

MIKULA STEPHANE
Université des Sciences et Techniques de LILLE I
DEUST Valorisation des produits de la pêche

15 mars 1992
15 juin 1992

**MISE AU POINT D'UN PILOTE
MICRO-ONDES
MULTIFONCTION EN VUE
D'UN SECHAGE D'ALGUES
ALIMENTAIRES**

Directeur d'étude: **JP.COLBEAUX**
Maître de stage : **F.LIOT (CEVA)**
JL.VALLET (IFREMER)
C.KNOCKAERT (IFREMER)
P.CHANTREAU (IFREMER)

IFREMER
Rue de l'île d'Yeu
44037 NANTES
CEVA
Presqu'île de Pen Lan
22610 PLEUBIAN

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur BRAULT, Directeur du centre d'Etudes et de Valorisation des Algues (CEVA), ainsi que Monsieur HAN CHING, Directeur du Département Valorisation des Produits à IFREMER, qui m'ont accueilli durant ce stage.

Je tiens également à remercier Monsieur Frédéric LIOT (CEVA), Monsieur Jean-Luc VALLET (IFREMER), Monsieur Camille KNOCKAERT (IFREMER), Monsieur Patrick CHANTREAU (IFREMER) mes maîtres de stages, pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toute l'équipe du CEVA et d'IFREMER. pour la sympathie qu'ils m'ont témoignée et qui a contribué au bon déroulement de mon stage et en particulier M BENHAMMOU Allal (IFREMER) pour son aide apportée concernant la méthodologie des plans expérimentaux.

SOMMAIRE

	PAGE
1	<u>INTRODUCTION</u> 3
2	<u>PRESENTATION DES ENTREPRISES</u>
	<u>2.1. Centre d'Etude et de Valorisation des Algues</u> 4
	<u>2.2. Institut Française de Recherche pour l'Exploitation de la MER</u> 7
3	<u>GENERALITE SUR LES MICRO-ONDES</u> 12
	<u>3.2. Que sont les micro-ondes ?</u> 12
	<u>3.3. Avertissement</u> 13
	<u>3.4. Pourquoi les micro-ondes chauffent-elles ?</u> 13
	<u>3.5. Avantages des micro-ondes</u> 13
	<u>3.6. Inconvénient principal des micro-ondes</u> 13
	<u>schéma de fonctionnement</u> 14
4	<u>MATERIEL ET METHODES</u>
	<u>4.1. Caractéristiques techniques du matériel pilote</u> 16
	<u>4.2. Réglage effectués</u> 17
	<u>4.3. Les algues</u> 17
	<u>4.4. Utilisations</u> 28
	<u>4.5. Récolte</u> 30
	<u>4.6. Les algues dans l'alimentation humaine</u> 33
	<u>4.7. <i>UNDARIA PINNATIFIDA</i></u> 33
	<u>4.8. <i>PALMARIA PALMATA</i></u> 33
	<u>4.9. Méthodologie des plans d'expériences</u> 39

5	<u>RESULTATS</u>	40
	<u>5.1. Séchage traditionnel</u>	
	<u>5.2. Séchage par micro-ondes</u>	
	<u>5.3. Conclusion</u>	
6	<u>CONCLUSION GENERALE</u>	44
7	<u>ANNEXES</u>	45

INTRODUCTION

Le séchage ou dessiccation consiste à évacuer l'eau d'un matériau humide vers le milieu ambiant dans le but d'en assurer la stabilité.

Actuellement, le séchage à l'air chaud est le mode de déshydratation le plus employé dans le monde pour le traitement des denrées alimentaires. Cependant, cette technique présente quelques inconvénients.

Au cours du séchage, il se produit généralement un gradient de déshydratation aboutissant à un dessèchement superficiel caractérisé par un croûtage et un temps de traitement important.

Il existe de nombreuses techniques de séchage.

On distingue les techniques traditionnelles encore utilisées dans de nombreuses régions du globe qui associe le soleil et l'air.

Parmi, les techniques les plus récentes, on trouve la lyophilisation, Infra-rouge, etc...

Depuis quelques années, la technologie des micro-ondes est mieux maîtrisée ce qui permet d'envisager son utilisation pour le séchage. Nous nous proposons dans cette étude d'en faire l'application aux algues.

En Europe, contrairement aux pays asiatiques, les algues sont considérées comme un produit alimentaire original.

Son principal mode de conservation est le séchage à l'air chaud. En effet, en Occident, on ne dispose pas d'informations techniques et scientifiques concernant d'autres méthodes de séchage appliquées aux algues alimentaires .

De ce fait nous avons voulu sécher des algues à l'aide de micro-ondes afin de comparer l'influence de ces dernières à celle de l'air chaud.

La technique et le matériel employé étant relativement complexe et novateur, nous avons du diviser notre travail en trois parties :

- la mise au point de l'appareillage,
- les techniques d'analyse du produit séché,
- essais de séchage sur *Palmaria Palmata* et *Undaria Pinnatifida*.

2.1.LE CENTRE D'ETUDE ET DE VALORISATION DES ALGUES

Le CEVA est le centre technique de l'algue, chargé du transfert de technologie et de la recherche appliquée à l'industrie. Créé en 1982, le CEVA devient Société d'Economie Mixte en 1987 en ouvrant son capital aux industriels. Le capital de 3,5 MF est réparti entre les collectivités locales, l'IFREMER et des sociétés privées.

Une équipe pluridisciplinaire : 18 personnes dont 5 docteurs-es-sciences, 4 ingénieurs agronomes et 6 techniciens.

Des locaux adaptés (400 m² de laboratoires, une salle de production-pilote de 240 m², une éclosérie de 100 m², un site de 400 m² pour la culture d'algue à terre, une ferme de 6 ha de culture d'algues marines).

Certaines recherches complémentaires sont menées en collaboration avec l'IFREMER, le CNRS, l'INRA, et le CEVA maintient de solides relations avec l'étranger (Grande Bretagne, Norvège, USA, Chili, Corée).

A l'interface entre la recherche et la production, le CEVA; structure unique en Europe, est un outil au service des industriels par la mise à disposition de ses compétences en :

2.1.1.APPROVISIONNEMENT :

- Centralisation des informations sur les stocks disponibles et l'approvisionnement,
- Estimation par télédétection des biomasses naturelles exploitables, analyses locales du potentiel économique de la ressource algale,
- Développement de nouvelles cultures d'algues et transfert du savoir-faire en culture d'Undaria.

2.1.2.DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX PRODUITS :

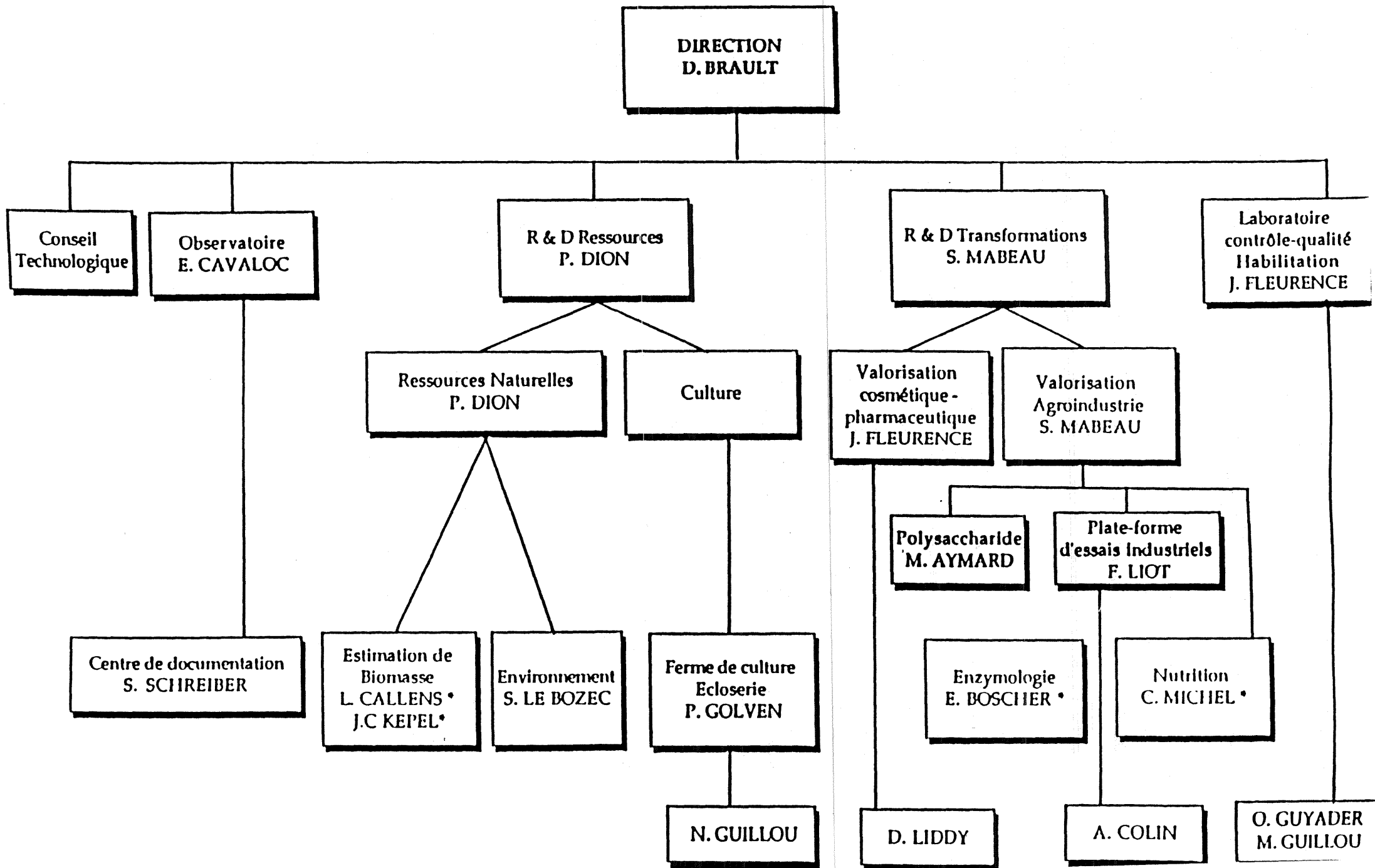
- Etude de faisabilité,
- Mise au point de produits (agroalimentaires, agricoles et cosmétiques etc...),
- Mise au point de procédés et fabrication semi industrielle,
- Production pilote.

2.1.3. CONTROLE DE LA QUALITE :

- Contrôle de conformité aux normes,
- Agrément à l'exportation,
- Analyse et certification des produits intermédiaires ou finis à base d'algues,
- Mise au point de méthodes analytiques spécifiques au matériel algal.

2.1.4. OBSERVATOIRE TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE :

- Veille scientifique et technico-économique (annuaires, fiche techniques ...),
- Etudes techniques ou économiques confidentielles,
- Expertises technico-économiques.



2.2.INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER

Organisme de recherche créé par un décret du 5 mai 1984, l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) est un établissement public industriel et commercial (Epic), qui est issu de la fusion du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) et de l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (ISTPM). Il est placé sous la double tutelle du ministère de la Recherche et de la Technologie et du ministre de la Mer.

L'Ifremer exerce quatre missions principales : d'abord comme organisme de recherche et agence d'objectifs dans des domaines pour lesquels il détient une compétence scientifique ; puis comme agence de moyen en développant et en mettant au service de la communauté nationale la flotte océanographique ; ensuite une mission de service public et enfin une mission essentielle pour un Epic : valoriser le résultat de ses travaux dans les entreprises.

Le financement des activités d'Ifremer (environ 900 millions de francs) est assuré à 85 % par les subventions que lui verse l'Etat auxquelles s'ajoutent des ressources propres, chaque année en augmentation.

1200 ingénieurs, chercheurs, techniciens participent aux diverses missions de l'Ifremer. Ce personnel travaille dans 5 principaux centres de recherche (Brest; Nantes; Toulon; Boulogne; Appende), dans 23 stations ou délégations réparties le long du littoral français ou outre-mer et dans son nouveau siège social à Issy-les-Moulineaux.

Mais l'Ifremer, c'est aussi un groupe : en effet à ces 1200 personnes, il faut ajouter environ 600 personnes qui travaillent dans des filiales pour valoriser la politique de recherche de l'Institut et gérer notamment par sa plus importante filiale, Génavir, les moyens de la flotte océanographique française qui est composée de 9 navires, dont l'Atlante, navire de 85 m lancé fin 90 et de submersibles habités comme le Nautille.

2.2.1.LE CENTRE DE NANTES

Construit en 1969, le centre de NANTES était à l'origine le siège de l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes.

En 1984, à la création de l'Ifremer, il est devenu l'un des cinq centres principaux au sein duquel sont réunis les équipes de recherches et leur support logistique.

L'effectif du centre de NANTES, y compris les stations rattachées, est de l'ordre de 300 personnes.

