Si la hauteur de pic de l'échantillon, pour le CO est de 10 cm, sa teneur est de :

$$\frac{9,2}{8} \times 10 = 11,5 \%$$

En réalité, les rapports devraient se faire avec l'aire sous la courbe, mais le pic a une précision assez grande pour le type de mesure désiré et le calcul beaucoup plus rapide : nous ne disposons pas d'intégrateur.

3 - Appareil de mesure en continu de CO-CO₂

Contrairement au chromatographe, il permet la mesure en continu des gaz. Cette mesure du CO-CO₂ rend compte de façon satisfaisante de la qualité de la gazéification ou de combustion de la biomasse.

Elle permet d'autre part de définir le rythme auquel l'analyse au chromatographe doit être faite pour une bonne appréciation des rendements.

a) L'appareil

Il est muni de deux cellules de mesure à infra-rouge et de deux sources. Les pourcentages en CO-CO₂ sont affichés sur des galvanomètres et peuvent être imprimés.

Le gaz est filtré avant d'entrer dans l'appareil et circule à l'intérieur à l'aide d'une pompe, 24 heures sur 24.

b) Principe de fonctionnement

Lorsqu'un faisceau de rayons infrarouges traverse un mélange contenant un gaz G, on constate que certaines radiations de longueurs d'onde L1, L2, L3, etc... sont affaiblies d'autant plus que la concentration du gaz G dans le mélange est grande. Ces longueurs d'onde sont celles des bandes d'absorption caractéristiques du gaz G.

Pour effectuer un dosage de ce gaz dans un mélange, il suffit donc de mesurer l'absorption des rayons infrarouges de longueur d'onde L1, L2, L3 etc.... que nous appellerons pour abrégé les radiations L.

Dans cet analyseur, est utilisée une source de rayonnement infrarouge non sélective, c'est-à-dire qui ne favorise aucune longueur d'onde particulière. Par contre, le récepteur est sélectif : c'est lui qui distingue les radiations L de toutes les autres. Il contient une masse du gaz G pur, chargée d'absorber complètement ce qui reste des radiations L après passage dans le mélange où elles se sont affaiblies. Cette absorption provoque l'échauffement du gaz G dans le récepteur. Le rayonnement non "caractéristique", ne subissant pas d'absorption, n'échauffe pas le gaz G. L'échauffement du récepteur n'est donc provoqué que par les seules radiations "caractéristiques". La mesure des teneurs se ramène alors à une mesure de "l'effet" correspondant.

4 - Mesure de la teneur en vapeur d'eau

Cette mesure est incompatible avec les colonnes choisies pour le chromatographe et la température de service. Nous mesurerons donc l'eau en la condensant dans un bol condenseur plongé dans la glace. Nous prenons naturellement une petite part de gaz, mesuré au débitmètre et son poids d'eau correspondant .

5 - Mesure des débits

Il est important de connaître le débit de l'air injecté dans le gazogène, de celui utilisé pour le refroidissement et du gaz pauvre issu de la gazéification.

a) L'air de gazéification

Nous utiliserons le venturi installé par les établissements Pillard, qui l'ont installé afin d'injecter l'air d'une manière précise, sans dépendance des pertes de charge provoquées par le combustible.

Son principe, bien connu, consiste à mesurer la pression différentielle par un tube U entre la pression de service et celle de la partie contractée. Cette mesure permet la détermination de la vitesse et du débit.

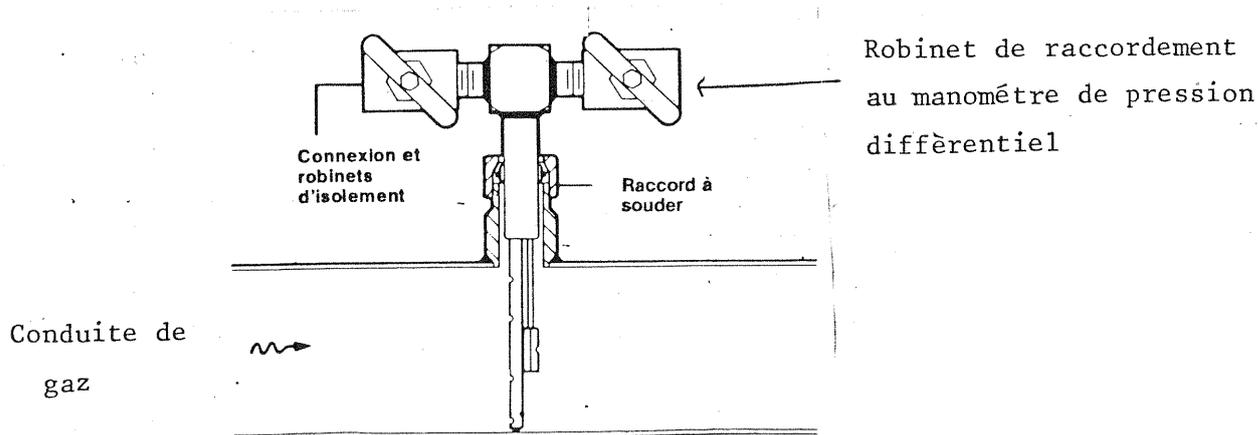
Deux autres venturis sont installés sur cette même injection, après le premier, pour mesurer la répartition entre l'injection centrale et périphérique.

b) Le gaz pauvre

Deux méthodes sont possibles :

- La méthode directe :

Elle consiste à mesurer le débit de gaz dans la canalisation, vers le brûleur. L'appareil utilisé est un "Annubar". La sonde a une forme de diamant qui permet une grande précision en créant une faible perte de charge.



La difficulté de l'utilisation de ce matériel vient de la faible densité du gaz pauvre lié à une vitesse relativement faible. Le nombre de Reynolds est donc faible (ϕ de la conduite importante). L'amplitude de l'échelle de mesure est courte et diminue la précision.

D'autre part, la température évolue ce qui change tous les paramètres du gaz (voir formule de détermination du débit en fonction de la pression différentielle, annexe 23). Pour simplifier le travail, nous avons établi un programme d'ordinateur qui intègre toutes les variables en fonction de la température (voir courbe de régression, annexe 24 -30) et de la pression. Les autres valeurs varient de façon linéaire ou sont facilement extrapolables dans les tables de valeurs .

- méthode indirecte :

Connaissant le débit d'air injecté, par le venturi du gazogène, et sachant que l'azote de l'air ressort sous forme N_2 , nous connaissons le débit d'azote dans la canalisation du gaz pauvre.

D'autre part, le chromatographe nous indique le pourcentage d'azote dans le gaz pauvre et dans l'air.

Exemple : si le débit d'air injecté est de 1139 m³ par heure, l'azote est injecté à 900 m³ par heure. Si le pourcentage dans le gaz pauvre est de 50 %, nous avons :

$$900 \times \frac{100}{50} = 1800 \text{ m}^3/\text{heure}$$

L'avantage de cette méthode est sa simplicité : la température de l'air est constante et l'organe déprimogène (le venturi) mesure un gaz propre, exempt de particule (l'air). Le seul problème est l'inertie du gazogène dans ces transformations.

c) L'air de refroidissement

La mesure se fera avec l'Annubar

d) Mesure du débit de fumées

Elle peut se faire soit avec l'Annubar, soit en tenant compte du débit de combustible.

- La première méthode est difficile à réaliser, la vitesse étant trop faible. Les autres techniques de mesure directes créent des pertes de charge importantes, ne reflétant pas la réalité.

- La deuxième méthode consiste à mesurer le débit de biomasse, et connaissant, à peu près, le pourcentage de carbone, nous connaissons le débit de carbone.

D'autre part, les appareils d'analyse (chromatographe ou analyseur CO-CO₂) nous donnent l'analyse des fumées où, normalement, tout le carbone est à l'état de CO₂ et CO. Il faut toutefois soustraire le C imbrulé des cendres et des particules entraînées par le gaz.

Ainsi, en connaissant la proportion des différents gaz (CO₂ - CO - N₂ - H₂O) dans les fumées et le débit de carbone, nous avons le débit de fumée. Il faut également connaître le taux de carbone non gazéifié, dans les cendres.

6 - Mesure des températures

Une part de l'énergie produite par le gazogène concerne la chaleur sensible du gaz pauvre, de l'air de refroidissement et des cendres. D'autre part, elle est utile pour déterminer les paramètres physiques du gaz.

a) Dans les gaz

Des doigts de gant munis de sonde à thermocouple, sont installés sur des canalisations. Les températures sont mesurées et imprimées sur un MECI (mesure de la différence de potentielle variable avec la température).

b) Dans les cendres

On utilise une sonde portative.

7 - Compteur d'énergie

Tous les appareils précédemment cités, concernent plus spécialement le gazogène.

Le compteur d'énergie a uniquement rapport avec la chaudière des serres ou pour calculer le rendement global : biomasse - eau chaude.

Il est monté sur la canalisation de retour des serres (eau froide). Son principe est simple, il s'agit de :

- un compteur volumétrique d'eau
- 2 sondes de température disposées sur l'allée et le retour de l'eau
- un intégrateur qui transforme ces données en kwh.

8 - Pesée

Pour de nombreux contrôles, nous employons des balances :

a) Calorimètre

Trois balances sont utiles, pour mesurer l'échantillon, doser l'humidité et le poids de l'eau introduit dans les enceintes. Elles ont des précisions de : 10^{-4} , 10^{-2} et 1 gramme.

b) Débit de biomasse

On peut le déterminer en pesant une grande quantité au pont bascule, pour une mesure de longue période.

Pour les mesures de courtes durées, nous utiliserons la balance doseuse ou le poids d'un chargement du gazogène que multiplie l'écart de temps entre deux chargements.

c) Débit de cendre

Mesure au pont bascule ou à la balance.

B - Exploitation de résultats

1 - Energie du combustible

- Mesure du PCI à la bombe qui est corrigé par l'humidité
PCI vrai
- Mesure du débit de biomasse par pesée et par unité de temps
→ débit énergétique du biocombustible

2 - Energie du gaz

- Débit de gaz pauvre (venturi, annubar)
- Chaleur latente par analyse du gaz au chromatographe
- Chaleur sensible par mesure avec des thermocouples et en
connaissant la composition du gaz au chromatographe
→ débit énergétique du gaz pauvre

3 - Energie de l'air de refroidissement

- Mesure par l'annubar., du débit
- Mesure de la température par thermocouple
→ débit énergétique du refroidissement

4 - Energie des Cendres

- Pesée des cendres
- Mesure de la chaleur latente par la bombe calorimétrique
- Mesure de la chaleur sensible à la sonde.

→ débit de perte par les cendres.

Pour calculer le rendement global, nous considérons en plus :

- 5 - Débit énergétique de l'eau chaude
 - . Par relevé du compteur d'énergie (voire cheminement pour le calcul du rendement global annexe 34 & 35)
- 6 - Débit énergétique des fumées.
 - . Débit de fumées avec l'annubar ou le venturi (indirect)
 - . Chaleur latente par analyse ou chromatographe ou à l'analyseur de CO - CO₂
 - . Chaleur sensible avec thermocouple et analyse des gaz

Nous devons également considérer les pertes thermiques par les parois mais, aucune méthode ne permet de les déterminer de façon précise. Nous les déduirons par différence. Les pertes thermiques dans les canalisations sont déterminées avec des thermocouples situés à chaque extrémité.

Nous considérerons différents cas en annexe .

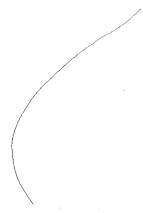
° Données permettant le calcul de différents paramètres :

Pour que le calcul soit facilité, nous avons établi toute une série de courbes et d'équations de régression en fonction de la température, suivant des tables de valeur (source Techniques de l'Ingénieur).

- Masse volumique des éléments du gaz et de l'air
- Viscosité
- Capacité calorifique.

Pour les constantes du gaz et des autres produits, nous les verrons en Annexe.

REMARQUE : des résultats seront donnés le jour de la soutenance



C - ETUDES DES SERRES

En dehors des mesures effectuées sur les appareils de gazéification et de combustion, nous avons voulu avoir une idée du comportement global de l'installation de chauffage des serres. Nous nous sommes d'avantage penchés sur certains points qui nous paraissaient les plus significatifs :

- mesure du temps de réponse
- comparaison entre chauffage au fuel et à la biomasse
- regard sur les températures d'ambiance et observation de la répartition des températures avec les aérothermes.

1 - Protocole de mesure

Les mesures ont été effectuées avec des thermocouples, reliés à une imprimante. Ils étaient équipés de deux manières différentes :

- avec un ventilateur, pour la température d'ambiance
- sans ventilateur, pour le contrôle des thermostats des aérothermes.

Nous avons disposé de 16 serres, 11 ventilées (dont une pour la mesure de la température humide) et 5 sans ventilation.

La durée des mesures s'est étalée sur 4 mois, entre début Décembre et fin Mars, dans un des 4 blocs de serres.

Les résultats et les conclusions qui vont se dégager par la suite sont à relativiser. En effet, pour des raisons indépendantes de notre volonté, le gazogène n'a pu produire que le 1/3 de sa puissance et de nombreux incidents ont émaillé la campagne.

2 - Etude comparative des modèles de chauffage

a) L'équipement

Le chauffage des serres peut être assuré par 3 systèmes différents :

- par l'ancienne installation, constituée par des brûleurs à fuel domestique et à air pulsé, dont un est installé dans la partie qui nous intéresse.

- avec la nouvelle chaudière, reliée aux aérothermes, mais dont le combustible peut être indifféremment le fuel domestique ou le gaz pauvre.

b) Les mesures

Pour établir les comparaisons, nous nous sommes attachés à la température moyenne, en plaçant les rondes en divers points de la serre. Nous avons pris les sondes ventilées, dont une était installée à l'extérieur, pour la mesure du Δt .

Nos remarques se sont basées sur plusieurs suites de mesures, les renseignements pris sur le fuel sont le fruit des pannes du gazogène.

Nous avons également tenu compte de la puissance, en nous mettant dans les mêmes conditions pour les 3 systèmes :

- relevé du compteur d'énergie (pour la chaudière)
- relevé du Δt entre intérieur et extérieur (chauffage interne)

c) Observations

La chaudière permet une température vraiment constante, que ce soit avec le fuel ou le gaz pauvre. La seule différence vient du temps de mise en température de l'eau : le gazogène présente une certaine inertie. Cet inconvénient est facilement supprimé par un allumage antérieur à celui du fuel (voir courbe annexe 36). La régulation automatique est vraiment parfaite.

L'ancienne installation donne des températures très irrégulières (annexe

3 - Mesure de la stratification

La nouvelle installation est pourvue d'aérothermes, disposés au faitage de la serre. Ce sont des ventilateurs d'air chaud dont le rôle est de brasser les couches d'air supérieures de l'enceinte, pour homogénéiser la température avec les couches basses, plus froides et limiter ainsi, dans une certaine mesure, les pertes par convection et

- avec la nouvelle chaudière, reliée aux aérothermes, mais dont le combustible peut être indifféremment le fuel domestique ou le gaz pauvre.

b) Les mesures

Pour établir les comparaisons, nous nous sommes attachés à la température moyenne, en plaçant les rondes en divers points de la serre. Nous avons pris les sondes ventilées, dont une était installée à l'extérieur, pour la mesure du Δt .

Nos remarques se sont basées sur plusieurs suites de mesures, les renseignements pris sur le fuel sont le fruit des pannes du gazogène.

Nous avons également tenu compte de la puissance, en nous mettant dans les mêmes conditions pour les 3 systèmes :

- relevé du compteur d'énergie (pour la chaudière)
- relevé du Δt entre intérieur et extérieur (chauffage interne)

c) Observations

La chaudière permet une température vraiment constante, que ce soit avec le fuel ou le gaz pauvre. La seule différence vient du temps de mise en température de l'eau : le gazogène présente une certaine inertie. Cet inconvénient est facilement supprimé par un allumage antérieur à celui du fuel (voir courbe annexe 36). La régulation automatique est vraiment parfaite.

L'ancienne installation donne des températures très irrégulières (annexe 3)

3 - Mesure de la stratification

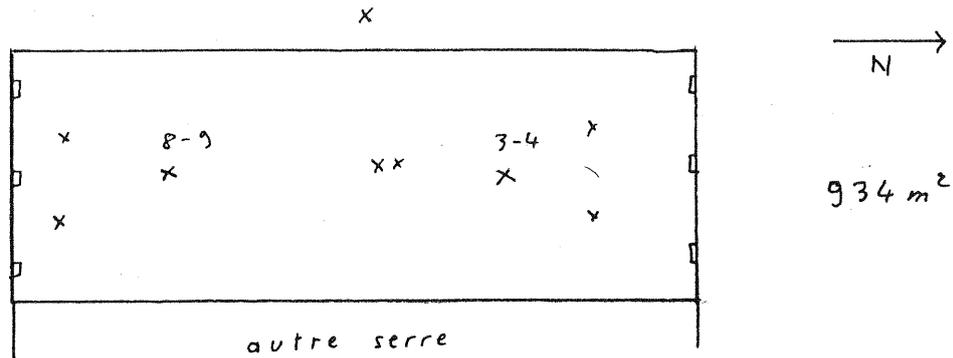
La nouvelle installation est pourvue d'aérothermes, disposés au faitage de la serre. Ce sont des ventilateurs d'air chaud dont le rôle est de brasser les couches d'air supérieures de l'enceinte, pour homogénéiser la température avec les couches basses, plus froides et limiter ainsi, dans une certaine mesure, les pertes par convection et

rayonnement, au niveau de la paroi supérieure. Il apporte également de la chaleur, puisée à l'eau de chauffage.

a) Mesure

Nous avons installé deux paires de thermocouples, en un même point mais avec une altitude différente :

- celui du bas était à 1 mètre du sol
- celui du haut à 3,7 m et 40 cm de la paroi supérieure.



b) Remarques

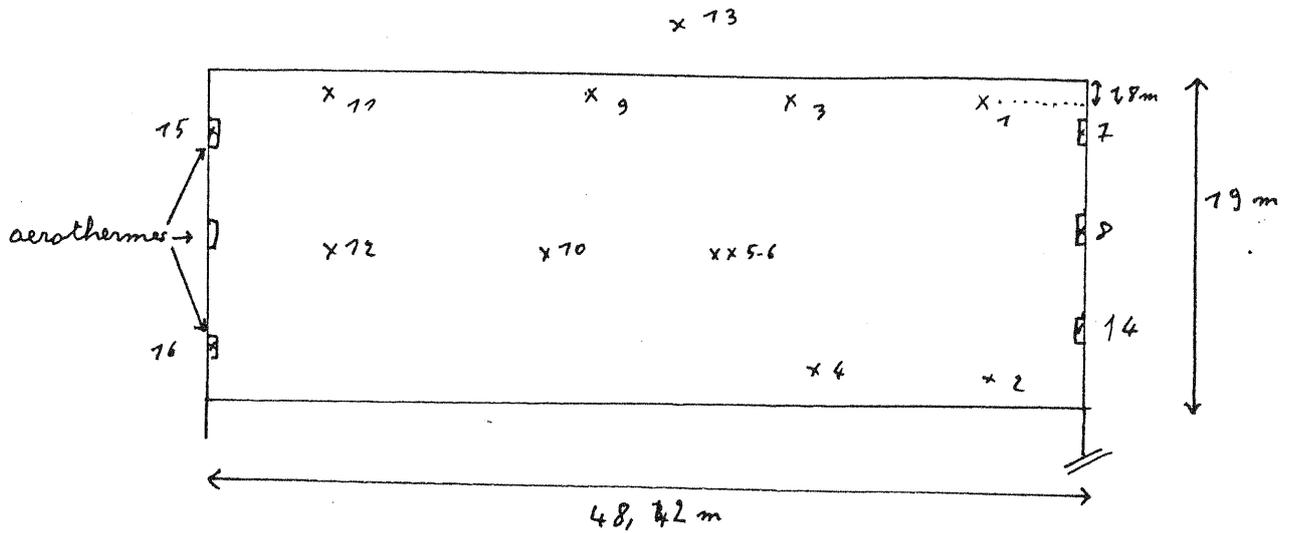
Le Δt entre ces deux hauteurs est faible, de l'ordre de $2,5^\circ$ bien que la température extérieure soit au voisinage de 0° et la température intérieure à + de 15° , ceci quand les aérothermes sont en marche avec la chaudière (voir courbe annexe 38).

Quand le chauffage provient du brûleur interne à la serre, le Δt est voisin de 10° bien que la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur soit plus faible que précédemment (nous disposons de peu de mesure, nous avons seulement profiter d'un incident du gazogène et du brûleur fuel), voir courbe en annexe 39 .