Les stations du littoral atlantique de la Vilaine à la frontière espagnole, sont localisées à :

- Bouin (Vendée)
- Noirmoutier (Vendée)
- L'Houmeau (Charente Maritime)
- La Tremblade (Charente Maritime)
- Arcachon (Gironde)

2.2.2.ACTIVITES

- Département " Ressources halieutiques " (ERHAL)
- Laboratoire "Océanologie halieutique " (OCEHAL)
- Département "Ressources aquacoles

- Département " **Utilisation et Valorisation des produits** "
 - .Laboratoire " Technologie de traitement "
 - .Laboratoire " Caractéristiques alimentaires des produits "
 - .Laboratoire " Biochimie et molécules marines "
- Département " Contrôle et Suivi des Ressources et de leurs utilisations "
- Département " Milieu et ressources ".

2.2.3.DEPARTEMENT VALORISATION DES PRODUITS

Transformation et valorisation des produits de la mer

L'IFREMER a pour mission de concevoir et de mettre en oeuvre les programmes de recherche et les actions de développement pour contribuer au renforcement de la compétitivité des entreprises nationales du secteur des Produits de la Mer par une meilleure utilisation des ressources marines:

- amélioration des technologies de traitement et de la qualité;
- optimisation et diversification des utilisations;
- valorisation des espèces sous-exploitées;
- soutien à la profession et à la recherche amont;
- transfert des connaissances aux Centres Techniques des Produits de la Mer.

Utiliser d'avantage ou mieux les espèces capturées ou capturables, qu'il s'agisse de parties comestibles ou de sous produits, à des fins alimentaires ou industrielles, conduit à l'amélioration de la plus value sur les captures.

2.2.4.MOYENS

L'effectif du département comprend à Nantes, 36 personnes dont 18 cadres et 9 techniciens regroupés en :

- 3 laboratoires :

.Génie Alimentaire

.Biochimie et Molécules marines

.Qualité et Physico-chimie

- une équipe pour les "Etudes techno-réglementaires"

2.2.5.EQUIPEMENT PILOTES:

.Traitements techniques : congélation-décongélation-cuisson (armoire tunnel) conserve -pasteurisation- micro-ondes.

.Séparation : décantation -lavage-tamissage-pilote surimi.

.Texturation : pilote pour bâtonnets de surimi-cuisson-extrusion.

.Traitements divers : mareyage - fumage - mélange - broyage - désarêtage - pressage - emballages - divers.

2.2.6.MOYENS ANALYTIQUES

.Chromatographies CPG, HPLC, FPLC;

.Analyseur d'acide aminés;

.Isoélectrofoculation;

.Texturomètre;

.Colorimètre;

.Analyse thermique différentielle;

.Histologie;

.Analyse d'images.

2.2.7.LABORATOIRE GENIE ALIMENTAIRE

Les travaux effectués au sein de ce laboratoire concernent :

.L'étude de nouveaux procédés agro-alimentaires appliqués aux produits marins (extraction, extrusion, texturation, fermentation lactique...)

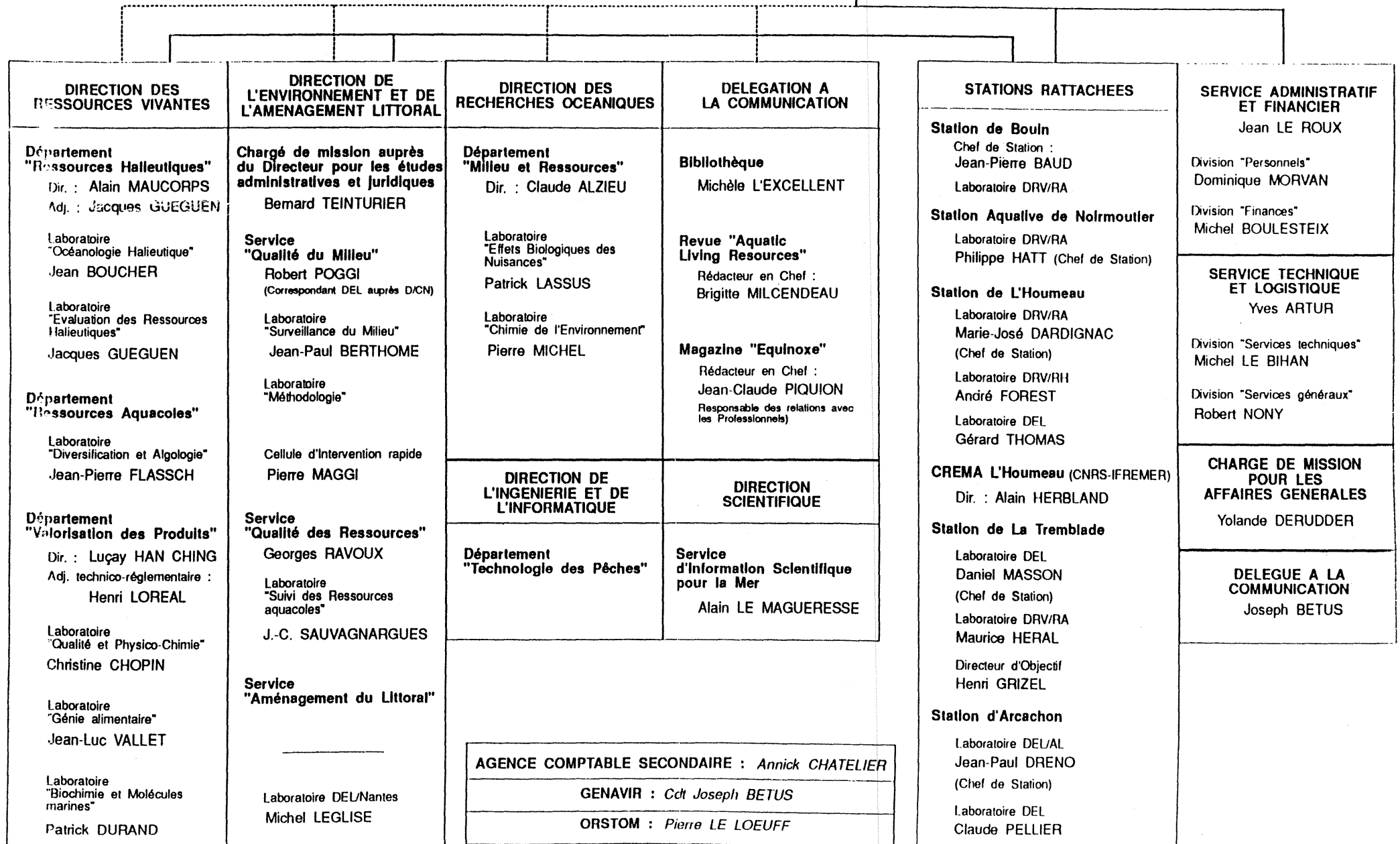
. La valorisation de la production salmonicole marine.

. La valorisation d'espèces sous-utilisées (petites espèces pélagiques).

. L'optimisation l'amélioration des techniques de conservation et de transformation à bord des navires et dans les installations à terre (fumage, décongélation, technologie du surimi...).

DIRECTEUR

Henri DURAND



LES MICRO-ONDES

3.1.Généralités

3.1.1.Oue sont les micro-ondes?

Les micro-ondes ou hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est comprise entre 300 MHz et 30 GHz.

L'onde électromagnétique est formée par deux champs (électrique et magnétique) et elle se caractérise par :

-sa fréquence (F) exprimée en Hertz, qui est le cycle d'alternance du champ électromagnétique par seconde ,

-sa vitesse (V) qui est de 300 000 km/secondes,

-sa longueur d'onde (l) qui est la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'un cycle.

Pour les applications I.S.M (Industrielles, Scientifiques, et Médicales) des micro-ondes, une convention internationale autorise les fréquences suivantes :

433.92 MHz
896 MHz
915 MHz
2375 MHz
2450 MHz
5800 MHz
24125 MHz

3.1.2.Avertissement

L'ensemble de ces fréquences n'est pas applicable dans tous les pays, et seules les trois dernières citées à savoir 2450 MHz, 5800 MHz, 24125 MHz sont valables pour l'ensemble du monde

De ces trois fréquences, seule la fréquence de 2450 MHz est utilisée au niveau industriel.

L'énergie micro-ondes est produite par un tube à vide appelé **magnétron***, dont le rendement est voisin de 70%. Pour la fréquence de 2450 MHz, la longueur d'ondes est de 12.24 cm.

3.1.3. Pourquoi les micro-ondes chauffent-elles?

Le chauffage par micro-ondes est basé sur les propriétés de l'interaction du champ électrique avec les constituants d'un produit.

Sous l'action d'un champ électrique alternatif variant 2450 millions de fois par seconde, les molécules polaires ont tendance à suivre la variation du champ électrique. Ce phénomène engendre une agitation moléculaire qui est à l'origine de l'échauffement dans la matière. À noter que du fait de la configuration asymétrique de la molécule d'eau, définissant une polarité exceptionnelle, l'eau est le matériau idéal pour le chauffage par micro-ondes.

3.2. Avantages spécifiques des micro-ondes

La dissipation de la chaleur s'effectuant dans le produit, on obtient un chauffage dans la masse .

Le chauffage est direct et rapide en raison de fortes densités de puissance qui peuvent être appliquées.

L'absence d'inertie permet une régulation et un asservissement aisé.

La production de la chaleur étant liée à la nature de la matière elle-même, il n'y a pas de dissipation thermique inutile et on aboutit à un bon rendement énergétique (supérieur à 55%).

Le chauffage est sélectif, seul le produit est chauffé, et non l'environnement, d'où les suppressions des déperditions dans l'enceinte.

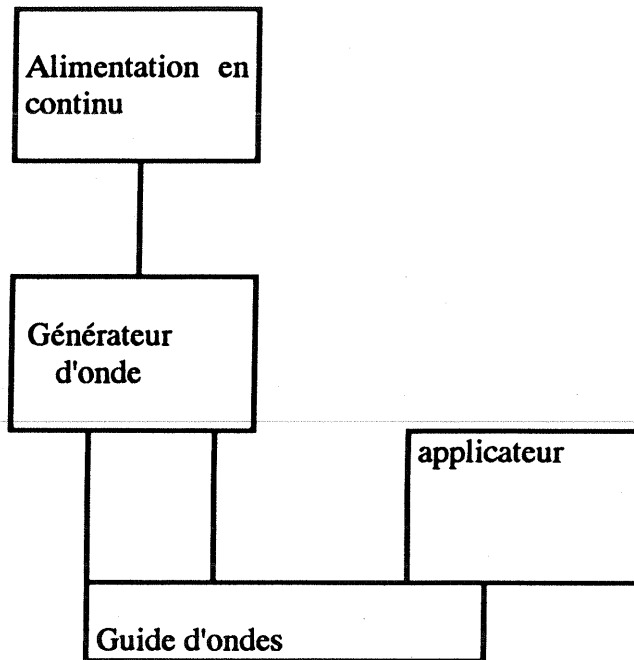
L'énergie est transmise à distance et peut se propager dans des atmosphères variées, sous vide, sous pression, en ambiance froide, chaude, vapeur, etc...

3.3. Inconvénient principal des micro-ondes

L'inconvénient principal est le coût; pour un Kw installé utile, il faut compter entre 10 000 et 40 000 Francs. Il existe des différences selon les applications, mais elles ne sont pas énormes (20 % maximum).

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT

Malgré son allure complexe, sa nouveauté technologique, on peut simplifier le pilote micro-onde multi fonction comme suit :



Guide d'ondes : transporteur d'énergie
Applicateur : enceinte de traitement
Générateur : producteur d'ondes

APPLICATION DES MICRO-ONDES ET HAUTES FREQUENCES DANS L'INDUSTRIE

AGRO-ALIMENTAIRE séchage, déshydratation, cuisson, décongélation, réchauffage, pasteurisation, stérilisation, blanchiment, désinsectisation...
CAOUTCHOUCS, PLASTIQUES préchauffage, gélification, vulcanisation, fusion...
BOIS séchage, séchage de colle (aboutage, lamellé collé, etc.) cintrage...
TEXTILES séchage des bobines, balles, séchage de mèche ou fils, séchage de nappes, séchage d'enduction...
PAPIER CARTON séchage du papier ou carton, séchage de colle sur papier, séchage d'enduction, séchage d'encres, collage de reliures...
INDUSTRIE CHIMIQUE ET PARA-CHIMIQUE séchage des produits en poudre ou en tablettes, stérilisation de produits pharmaceutiques, cosmétiques...
MATERIAUX COMPOSITES polymérisation ou prépolymérisation, préchauffage des profilés, fusion de résines...
DIVERS domaine médical (hyperthermie), fonderie, tabac, laboratoires scientifiques...

4.1.CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU MATERIEL PILOTE

Le four ALM 3200 est un appareil multi énergie, prévu pour fonctionner avec:

.Micro-ondes

- .4 générateurs 800 W chacun
- .Puissance maximale des générateurs 3,2 kW
- .Fréquence des magnétrons 2450 MHz

.Air chaud

- .Un ensemble de résistances (7.8 kW)

.Infra-rouge

- .Un tube de (3.5 kW)

.Humidité

- .Générateur de vapeur
- .Spray

.Automatisme (pupitre)

.Un régulateur (JUMO MpR 88) permet de piloter l'ensemble de la partie commande

.Le contrôle et la gestion de la température et de l'humidité se font par un régulateur de type MicrocorIII.

.Ventilation des moteurs

- .Une turbine à air chaud située dans le four qui brasse l'air.
- .Fonctionnement dès la mise sous tension.
- .Un ventilateur d'extraction vapeur, piloté par le régulateur.
- .4 ventilateurs pour refroidir l'ensemble magnétron* (alimentation micro-ondes)
- .Une sole tournante, oscillante, pilotée par le régulateur.

.Accessoires

- .Une sonde d'humidité
- .Une sonde de température (PT 100) déformable, servant de base à la régulation air chaud
- .3 sondes à piquer (PT100), à connecter sur un enregistreur ou indicateur.
- .Un thermostat de sécurité qui détecte tout dépassement de la température limite.
- .Un détecteur inductif pour le mouvement oscillant de la sole.

.Sécurité

- .2 détecteurs inductifs contrôlant la bonne fermeture de chacune des demi-portes.
- .Un fin de course détectant la fermeture du verrou

.Objectif

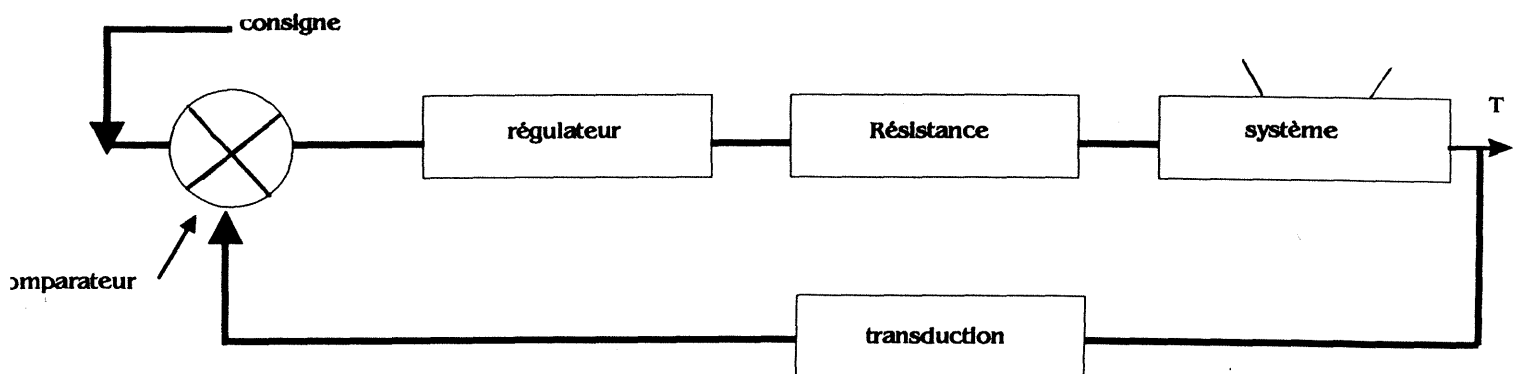
Ce four multifonction nous permet d'utiliser en commun différents types d'énergie de façon à faire apparaître des interactions entre divers moyens de chauffe, des synergies ou des inhibitions qui pourraient être exploitées en objectif final.

4.2.réglages effectués

Ci dessous sont représentés les boucles de régulation des différents paramètres étudiés:

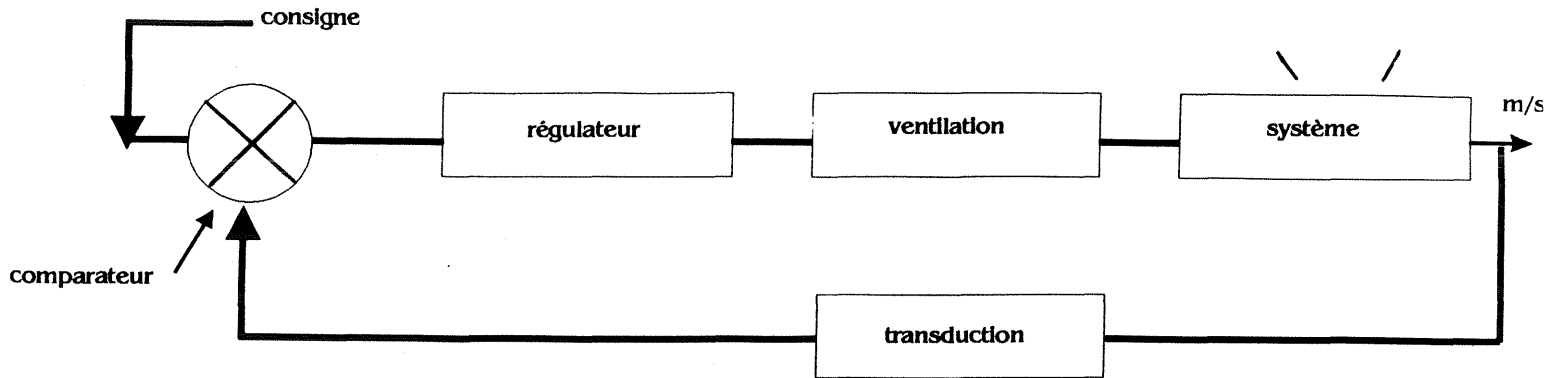
4.2.1.la température

La température est un paramètre important au niveau du séchage car il favorise l'extraction de l'air.

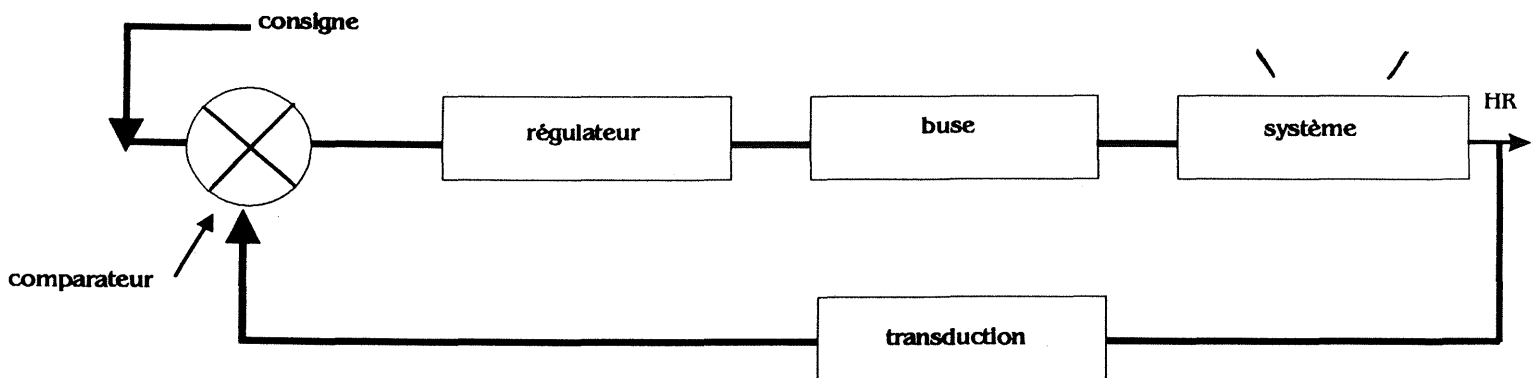


4.2.2. Ventilation

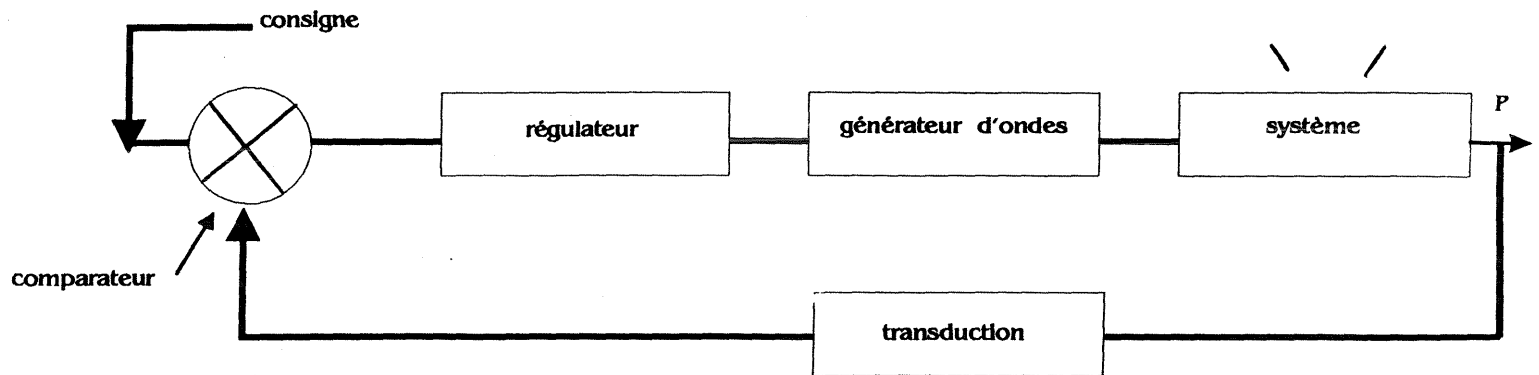
La ventilation autorise l'échange par évaporation.



4.2.3. L'absence d'humidité relative ambiante permet la migration de l'eau de l'intérieur des produits vers l'extérieur.



4.2.4. Contrairement au chauffage classique la puissance micro-onde va chauffer l'eau dans la masse de produit ce qui crée des îlots de surpression. sous l'effet de ces légères surpression les molécules d'eau vont migrer du coeur vers l'extérieur.

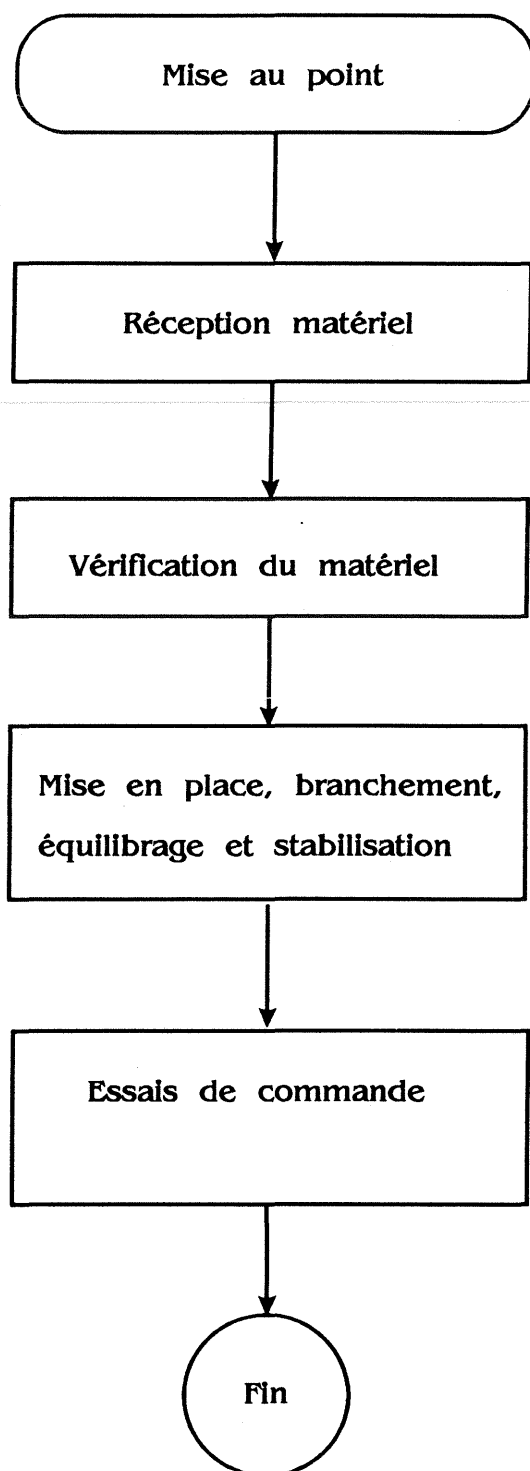


Suite à ces essais de réglage il s'est avéré que les paramètres étudiés ne pouvait être réglé suite à des pannes diverses.