4 - Isotherme de surface

a) Mesure

Nous avons étudié ce caractère, en installant des thermocouples en divers endroits de la serre, plus ou moins proches des parois et des aérothermes, mais tous à la même hauteur (1 m du sol).



b) Observations

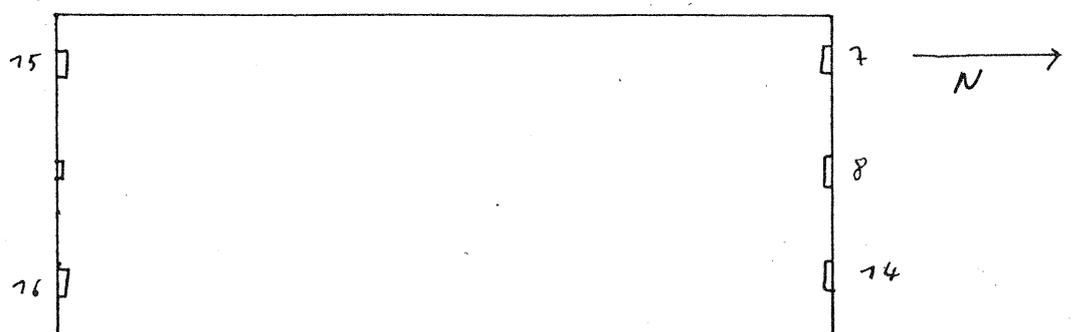
Le relevé des mesures nous indique une mauvaise répartition de la chaleur dissipée par les aérothermes : en plus des déflecteurs horizontaux, il faudrait installer des déflecteurs latéraux (voir courbes n° 2/n° 4) pour diminuer l'effet directif des rangées de rosiers. (Annexe 40)

D'autre part, la proximité des parois tend à une chute relativement importante (voir courbes 1, 3, 11, 9/12 et 10).

Il faudrait doubler cette paroi avec un film de plastic et doubler la puissance de chauffage comme dans la serre voisine (2 aérothermes sont couplés près des parois).

5 - Mise en marche des aérothermes

Pour étudier ce facteur, nous avons disposé des thermocouples non ventilés, aux mêmes places que les sondes des thermostats.



a) Mesures

Les mesures ont été effectuées sur cinq aérothermes, par les lignes 7 - 8 - 14 - 15 - 16 (voir courbe en annexe 41)

b) Observations

Les thermostats sont placés juste en dessous des aérothermes, dans le courant d'aspiration, froid. Ainsi, quand l'aérotherme se met en marche, le thermocouple enregistre une chute de température tandis que la température d'ambiance s'élève (voir courbes en annexe). Les thermostats devront être réglés plus bas que la température désirée, mais assez haut pour le démarrage, ce qui est contradictoire.

Il faudrait les changer de place, en les disposant au centre de l'enceinte.

D'autre part, nous pouvons remarquer que l'air d'aspiration est en contact avec la paroi de la serre (qui est proche de la température externe) ce qui entraîne une perte de chaleur. Il faudrait installer des gaines pour l'aspiration.

VIII - INTERET ECONOMIQUE DE L'OPERATION

A - Le Projet

1 - Coûts de la culture

a) Frais d'implantation

Depuis cette année, après des essais de l'INRA, la canne de Provence est plantée en association avec du maïs entre les lignes. Ainsi, la surface laissée libre par la canne, la première année, est valorisée.

La surface de maïs représente 2/3 de la surface totale : l'interligne de canne est de 3 m et l'on sème 3 rangs de maïs entre.

Nous pouvons en déduire que les frais d'investissement sont représentés par la somme des charges supplémentaires exigées par la plantation des rhizomes et du tiers manquant à la recette, sur une récolte de maïs.

	en Frs/ha
- Aménagement du sol par entreprise (moyenne)	800,00
- Sous-solage	300,00
- Frais de plantation	600,00

charges supplémentaires	1.700,00
- A ajouter : recette de maïs manquants	
70 q x 1/3 x 83 Frs	1.937,00
- A déduire :	
1/3 de dose de semence de maïs	100,00
1/3 de battage	100,00

Frais nets de plantation	3.437,00 F/ha

Quoique cet investissement puisse être étalé sur une plus longue période, il sera tenu compte dans cette étude d'un amortissement en dix ans et d'un taux d'intérêt de 12 %.

L'annuité se monte alors à 608,35 F/ha

b) Frais annuels d'exploitation

Elle concerne tous les travaux effectués et les produits achetés

- Fumure azotée, 200 unités à 2,60 F	520,00
- Irrigation	200,00
- Façons culturales (épandage et régénération)	200,00
- Récolte	700,00
	<hr/>
Total (sans main d'oeuvre)	1.620,00 F/ha

Ces chiffres sont calculés pour le Grand Manusclat (source Mr. Lechevalier).

Nous remarquons que les frais de culture sont relativement faibles, le plus gros poste étant la récolte (coupe et débardage).

2 - Frais de conditionnement (pour le projet)a) Charges proportionnelles

. Fuel lourd : nous avons vu que le besoin de fuel lourd pour le séchage de 254 ha de canne est de 56 tonnes. En prenant le prix du mois d'Avril 1981 :

56 x 1130	63.280 Frs
-----------	------------

. Electricité : il faut comptabilisé la consommation du gazogène, du rechauffage du fuel et de l'unité de séchage (dont la granulation).

Le prix du kwh est complexe à déterminer : il dépend de l'heure d'utilisation, de l'énergie réactive et de la prime mensuelle forfaitaire :

- moyenne du kwh pour la journée	21,08
(l'usine fonctionnant 24h/24)	
- prime mensuelle sur 3 mois, pour les	
2/3 de la consommation et 197630 kwh	2,55
- énergie réactive supplémentaire	3,65
(moyenne observée)	

La consommation étant de 197630, le montant est de :

$$197630 \times 27,28 = 53910 \text{ Frs}$$

. Entretien, lubrifiant et chargeur : ce poste est relatif aux frais d'entretien de l'usine de séchage et au chargement de la matière fraîche sur le convoyeur. Après une estimation, relative au séchage de la luzerne, nous considérons 16 F/tonne soit :

$$16 \times 5087 = 81390 \text{ Frs}$$

Total conditionnement 198480 Frs

soit pour 254 ha, 782 Frs/ha

b) Charges fixes

Main d'oeuvre : normalement, le personnel devrait rester le même, l'organisation du travail équivaudrait au chantier de récolte de luzerne.

Les taxes professionnelles d'apprentissage et autres resteront également les mêmes.

c) Charges de structure

Les amortissements : en déshydratation, on a coutume d'amortir les constructions sur 10 ans, sans valeur résiduelle et le matériel d'usine sur 8 ans.

L'installation ayant dépassé ces âges, nous ne tiendrons pas compte de ce poste, mais, dans l'entretien, le chiffre d'un montant important, relate de la vétusté de certains appareils.

Assurance : pour cette usine, elle se monte globalement à 55600 Frs par an et l'utilisation pour la canne n'entraînera pas d'augmentation.

Les frais totaux de conditionnement reste à 782 Frs/ha

3 - Marge brute de la culture remplacée

La référence choisie est le blé dur. Le rendement moyen sur les 10 dernières années étant de 34 Q /ha et le prix actuel de 135 F/quintal, nous avons :

- recette à l'hectare : 34 x 135,00	4.590 F/ha
- charges en culture :	
engrais N/P/K : 140/100/100	854 F/ha
traitements	300 F/ha
semence	400 F/ha
façon culturale	600 F/ha
récolte	300 F/ha
	<u>2.454 F/ha</u>

La marge brute est de 21316 F/ha

4 - Prix de seuil

Nature de la charge	Plantation existante		Plantation Nouvelle	
		sur SAU	hors SAU	
: Annuité d'amortissement	:	: 608	: 608	:
: Charges annuelles	: 2402	: 2402	: 2402	:
: (dont conditionnement)	: (782)	: (782)	: (782)	:
: Marges perdues	: 2136	: 2136	: 11	:
: Prix seuil/ha	: 4538	: 5146	: 3010	:
: Prix seuil de la th avec	: 5,5 cts	: cts 6,2	: cts 3,7	:
: 82400 th/ha	:	:	:	:
: Prix seuil de la th avec	: 6,7 cts	: cts 7,6	: cts 4,4	:
: 67750 th/ha (après séchage	:	:	:	:
: avec 85 % de canne	:	:	:	:

5 - La paillea) Rammassage

Nous allons considérer le coût de ramassage des 120 ha de céréales

du mas. Pour cela, j'utiliserai des informations recueillies au BCMEA.

Ainsi, pour le pressage et la manutention de grosses balles rondes, il faut compter par tonne de paille récoltée :

- pressage avec tracteur et round-baller	33,63
- chargement, transport, déchargement	16,65
	<hr style="width: 100%;"/>
	50,28

50,28 F/t (sans main d'oeuvre)

Si nous considérons les 120 ha à 3,5 t/ha, le chantier revient à :

$50,28 \times 120 \times 3,5$	21.119,00
-------------------------------	-----------

b) Granulation

Nous considérerons que la granulation de la paille consomme la même énergie que celle de la canne (broyage + pressage) soit 47 kwh par tonnes

$0,2825 \times 47 \times 120 \times 3,5$	5.385,00
--	----------

c) Entretien

Il faut ajouter l'usure de la filière et des galets, les lubrifiants et le chargement soit 10 F/t

4.200,00
<hr style="width: 100%;"/>

Total	9.585,00
-------	----------

coût total de la paille : 30.700 Frs

6 - Autres coûts entraînés par l'utilisation de la biomasse

Ces consommations concernent la marche des gazogènes pour le séchage, supérieur à la consommation électrique pour le brûleur fuel et le gazogène associé à la chaudière des serres:

a) Séchage de la luzerne

La consommation horaire supplémentaire est de 75,5 kwh/h. En prenant

- 1069 t de fuel lourd à 1130 F/t (Avril 81)	1207970
- 410 m3 de fuel domestique à 1900 F/m3 (Avril 1981)	779000
	1986970

soit un solde positif de 822.990 Frs

B - Intérêt économique pour la situation actuelle

Nous allons maintenant considérer la situation actuelle, avec 4000 tonnes de luzerne, 7300 m2 de serre et un rendement d'évaporation de 730 kcal/kg d'eau (et en autonomie énergétique)

1 - Séchage de la canne

- Fuel lourd ; nous savons qu'il faut 46 tonnes pour le séchage des 211 ha nécessaires à l'opération		
	49 x 1130	55.370 Frs
- Electricité : la consommation électrique pour le séchage de cette même canne est de 168.520 kwh. Le prix du kwh est le même que celui calculé précédemment		
	168.520 x 0,2728	45.270
- L'entretien, les lubrifiants et le chargeur, 16 F/tonne soit :		
	16 x 4272 =	67.390 Frs
total pour le séchage canne ≈ 800 F/ha		

2 - Prix de seuil (en considérant les mêmes charges de culture et la même marge de la culture de remplacement) :

	: Plantation existante	: Plantation nouvelle :	
	:	: sur SAU	: hors SAU
	:	:	:
Annuité d'amortissement	:	: 608	: 608
Charges annuelles	: 2420	: 2420	: 2420
(dont conditionnement):	: (800)	: (800)	: (800)
Marge perdue	: 2136	: 2136	: 2136
Prix seuil/ha	: 4556 F	: 5164 F	: 3028 F
Prix seuil de la th	: 5,5 cts	: 6,2 cts	: 3,7cts
avec 82400 th/ha	:	:	:

Prix seuil de la th	:	6,8cts	:	7,7cts	:	4,2cts	:
avec 669 00 th/ha en.	:		:		:		:
considérant la part	:		:		:		:
pour le séchage	:		:		:		:

3 - Consommation supplémentaire

Cette fois, encore, nous allons considérer la consommation supplémentaire d'électricité pour le stockage de la luzerne et le chauffage des serres.

Pour la luzerne, le débit est de 1,64 t/h ce qui fait, avec les mêmes gazogènes, 183690 kwh supplémentaires. Si l'on prend le même prix au kwh

0,2473 x 183690	45.430 Frs
-----------------	------------

Pour les serres, nous prendrons également les mêmes paramètres, soit :

66320 x 0,2537	16.820 F
----------------	----------

Total	62.250 F
-------	----------

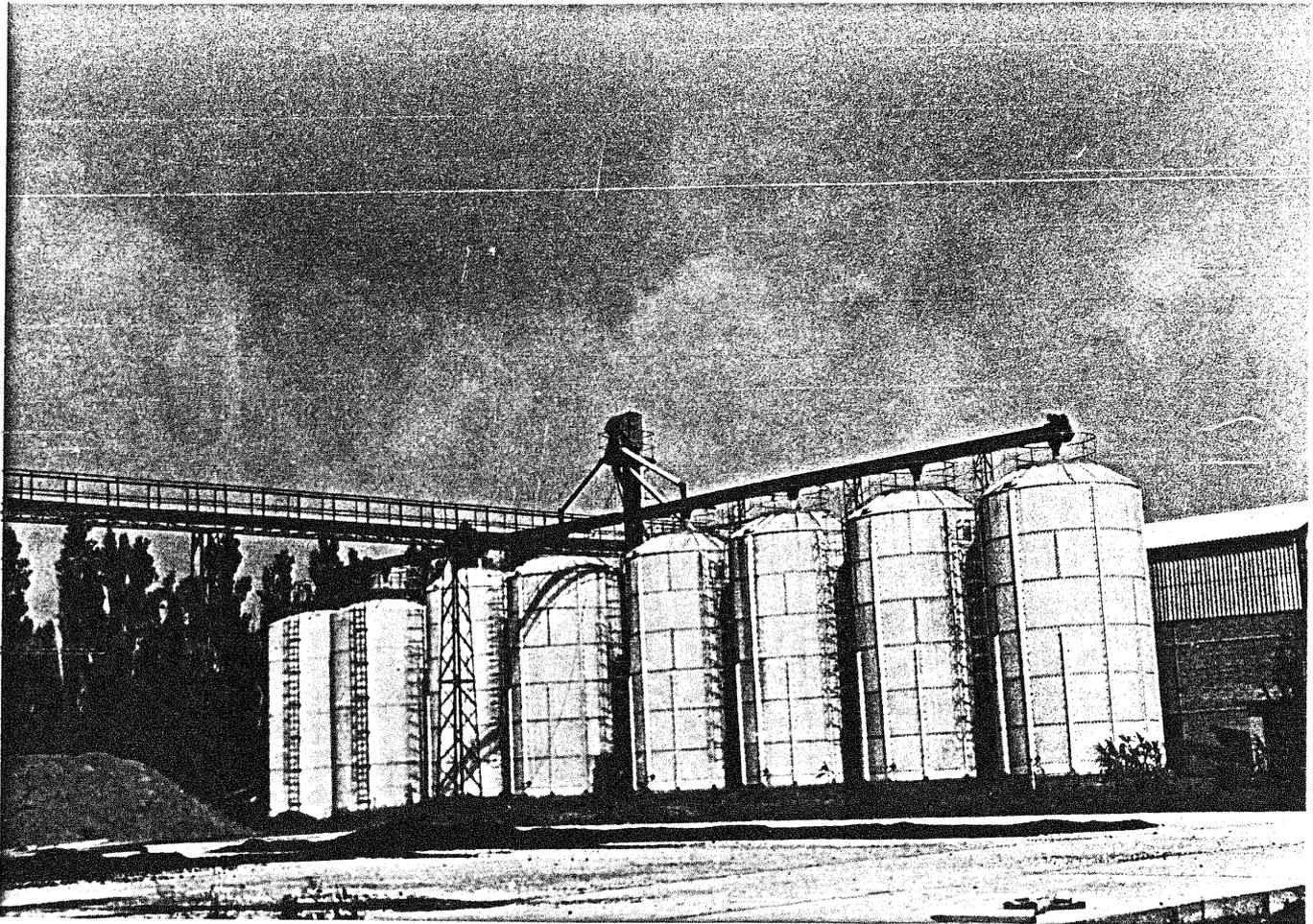
4 - Total des charges supplémentaires pour la situation actuelle

Pour la canne (211 ha)	
80 ha de plantation existante	364.480
61 ha de plantation sur SAV	315.000
70 ha de plantation hors SAV	211.960
	<hr/>
	891.440
Paille	30.700
Electricité en plus	62.250
	<hr/>
	984.390 F

5 - Suppression des achats suivants

Fuel lourd 9 en moins : 905 x 1130	1.022.650
Fuel domestique en moins : 302 x 1900	573.800
	<hr/>
	1.596.450 F

soit un solde positif de 612.060 Frs



Silos de luzerne et aire de stockage

C - Equilibre actuel

Pour l'instant, l'exploitation est dans une phase transitoire pour son autonomie énergétique. Elle ne dispose que de 80 ha de canne de Provence, sur les 211 utiles, avec la production de luzerne et la surface de serres actuelle.

1 - Besoin de biomasse "étrangère"

a) Source

Les besoins en biomasse sont de 15 309 000 th. Le mas dispose pour l'instant de 6 738 000 th, avec la paille et la canne disponible. Il devra se procurer 8 571 000 th à l'extérieur. Deux sources sont possibles à des prix abordables : les noyaux de pêches et les rafles de maïs.

Nous considérons le PCI de ses deux produits à 3 500 th par tonne. C'est une valeur moyenne, les variations sont importantes, en fonction de l'humidité.

b) Quantité

Les besoins sont de 8 571 000 th soit, 2 448 tonnes. Nous prendrons comme approvisionnement 1/3 de noyaux et 2/3 de rafles.

2 - Prix de revient de cette biomasse

Le prix d'achat des rafles de maïs est de 30 Francs la tonne tandis que les noyaux de pêches sont donnés pour débarasser l'usine de conserve de fruits.

Le coût dépend du transport, effectué par container, sur des camions. Son prix est de 500 Francs pour 5 tonnes de produit.

noyaux :	$1/3 \times 2\,448 \times 100$	81 632,52
rafles :	$2/3 \times 2\,448 \times (130 + 30)$	<u>212 244,56</u>
	total =	293 800 Francs.

3 - Total des charges supplémentaires

Canne de Provence, 80 ha existants	364 480
Paille	30 700
Rafles et noyaux	293 880
Electricité en plus	<u>62 500</u>
	751 560 Francs

4 - Solde de l'opération

Cette opération évite les mêmes achats que précédemment, le fuel domestique des serres et le fuel lourd du séchage de la luzerne : 1 596 450 F.

Le solde est encore plus positif, il s'élève à :

$$1\ 596\ 450 - 751\ 560 = 844\ 890 \text{ F/an.}$$

D - Investissement

Nous venons de considérer l'avantage économique de l'utilisation de la biomasse, sans tenir compte des investissements importants qui l'accompagnent. Nous allons maintenant mesurer leur importance. Toutefois, pour diverses raisons, je n'ai pas eu le prix exact de tous les postes, seul le total est sûr.

1 - Prix de l'équipement complet

a) Le Stockage

Cette rubrique comporte l'aire de stockage et ses annexes ainsi que le silo tampon :

Aire de stockage	140 376,35
Structure de l'aire	18 170,11
Silo tampon	67 144,00
Manutention stockage	<u>431 678,32</u>
total	657 370 Francs

b) Les gazogènes

Pour ces appareils, bien que je dispose d'un prix unitaire, il faut considérer l'ensemble : le premier était un prototype expérimental tandis que le deuxième entre dans le secteur de la fabrication industrielle.

D'autre part, le constructeur a reporté une bonne partie des coûts de recherche du premier sur le second, ce qui explique le prix élevé, sans doute très différent de celui de série.

1er gazogène	285 290,00
2ème gazogène	<u>623 480,00</u>
	908 770,00 Francs

c) Appareil de chauffage

Ici, nous n'allons considérer que le bruleur mixte fuel-gaz pauvre, qui a remplacé le bruleur à fuel, sur l'installation de séchage :

1 bruleur mixte	91 000 F.
-----------------	-----------

d) Chauffage des serres

J'ai différencié ce secteur car l'achat de ce matériel n'était pas uniquement dérivé du passage à la biomasse : l'ancienne installation n'était pas suffisante pour la production horticole.

Nous considérerons donc deux cas de figure, pour le calcul des annuités d'amortissement : avec ou sans l'équipement pour les serres.

Détails de l'installation :

Chaufferie (chaudière, pompe...)	238 462,44
Aérotherme et tuyauterie	52 915,00
Bruleur chaudière et régulation	<u>49 432,11</u>
total	340 810

e) Etude et frais divers

Dans cette rubrique sont inclus les frais d'ingénierie et tous les frais non ventilés dans les différents postes. On peut considérer ces frais comme proportionnels aux prix des appareils.

Total pour l'installation : 3 015 860 F

2 - Annuités d'amortissement

TOTAL 3 013 810 F

Ce type d'installation est encore très rare et la durée d'amortissement n'a pas encore été définie de façon définitive.

J'ai pris comme valeur celle utilisée pour les usines de deshydratation, industries propres au secteur agricole. Ainsi, j'ai considéré trois secteurs :

- l'aire de stockage et le silo tampon plus les frais de structure, amortis en 10 ans
- le matériel usine (manutention, régulation...) amorti en 8 ans
- le corps du gazogène (sans équipement) amorti en 5 ans.

Pour le coefficient de calcul d'annuité d'amortissement, voir Annexe 42

a) Les constructions

Nous considérerons le prix global qui est de 225 690 F. auquel il faut ajouter 7,49% des frais incombant à l'ensemble de l'installation soit, au total 301 760

Les annuités s'élèvent par an à :

$$0,177 \times 301\ 760 / = 39\ 847,15 \text{ F/an.}$$

b) Le matériel d'usine

Cette fois encore, nous considérerons le prix global. Dans ce total nous comptons la manutention de la biomasse, l'équipement des gazogènes ainsi que le reste de l'installation de chauffage soit :

2 189 251,66 F avec les 77,65% de frais généraux.