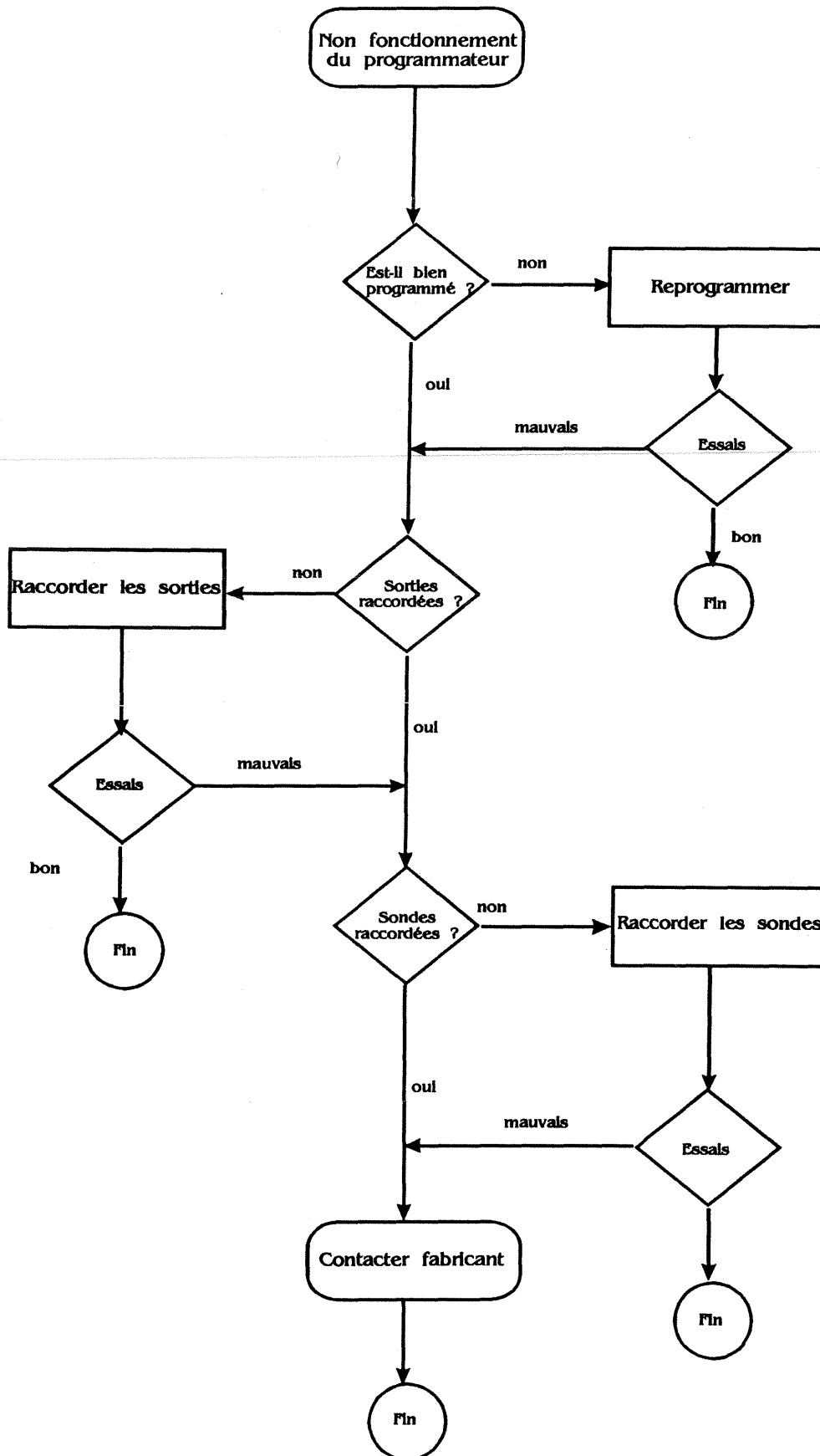
Ci-après se trouve les diagnostics de la plupart des pannes rencontrées.

4.2.5. Diagnostics de pannes

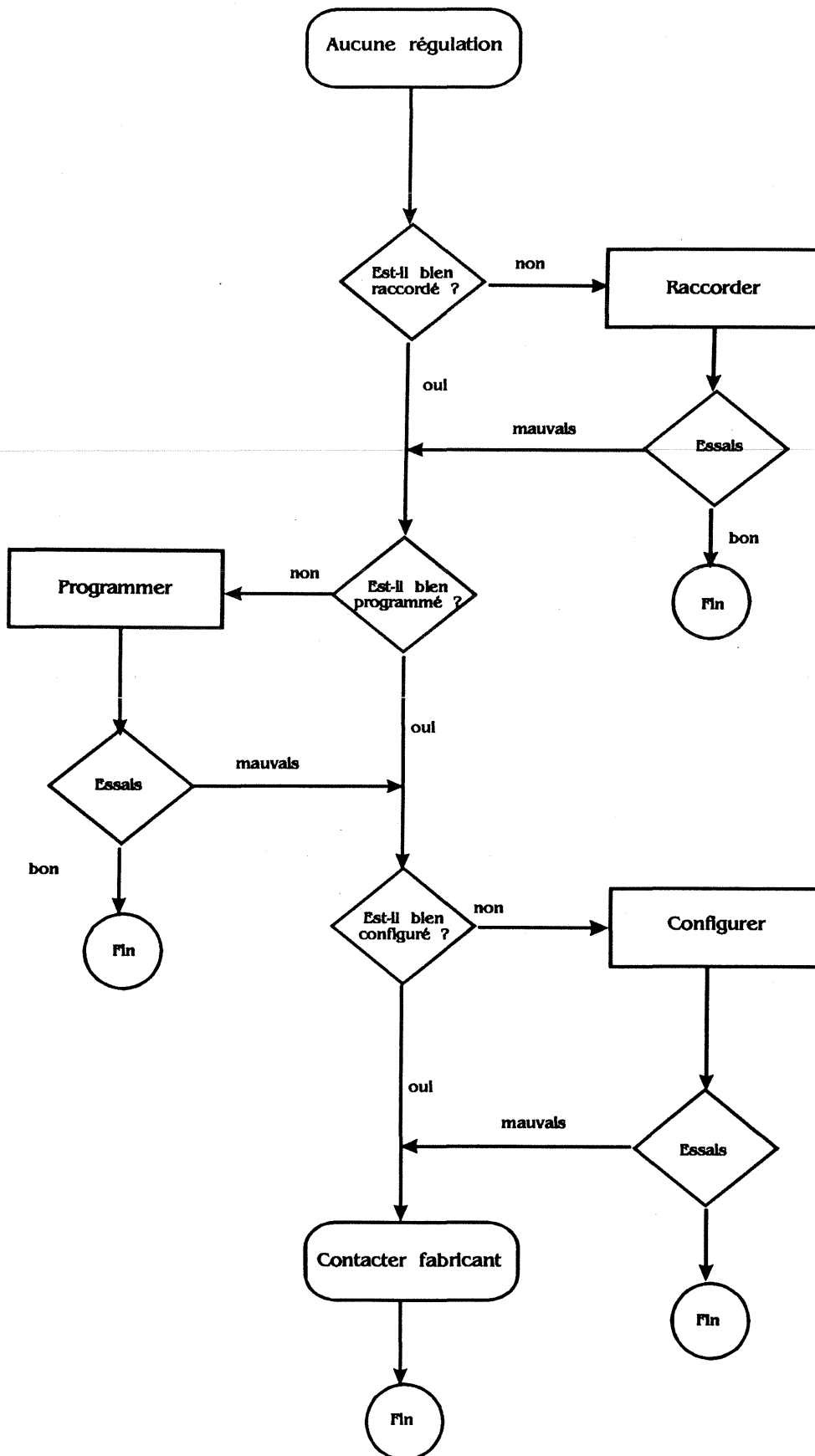
RECEPTION ET INSTALLATION DU MATERIEL PILOTE MICRO-ONDES



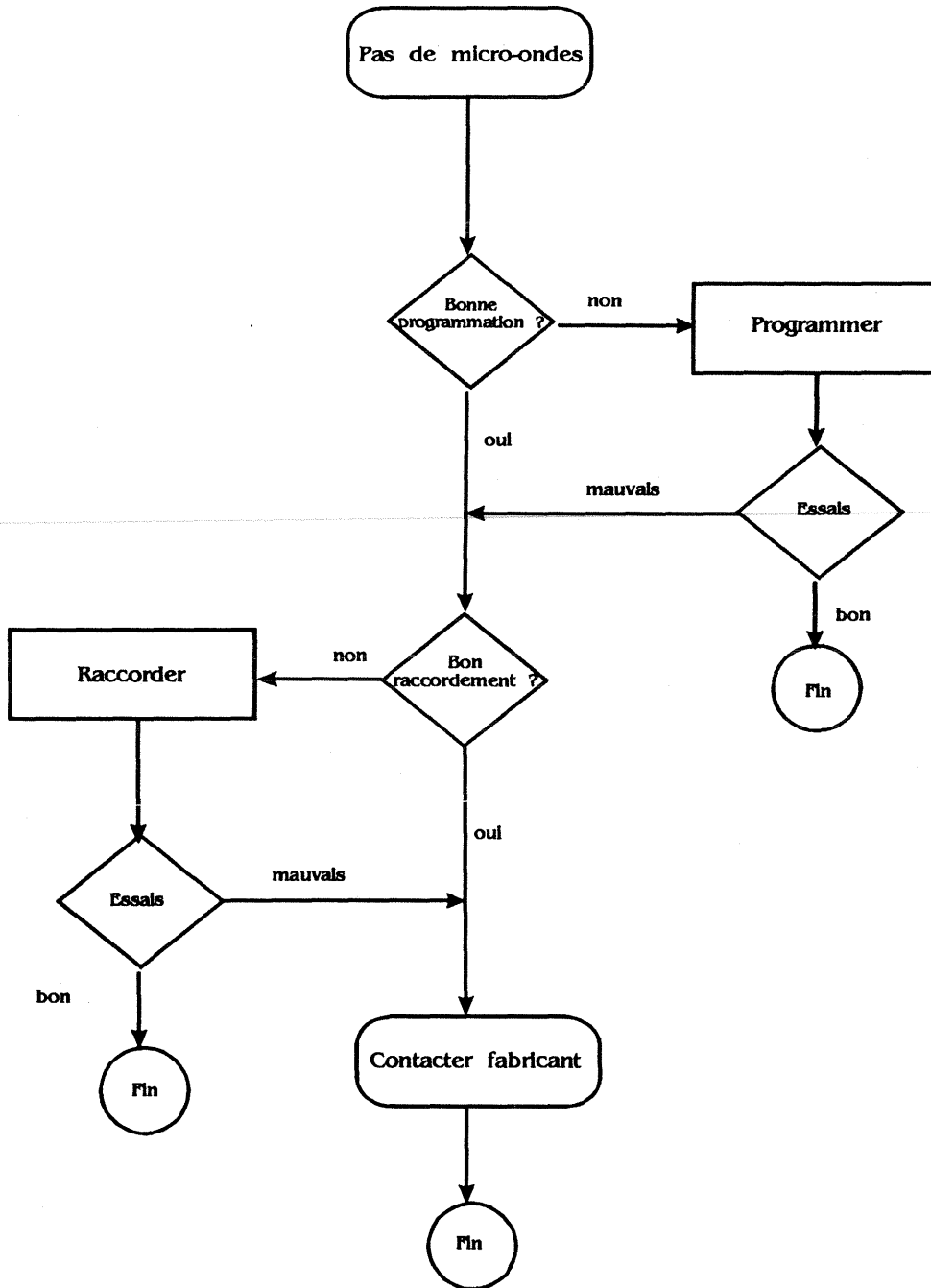
I - MISE EN ROUTE DU PROGRAMMATEUR



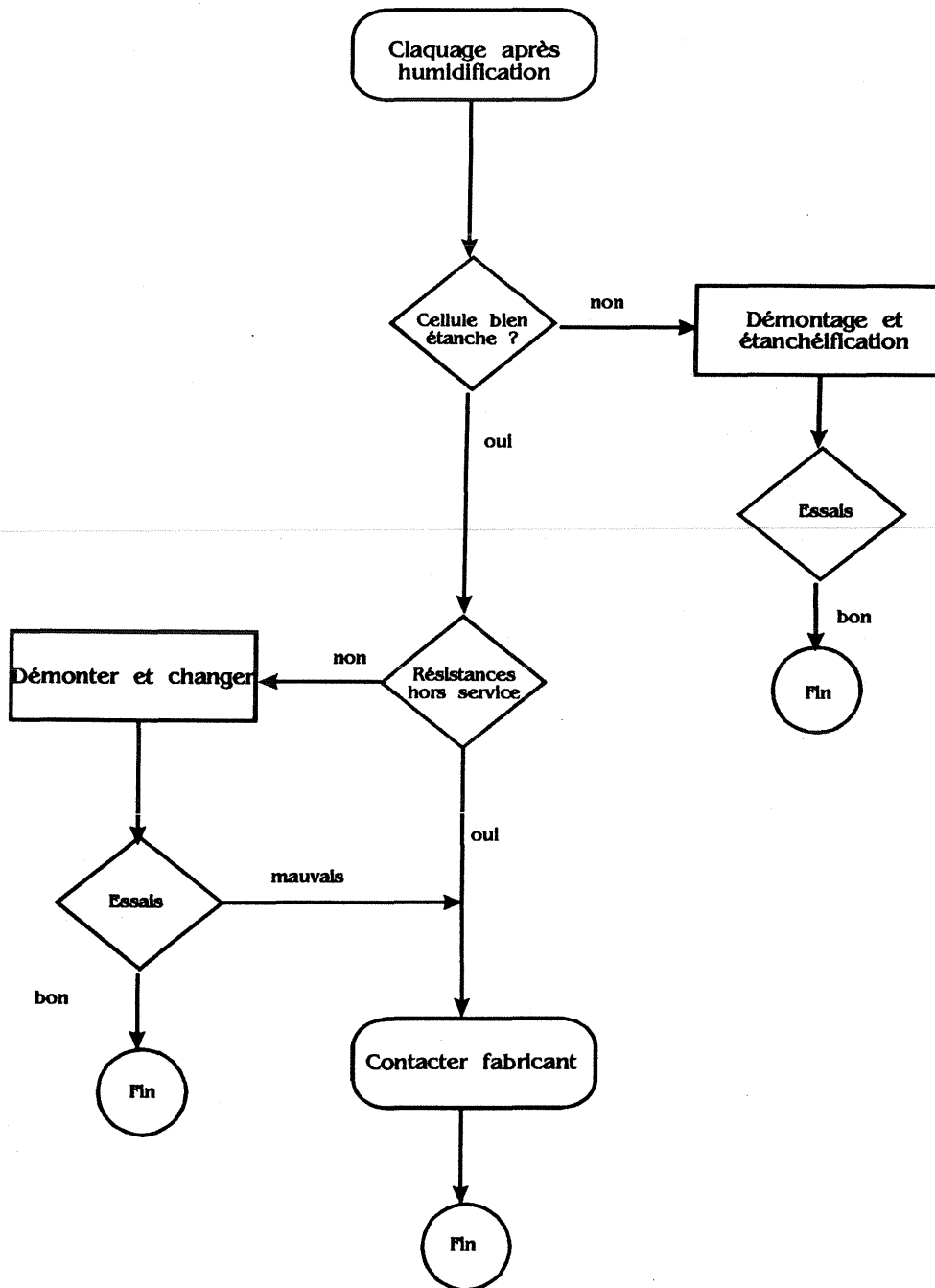
II - MISE AU POINT DE LA REGULATION



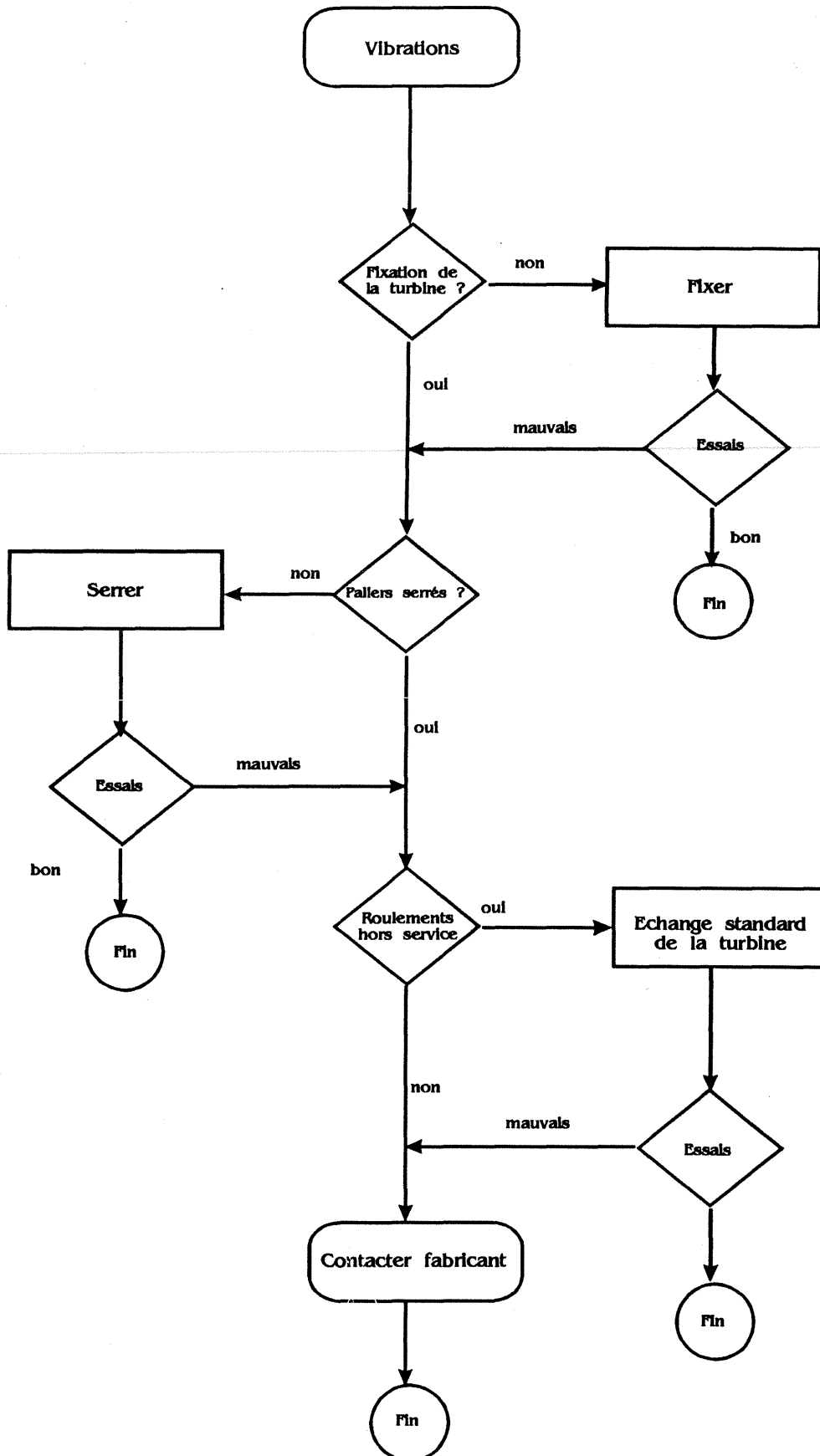
III - DECLENCHEMENT MICRO-ONDES



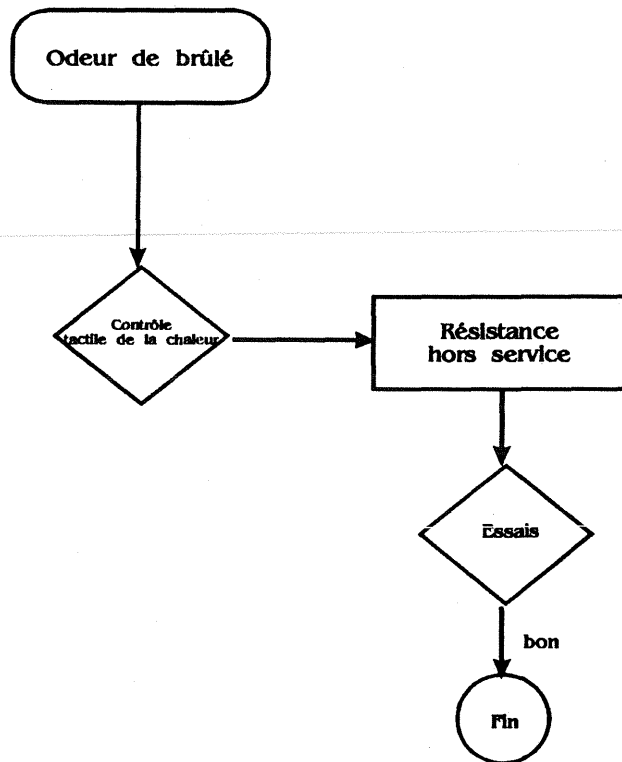
IV - CLAQUAGE DES RESISTANCES



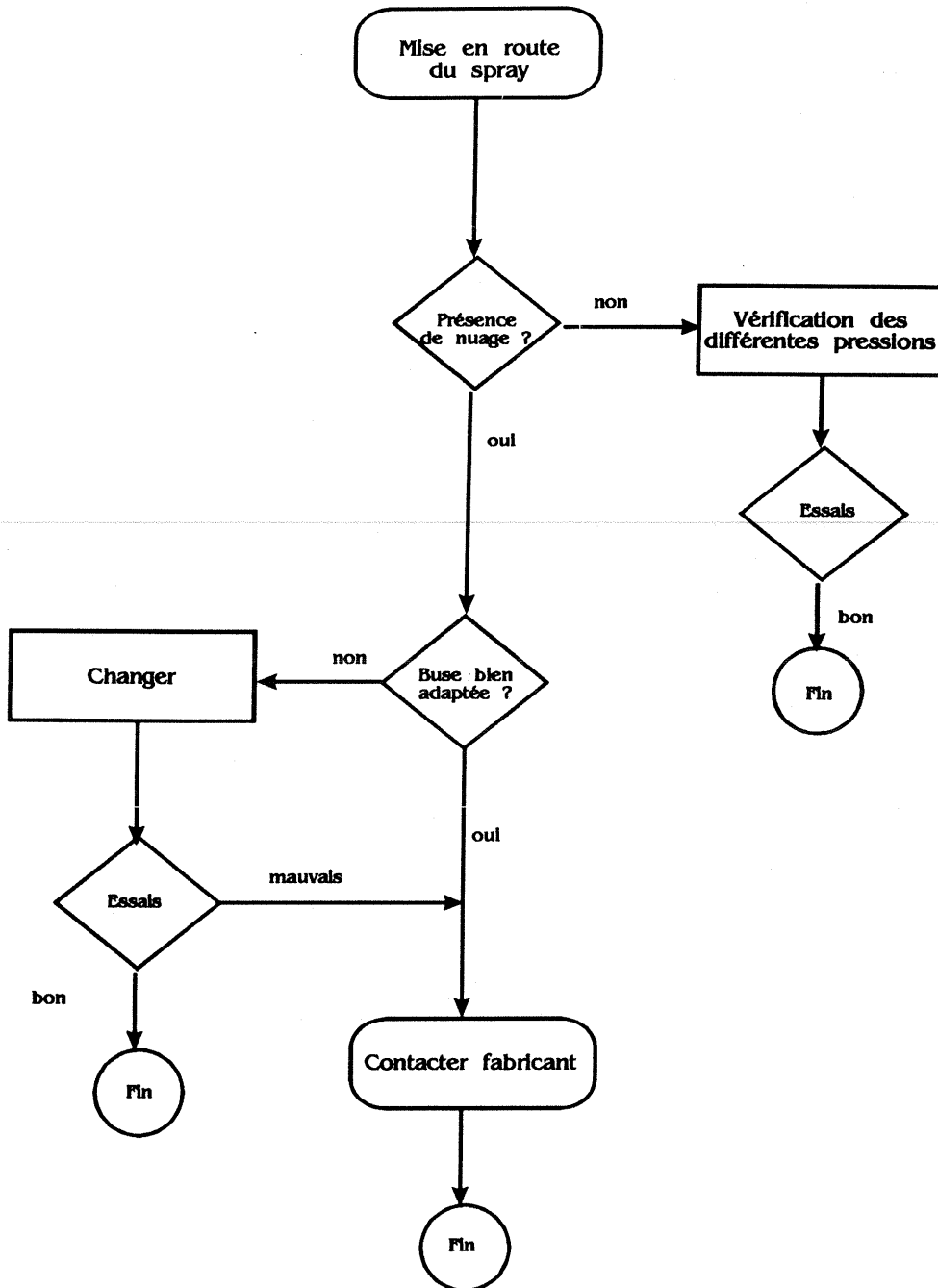
V - VIBRATIONS AU NIVEAU DE LA TURBINE



VI - RESISTANCE HORS SERVICE



VII - BUSE d'ASPIRATION DEFECTUEUSE



4.3.LES ALGUES

4.3.1.INTRODUCTION

Les algues marines ont été de tout temps exploitées en zone littorale, et ceci quelle que soit la zone géographique.

Aujourd'hui encore, ces algues sont utilisées aussi bien en alimentation humaine (Japon, Corée, Chine...) qu'en industrie (France, U.S.A, Norvège, ...) ou en agriculture.

Si l'utilisation de ces algues dans les glaces, entremets, cosmétiques, ou en épandage sur les cultures est connue, il en va différemment des utilisations industrielles qui représentent pourtant les secteurs en voie de développement.

4.3.2.CES ALGUES OU'ELLES SONT-ELLES

Ce sont des végétaux : qui pratiquent, comme les plantes terrestres, l'assimilation chlorophyllienne par photosynthèse, avec cette différence que l'algue ne tire pas sa substance nutritive du substrat sur laquelle elle est fixée (il ne lui sert que de support), mais directement de l'eau. Ceci requiert une certaine quantité d'énergie lumineuse, ce qui explique qu'en fonction de la transparence de l'eau, les radiations lumineuses ne parviennent plus en quantité suffisante, la vie végétale devient impossible à une certaine profondeur de l'ordre de 50 mètres. Ce facteur, mais également le rythme émergence-immersion (marée), la salinité.. sont responsables d'un étagement précis des algues (tabl.1).

4.3.3.DIVERSITE DES ALGUES

4.3.3.1.Les algues brunes

Elles sont récoltées uniquement sur les côtes bretonnes, à l'exclusion de tout autre région française et sont très recherchées par les industriels comme matière première d'où sont extraits les alginates (E401, E402, E403, E404). Les emplois de ces produits sont très nombreux et variés(voir fig.2).