Les annuités sont de :

$$2\,189\,251,66 \times 0,201 = 440\,040 \text{ F/an}$$

c) Les gazogènes

J'ai pris un amortissement en 5 ans, au regard des contraintes et de l'utilisation intensive auxquelles ils sont soumis.

Pour déterminer le montant à amortir, je connaissais le prix du deuxième gazogène en détail; entre les équipements et le corps. Pour le premier, j'ai considéré le même pourcentage du total, soit pour les deux ... 447 895,00 F. Nous ajoutons les 14,86% de frais généraux.. 598 866 F.

Les annuités s'élèvent à :

$$598\,866,34 \times 0,277 = \underline{165\,885 \text{ F/}}$$

$$\text{Total des annuités pour l'installation....} \quad \underline{\underline{645\,872 \text{ F/}}}$$

Remarques :

Si nous retirions la chaudière, le bruleur et l'équipement des serres, l'investissement diminuerait de 340.805,55 F. soit ... 91 591 F.
de moins par an pour les annuités.

$$\text{Sans l'équipement serres} \quad \underline{\underline{554\,280 \text{ F/}}}$$

RECAPITULATIF (en Francs)

	Marge avant amortissement	Marge après amortissement	
		TOTAL	sans les serres
Projet final	822 990	177 117	268 709
Projet d'autonomie avec production actuelle	612 060	-33 813	57 779
Situation actuelle	844 893	199 020	290 612

CONCLUSION

Nous voyons que l'opération est souvent très avantageuse à une exception près. Le projet, tel qu'il sera conduit, donnera une marge supplémentaire appréciable et sûre. Cette situation sera de plus en plus profitable avec l'augmentation du fuel.

L'emploi de la biomasse étrangère est également intéressante mais il faut se méfier de la flambée des prix que risque d'entraîner le résultat d'une telle valorisation des sous produits.

Remarque (1) :

Ces chiffres ne comprennent pas les pertes dues à la mise en route et à l'abandon du ligno-brûleur. Monsieur LECHEVALIER estime cette dépense à 1 770 000 Francs, en comptant également le manque à gagner par la perte de luzerne, la main d'oeuvre utilisée à des fins de recherche et le fuel consommé inutilement. Il faudrait récompenser de tels efforts, profitables à la communauté, pour éviter de gros problèmes au mas.

Remarque (2) :

Dans tous les calculs économiques, nous n'avons pas considéré d'amortissement sur l'installation de déshydratation puisqu'elle n'a plus de valeur comptable.

Si nous étions en présence d'une usine neuve, de même caractéristique, le montant des annuités d'amortissement serait :

	<u>Prix neuf</u>	<u>annuité</u>
Aménagement terrain, bâtiment, électricité (sur 10 ans)	125 000 000	221 250
Matériel usine (sur 8 ans)	<u>125 000 000</u>	<u>251 250</u>
	2 500 000	516 750

Ces chiffres seraient à répartir entre la canne et la luzerne, en fonction du temps d'utilisation soit, respectivement, 30% et 70% pour 3 mois de séchage de canne.

Les annuités d'amortissement pour la canne seraient de 155 025 F/an.

Nous voyons que, même en comptant ces frais supplémentaires, la situation est encore avantageuse dans 4 cas sur 6 vus précédemment, en répartissant les amortissements de manière constante, sans tenir compte des hectares en moins dans les autres situations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

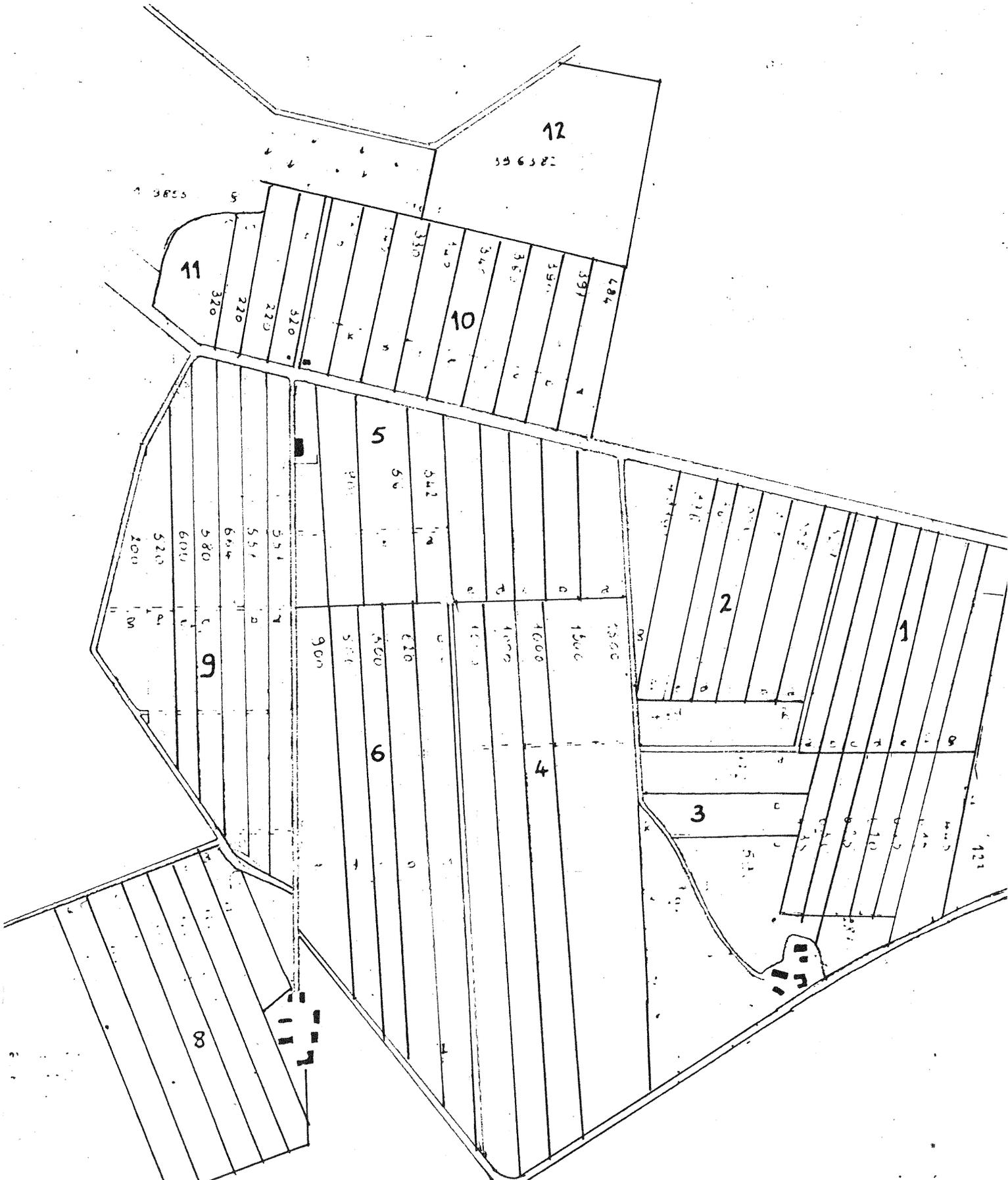
- 1 - J. MEUNIER - *"Gazéification et oxydation des combustibles"*
1958 (MASSON)
- 2 - *"Bulletin technique d'information - La canne de Provence"*
1975 - Ministère de l'Agriculture.
- 3 - M. ARNOUX *"La canne de Provence"* 1973 INRA.
- 4 - Etude du CNEEMA *"Les travaux et les avis du CNEEMA sur la valorisation
énergétique de la biomasse"* 1980 n° 460.
- 5 - Etude du CNEEMA *"Traduction rapide d'un rapport sur l'énergie pour
l'agriculture mondiale"* tome 1-2-3 1978 n° 439,432,433,434.
- 6 - Etude du CNEEMA *"Essai sur l'énergie dans l'agriculture ou dans le système
agro-alimentaire en France"* tome 1-2 1975 n° 404-408.
- 7 - David PIMENTEL *"Food production and the energie crisis"*
Science USA 1973
- 8 - COMES *"L'énergie verte"* 1980
- 9 - Miche DEHAIS *"Etude sur la gazéification de la paille"*
1976 CNEEMA.
- 10 - CETEGREF *"Etude sur les économies d'énergie dans les serres"* 1980
- 11 - J. LUCAS et J.F. MOLLE *"Production d'énergie mécanique par gazeification
de la paille"* CNEEMA 1979.
- 12 - Archives du GEPALC, de 1972 à 1978.
- 13 - Perspective agricole spécial deshydratation, n°3 1977.
- 14 - Techniques de l'Ingénieur : *"Constantes"* *"Mécanique et chaleur"*
"Mesures et controle" *"Mesures et analyse"*.

- ANNEXES -

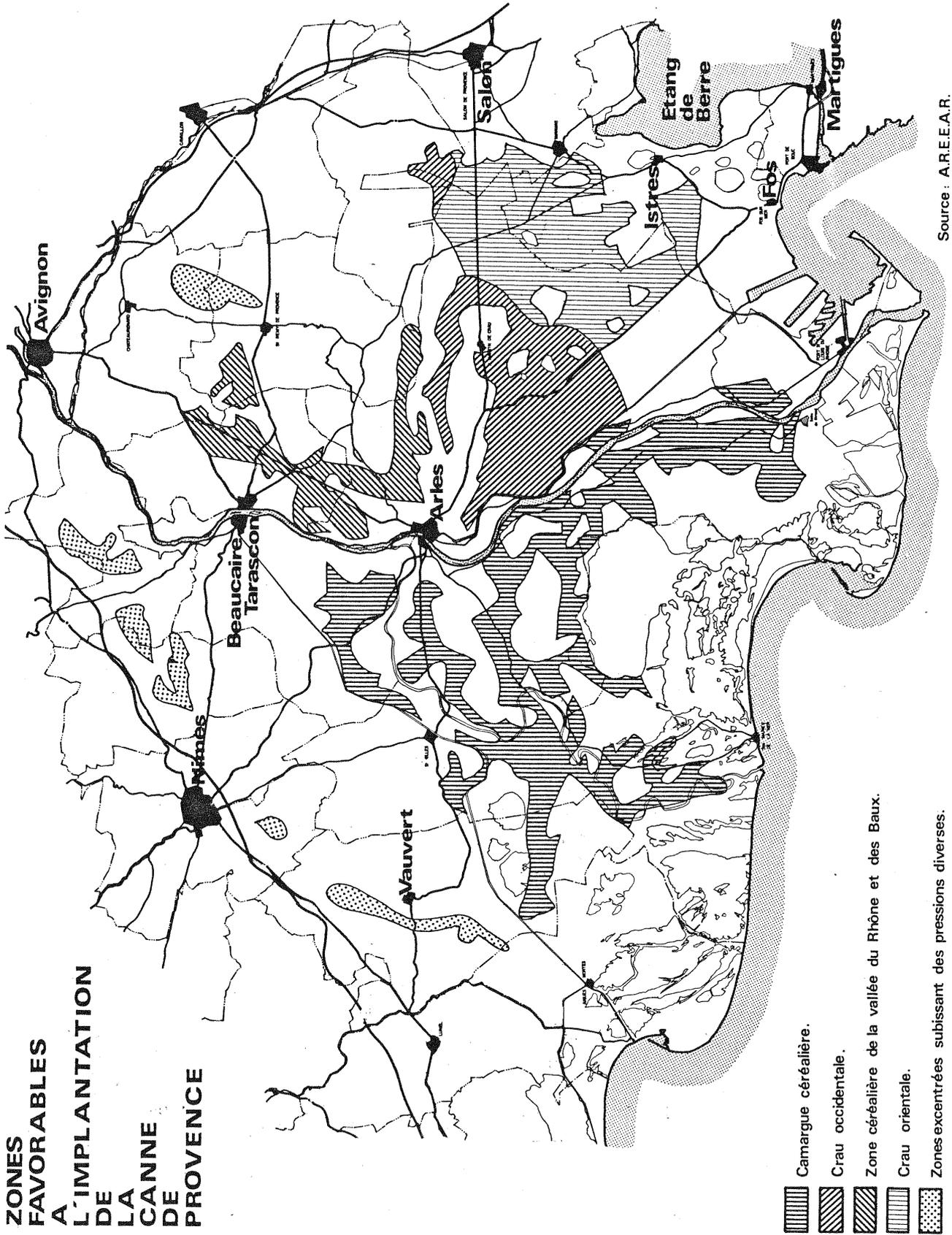
- SOMMAIRE DES ANNEXES -

- 1 - Plan du parcellaire du Grand Manusclat
- 2 - Zone favorable à l'implantation de la canne de Provence en Camargue
- 3 - Rendement de la canne de Provence de diverses origines
- 3bis - Photos plantation et récolte
- 4 - Plan installation séchage
- 4bis - Rendement de la canne du Grand Manusclat
- 5 - Plan installation séchage
- 6-7 - Effeuilage
- 8 - Caractéristiques des granulés
- 9-10 - Caractéristiques des tronçons
- 11 - Production énergétique de quelques cultures
- 12 - Rendement énergétique solaire
- 13 - Références pour la consommation énergétique de la culture
- 14 - Unités énergétiques
- 15 - Rendement de différentes cultures
- 16 - 17 - Schéma de l'installation globale
- 18 - Réactions de gazéification
- 19 - Plan de la chaufferie
- 20-22 - Mode opératoire du calcul du P.C.S,
- 23 - Formule du calcul de débit à l'Annubar
- 24-26 - Equation de régression de la masse volumique en fonction de la température
- 27-30 - Equation de régression de la viscosité des gaz en fonction de la température
- 31 - Combustions conventionnelles
- 32 - Table des valeurs des constituants du gaz pauvre
- 33 - P.C.I. du gaz pauvre
- 34-35 - Modèle de calcul de rendement
- 36-41 - Courbes de températures des serres: efficacité du chauffage (2), stratification (2), homogénéité de surface (1), déclenchement des aérothermes (1)
- 42 - Table d'ammortissement.

MANUSCLAT



ZONES FAVORABLES A L'IMPLANTATION DE LA CANNE DE PROVENCE

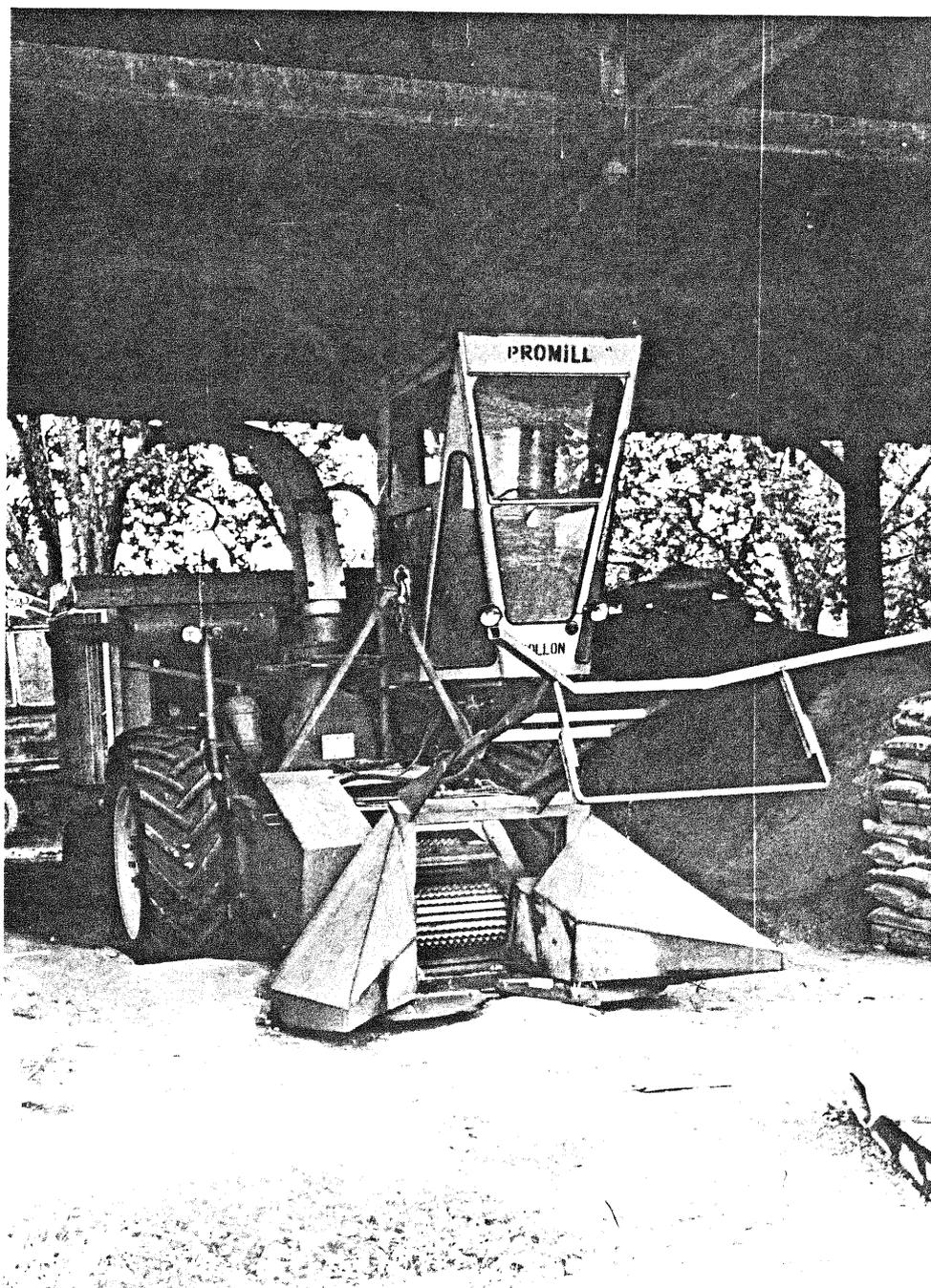


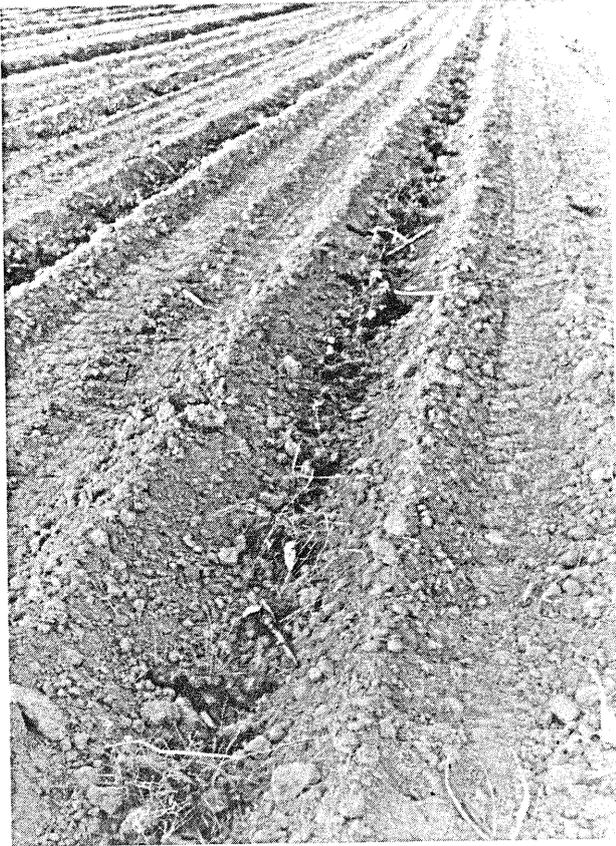
Source : A.R.E.E.A.R.