Cinq algues brunes sont actuellement récoltées :

- deux laminaires -*laminaria digitata*
 -*laminaria hyperboréa*
- un fucus : le *Fucus serratus*
- l'*Ascophyllum nodosum*
- l'*Undaria pinnatifida*

On trouve l'*Ascophyllum* et le *Fucus* dans la zone intertidale (zone comprise entre les limites extérieures de balancement des marées), tandis que les Laminaires, qui vivent au-dessous du niveau des plus basses mers, constituent un goémon de fond, quant à l'*undaria pinnatifida* elle se cultive en pleine mer.

4.3.3.2. Les algues rouges

Elles sont demandées par les industriels comme matière première d'où sont extraits des produits tels que l'agar-agar (E406) et les carraghénanes (E407).

Les algues destinées à la production d'agar-agar sont récoltées sur le littoral méridional du Golf de Gascogne et sont constituées par des Gelidium et Gracilaria.

L'algue de base pour les carraghénanes est *Chondrus crispus*, encore appelée lichen ou "pioka" en Bretagne. Le ramassage se fait sur le littoral du Cotentin à la Vendée, mais principalement dans le Finistère-Nord.

Les peuplements d'algues rouges sont diffus, même en Bretagne.

4.3.3.3. Les algues vertes

Elles ont pour le moment un intérêt économique très limité. Leur exploitation est essentiellement liée à la lutte "anti-pollution". Celle-ci se développe en raison de la prolifération de l'*Ulva* ou "laitue de mer" sur les côtes bretonnes. Les recherches dans ce domaine sont récentes.

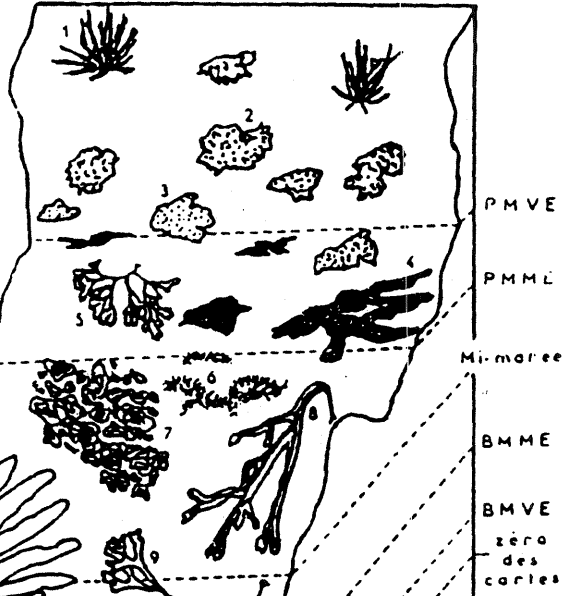
4.4.UTILISATIONS

L'homme de tout temps a utilisé l'algue à des fins agricoles, thérapeutiques, ou alimentaires. Elle est restée encore aujourd'hui une matière première traditionnelle en Asie. Par contre, son usage a considérablement diminué en Occident.

En Bretagne, cependant, elle a su garder une place privilégiée, ceci s'appliquant à la vocation agricole de la région où l'emploi du goémon, un engrais, fut le débouché premier. La Bretagne possède il est vrai, un champ d'algues qualifié le plus important du monde, 800 espèces y sont répertoriées. 90 % des champs d'algues français se situent en Bretagne et 100 % des algues brunes y sont récoltées.

MODE BATTU

- 1 Ramalina sp
- 2 Xanthoria parietina
- 3 Caloplaca marina
- 4 Verrucaria mauro
- 5 Pelvetia canaliculata
- 6 Chondrus crispus
- 7 Rhodymenia palmata



- 8 Ascophyllum nodosum
- 9 Fucus vesiculosus
- 10 Fucus serratus
- 11 Fucus serratus
- 12 Gigartina stellata
- 13 Himanthalia elongata
- 14 Alaria esculenta
- 15 Sacchoriza polyschides
- 16 Laminaria hyperborea
- 17 Rhodymenia pseudopalmata

MODE ABRITE

- 1 Ramalina sp
- 2 Xanthoria parietina
- 3 Caloplaca marina
- 4 Verrucaria mauro
- 5 Lichina confinis
- 6 Pelvetia canaliculata
- 7 Fucus spiralis
- 8 Ascophyllum nodosum
- 9 Fucus vesiculosus
- 10 Fucus serratus



- 11 Laminaria saccharina
- 12 Chondrus crispus
- 13 Bifurcaria rotunda
- 14 Laminaria digitata

4.5.RECOLTE

4.5.1.Traditionnelle

Elle concerne les algues de rives, récoltées à marée basse : *Fucus*, *Ascophyllum* (algues brunes) ; *Chondrus*, *Gigartina*, *Gracilaria* (algues rouges). Elles sont coupées à la faucille, puis séchées, avant d'être livrées aux usines de transformation. Mais cette récolte a considérablement décliné ces dernières décennies, ceci s'expliquant par le vieillissement des récoltants et la faible rémunération au regard du travail fourni, ainsi que par l'abandon pur et simple des récoltes d'algues brunes effectuées par les agriculteurs.

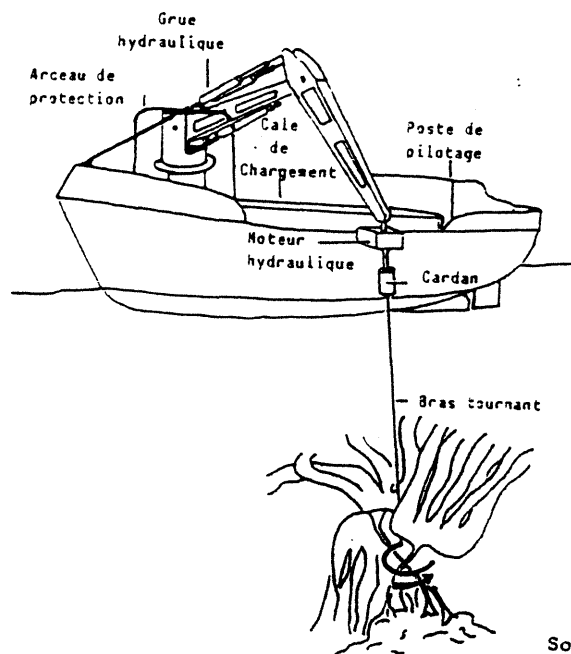
(Nota : ce type de récolte concernait 417 personnes en 1976 contre 2197 en 1954)

4.5.2.Mécanisée

Elle est utilisée depuis 1970 par les goémoniers professionnels qui récoltent les algues de type laminaire (*laminaria digitata*), ceci en pleine eau, à l'aide de bateaux équipés de grue hydrauliques (scoubidou).

Le scoubidou, qui a remplacé la technique traditionnelle "Pigouille" ou guillaoutine (faucille fixée au bout d'un long manche), existe depuis 1970 et a considérablement facilité le travail des goémoniers. Avec la pigouille, on hissait les algues à la force des bras. Cette méthode, relativement éprouvante, permettait de récolter l'équivalent d'une tonne par jour.

Aujourd'hui le scoubidou extrait quotidiennement de 10 à 11 tonnes de laminaires, et ceci avec bien moindres difficultés. La profession s'est adaptée rapidement à ce nouveau procédé. En 1983, il est complètement généralisé, induisant de ce fait une forte diminution des effectifs (hommes et bateaux).



Source :
ISTPM

SCHEMA D'UN BATEAU GOEMONIER MECANISE

4.6.LES ALGUES DANS L'ALIMENTATION HUMAINE

Intégrer l'algue à notre nourriture de tous les jours ; l'idée chez nous fait encore sourire :

"Les algues d'accord, mais juste pour agrémenter la présentation des fruits de mer ".

Pourtant, les végétaux marins sont extrêmement riches en oligo-éléments, vitamines, etc... comme en témoigne le tableau ci dessous :

TABLEAU1

VALEUR REMARQUABLE POUR 100 GR/ms	protéi nes	mat.gr asse g	glucides		calciu m	Phos- phore	fer	sodiu m	VII.A	VII. B1	VII. B2	VII C
	g	g	total g	fibres g	mg	mg	mg	mg	UI	mg	mg	mg
ULVA	112.7	22.8			11400	0200	031	02500	01484 0	00.2	--	079
KOMBU	77.3	11.1	554.9	33	8800	0150	--	22500	0430	00.08	00.32	011
NORI	335.6	00.7	044.3	04.7	0260	0510	012	0600	01000 0	00.25	01.24	020
WAKAME (JAPON)	112.7	11.5	051.4	03.6	01300	0260	013	02500	0140	00.11	00.14	115

Source : "le livre de la macrobiotique" de MICHIO KUSHI, p178

TABLEAU.2
APPLICATION ALIMENTAIRE

GELIFIANT	Gels à l'eau fruités ou aux fruits ; jellies, confiseries gélifiées : cerises artificielles, nappage fruité ou au fruit de diverses pâtisseries, enrobage des viandes ou poissons, dessert laitier en poudre, desserts laitiers frais ou pasteurisés.
EPAISSISSANT OU RETENITEUR D'EAU	liant en charcuterie : pâté, saucisses... rétenteur d'humidité dans divers produits de boulangerie et de pâtisserie (pain, madeleine, cake, etc...), épaississants de divers sauces et condiments : tomato ketchup,... etc
STABILISATEUR	Stabilisateur d'émulsion type huile dans l'eau, crème, glacées et glace à l'eau : évite la formation de cristaux de glace, stabilisation des crèmes fouettées et à fouetter : "topping" dessert aérés, fromages à tartiner, yaourts, stabilisation de lait cacaotés et diverses autre boissons
FLOCULANT	clarifiant des vinaigres

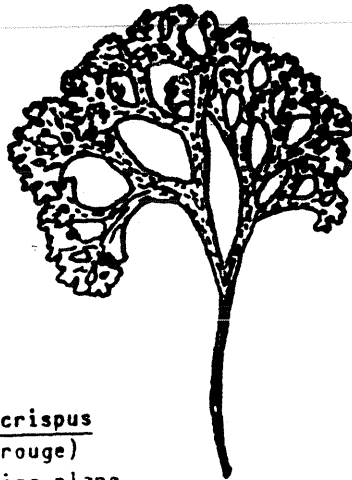
TABLEAU.3
APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET TECHNIQUES

TEXTILES	encollage des filets épaississement des pâtes d'impression : spécialement avec colorants, réactifs, acides et rapidogènes.
PAPIERS	traitement de surface : propriétés filmogènes remarquables.
ELECTRODES	liant de haute qualité pour l'enrobage des baguettes de soudure.
LATEX	crémage de latex : permet de faciliter sa concentration, épaississement du latex.
PEINTURES	stabilisateur de l'émulsion, agent de suspension des colorants, liant pour mélange de peinture, l'alginate facilite également l'application.
PAPIERS PEINTS	plastifiant, épaississant et stabilisant des gommes, émulsifiant des huiles, l'alginate facilite la suspension des colorants, et sert d'émulsionnant pour les résines de vinyle.
PLATRES	retardateur, plastifiant pour plâtres destinés aux moulages, épaississant pour enduits et joints.
CUIRS	collage des peaux, apprêtage des surfaces avant coloration à la résine, suspension et fixation des colorants, agent émulsifiant.
MINES DE CRAYONS	agglomérant et agent de liaison pour mines de crayons.
CERAMIQUES	agent de suspension et liant pour barbotines et émaux.
COLLES ET RESINES	liants, épaississant, plastifiant, agent de dispersion et de stabilisation.
INSECTICIDES	agent de suspension, de dispersion et de fixation des substances actives.
PRODUITS HORTICOLES	rétenant d'eau pour le repiquage des jeunes plants.
TRAITEMENT DES EAUX	agent floculant utilisable seul ou combiné avec d'autres composés comme le sulfate d'alumine. agent permettant la clarification et la décantation des eaux potables.

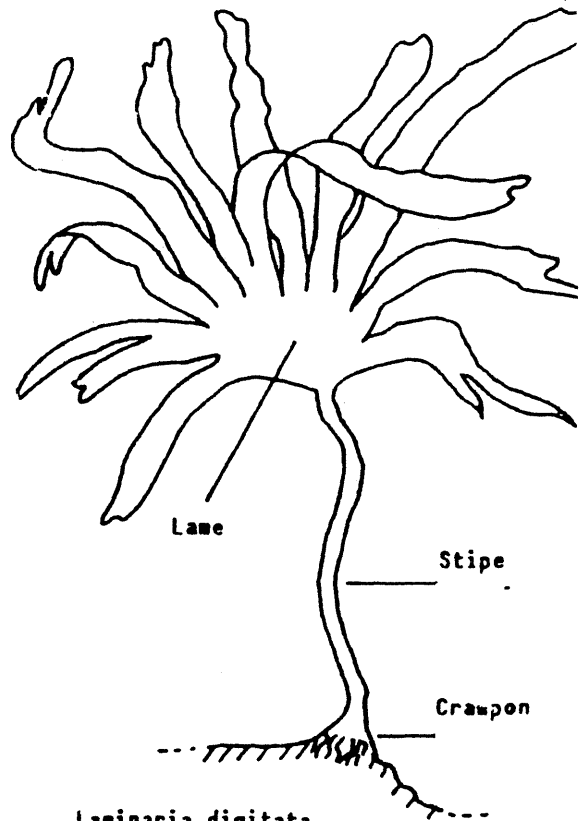
DIVERSITE DES ALGUES



Ulva sp.
(algue verte)
Fronde mince, vert clair



Chondrus crispus
(algue rouge)
base du stipe plane



Laminaria digitata
(algue brune)

4.7.UNDARIA PINNATIFIDA

4.7.1.INTRODUCTION

Undaria pinnatifida est une phéophycée (algue brune) utilisée depuis des millénaires en alimentation humaine dans les pays asiatiques. Commercialisées sous les noms : "Suboshi wakame", "Wakame" et "Haiboshi wakame", selon le mode de préparation (respectivement séchées, salées et cendrées), sa consommation atteint au Japon 170 000 t par an (PEREZ, 1981).