Clône	Origine	Nombre d'années d'observation	Rendement moyen annuel en kg/ha de M.S.	%
Villeroy (témoin)	Hérault	10	21 700	100
N° 1	Bouches-du-Rhône	10	19 600	94
N° 9	Alpes-Maritimes	10	20 700	95
N° 10	Alpes-Maritimes	10	20 900	96
Villeroy (témoin)	Hérault	8	20 600	100
N° 4	Maroc	8	25 900	125
N° 7	Var	8	22 500	109
N° 8	Var	8	23 500	114
N° 13	Maroc	8	22 300	108
N° 18	Espagne	8	23 800	115
Villeroy (témoin)	Hérault	7	17 600	100
N° 12	Maroc	7	21 960	124
N° 32	Tunisie	7	19 120	108
N° 35	Maroc	7	19 860	112

Source INRA

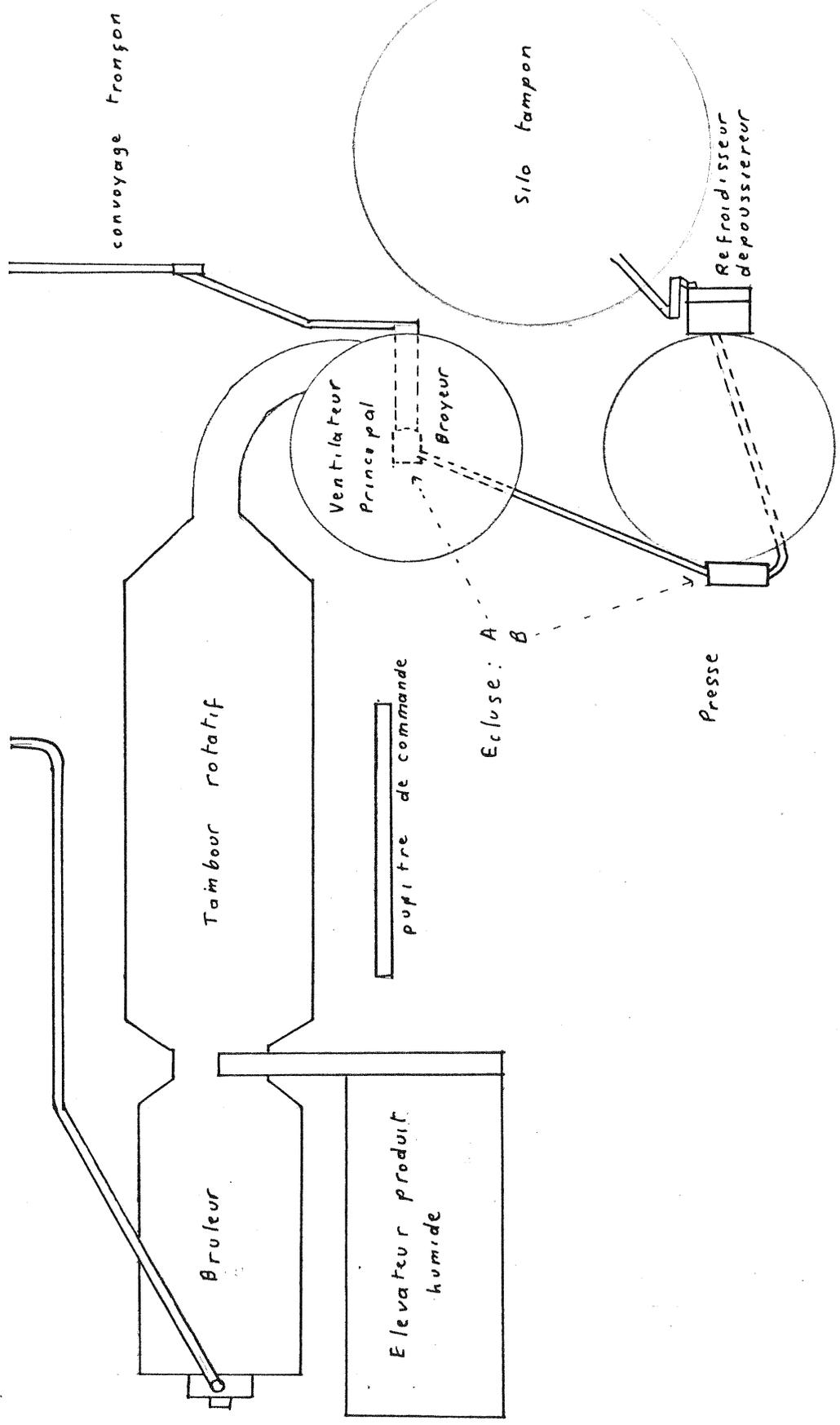
Tête de récolte pour
la canne de Provence
du CNEEMA





Plantation par rhizomes





ESSAIS DE COMPORTEMENT EXTERIEUR

RESULTATS 1976

A - SUD-EST - PLANTATION 1968-1971

I - LE SAMBUC - Le Grand-Manusclat

Plantation réalisé en 1968.

RESULTATS

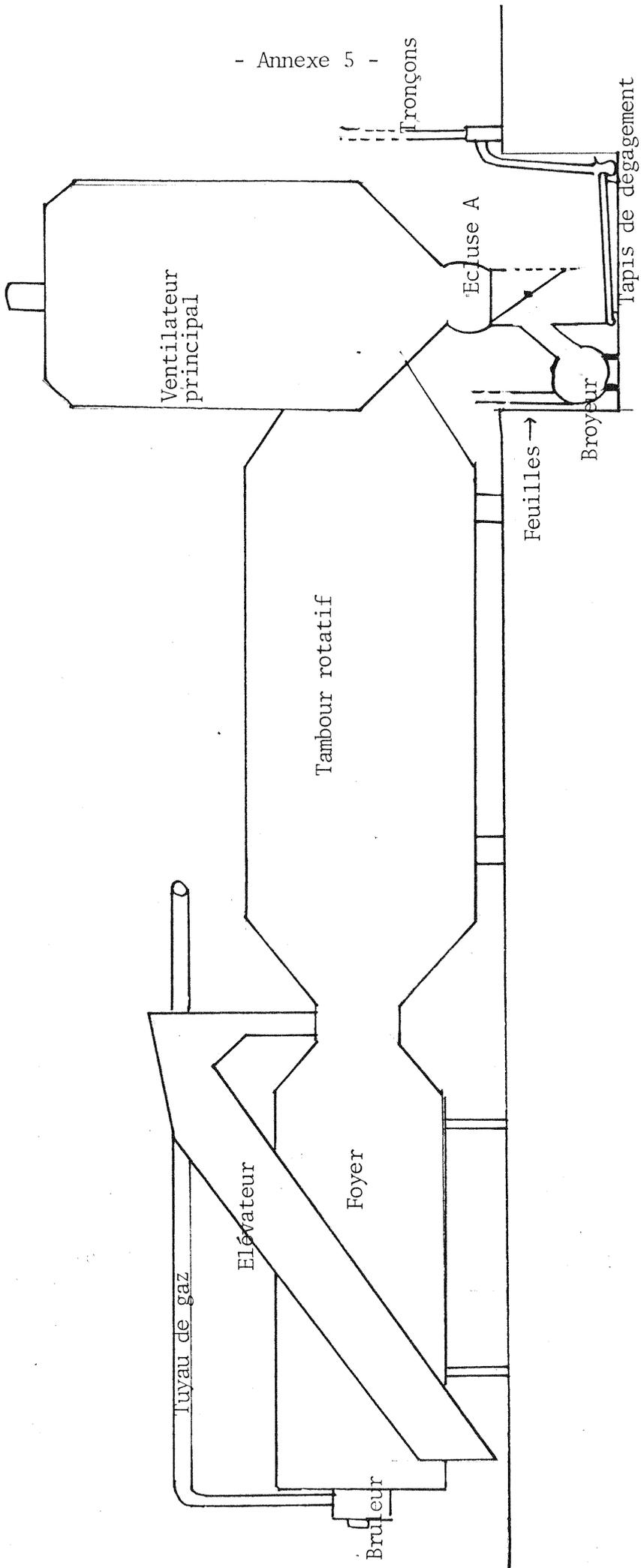
Clônes	Zones	Nombre m2 réel	Nombre m. linéaire	Hauteur cm	Diamètre mm	Poids sec my I canne g.	Rendement KG/ha
Merle	non salée	13,7	27,4	390	19,0	163,5	22.400
	salée	11,4	22,8	180	16,5	68,0	7.750
Villeroy	non salée	14,1	28,2	310	16,0	137,0	19.320

Taux de feuilles à la récolte Merle : 23,1 %

Taux de feuilles à la récolte Villeroy : 31,2 %

RENDEMENT APRES 9 ANNEES DE PRODUCTION

	V.I.L.L.E.R.O.Y.		
	MERLE Zone non salée	Zone non salée	Zone salée
1968	3.755	4.450	586
1969	19.465	20.565	4.057
1970	20.730	17.210	3.562
1971	25.880	22.340	10.820
1972	19.880	22.745	12.530
1973	22.230	24.050	10.510
1974	19.570	20.310	9.820
1975	24.060	17.950	10.960
1976	22.400	19.320	7.750
Moyenne	19.774	18.771	7.848
%	100	94,9	39,6



	Copeaux séchés à 110°C	Feuilles séchées à 110°C	Mélange 3/4 de copeaux + 1/4 de feuilles séchées	Copeaux + feuilles en vert
VITESSE MAXIMALE DE FLUIDISATION	2,9 m/s	0,9 m/s	2,0 m/s	2,8 m/s

- Résultats d'essais sur un produit contenant 25 % de feuilles :

Débit de canne + feuilles (kg/h)	Débit d'air (m ³ /h)	V. moyenne du flux d'air m/s	% de copeaux dans les feuilles	% de feuilles dans les copeaux
175	660	4,7	présence E	(2-3) E
200	660	4,7	22	6
150	550	4,0	0 E	10
170	710	5,1	27 E	1 E
385	710	5,1	26	8
405	850	6,1	52	1 - 1,5 E
420	630	4,5	23	3 E
472	510	3,7	6	8
740	510	3,7	16	14

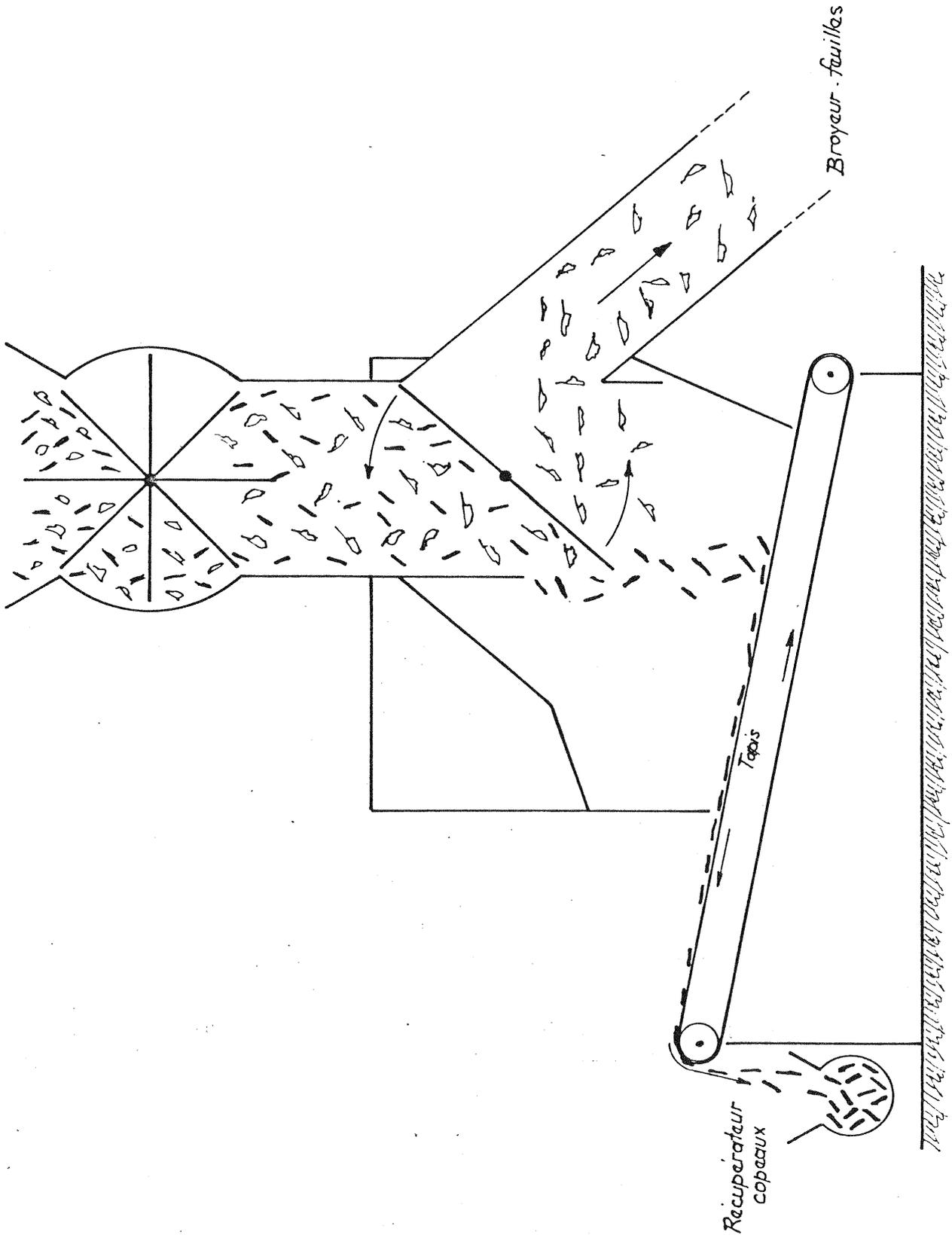
E : estimation visuelle.

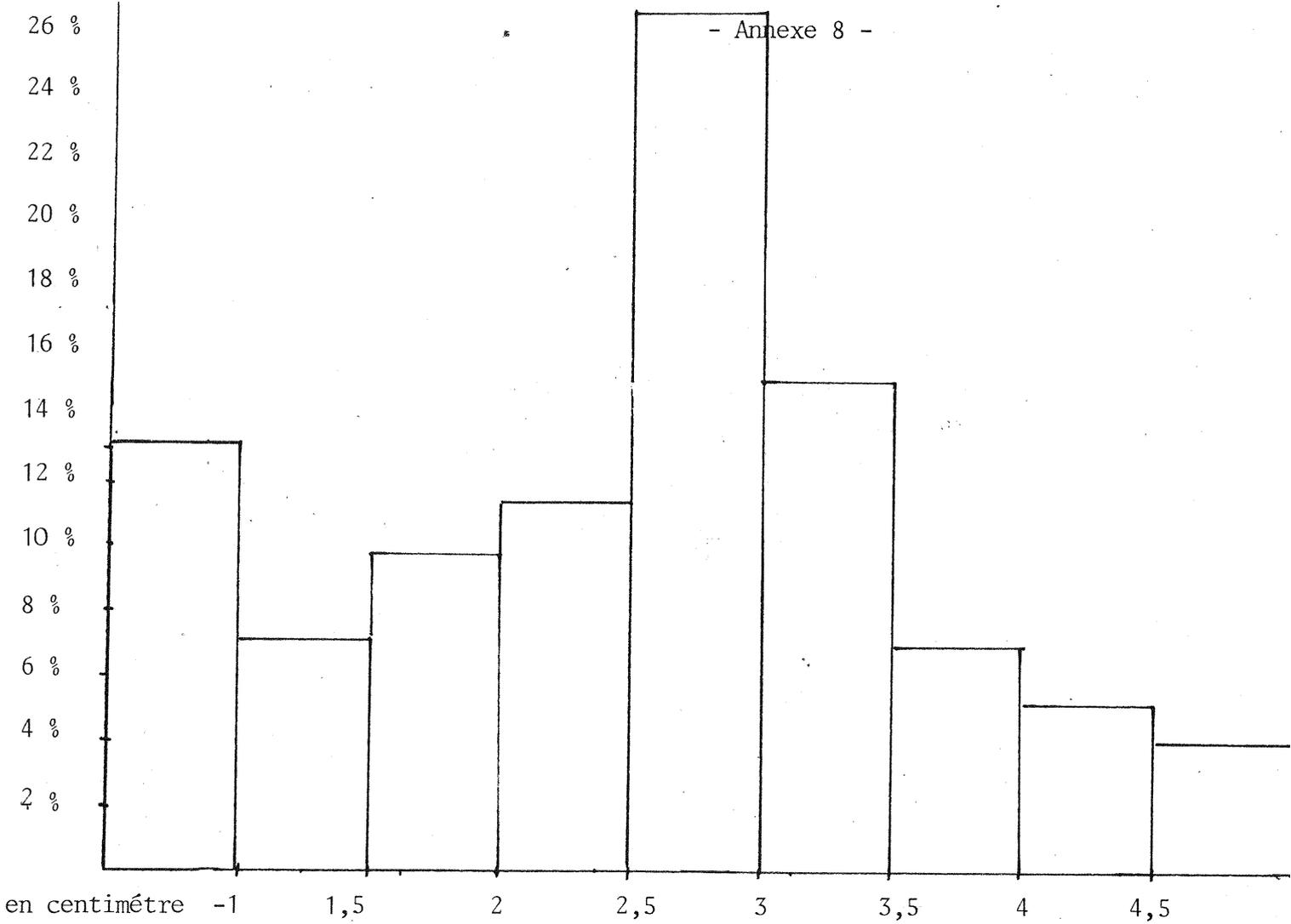
- Pour la gamme de débit de 150 à 200 kg/h, la vitesse moyenne de l'air optimale se situe vers 4,7 m/s, la plage de réglage est étroite 4 et 5,1 m/s donnant de mauvais résultats.

- Pour des débits de 380 à 470 kg/h, le meilleur résultat a été obtenu pour une vitesse d'air de 4,5 m/s. Mais dans la fraction feuilles, nous trouvons 23 % de copeaux (soit de 7,5 à 15 % de l'ensemble des copeaux).

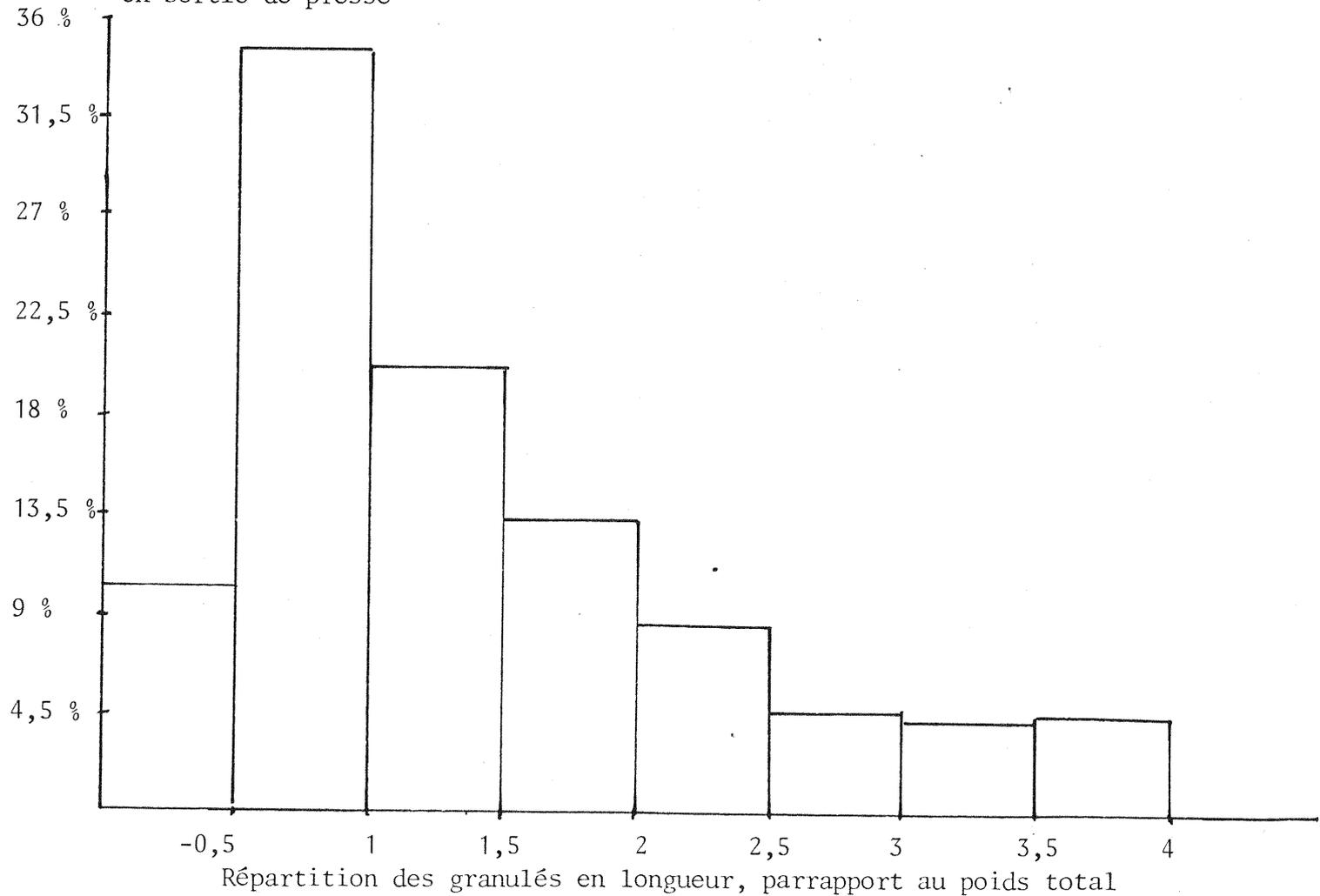
- Pour les débits supérieurs, la séparation devient mauvaise.

L'observation du produit à effeuiller au cours des essais montre la limite effective du procédé. Certains copeaux éclatés par les organes de coupe de la machine de récolte ont une forme de batonnets de masse très proche de celui des

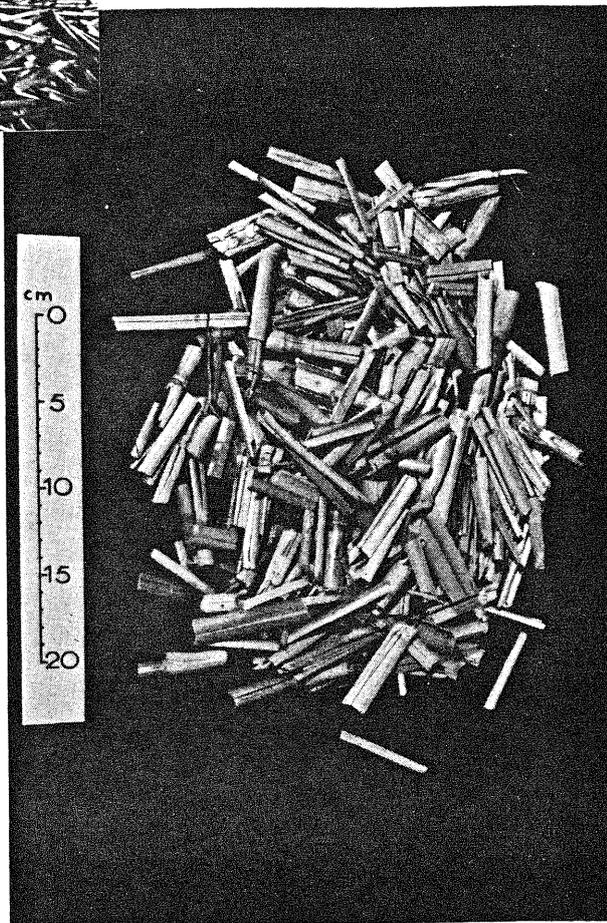
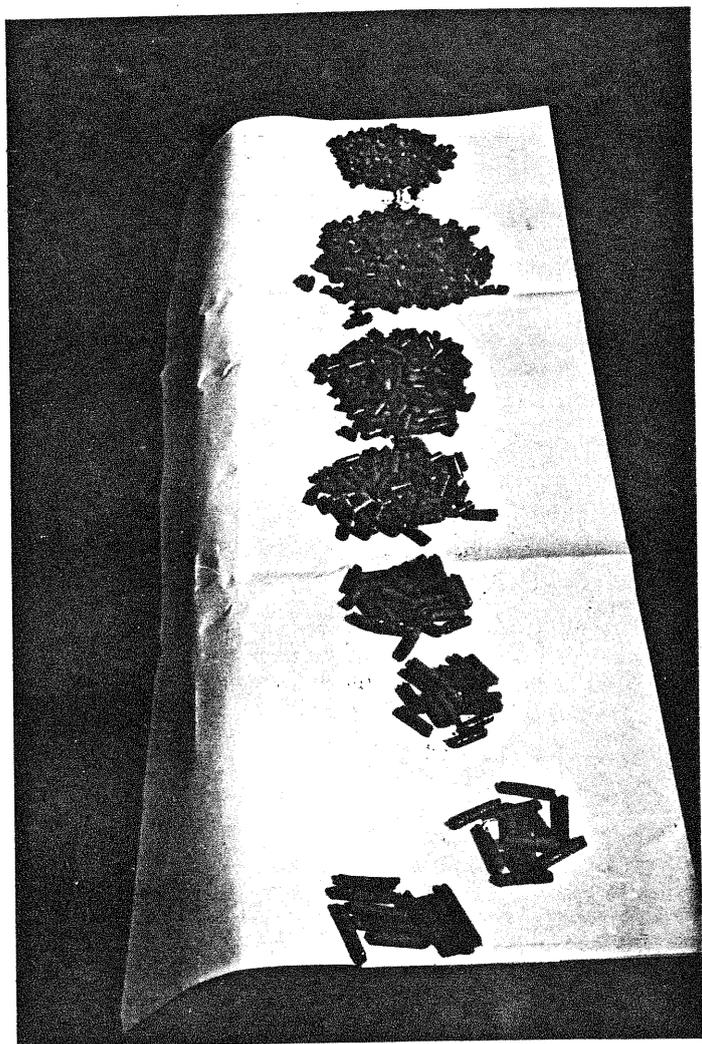
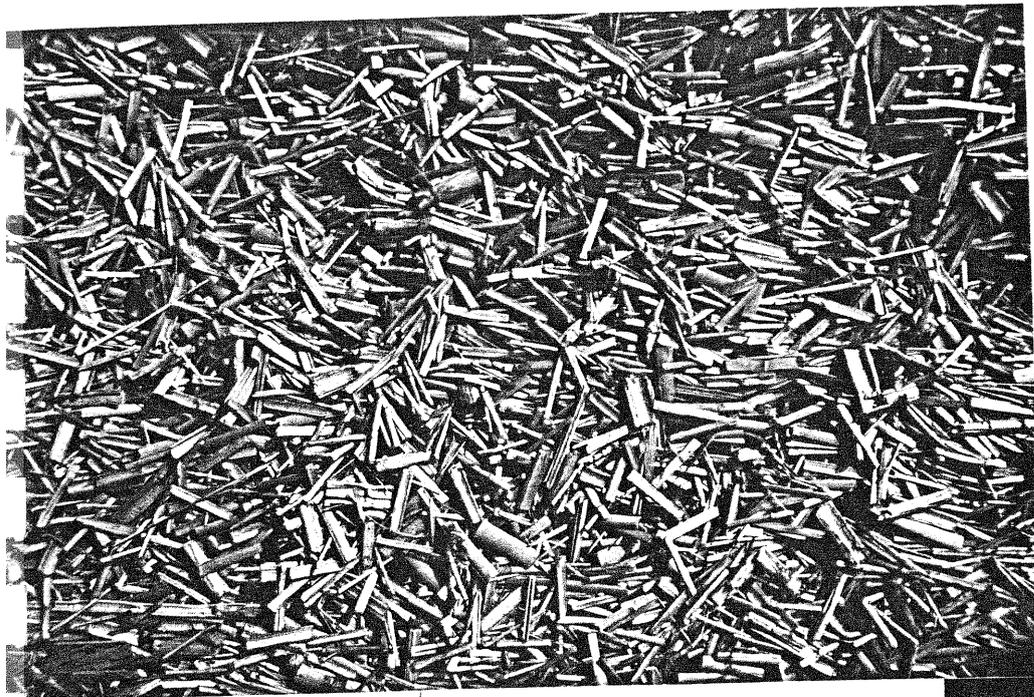




Répartition des granulés en longueur par rapport au poids total , en sortie de presse

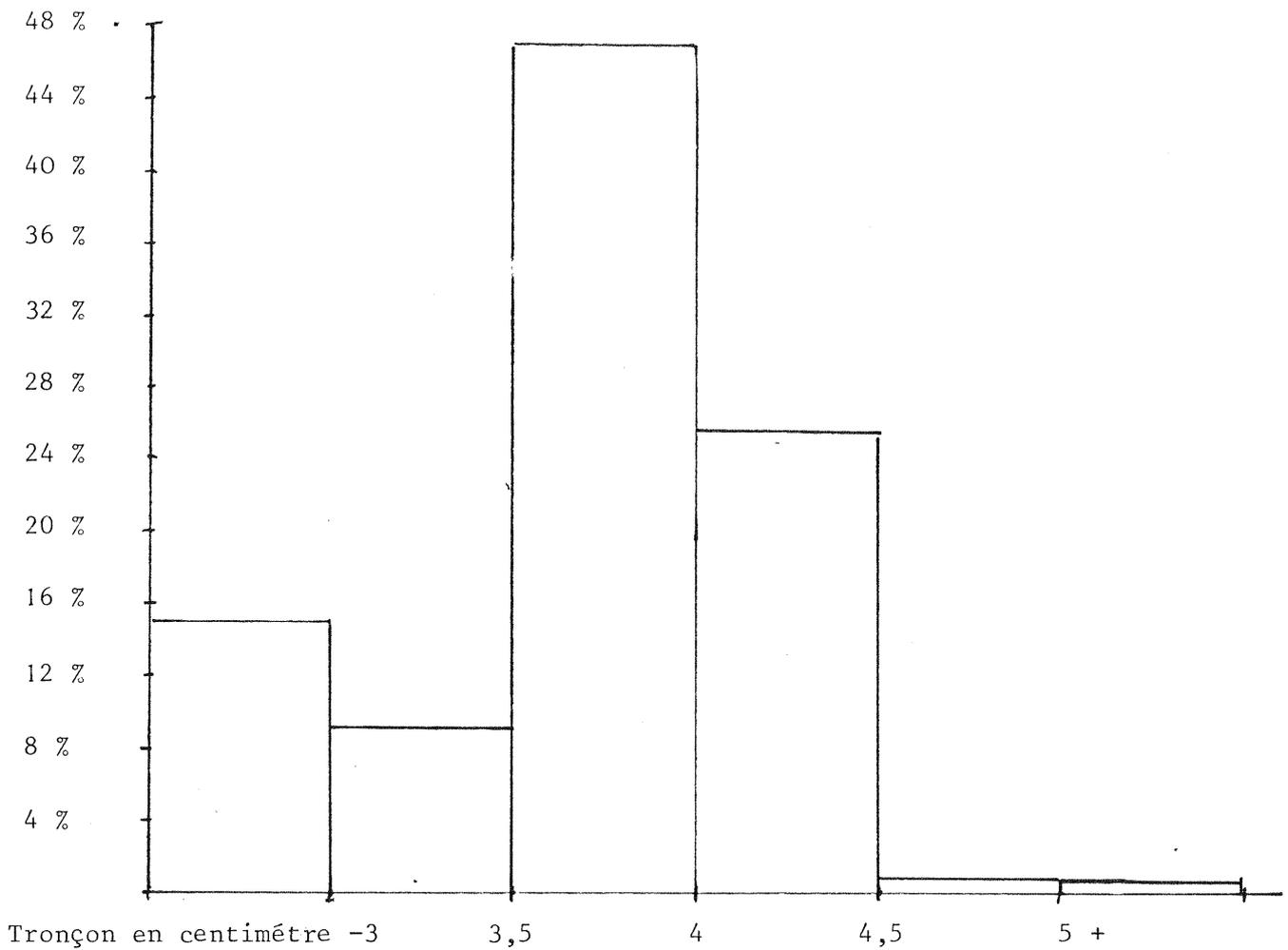


Répartition des granulés en longueur, par rapport au poids total

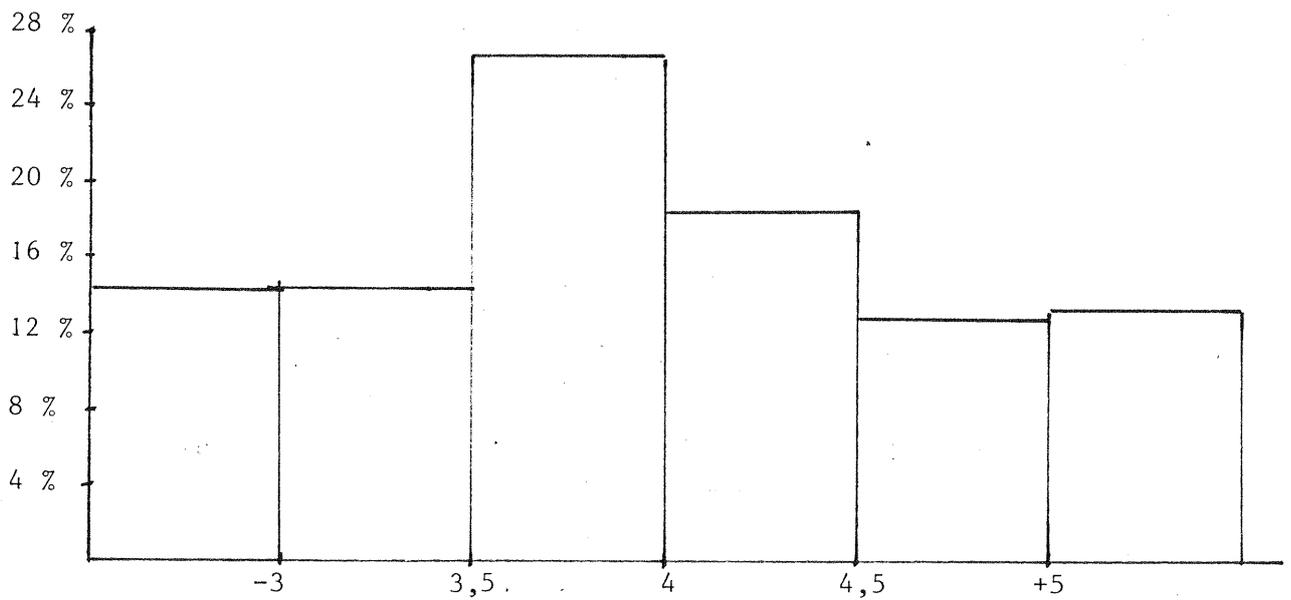


Copeaux de tiges.

Granulés de feuilles

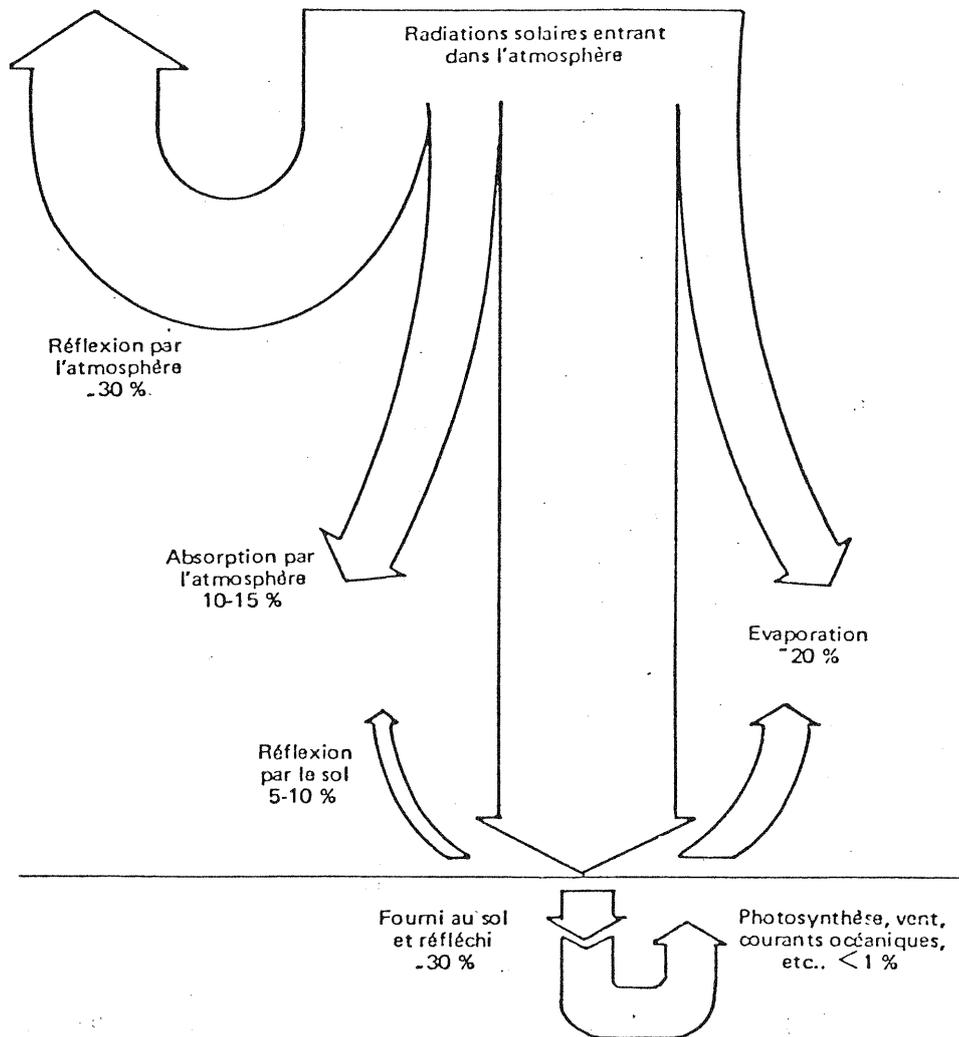


Répartition de la longueur des tronçons en fonction de leur nombre



Répartition de la longueur des tronçons en fonction de leur poids

CULTURE	IRRIGATION	ÉQUIVALENTS ÉNERGÉTIQUES EN MILLIERS DE KCAL./HA	
		Matière sèche totale	Grain
Sorgho g . . .	non irrigué	38 500	20 000
	irrigué	45 300	23 600
Maïs groupe 4	non irrigué	52 600	26 000
	irrigué	76 100	37 600
Maïs groupe 2	non irrigué	45 900	23 200
	irrigué	67 600	34 000
Soja	non irrigué	23 300	13 200
	irrigué	31 900	17 600
Tournesol	non irrigué	30 400	13 700
	irrigué	40 300	17 600
Blé tendre haut rendement	non irrigué	41 500	21 200
Blé faible rendement	non irrigué	28 200	12 800
Blé dur	non irrigué	15 300	8 000
Luzerne paturée	non irrigué	8 400	
	irrigué	10 200	
Luzerne fanée	non irrigué	6 600	
	irrigué	8 200	
Féтуque paturée	non irrigué	9 500	
	irrigué	12 300	
Féтуque fanée	non irrigué	8 700	
	irrigué	11 900	
Ray-Grass pataré	non irrigué	10 400	
	irrigué	12 900	
Ray-Grass fané	non irrigué	10 200	
	irrigué	12 700	



Ca quo devient l'énergie solaire interceptée par la Terre

Seulement 30 % de l'énergie solaire est fournie au sol au niveau du couvert végétal. Ensuite, la photosynthèse ayant un rendement assez faible, de 1 à 5 % de l'énergie se retrouve au niveau des produits organiques. Pour finir en raison des dépenses occasionnées par les phénomènes de croissance, seulement 1 % de l'énergie solaire se retrouve dans la biomasse.

Coefficients utilisés dans les principales analyses énergétiques

Unité énergétique : milliers kcal					
A) INTRANTS TYPIQUEMENT AGRICOLES					
Bien ou service	Spécification	Coefficient calorique retenu			
		Américains	Britanniques Slessor	Leach	Français
Engrais azotés					
Ammoniac liquide NH ₃	kg N		14,00	14,93	
Urée	kg N		18,46	19,95	
Sulfate d'ammoniaque	kg N		16,50	19,57	
Nitrate d'ammoniaque	kg N		15,24	18,16	
Moyenne engrais simples (a)	kg N	18,52	15,77	19,11	19,52
Engrais phosphatés, moyenne P	kg P	3,35	3,34	3,34	3,53
Engrais potassiques, moyenne K	kg K	2,31	2,32	2,15	2,44
Chaux	kg			0,48	
Herbicides, Pesticides	kg	24,25	30,58	23,89	26,11
Tracteur (inclus amortissement, réparations, etc...)	50 cv heure			45,08	
	65 cv heure			54,86	
	90 cv heure			99,70	
Semences hybrides de maïs (b)		7,94		2,17	
Irrigation	tonne eau	0,73		(pompée)	
Matériaux de construction :					
métal	tonne				13.400
maçonnerie	tonne				800

(a) France = Pimentel + transport

(b) Dans Leach, semences déduites de la production

- Récapitulatif des EEP des engrais par tonne d'élément fertilisant

unité : 10³ kcal/t.

	G. Leach	D. Pimentel	F.N.I.E.	G.M. Blouin et C.H. Davis
Engrais azotés N	19 200	18 500	de 16 000 à 17 000	de 12 000 à 14 700
Engrais phosphatés - P	3 350	3 350	plus de 3000	de 1100 à 2 700
Engrais potassiques - K	2 160	2 315	1250	1 600

Sources : G. LEACH : "Energy and food production", ouvr. cit. Annexe 6, p. 72.
 D. PIMENTEL : "Food production and the energy crisis", Science n° 182
 nov. 1973, pp. 443-449.
 F.N.I.E. Fédération nationale de l'industrie des engrais ; données non publiées établies en relation avec les producteurs. Il faut ajouter 500 x 10³ kcal/t pour les pulvérulents et 900 x 10³ kcal/t pour les granulés (plus séchage).
 G.M. BLOUIN et C.H. DAVIS, cités par W. LOCKERETZ dans "Agriculture and energy", Academic Press, New-York, 1977.

UNITES DE MESURE : LA T.E.P. ET SES EQUIVALENTS

1) Unités légales de travail, énergie ou quantité de chaleur :

L'unité de travail légale de base est le Joule (J) : c'est le "travail produit par une force de 1 Newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de cette force".

Les autres unités légales sont l'erg (erg), et le wattheure (wh).

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ wh} = 3600 \text{ J}$$

2) Autres unités :

La calorie (cal) et ses dérivées ; la frigorie et la thermie (th), n'ont plus droit de cité depuis le 31 décembre 1977. Cependant, elles continuent d'être utilisées dans la pratique courante.

"La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 gramme d'un corps dont la cha-

leur massique est égale à celle de l'eau à 15°C sous la pression atmosphérique normale (101325 pascals)".