Cette espèce est exogène des eaux bretonnes. Introduite accidentellement en 1971 dans le Midi de la France, elle est actuellement cultivée avec succès depuis trois ans à Ouessant. L'étape suivante consiste à promouvoir cette algue et donc réussir à développer son utilisation en alimentation humaine. Il s'agit en effet du principal créneau de valorisation en raison notamment de l'augmentation de la population asiatique en France. Il pourrait exister également des possibilités d'exportation vers les pays asiatiques demandeurs.

En France, les algues sont considérées comme aliment "non traditionnels" et, de ce fait, interdites en vertu du principe des listes positives (tout ce qui n'est pas expressément autorisé est interdit).

De ce fait, il a donc été nécessaire de procéder à l'analyse de l'algue en vue d'obtenir l'autorisation de son utilisation en alimentation humaine

4.7.2.COMPOSITION

La composition globale d'*Undaria pinnatifida* est présentée dans le tableau.1. Elle fait principalement apparaître une richesse en protéines et en éléments minéraux ainsi qu'une pauvreté en lipides.

TABLEAU.1
Composition chimique d'*Undaria pinnatifida*
(en % de matière sèche)

Protéines	19-21
Composés azotés non protéiques	3-4
Polysaccharides	
alginates	35-40
fucanes	2-3
cellulose	2.5-3
Lipides	1-3
Sucres libres	4-5
Cendres	25-30

4.7.3. PROTEINES ET ACIDES AMINES

Le taux de protéines dans *Undaria pinnatifida* est de 20 % par rapport au poids sec. Ce pourcentage fait partie des taux les plus élevés cités dans la littérature : 10 à 15 % (CHAPMAN et CHAPMAN, 1980), 15 % (PEREZ, 1981), 18 % (PYEN et al., 1977), 22.1 % (KIM et KIM, 1983). On peut estimer que ce sont les conditions du biotope breton qui sont responsables de cet important pourcentage de protéines.

Cet élément représente un facteur très important de valorisation. En effet, les Phéophycées (algues brunes) sont considérées (ROBINSON et TOERINE, 1982) comme peu intéressantes du point de vue alimentaire en raison de leur faible taux de protéines, celui des Rhodophycées (algues rouges) étant nettement supérieur. Avec un taux protéique de 20 %, *Undaria pinnatifida* est l'une des algues les plus riches.

Les besoins journaliers en protéines (33 g pour un adulte de 70 kg) (HARPER, 1977) seraient ainsi couverts par un peu plus de 150 g (poids sec) d'algues.

Les principaux acides aminés sont l'acide glutamique, l'acide aspartique, la leucine et l'alanine, tous les acides aminés indispensables étant présents (tabl.2). De plus, l'équilibre entre ces différents acides aminés est très proche de ceux établis par la "Food and Agriculture Organization" (FAO) et par la "National Academy of Sciences" (NAS) (tabl.3) (HARPER, 1977).

TABLEAU.2
Composition en acide aminés d'*Undaria pinnatifida*
(en g pour 100 g de poids sec)

(Acides aminés essentiels*)	Acides aminés libres	Acides aminés totaux
Phosphosérine	-	0.130
Phosphoéthanolamine	0.024	-
Taurine	-	0.124
Acide aspartique	0.235	1.587
Thréonine*	0.044	0.835
Sérine	0.140	0.784
Acide glutamique	0.276	2.075
Glycine	0.027	0.942
Alanine	0.702	1.267
Cystéine	-	0.396
Valine*	traces	0.950
Méthionine*	-	0.565
Isoleucine*	0.030	0.726
Leucine*	0.038	1.330
Tyrosine	0.043	0.619
Phénylalanine	0.066	0.904
Lysine*	0.032	0.585
Histidine*	0.009	0.983
Arginine	0.064	0.948
Proline	0.120	0.987
Tryptophane*	-	0.251
NH ₃	0.033	0.323
TOTAL	1.884	17.311

TABLEAU.3
Quantités d'acides aminés essentiels
(mg par g de protéines)

	Modèles types		<i>Undaria pinnatifida</i>
	NAS/NRC (1)	FAO/WHO (2)	
HIS	17	-	56
ILE	42	40	42
LEU	70	70	77
LYS	51	55	34
MET +CYS	26	35	56
PHE +TYR	73	60	88
THR	35	40	48
TRP	11	10	14
VAL	48	50	55

(1) National Academy of Sciences – National Research Council

(2) Food and Agriculture Organization – World Health Organization

Par ailleurs, ces résultats sont très voisins de ceux cités par PYEN *et al.* (1977) et KIM *et KIM* (1983).

4.7.4. MINÉRAUX

Undaria pinnatifida est riche en minéraux (tabl.5). Les principaux sont : Cl, K, Na et surtout Ca. La présence de calcium peut représenter un très bon complément calcique dans le cas de régime très souvent déficitaire en raison d'une trop faible consommation de produits laitiers.

4.7.5. MÉTAUX LOURDS

Les trois métaux : Hg, Pb, et Cd font partie des métaux les plus toxiques pour l'homme. Les quantités décelées (tabl.4) sont très inférieures aux taux maximaux admis par la législation.

TABLEAU.4
Composition en minéraux et en métaux lourds

	Teneur par kg de matière sèche
Ca	11.9 g
K	55.2 g
Na	27.4 g
P	5.8 g
Cl	66.0 g
I	245.0 mg
Fe	103.0 mg
Cu	3.5 mg
Zn	24.0 mg
Hg	0.22 mg
Pb	0.41 mg
Cd	0.42 mg

4.7.6. VITAMINES

Les résultats des dosages de vitamines sont présentés dans le tableau.5. Sur la base des besoins quotidiens d'un individu adulte (70 kg) et d'une consommation théorique de 150 g d'algues par jour, le bilan vitaminique est bon pour les vitamines : A, K₁, B₁, B₂, B₁₂, H, PP et pour l'acide folique.

TABLEAU.5
Composition en vitamines d'*Undaria pinnatifida*
par rapport aux besoins quotidiens

	Teneur en $\mu\text{g/g}$ de matière sèche	besoins quotidiens d'un homme adulte*
Vitamines liposolubles		
A :Rétinol	12.5	1000 μg
D :Calciférol	Traces	10 μg
E :Tocophérol Eg	2.3	15 μg
Tocophérol Ea	12.0	
K ₁ :Phylloquinone	8.0	**
Vitamines hydrosolubles		
B ₁ :Thiamine	8.8	1.5 mg
B ₂ :Riboflavine	12.0	1.8 mg
B ₅ :Acide pantothénique	1.6	10 mg
B ₆ :Pyridoxine	2.7	2.2 mg
B ₁₂ :Cyanocobalanine	3.6.10 ⁻³	3 μg
Acide folique	5.5	400 μg
H :Biotine	0.16	200 μg
P.P. :Niacine	94.6	18 mg
C :Acide ascorbique	120	80 mg

* DUPIN *et al.*, 1981

** Apport non estimés : il n'existe pas de carence d'apport chez les individus bien portants.

Les besoins journaliers d'un adulte (70kg) seraient ainsi couverts en grande partie par une portion de 100 g d'algues. Une telle ration est déficitaire pour Cu et Zn, par contre la quantité d'iode ingérée est très supérieure aux besoins. Cependant ces quantités très importantes d'iode ne devraient pas engendrer des risques d'hyperthyroïdie à la condition que cette algue soit considérée comme un aliment occasionnel.

4.7.7.CELLULOSE

La teneur en cellulose est de 27.3 g/kg d'algues séchées. L'*Undaria pinnatifida* est relativement pauvre en cellulose et devrait donc, de ce fait, présenter une bonne digestibilité.

4.7.8.RADIOACTIVITE

Pour tous les radio-éléments, les activités décelées restent inférieures aux seuils tolérés par la législation.

Le bilan au niveau des contaminants ne semble donc pas constituer un handicap à l'utilisation alimentaire d'*Undaria pinnatifida*.

Un troisième point a été mis en évidence grâce à cette étude, il concerne la valorisation non alimentaire d'*Undaria pinnatifida*. En effet, certaines analyses ont montré qu'il existait des possibilités d'extraction de molécules à intérêt pharmacologique

- vitamine K₁ (phylloquinone) ;
- fucanes (polysaccharides sulfatés hétérogènes dont l'ose neutre dominant est le fucose).

D'une part, l'analyse des vitamines a permis de mettre en évidence la présence en quantité importante de vitamine K₁. La dose détectée dans *Undaria pinnatifida* est de 8 µg/g de matière sèche. Cela place cette algue parmi les végétaux les plus riches en vitamine K₁ qui entre dans le mécanisme de la coagulation du sang ; il semble donc possible d'en envisager l'extraction. Des travaux sont menés actuellement afin de confirmer ces données.

D'autre part, des études ont montré que les fucanes avaient des propriétés pharmacologiques. Ainsi MORI et KAMEI (1982) ont montré que les polysaccharides sulfatés d'*Undaria pinnatifida* présentaient une activité anticoagulante de type héparinique, une activité antithrombine ainsi qu'une activité au niveau des lipoprotéines du sang.

Ces trois facteurs sont fondamentaux dans le développement des maladies cardio-vasculaires, en particulier l'athérosclérose.

Une première étude a été réalisée afin de déterminer la composition en oses neutres des fucanes (tabl.6). Des travaux à venir auront pour but d'affiner la connaissance de cette structure (fractionnement, quantification des sulfates) afin de pouvoir ensuite établir une relation avec leurs propriétés *in vivo*.

TABLEAU.6
Composition en oses des fucanes
(en % des sucres totaux)

Ribose	0.22
Fucose	42.75
Arabinose	2.43
Xylose	4.89
Mannose	23.63
Galactose	18.17
Glucose	7.86

4.7.9.CONCLUSION

L'analyse biochimique d'*Undaria pinnatifida* effectuée a permis de dégager certains éléments positifs :

- équilibre intéressant entre les différents nutriments ;
- absence de toxicité (métaux lourds et radioactivité) ;
- possibilité d'extraction de molécules à intérêt pharmacologique (vitamine K₁ et polysaccharides sulfatés).

Par ailleurs, il est possible d'envisager un développement d'*Undaria pinnatifida* à l'exportation. Jusqu'à présent cette algue a été cultivée au stade expérimental. Depuis 1987, on développé sa culture en phase industrielle. La production serait alors d'environ 25 t de produits commercialisables (15 % environ d'humidité résiduelle).

L'avenir d'*Undaria pinnatifida* semble se présenter favorablement, compte tenu des résultats analytiques présentés, d'un système performant de culture, ainsi que d'une étude économique qui montre que le prix de revient de l'algue française est inférieur d'environ 25 % au produit importé, et ceci malgré les problèmes soulevés par le caractère exogène d'*Undaria pinnatifida*.

PALMARIA PALMATA

1. BIOLOGIE

Palmaria palmata est une algue rouge divisée dichotomiquement en lanières vers son extrémité. Sa taille peut dépasser 50 centimètres dans les zones favorables de croissance. Cette espèce est localement abondante sur substrat rocheux à la base de la zone de balancement des marées.

On la trouve dans la zone infralittorale, souvent en épiphyte* du stipe de *Laminaria hyperboréa*.

Une cinquantaine de tonnes de *Palmaria* est récoltée chaque année en France. Du point de vue législatif, cette algue appartient à la catégorie "Algue de rive", dont la récolte est autorisée toute l'année; cependant, la qualité de la matière première est inférieure en août et septembre, et sa biomasse est faible en hiver.

Les quantités facilement exploitables par récolte sont difficiles à estimer: elles approchent certainement plusieurs milliers de tonnes par an en frais.

Palmaria est riche en provitamine A les vitamines hydrosolubles (C, groupe B) sont également abondantes. Elles contiennent notamment de la vitamine B 12, qui n'existe pas chez les végétaux supérieurs.

Palmaria contient aussi des polysaccharides en partie digestibles : amidon floridéen, floridoside, xylanes*.