Par mesure expérimentale, on obtient :

$$1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}, \text{ et par définition:}$$

$$1 \text{ th} = 10^6 \text{ cal}$$

3) La Tonne - équivalent - pétrole :

Très en vogue dans le milieu de l'énergie, cette unité n'a aucune existence légale. Elle a remplacé la tonne-équivalent-charbon comme mesure pratique de compa-

raison. Par convention :

1 T.E.P. = 10 000 th, sur la base du pouvoir calorifique inférieur du combustible considéré.

TABLEAU DES EQUIVALENCES ENERGETIQUES

Energie primaire			Charbons		T.E.P./tonne	
<u>Liquides</u>	T.E.P./tonne	dens./eau	<u>Anthracite N.P.C.</u>			
Fuel domestique	1,015	0,835	Flambant sec ind.		0,77	
Fuel lourd n°1	0,99	0,94	Moyenne		0,55	
Fuel lourd n°2 ordinaire	0,96	0,96			0,66	
Fuel lourd n°2 B.T.S.	0,975	0,95	(1 tonne équivalent-charbon = 2/3 T.E.P.)			
Fuel lourd n°2 T.B.T.S.	0,98	0,93	<u>Bois</u>		. 0,3 à 0,35 T.E.P./tonne	
<u>Gaz</u>	T.E.P./m ³ N	dens./air	Energie secondaire			
Gaz de Lacq	0,00088	0,59	<u>Electricité</u>		. 0,00025 T.E.P./kwh	
Gaz de Groningue	0,000756	0,65	<u>Vapeur urbaine</u>		. 0,06 T.E.P./tonne	
Butane	0,0028	1,85				
Propane	0,0022	1,54				

Les équivalences des énergies secondaires découlent d'une évaluation du rendement des installations.

Ainsi, pour un rendement de 35% d'une cen-

trale thermique (norme courante, bien que des centrales récentes atteignent 42%) :

$$1 \text{ kwh théorique} = \frac{3,6}{4,1855} 10^{-4} \text{ T.E.P.}$$

$$1 \text{ kwh physique} = 0,35 \cdot 1 \text{ kwh théorique}$$

4) Le baril mesurant usuellement les produits pétroliers vaut 42 gallons américains ; soit : 1 baril (bbl) = 158,98 dm³

Suivant la densité du pétrole, on a :

$$1 \text{ tonne} = 7 \text{ à } 7,7 \text{ bbl}$$

$$1 \text{ bbl/jour} \neq 50 \text{ tonnes/an}$$

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DES PRINCIPALES CULTURES
(en milliers de Kcal par hectare et par an)
PAR TYPES DE TRAVAUX CULTURAUX (travail + produits)

a) Cultures « à graines »

CULTURES	IRRIGATION	TRAVAIL DU SOL	FERTILISA- TION	SEMIS	TRAITE- MENTS PHYTO- SANITAIRES*	IRRIGATION	RÉ- COLTE	CONSOMMA- TION TOTALE PAR CULTURE	ÉQUIVALENCE EN TONNES DE FUEL-OIL
Maïs	non irrigué	1 000	2 690	160	1 000	—	880	5 730	0,57
	irrigué	1 000	4 280	200	1 000	2 320	880	9 680	0,97
Blé tendre . . .	non irrigué	730	3 000	880	660	—	440	5 710	0,57
	irrigué	860	2 500	1 140	0	—	440	4 940	0,49
Blé dur	non irrigué	810	2 540	780	150	—	440	4 720	0,47
	irrigué	1 100	2 200	180	310	—	440	4 230	0,42
Sorgho	non irrigué	1 100	3 360	180	310	1 640	440	7 030	0,70
	irrigué	1 110	2 200	90	150	—	580	4 130	0,41
Tournesol . . .	non irrigué	1 110	3 360	90	150	1 640	580	6 930	0,69
	irrigué	810	2 200	120	120	—	440	3 690	0,37
Colza	non irrigué	1 200	370	460	120	—	580	2 730	0,27
	irrigué	1 200	490	460	120	1 640	580	4 490	0,45
Soja	non irrigué	490	290	550	120	—	580	2 030	0,20
	irrigué	490	390	550	120	1 300	580	3 430	0,34

(*) Herbicides et Pesticides.

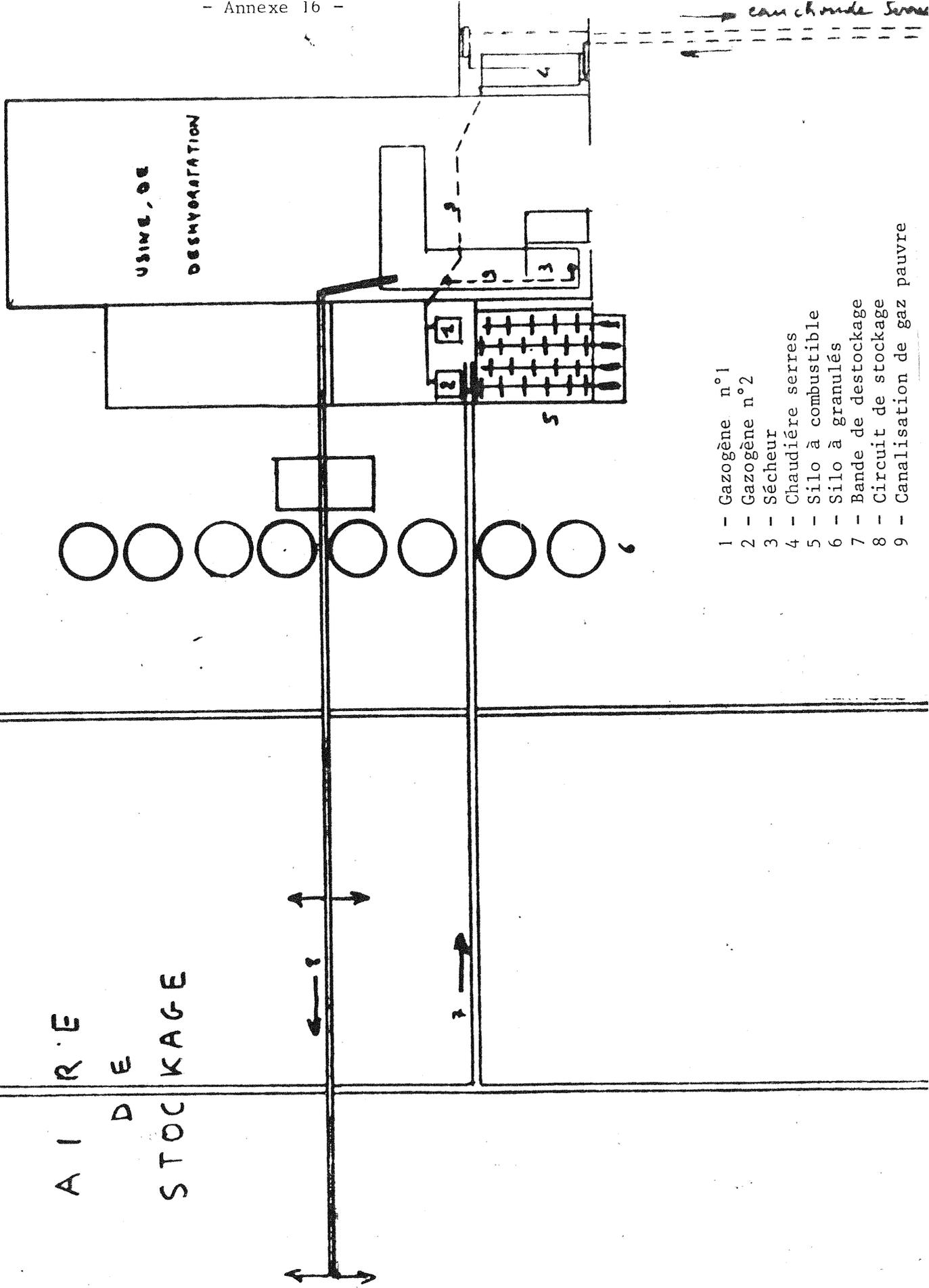
CONSOMMATION D'ÉNERGIE DES PRINCIPALES CULTURES
(en milliers de Kcal par hectare et par an)
PAR TYPES DE TRAVAUX CULTURAUX (travail + produits)

b) Cultures fourragères

CULTURES	IRRIGATION	TRAVAIL DU SOL	FERTILISA- TION	SEMIS	TRAITE- MENTS PHYTOSANI- TAIRES (*)	IRRIGATION	RÉ- COLTE	CONSOMMA- TION TOTALE D'ÉNERGIE PAR CULTURE	ÉQUIVALENCE EN TONNES DE FUEL-OIL
Ray-Grass . . .	non irrigué	1 290	4 430	190	0	—	860	6 770	0,67
	Paturé (*)	1 290	4 920	190	0	1 980	860	9 240	0,92
Ray-Grass . . .	non irrigué	1 290	6 600	190	0	—	3 980	12 060	1,20
	Ensilé	1 290	7 580	190	0	1 980	4 770	15 810	1,58
Ray-Grass . . .	non irrigué	1 290	6 600	190	0	—	5 360	13 440	1,34
	Fané (*)	1 290	7 580	190	0	1 980	6 430	17 470	1,74
Sorgho	non irrigué	1 100	4 050	180	0	—	860	6 190	0,62
	Paturé (*) . . .	1 100	5 390	180	0	2 110	860	9 640	0,96
Sorgho	non irrigué	1 100	6 000	180	0	—	1 450	8 730	0,87
	Ensilé	1 100	8 040	180	0	2 110	1 600	13 030	1,30
Fétuque	non irrigué	230	3 950	60	0	—	860	5 100	0,51
	Paturé (*) . . .	230	4 800	60	0	2 060	860	8 010	0,80
Fétuque	non irrigué	230	6 100	60	0	—	2 710	9 100	0,91
	Ensilé	230	7 480	60	0	2 060	3 390	13 230	1,32
Fétuque	non irrigué	230	6 100	60	0	—	3 640	10 039	1,00
	Fané (*)	230	7 480	60	0	2 060	4 550	14 380	1,44
Luzerne	non irrigué	240	820	40	280	—	860	2 240	0,22
	Paturé (*) . . .	240	930	40	280	1 720	860	4 070	0,40
Luzerne	non irrigué	240	1 290	40	280	—	3 640	5 490	0,55
	Fané (*)	240	1 470	40	280	1 720	4 180	7 930	0,79

(*) Paturé : avec restitutions par les animaux; 1 coupe de « nettoyage ».

(*) Fané : foin séché au sol.

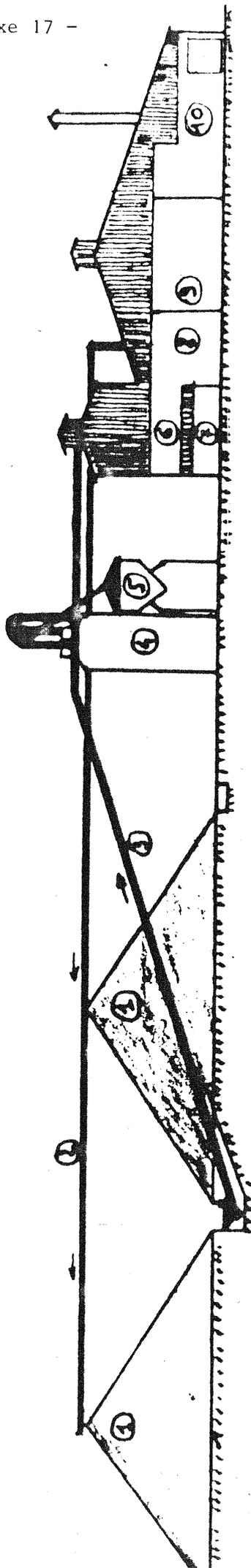


- 1 - Gazogène n°1
- 2 - Gazogène n°2
- 3 - Sécheur
- 4 - Chaudière serres
- 5 - Silo à combustible
- 6 - Silo à granulés
- 7 - Bande de destockage
- 8 - Circuit de stockage
- 9 - Canalisation de gaz pauvre

A I R E
D E
S T O C K A G E

U S I N E , D E
D E S H Y D R A T A T I O N

can chaudière Serres



- 1 - stockage du combustible (tronçons de canne)
- 2 - circuit d'amenée du combustible
- 3 - circuit de déstockage
- 4 - silo à granulés
- 5 - trémie de chargement des camions
- 6 - silos à combustible et salles des gazogènes
- 7 - chambre des vérins pousseur
- 8 - emplacement du sécheur
- 9 - emplacement du tapis d'alimentation du sécheur

GRAND MANUSCLAT

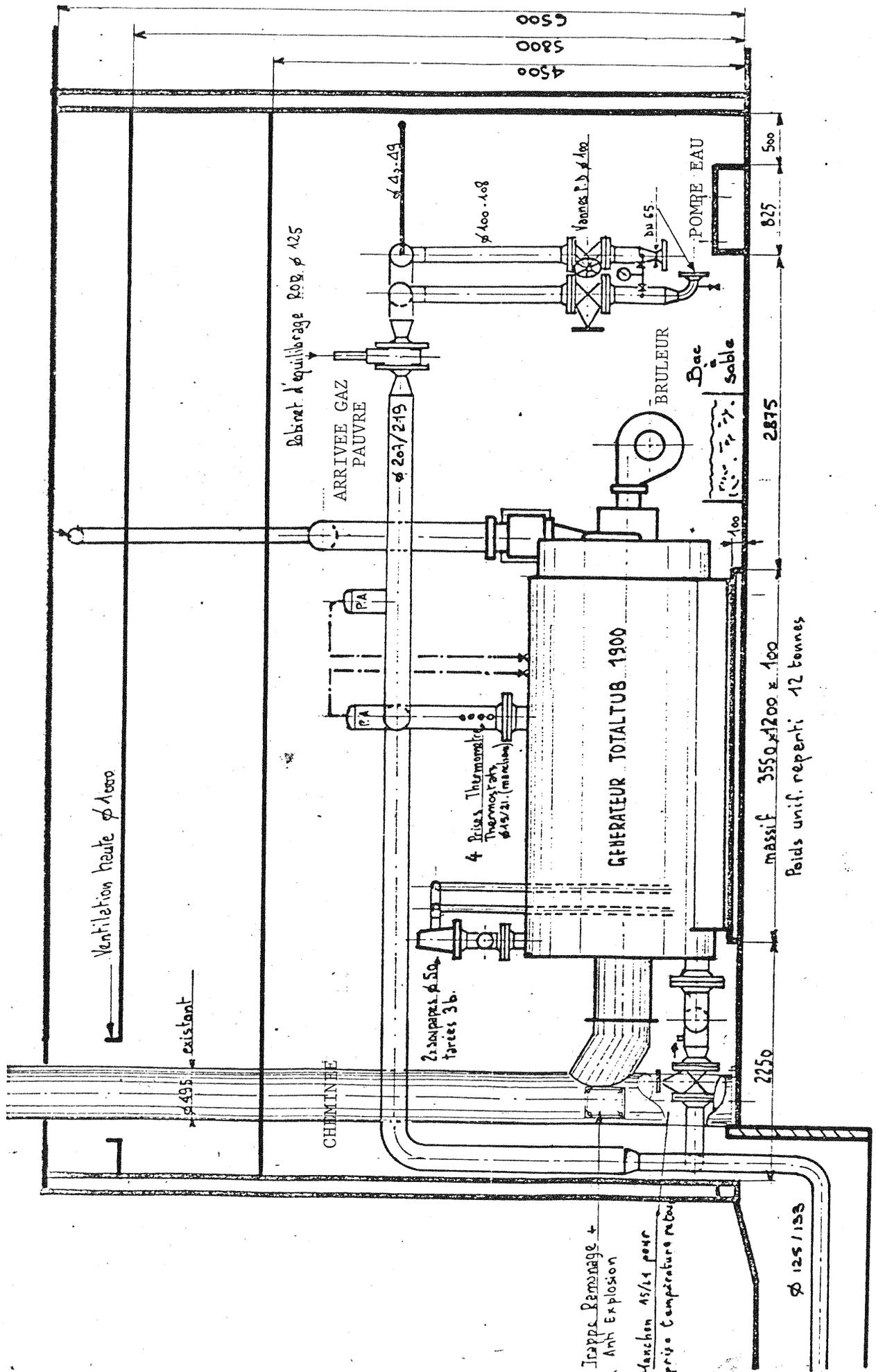
Silhouette du complexe énergétique

RÉACTIONS CLASSIQUES DE LA CONVERSION OXYDANTE ET DE LA COMBUSTION.

Equations de réactions	Expression en fonction d'un système de réactions indépendantes		Variations d'enthalpie et d'énergie libre standard *		
	Système I	Système II	ΔH_{298}°	ΔH_{273}°	ΔG_{298}°
AVEC OXYGÈNE LIBRE :					
(A) $C + O_2 = CO_2$			- 94,052	- 94,045	- 94,260
(B) $H_2 + 0,5 O_2 = H_2O$			- 57,798	- 57,740	- 54,635
(C) $CO + 0,5 O_2 = CO_2$			- 67,636	- 67,592	- 61,452
(D) $CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$			- 191,759	- 191,819	- 191,390
(E) $C + 0,5 O_2 = CO$	(A) - (C)		- 26,416	- 26,453	- 32,808
(F) $CH_4 + 0,5 O_2 = CO + 2 H_2$	(D) - (C) - 2(B)		- 8,527	- 8,747	- 20,668
AVEC OXYGÈNE COMBINÉ :					
(1) $CO + H_2O = CO_2 + H_2$	(C) - (B)		- 9,838	- 9,852	- 6,817
(2) $C + CO_2 = 2 CO$	(A) - 2 (C)		+ 41,220	+ 41,139	+ 28,644
(3) $C + 2 H_2 = CH_4$	(A) + 2(B) - (D)		- 17,889	- 17,706	- 12,140
(4) $C + H_2O = CO + H_2$	(A) - (B) - (C)	(1) + (2)	+ 31,382	+ 31,287	+ 21,827
(5) $C + 2 H_2O = CO_2 + 2 H_2$	(A) - 2 (B)	2 (1) + (2)	+ 21,544	+ 21,435	+ 15,010
(6) $CH_4 + H_2O = CO + 3 H_2$	(D) - (C) - 3 (B)	(4) + (2) - (3)	+ 49,271	+ 48,993	+ 33,967
(7) $CH_4 + 2 H_2O = CO_2 + 4 H_2$	(1) - 4 (B)	2 (1) + (2) - (3)	+ 39,433	+ 39,141	+ 27,150
(8) $CH_4 + CO_2 = 2 CO + 2 H_2$	(D) - 2(C) - 2(B)	(2) - (3)	+ 59,109	+ 58,845	+ 40,784

* Exprimées en kcal par mole, par rapport à l'eau vapeur et au graphite β . Les valeurs de ΔH_{298}° et ΔG_{298}° sont celles des tables du « National Bureau of Standards ».

(source " Gazéification et oxydation des combustibles ")



MODE OPÉRATOIRE

Effectuer la détermination dans une salle à température sensiblement constante et en particulier à l'abri des courants d'air et des rayons solaires.

Relier les deux bornes de la bombe par un fragment de fil d'allumage sur lequel est enroulée l'une des extrémités d'un fil de coton. (La même longueur de fil de coton non mercerisé est utilisée pour chaque détermination et pour la détermination de la capacité calorifique effective du système).

Introduire dans la bombe 1 ml d'eau distillée ou déminéralisée.

Peser à 0,1 mg près dans la coupelle (*) une masse de charbon permettant d'obtenir une élévation de température de 2,5 °C à 3,5 °C ce qui correspond, avec un appareillage dont la capacité calorifique effective est de 10 500 J/°C à un dégagement de chaleur de l'ordre de 31 500 J (**).

Appliquer de légers chocs sur la coupelle pour niveler le combustible, mettre en place celle-ci sur son support et disposer l'autre extrémité du fil de coton, de telle sorte qu'elle soit en contact avec le combustible.

Ajuster le couvercle et le visser sur le corps de la bombe. Relier la bombe à la bouteille d'oxygène, puis ouvrir avec précaution le robinet de la bouteille et charger la bombe jusqu'à une pression de 25 bar sans retirer l'air qui s'y trouvait (**).

Introduire dans le vase calorimétrique une quantité d'eau distillée ou déminéralisée suffisante pour immerger la face supérieure du couvercle de la bombe. Cette quantité doit être la même, à 1 g près, que celle utilisée au cours de l'étalonnage pour la détermination de la capacité calorifique effective. Peser cette eau. Noter *E* la masse trouvée. S'assurer que la bombe ne fuit pas (absence de bulles d'oxygène).

Sur le fond et les parois de la coupelle, une couche (2 à 4 mm) de kaolin calciné ou d'alumine évite les phénomènes de déflagration et aussi de rupture de la coupelle (lorsque celle-ci est en silice ou en matière réfractaire) qui se produisent en son absence, dans le cas de certains charbons flambants.

**) Dans le cas de certains combustibles très cendreuse, il est indiqué, pour obtenir une combustion complète, d'ajouter une masse déterminée d'acide benzoïque ou d'un charbon peu cendreuse de pouvoir calorifique connu.*

****) On peut aller jusqu'à 30 bar pour les combustibles brûlant mal (anthracites).*

La détermination diffère suivant que la jaquette utilisée est isothermique ou adiabatique.

Dans le cas d'un calorimètre à jaquette adiabatique, la température de l'eau de la jaquette doit être inférieure à la température ambiante de 1 °C à 1,5 °C.

Placer la bombe dans le vase calorimétrique, celui-ci dans la jaquette, ajuster le thermomètre, établir les connexions et mettre en marche l'agitateur.

Une détermination de l'humidité est effectuée simultanément, en utilisant une des méthodes décrites dans la norme **NF M 03-037**.

JAQUETTE ISOTHERMIQUE

Cinq minutes après la mise en marche de l'agitateur, repérer les températures pendant les trois périodes suivantes :

- **Période préliminaire**, généralement fixée à cinq minutes, pendant laquelle la température est notée de minute en minute, de manière à déterminer la loi de variation avant l'inflammation.
- **Période principale**. Elle débute à la fin de la cinquième minute. À ce moment, lire la température : c'est la température initiale. Immédiatement après cette lecture, fermer le circuit électrique pour provoquer l'inflammation et continuer à noter les températures de trente en trente secondes. Lorsque la montée de la colonne de mercure ralentit, l'observer de façon continue en appliquant sans cesse, à défaut de vibreur, de petits chocs sur le thermomètre, au niveau du sommet de la colonne de mercure.

Noter :

- l'instant où cette dernière cesse visiblement de monter ;
 - la température maximale ;
 - l'instant auquel commence la descente perceptible de la colonne de mercure.
- **La période finale** commence à partir de ce moment. Faire de nouveau des observations de minute en minute pour déterminer la loi de refroidissement du calorimètre, jusqu'à ce que la variation de température soit linéaire pendant au moins cinq minutes.

NOTE : Si la combustion n'est pas complète, recommencer l'essai.

EXPRESSION DES RÉSULTATS

Corriger toutes les températures relevées en fonction du certificat d'étalonnage du thermomètre et en tenant compte de la partie émergente de la tige thermométrique.

CORRECTIF 1

CORRECTION NÉCESSITÉE PAR LA FORMATION D'ACIDES (a)

1 — Sans séparation des acides

Titrer le mélange des deux acides avec du carbonate de sodium 0,1 N. Compter 12,56 Joules par millilitre de solution de carbonate de sodium 0,1 N.

2 — Avec séparation des acides nitrique et sulfurique

Pour titrer ces acides dans l'eau de la bombe, opérer par exemple de la façon suivante (après filtration éventuelle).

a) Doser la totalité des acides à l'hydroxyde de baryum après élimination du dioxyde de carbone.

Dans ce but diluer à 100 ml, faire bouillir pour éliminer le CO₂ et titrer le liquide encore chaud par de l'hydroxyde de baryum 0,1 N en présence de phénolphthaléine. Soit p ml d'hydroxyde de baryum utilisés.

b) Précipiter les ions baryum correspondant à l'acide nitrique par du carbonate de sodium, titrer l'excès de carbonate en retour à l'acide chlorhydrique.

Dans ce but ajouter 20 ml de carbonate de sodium 0,1 N, chauffer, filtrer, laver le précipité. Titrer les filtrats refroidis par de l'acide chlorhydrique 0,1 N en utilisant le méthyl orange comme indicateur. Soit q ml d'acide utilisés.

(20 — q) ml correspondent à de l'acide nitrique

p — (20 — q) ml correspondent à de l'acide sulfurique.

Compter pour l'acide nitrique 5,99 Joules par millilitre de solution de carbonate de sodium 0,1 N et pour l'acide sulfurique 15,07 Joules par millilitre de solution de carbonate de sodium 0,1 N.

CORRECTIF 2

CORRECTION NÉCESSITÉE PAR LA CHALEUR DE COMBUSTION DU FIL D'ALLUMAGE (b)

La correction relative à la cellulose (fil de coton) est calculée à raison de 17 500 J/g de produit anhydre, celle du fil de nickel-chrome à raison de 1 400 J/g.

CORRECTIF 3

(pour les jaquettes isothermiques)

CORRECTION DE TEMPÉRATURE NÉCESSITÉE PAR L'ÉCHANGE DE CHALEUR AVEC L'EXTÉRIEUR (*)

Elle est donnée par la formule approchée suivante :

$$c \text{ (en } ^\circ\text{C)} = (n - n') \Delta_2 - n' \Delta_1$$

dans laquelle :

n = temps écoulé en minutes et fractions de minute depuis le commencement de la période principale jusqu'au moment du maximum de température, cet instant étant déterminé en faisant la moyenne des temps auxquels la température cesse de monter et commence à baisser ;

n' = temps écoulé en minutes ou fractions de minute depuis le début de la période principale jusqu'à l'instant où l'élévation de la température est égale aux 6/10 de l'écart total de température ($t_m - t_i$) dont la signification est donnée ci-après. Cet instant étant calculé par interpolation entre les deux lectures de température les plus voisines ;

Δ_2 = baisse moyenne de température par minute de la période finale ;

Δ_1 = hausse moyenne de température par minute de la période préliminaire ; cette variation correspond normalement à un échauffement du calorimètre.

(*) Celle-ci est nulle si l'on utilise la jaquette adiabatique.

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant P_v de l'échantillon est donné par la formule suivante en joules par gramme.

$$P_v = \frac{(4,18 E) \times (t_m - t_i + c) - (a + b)}{M}$$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur sec est obtenu en multipliant

$$P_v \text{ par } \frac{100}{100 - h_1}$$

dans laquelle :

- E = équivalent en eau du calorimètre, de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe (*);
- t_i = température initiale en degrés Celsius ;
- t_m = température maximale en degrés Celsius ;
- a = correction nécessitée par la formation d'acides ;
- b = correction nécessitée par la chaleur de combustion du fil d'allumage ;
- c = correction de température nécessitée par l'échange de chaleur avec l'extérieur. Celle-ci est nulle si on utilise la jaquette adiabatique ;
- M = masse de la prise d'essai en grammes ;
- h_1 = humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage.

POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR

Le pouvoir calorifique inférieur I_v sur sec à l'air se calcule par convention par la formule suivante :

$$I_v = P_v - 6h_2$$

h_2 étant la teneur en eau en pourcentage du combustible (eau préexistante dans ce combustible et eau formée par combustion de l'hydrogène).

(Extrait de la norme AFNOR M 03-005)

Pour des raisons techniques, les résultats seront donnés le jour de la
soutenance

GAZ (Débit volumétrique)

$$h = \left[\frac{Q \text{ (Nm}^3\text{/h)}}{0,180789 \times K \times D^2 \times F_{RA} \times F_{AA} \times F_{pv} \times Y_A \times F_M \times R \sqrt{\frac{P_f}{T_f \times G}}} \right]^2$$

h = Pression différentielle en mm de CE

K = Coefficient de sonde (Table 2.1)

D = Diamètre intérieur exact en mm

Q = Débit volumétrique

W = Débit massique

ρ_f = Masse volumique au C.S. Kg/m³

G = Densité des gaz

P_f = Pression de service (en bar)

T_f = Température de service (en °K)

F_{RA} = Coefficient de correction de la vitesse d'écoulement et de la viscosité (Table 2.2)

F_{AA} = Coefficient d'extension contraction

F_M = Facteur de correction manométrique

F_R = Coefficient de correction d'élévation

} Table fournies avec
l'appareil

F_{pv} = Coefficient de supercompressibilité des gaz

Y_A = Coefficient d'expansion des gaz et vapeur

I	X	Y	X ²
1	10.0000	1.3907	2.3026
2	100.0000	1.0460	4.6052
3	200.0000	0.8250	5.2983
4	300.0000	0.6810	5.7038
5	400.0000	0.5800	5.9915
6	500.0000	0.5040	6.2146
7	600.0000	0.4450	6.3969
8	700.0000	0.4010	6.5511
9	800.0000	0.3640	6.6846
10	900.0000	0.3320	6.8024

H₂

$$Y = 0,0743 (\log X)^3 + 0,2356 (\log X)^2 + 0,9496 \log X + 0,279$$

DEGREE REGRESSION= 3

COEFFICIENTS

	B(I)	STD ERROR	T
B(0) =	0.2790	0.0708	3.9397
B(1) =	0.9496	0.0540	17.5990
B(2) =	-0.2356	0.0123	-19.2256
B(3) =	0.0143	0.0009	16.4756

I	X	Y	X ²
1	1.0000	1.4290	0.0000
2	100.0000	1.0460	4.6052
3	200.0000	0.8250	5.2983
4	300.0000	0.6810	5.7038
5	400.0000	0.5800	5.9915
6	500.0000	0.5040	6.2146
7	600.0000	0.4450	6.3969
8	700.0000	0.4010	6.5511
9	800.0000	0.3640	6.6846
10	900.0000	0.3320	6.8024

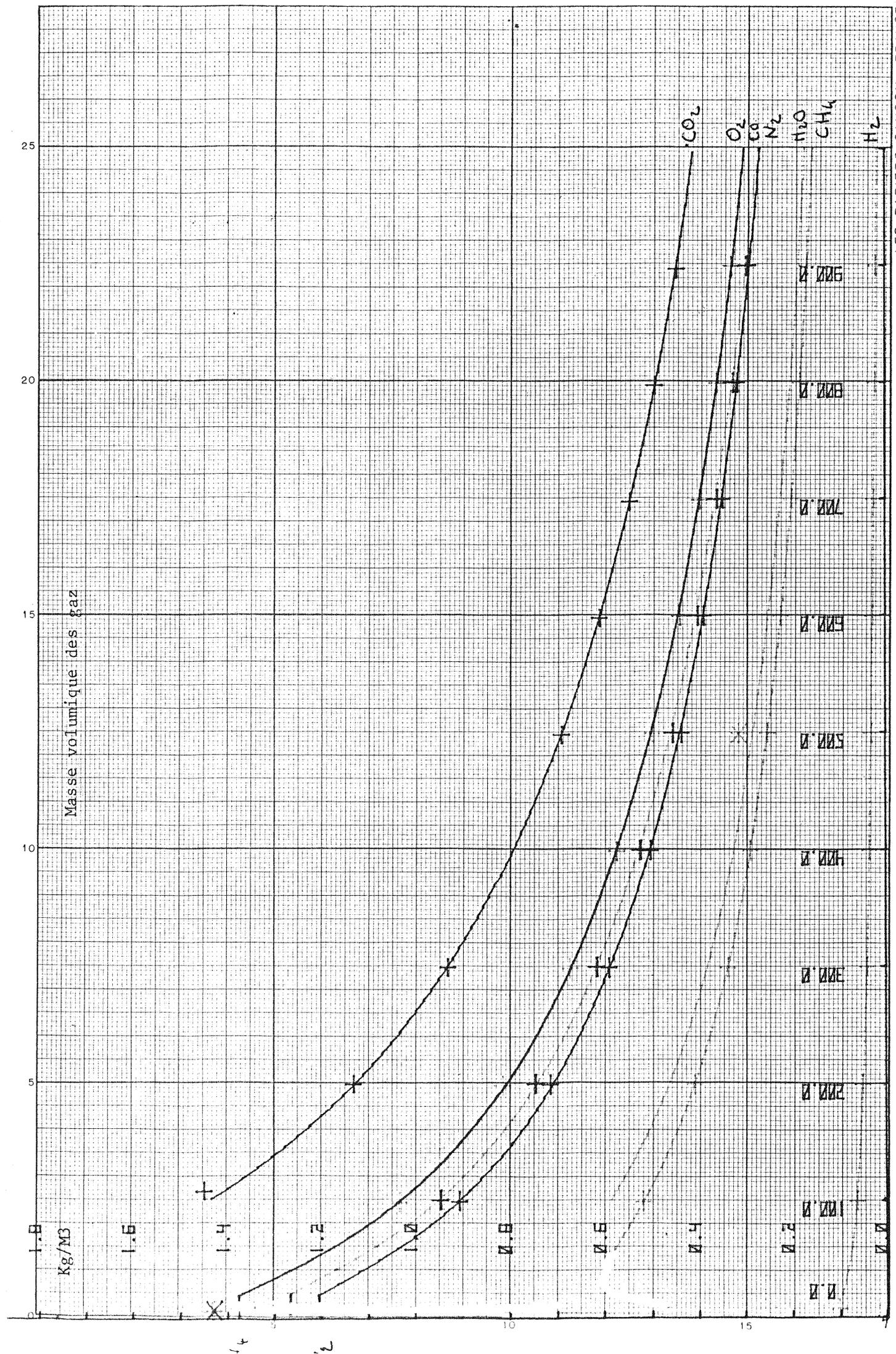
DELETE SET 1

O₂

$$Y = 0,0079 (\log X)^3 - 0,7266 (\log X)^2 + 0,3329 \log X + 7,4289$$

COEFFICIENTS

	B(I)	STD ERROR	T
B(0) =	1.4289	0.0055	260.2155
B(1) =	0.3329	0.0250	13.3301
B(2) =	-0.1266	0.0086	-14.7206
B(3) =	0.0079	0.0007	10.7535



VISCOSITE DYNAMIQUE EN 10^{-7} PI

POLYNOMIAL REGRESSION

MAX DEG = 2
 XMIN = 0.0000 XMAX = 900.0000
 YMIN = 0.0000 YMAX = 500.0000

I	X	Y
1	0.0000	166.0000
2	100.0000	209.0000
3	200.0000	248.0000
4	300.0000	286.0000
5	400.0000	321.0000
6	500.0000	342.0000
7	600.0000	368.0000
8	700.0000	393.0000
9	800.0000	416.0000
10	900.0000	440.0000

N_2

$$Y = -0,0001 \cdot X^2 + 0,4232 \cdot X + 168,3000$$

DEGREE REGRESSION= 2

COEFFICIENTS

	B (I)	STD ERROR	T
B(0) =	168.3000	2.9980	56.1379
B(1) =	0.4232	0.0155	27.2789
B(2) =	-0.0001	0.0000	-8.4231

XMIN = 0.0000 XMAX = 900.0000
 YMIN = 0.0000 YMAX = 500.0000

H_2O

I	X	Y
1	100.0000	120.0000
2	200.0000	160.0000
3	300.0000	201.0000
4	400.0000	243.0000
5	500.0000	284.0000
6	600.0000	324.0000
7	700.0000	365.0000
8	800.0000	406.0000
9	800.0000	416.0000
10	900.0000	440.0000

$$Y = 0,4241 \cdot X + 76,2381$$

DEGREE REGRESSION= 2

COEFFICIENTS

	B (I)	STD ERROR	T
B(0) =	76.2381	5.7168	13.3359
B(1) =	0.4241	0.0262	16.1707
B(2) =	-0.0000	0.0000	-0.5788

I	X	Y
1	0.0000	166.0000
2	100.0000	211.0000
3	200.0000	252.0000
4	300.0000	286.0000
5	400.0000	321.0000
6	500.0000	353.0000
7	600.0000	382.0000
8	700.0000	410.0000
9	800.0000	437.0000
10	900.0000	464.0000

C0

$$Y = -0,0001 \cdot X^2 + 0,4232 \cdot X + 168,6364$$

COEFFICIENTS

	B(I)	STD ERROR	T
B(0) =	168.6364	1.6047	105.0912
B(1) =	0.4232	0.0083	50.9656
B(2) =	-0.0001	0.0000	-12.1970

I	X	Y
1	0.0000	192.0000
2	100.0000	243.0000
3	200.0000	288.0000
4	300.0000	330.0000
5	400.0000	367.0000
6	500.0000	403.0000
7	600.0000	436.0000
8	700.0000	470.0000
9	800.0000	500.0000
10	900.0000	531.0000

O₂

$$Y = -0,0001 \cdot X^2 + 0,4769 \cdot X + 195,0727$$

DEGREE REGRESSION= 2

COEFFICIENTS

	B(I)	STD ERROR	T
B(0) =	195.0727	1.8511	105.3833
B(1) =	0.4769	0.0096	49.7886
B(2) =	-0.0001	0.0000	-11.5346

I	X	Y
1	0.0000	84.2000
2	100.0000	104.0000
3	200.0000	122.0000
4	300.0000	139.0000
5	400.0000	154.0000
6	500.0000	170.0000
7	600.0000	184.0000
8	700.0000	198.0000
9	800.0000	211.0000

H₂

$$Y = 0,1921 \cdot X + 84,7988$$

DEGREE REGRESSION= 2

COEFFICIENTS

	B (I)	STD ERROR	T
B(0) =	84.7988	0.4445	190.7738
B(1) =	0.1921	0.0026	74.1489
B(2) =	-0.0000	0.0000	-13.9406

I	X	Y
1	0.0000	137.0000
2	100.0000	181.0000
3	200.0000	222.0000
4	300.0000	239.0000
5	400.0000	292.0000
6	500.0000	325.0000
7	600.0000	354.0000
8	700.0000	362.0000
9	800.0000	400.0000

CO₂

$$Y = -0,0001 \cdot X^2 + 0,4280 \cdot X + 137,3333$$

DEGREE REGRESSION= 2

COEFFICIENTS

	B (I)	STD ERROR	T
B(0) =	137.3333	7.3290	18.7385
B(1) =	0.4280	0.0427	10.0180
B(2) =	-0.0001	0.0001	-2.5255

DATA SET 4 IS NOW
X= 300.0000 , Y= 259.0000

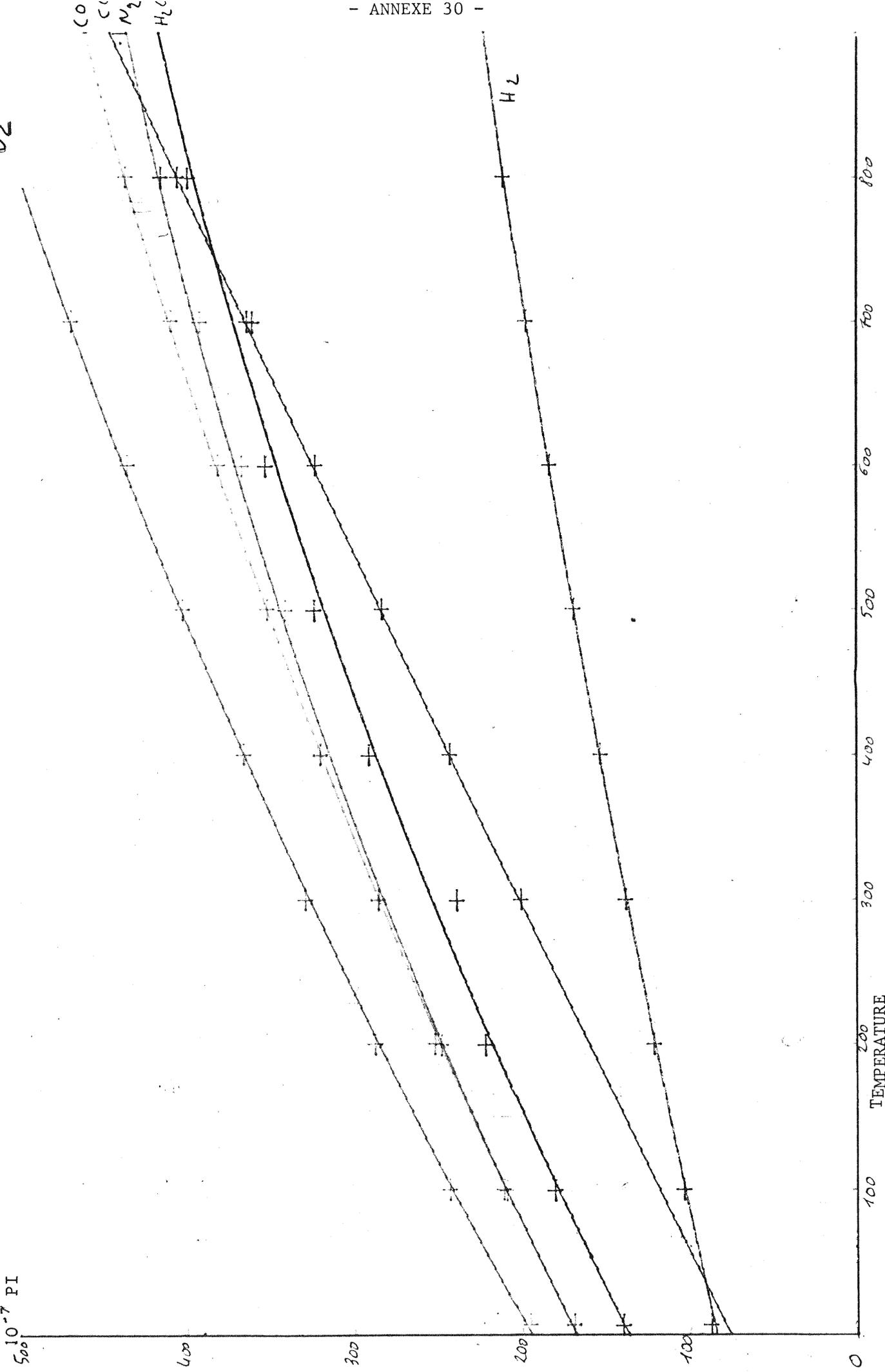
Viscosité dynamique

10^{-7} PI

O₂

CO
CC
N₂
H₂C

H₂



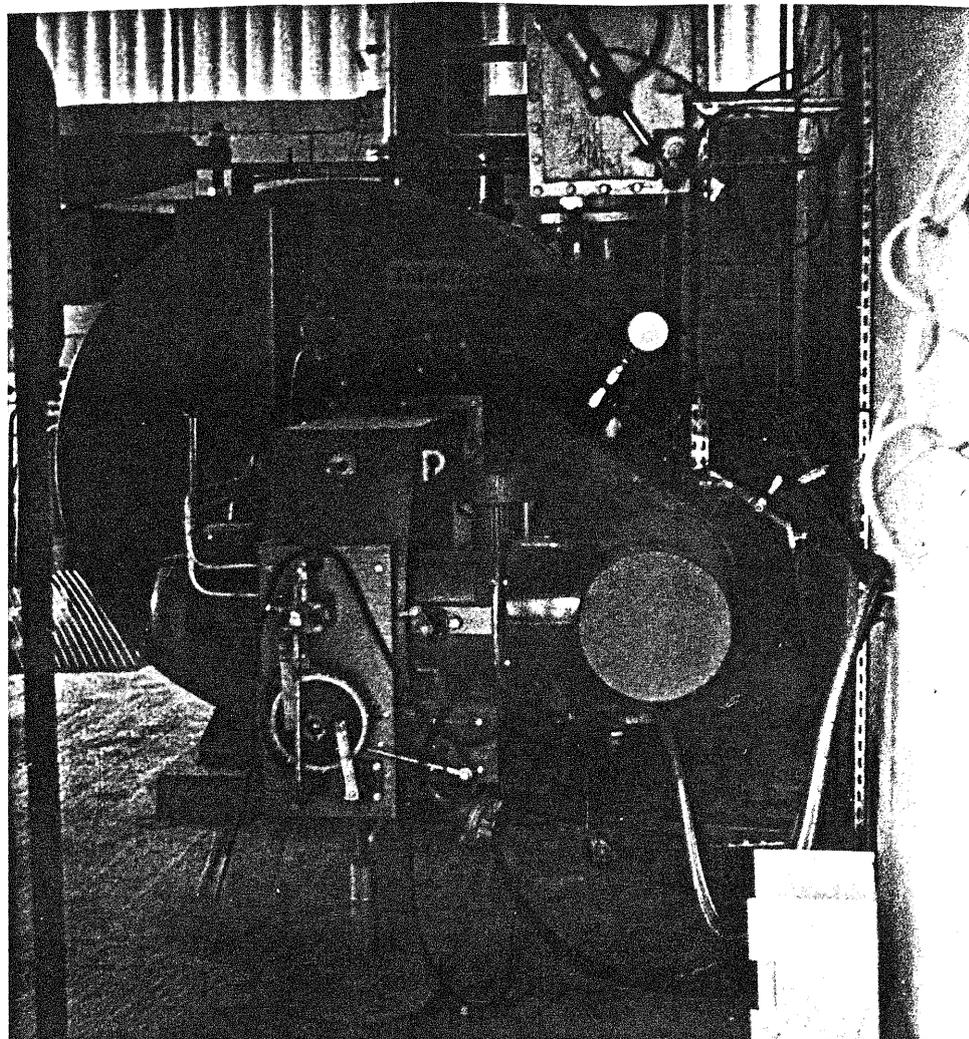
TEMPERATURE

0 100 200 300 400 500 600 700 800

COMBUSTIONS CONVENTIONNELLES

— Valeurs numériques des caractéristiques des combustibles gazeux.

		I	V _a	V _f	V _g	V _{H₂O}	η _e	V _{CO₂}	α ₀	α ₀
		kcal/m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	%	m ³ /m ³	%	%
Gaz purs										
hydrogène	H ₂	2 610	2,40	2,90	1,90	1,0	34,5	0,0	0	0
oxyde de carbone	CO	3 066	2,40	2,90	2,90	0,0	0	1,0	34,4	34,4
méthane	CH ₄	8 520	9,62	10,62	8,62	2,0	18,8	1,0	9,4	11,6
acétylène	C ₂ H ₂	13 730	12,02	12,52	11,52	1,0	8,0	2,0	16,0	17,4
éthylène	C ₂ H ₄	14 090	14,42	15,42	13,42	2,0	13,0	2,0	13,0	14,9
éthane	C ₂ H ₆	15 230	16,83	18,33	15,33	3,0	16,4	2,0	10,9	13,05
propane	C ₃ H ₈	21 740	24,04	26,04	22,04	4,0	15,4	3,0	11,5	13,6
butane	C ₄ H ₁₀	28 340	31,25	33,75	28,75	5,0	14,8	4,0	11,85	13,9
benzène	C ₆ H ₆	33 690	36,06	37,56	34,56	3,0	8,0	6,0	16,0	17,4
hydrocarbures	C _m H _n	.....	{ 4,81 m + 1,20 m	{ 4,8 m + 1,45 m	{ 4,8 m + 0,95 m	0,5 m	50 m	m	m	m
sulfure de carbone	CS ₂		14,4	14,4	14,4	0,0	0	1,0	6,9	6,9
hydrogène sulfuré	H ₂ S		7,2	7,7	6,7	1,0	13,0	0,0	0	0
Gaz inertes	vapeur d'eau	H ₂ O	0	0	0	1,0	100	0,0	0	0
	gaz carbonique	CO ₂	0	0	1,0	0,0	0	1,0	100	100
	autres gaz	N ₂ , SO ₂	0	0	1,0	0,0	0	0,0	0	0
oxygène	O ₂	0	-4,81	-3,81	-3,81	0,0	0	0,0	0	0
Gaz Industriels										
gaz butane du commerce	C ₄ H ₁₀	28 375	31,25	33,75	28,75	5,0	14,8	4,1	11,9	14,0
gaz naturel	CH ₄	8 400 à 9 550	9 à 10,75	10 à 11,8	8 à 10	1,8 à 2	15 à 20	0,9 à 1,3	9,0 à 11,0	11,0 à 12
gaz de Lacq (épuré)	CH ₄	8 900	9,2	10,2	8,23	1,97	19,3	0,96	9,4	11,7
gaz d'éclairage pur	H ₂ , CH ₄	4 900	5,3	6,0	4,7	1,3	21,6	0,5	8,3	10,6
gaz à l'eau carburé	H ₂ , CO, CH ₄	4 265	4,6	5,3	4,5	0,8	15,1	0,75	14,4	16,9
gaz de fours à coke	H ₂ , CH ₄	3 750 à 4 250	3,85 à 4,55	4,4 à 5,2	3,3 à 4,0	1,0 à 1,2	23 à 25	0,3 à 0,4	7,0 à 8,0	9,0 à 10
gaz à l'eau	H ₂ , CO	2 600	2,25	2,8	2,3	0,5	17,8	0,5	17,0	20,6
gaz Mond	N ₂ , H ₂ , CO ₂ , CO	1 400	1,3	2,15	1,8	0,35	16,3	0,3	15,2	18,1
gaz mixte { de houille	N ₂ , CO, H ₂	1 380	1,25	2,05	1,9	0,15	7,3	0,3	16,1	17,4
de coke		1 250	1,05	1,85	1,75	0,10	5,4	0,35	18,9	20,0
gaz à l'air	N ₂ , CO	1 100 à 1 300	0,8 à 1,25	1,6 à 2,05	1,5 à 2,0	0,10	5 à 6	0,3 à 0,35	18,0	19,0
gaz de haut fourneau	N ₂ , CO ₂ , CO	900 à 1 000	0,74	1,65	1,55	0,10	6	0,4	24,2	25,8



-Chaudière
des serres

— Chaleur massique, conductivité thermique et viscosité dynamique des gaz intervenant en thermique (à la pression atmosphérique).

Gaz	Température °C	Massa volumique kg/m³	Conductivité thermique W/m.°C	Chaleur massique kJ/kg.°C	Viscosité dynamique 10 ⁻⁵ Pl	Gaz	Température °C	Massa volumique kg/m³	Conductivité thermique W/m.°C	Chaleur massique kJ/kg.°C	Viscosité dynamique 10 ⁻⁵ Pl
Hydrogène (H ₂)	0	0,0899	0,168	14,231	0,842	Air	0	1,293	0,0242	1,004	1,72
	100	0,0658	0,216	14,440	1,04		100	0,947	.....	1,009	2,57
	200	0,0519	0,260	14,524	1,22		200	0,746	0,0387	1,025	
	300	0,0429	0,304	14,545	1,39		300	0,616	.....	1,046	3,25
	400	0,0365	0,347	14,637	1,54		400	0,524	0,0509	1,067	
	500	0,0318	.....	14,670	1,70		500	0,457	.....	1,092	3,83
	600	0,0281	0,413	14,775	1,84		600	0,404	0,0615	1,113	
	700	0,0252	.....	14,942	1,98		700	0,363	.....	1,134	.....
	800	0,0228	.....	15,130	2,11		800	0,329	.....	1,151	
	900	0,0209	.....	15,319	.....		900	0,301	.....	1,170	.....
Méthane (CH ₄)	0	0,720	0,0305	2,155	1,02	Anhydride carbonique (CO ₂)	0	1,977	0,0145	0,820	1,37
	100	0,526	0,0442	2,461	1,33		100	1,440	0,0224	0,921	1,81
	200	0,415	0,0637	2,796	1,61		200	1,135	0,0322	0,996	2,22
	300	0,343	0,0849	3,173	1,86		300	0,935	0,0401	1,067	2,59
	400	0,292	.....	3,499	.....		400	0,851	0,0467	1,122	2,92
	500	0,254	.....	3,813	.....		500	0,695	0,0546	1,163	3,26
	600	0,225	.....	4,085	.....		600	0,615	0,0605	1,201	3,54
	700	0,202	.....	4,332	.....		700	0,552	0,0663	1,230	3,82
	800	0,183	.....	4,541	.....		800	0,501	0,0721	1,256	4,09
	900	0,168	.....	4,759	.....		900	0,456	0,0768	1,276	4,35
Oxyde de carbone (CO) ..	0	1,250	0,0232	1,040	1,66	Oxygène (O ₂)	0	1,429	0,0246	0,917	1,92
	100	0,916	0,0304	1,046	2,11		100	1,046	0,0328	0,933	2,43
	200	0,722	0,0370	1,059	2,52		200	0,825	0,0401	0,963	2,88
	300	0,596	0,0430	1,080	2,86		300	0,681	0,0471	0,996	3,30
	400	0,508	.....	1,105	3,21		400	0,580	0,0535	1,025	3,67
	500	0,441	.....	1,130	3,53		500	0,504	0,0594	1,050	4,03
	600	0,392	.....	1,159	3,82		600	0,445	.....	1,076	4,36
	700	0,351	.....	1,180	4,10		700	0,401	.....	1,088	4,70
	800	0,318	.....	1,201	4,37		800	0,364	.....	1,101	5,00
	900	0,292	.....	1,218	4,64		900	0,332	.....	1,113	5,31
Azote (N ₂)	0	1,250	0,0242	1,038	1,66	Vapeur d'eau (H ₂ O)	100	0,589	0,0217	2,337	1,20
	100	0,916	0,0314	1,046	2,09		200	0,465	0,0337	1,967	1,60
	200	0,722	0,0380	1,053	2,48		300	0,384	0,0442	2,010	2,01
	300	0,596	0,0441	1,069	2,86		400	0,326	0,0564	2,067	2,43
	400	0,508	0,0495	1,092	3,21		500	0,284	0,0686	2,132	2,84
	500	0,441	0,0544	1,117	3,42		600	0,252	0,0820	2,201	3,24
	600	0,392	0,0592	1,138	3,68		700	0,226	0,0965	2,268	3,65
	700	0,351	0,0634	1,163	3,93		800	0,205	0,112	2,332	4,06
	800	0,318	0,0672	1,182	4,16						
	900	0,292	0,0706	1,201	4,40						

PCI DES GAZ

La chaleur de combustion d'un mélange de gaz est égale à la somme des chaleurs de ses constituants (diffusion mutuelle des gaz négligeables).

		mth/ Nm3		mth/kg	
		P C S	P C I	P C S	P C I
H2	:	3055	2586	33990	28770 :2H2O :
CO2	:	0	0	0	0 :
CO	:	3021	3021	2416	2416 :2CO2 :
CH4	:	9570	8580	13265	11954 :CO2 +: : 2 H2O :
C2 H6	:	16815	15370	12400	11350 :4CO2+: : 6 H2O :

Source T de l'ingénieur

$$PCI = \frac{x}{100} H_2 \times 2586 + \frac{x'}{100} CO \times 3021 + \frac{x''}{100} CH_4 \times 8580 + \frac{x'''}{100} C_2 H_6 \times 15370$$

x teneur en H2

x' teneur en CO

x'' teneur en CH4

x''' teneur en C2 H6

Température extérieure

0 30 40 50 60 70 80 90 100

B 30058

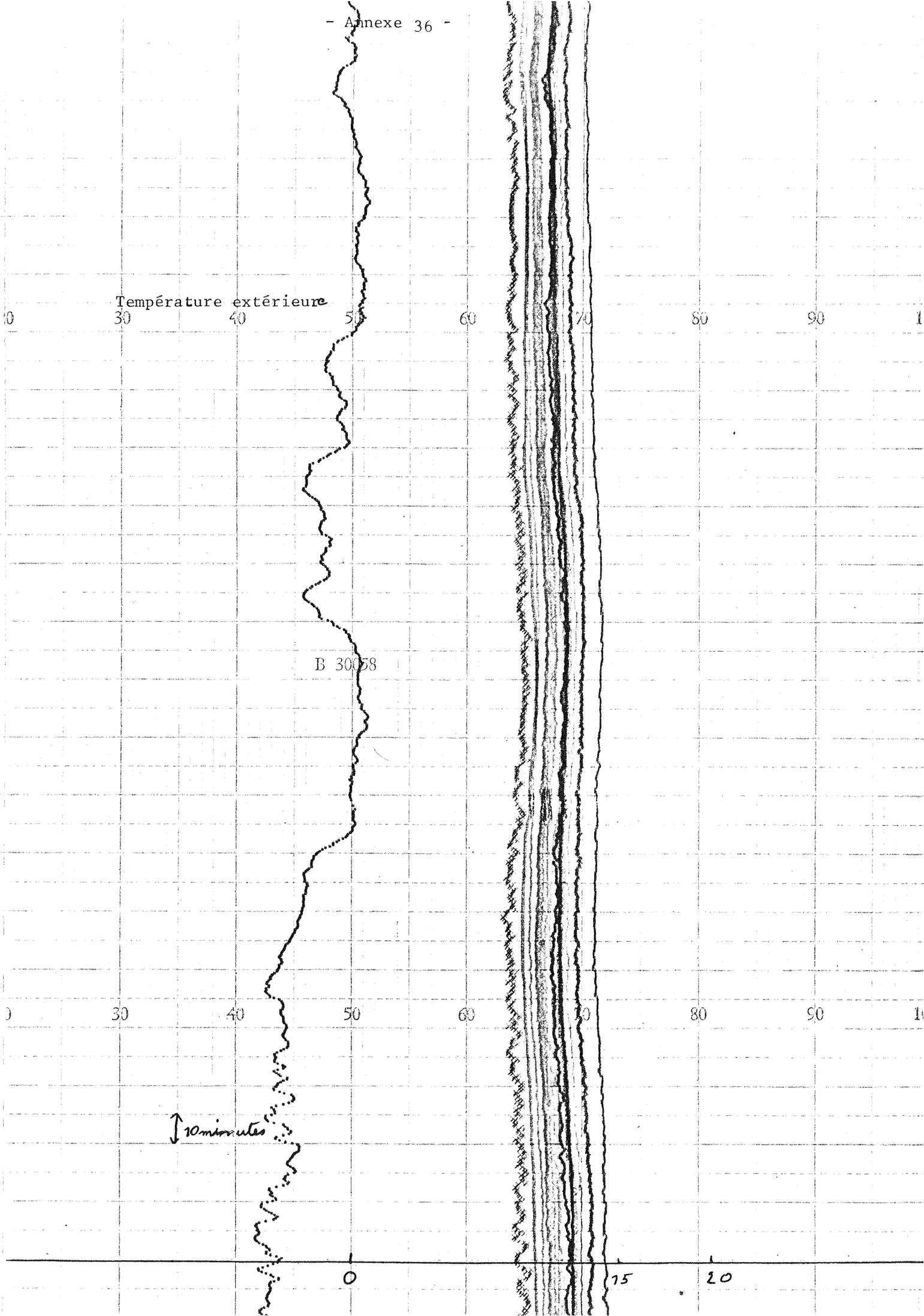
↓ 10 minutes

0 30 40 50 60 70 80 90 100

0

75

20



Échauffage avec bulbes à
fuel intérieur

20 30 40 50 60 70 80 90

Température
extérieure →

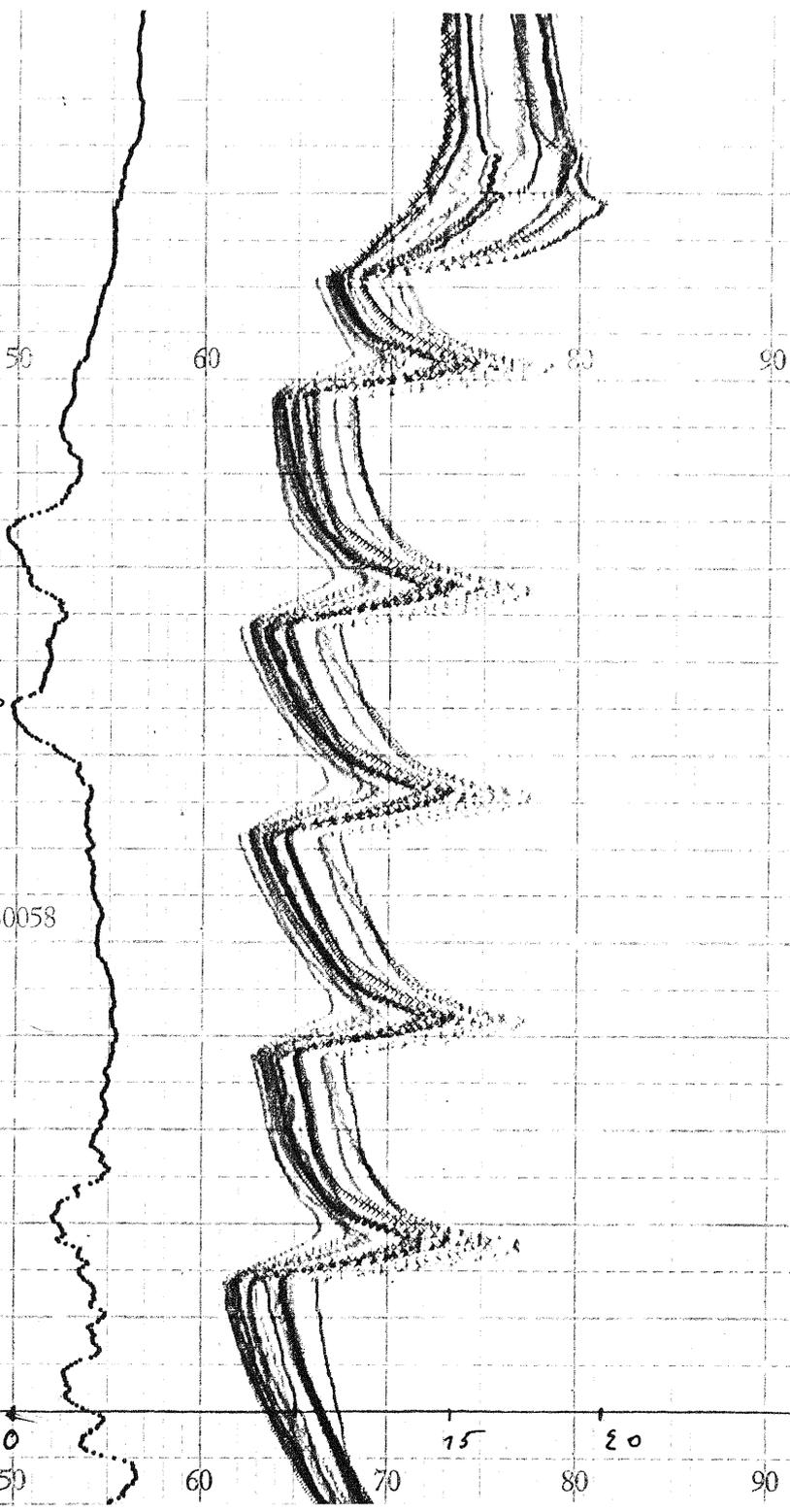
ordre des courbes

B 30058

11-7-2-9-10-3-4-7-8-6-5

↓ 10mm

20 30 40 50 60 70 75 80 85 90



ordre des mesures

13-15-7-16-8-14-3-9-1-11-5-2-10-12-4

6 - température humide

20 30 40 50 60 70 80 90

Bourbe pour la répartition de la t° dans la serre.

B 30058

température extérieure

20 30 40 50 60 70 80 90

20 mm

B 30058

0 10 20