2. UTILISATIONS

La consommation humaine de *Palmaria Palmata*, également appelé "Dulse" par les anglo-saxons, remonte au X^e siècle au moins en Islande. Cette espèce possède des atouts importants pour l'industrie agroalimentaire.

Sa lame de texture intermédiaire entre les algues fines (*Porphyra et Ulva*) et les algues épaisses (*Laminaria digitata, Laminaria saccharina, Himanthalia élongata*) peut être utilisée en salade ainsi que comme légume d'appoint. En outre, cette algue est principalement commercialisée sous deux formes : déshydratée (entière, en flocons, ou en paillettes), ou salée. Ces produits peuvent être directement utilisés comme légumes de mer , ou par des entreprises du secteur agroalimentaire qui les utiliseront en tant qu'ingrédients dans des préparations plus élaborées (salades traiteur, terrines, assaisonnement de charcuterie, pâtisserie,...).

3.COMPOSITION CHIMIQUE

-MATIERE SECHE :

11.9 – 21.8 g /100 g de poids frais.

-MATIERE MINERALE:

11.7 – 32.5 g /100 g de matière sèche.

-PROTEINES :

8.1 –35.6 g /100 g de matière sèche.

-GLUCIDES :

38 –74 g /100 g de matière sèche.

-LIPIDES :

0.2 –3.8 g /100 g de matière sèche.

TABLEAU 1

Composition en glucides (en g/100g de mat.sèche)

Pentoses	29-46
Floridosides	1,9-25
Cellulose	1,5-3,5

TABLEAU 2
Macroéléments (en g/100g de ms)

Ca	0,11-1,75
Cl	5,3-9,7
K	2,42-12,2
Mg	0,39-0,83
Na	0,19-3
P	0,3-0,567
S	0,23-1,423
Si	1,00

TABLEAU 3
Composition en oligo-éléments (en mg/kg)

I	80-1200
Fe	102-1500
Al	175
Zn	11,5-200
Mn	11-110
Cu	3-48
Sr	18,8-90
Ni	2,4-8
Ti	100
Cr	34
Co	0,13-3,85
Hg	0,1-0,6
Pb	28
Cd	0,1-0,4
As tot	5,96-13
Sb	0,05
Se	0,17
Sn	0,05-5

TABLEAU 4
Composition en acides aminés (en g/100g de protéines)

Ala	5,6-7,6
Arg	4,1-5,22
Asp	6,99-9,99
Cys	2,76
Glu	5,32-9,7
Gly	4,43-5,43
His	0,5-1,59
Ile	2,7-4,25
Leu	2,9-6,29
Lys	4,1-7,2
Met	0,8-6,84
Phe	3,2-4,92
Pro	3,6-5,16
Ser	4,04-4,4
Thr	3,56-4,63
Trp	0,9-2,98
Tyr	non det...
Val	4,68-6,4

TABLEAU 5
composition en vitamines (en mg/kg de m.sèche)

A carot	15,96
E	22-139
B1	1,5-6,3
B2	5,0-5,3
B5	4,5
B6	0,14
B11	0,028-0,24
B12	0,09
Ac.Folique	1,3
Ac.Folinique	0,46
PP	16,9-83
H	0,07-0,18
C	170-520

4.4.METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCE

Afin d'optimiser le séchage par micro-ondes et quantifier l'effet de chaque facteur intervenant au cours du séchage, nous avons adopté une expérimentation bien planifiée ; la méthodologie des plans d'expérimentation.

4.4.1.MESURE EFFECTUEES SUR LES ALGUES SECHEES

4.5.1.Pigmentation.

Les chlorophylles A et B sont respectivement extraites en milieu acétonique et en solution aqueuse, en suivant les précautions d'usages déjà décrites (7), leur concentrations ont été calculées à l'aide des formules de MAC KINNEY, l'analyse quantitative est assurée en utilisant les coefficients d'absorption donnés par MAC KINNEY.

4.5.2.Colloïdes.

On détermine la viscosité en mesurant l'alginate de sodium obtenu après un broyage des algues et une addition de carbonate de sodium. Cette technique nous permet d'optimiser l'extraction.

4.5.3.Réhydratation.

C'est une méthode simple qui consiste à tremper pendant un temps déterminé (ici 20 min) une algue sèche. Connaissant son poids initial, on peut alors déterminer la quantité d'eau réabsorbée.

4.5.4.Mesure de l'indice d'iode.

Après une minéralisation de l'échantillon d'algue, on solubilise les matières minérales puis on les filtre. Après refroidissement à température ambiante on neutralise la réaction avec du rouge de méthyl (TS) accompagné d'acide phosphorique. Refroidir le mélange dans un bain de glace et ajouter du Brome (TS) jusqu'à ce qu'une coloration jaune permanente soit obtenue. Porter la solution à ébullition afin d'évaporer tout le Brome libre. Ajouter quelque mg d'acide salicylique et refroidir à 20°C, après quelques ml d'acide phosphorique et de iodure de potassium (TS) on titre immédiatement avec le thiosulfate de sodium en utilisant l'amidon comme indicateur.

5.RESULTATS

5.1.SECHAGE EN FOUR TRADITIONNNEL

5.1.1.Matériel:

four thirode puissance 9 kw
-polycuiseur 6,35 Four air pulsé
Four mixte
Air pulsé vapeur

8 kg d'algue fraîche non blanchie

(*Undaria pinnatifida* et *Palmaria palmata*)

Démarrage à 40°C porte ouverte afin d'éviter une cuisson vapeur due au manque de puissance d'extraction du four. Cette cuisson vapeur détruit la pigmentation brune et provoque un verdissement des algues pour palier ce problème il faudrait une augmentation de la puissance d'extraction. On maintient cette température environ 3h30 puis on l'augmente et on l'a passe à 60°C toujours porte ouverte afin d'éviter le verdissement.

Après 15h 30 l'algue est sèche, (dans l'industrie la moyenne est de 17h) ces valeurs correspondent à *Undaria pinnatifida* quant à *Palmaria palmata* son temps de séchage n'est que de 13h, dans les mêmes conditions

	poids humide kg	poids sec kg	humidité %
<i>Undaria pinnatifida</i>	8 kg	0,800 kg	90 %
<i>Palmaria palmata</i>	8 kg	0,626 kg	92 %

5.2.REHYDRATATION

	poids sec	poids réhydraté
<i>Undaria pinnatifida</i>	100 g	680 g
<i>Palmaria palmata</i>	100 g	380 g

5.3.TENEUR EN IODE

	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	
<i>PALMARIA.P</i>	0,70	0,47	0,51	0,59	0,55	g/kg
<i>UNDARIA.P</i>	1,78	1,21	1	1,52	2,16	g/kg

STIPE

	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	
<i>UNDARIA.P</i>	0,60	0,88	0,61	0,56	0,58	g/kg

5.4.VISCOSITE

(*Undaria pinnatifida*)

B4 V/tm	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	Moy Ech
6	21000	16000	11000	10000	19000	15400
12	15500	13000	7750	8250	14250	11750
30	9700	8800	5600	5600	9600	7860
60	5800	6200	4100	4000	6800	5380

5.2.SECHAGE FOUR MICRO ONDES

5.2.1.Viscosité

(*Palmaria palmata*)

référence*	5	3	7	10	11	16	n° échantillon
5	3	5	3.5	4	5.5	3	cps

*référence : séchage traditionnel

Ces valeurs sont faibles étant donné que cette algue est pauvre en alginate. Comparativement à la référence séché en four traditionnel les micro-ondes, sur cette algue, n'agissent pas sur les colloïdes.

5.2.2.La pigmentation

Chlorophylle A

E1	E2	E3	3	5	7	10	11	15	16
14.36	14.57	13.84	6.53	6.36	6.88	4.26	7.27	6.67	5.24

Chlorophylle B

E1	E2	E3	3	5	7	10	11	15	16
0.691	0.549	0.60	0.31	0.47	0.45	0.03	0.48	0.42	0.48

L'action des micro-ondes nous montre une dénaturations au niveaux des chlorophylles.

E1, E2, E3, sont des échantillons séchés de façon traditionnelle

3,5,7,10,11,15,16, sont des échantillons ayant subi un traitement micro-onde, ces chiffre correspondent à des valeurs de facteurs influençant les séchage:

	essai 3	essai 5	essai 7	essai 10	essai 11	essai 15	essai 16
puissance	3200 W	800 W	3200 W	3200 W	3200 W	800 W	800 W
HR	10 %	10 %	10 %	10%	10 %	10 %	10 %
ventilation	mini	mini	mini	maxi	maxi	maxi*	mini
température	20°	60°	60°	20°	60°	60°	20°
temps	1h30	2h30	1h30	1h30	1h30	2h30	5h30
poids final pour 1 Kg d'algue fraîche	100g	82g	78g	86.60	85g	79g	79g

5.3.CONCLUSION

Les lois qui régissent le transfert de masse et le transfert dans le processus de séchage sont exprimées par des équations,dans lesquelles le coefficient de diffusion englobe tous les mécanismes possibles de transfert interne d'humidité au sein du matériau. Ce coefficient étant une fonction monotone de la température, on améliore la vitesse de séchage en augmentant la température.

Cette amélioration a pourtant ses limites : s'agissant de produits biologiques, il n'est pas toujours souhaitable d'atteindre le taux de séchage maximal, car la qualité risque de souffrir de températures excessives. Pour beaucoup de composants thermodégradables, la limite se situe aux environs de 60°C, ce qui interdit le séchage par ébullition à pression constante.

Le séchage classique comprend deux phases. La première phase est à vitesse constante : l'eau quitte les interstices et son niveau baisse dans les gros capillaires : une fois vides, ceux-ci se contractent d'un volume pratiquement égal à celui de l'eau évacuée. La surface du produit reste humide car la diffusion interne et le retrait mécanique y amènent un afflux d'eau qui compense l'évacuation. La seconde phase est à vitesse décroissante : le niveau d'eau baisse dans les tubes capillaires fins, et la texture des cellules se durcit graduellement. La contraction est de plus en plus lente : cette queue de séchage, mène à une limite asymptotique correspondant à la structure du produit sec.

La difficulté du séchage classique tient au durcissement croissant des couches externes, qui forment une enveloppe thermiquement isolante autour des zones internes encore humides.

Le rôle d'accélérateur du transfert de masse, ou de moteur de la pompe à eau, convient bien mieux aux micro-ondes qu'aux procédés traditionnels de chauffage et ce, pour de multiples raisons que l'on peut énumérer comme suit :

- Echauffement privilégié, sinon exclusif, de l'eau, avec pour conséquences une plus grande fluidité de celle-ci tenant à sa température plus élevée, une expulsion plus facile des dernières fractions de liquide, et un effet d'auto-régulation de la température en fin de séchage.

- Indépendance totale vis-à-vis des mécanismes de conduction, rendant inopérant l'effet d'isolation par les couches externes déjà sèches.

- Apparition d'un gradient de température dirigé de l'intérieur vers l'extérieur, favorable à l'expulsion de l'eau.

- Absence de croûtage superficiel, puisque l'air ambiant ne subit aucun échauffement.

En pratique, on limite souvent l'usage des micro-ondes à une phase précise du processus de séchage : préséchage, étape intermédiaire ou séchage final. Dans ce dernier cas, les micro-ondes permettent d'éliminer rapidement les dernières fractions de liquide, donc d'éviter la queue de séchage asymptotique. Les systèmes de séchage combinent en général les micro-ondes et l'air chaud, avec des durées respectives calculées de façon à optimiser le rendement.

Quant à la mise au point du pilote micro-onde, elle demande l'intervention de personnel qualifié. Ceci est dû à la complexité technologique du pilote.

On ne peut pas parler d'installation d'un matériel sans parler du coût d'installation et d'adaptation du personnel. Chaque intervention journalière d'un ingénieur spécialisé s'élève à 10 KF et celle d'un technicien de 5 à 6 KF.

Approximativement le temps que nous avons passé sur les différents réglages sans compter les incidents dus à la conception du pilote dite à la "carte", ce temps, au tarif technicien, revient pour l'entreprise à environ 30 KF.

On oublie dans bien des cas de prendre cette plus-value en compte.

CONCLUSION GENERALE

Il est difficile de recenser exactement les applications industrielles réalisées depuis quelques années à l'aide des micro-ondes, ceci est dû à la discrétion des industriels qui veulent en garder le plus longtemps possible l'avance acquise.

Cette discrétion même est la preuve du profit qu'apporte l'utilisation concrète de cette technologie nouvelle :

- chauffage en très peu de temps et à coeur,
- absence d'inertie,
- bon rendement énergétique,
- chauffage sélectif,
-
- etc...,

Par conséquent il est intéressant sur les plans techniques et économique d'associer aux micro-ondes un chauffage par infra-rouge, utiliser un courant d'air chaud avec un degré hygrométrique voulu pour assurer l'évaporation en surface des algues. La barrière constituée par l'eau s'oppose à la pénétration des micro-ondes à coeur.

Dans ces conditions les micro-ondes auront comme unique fonction de faire migrer l'eau d'une façon homogène de l'intérieur vers l'extérieur du corps).

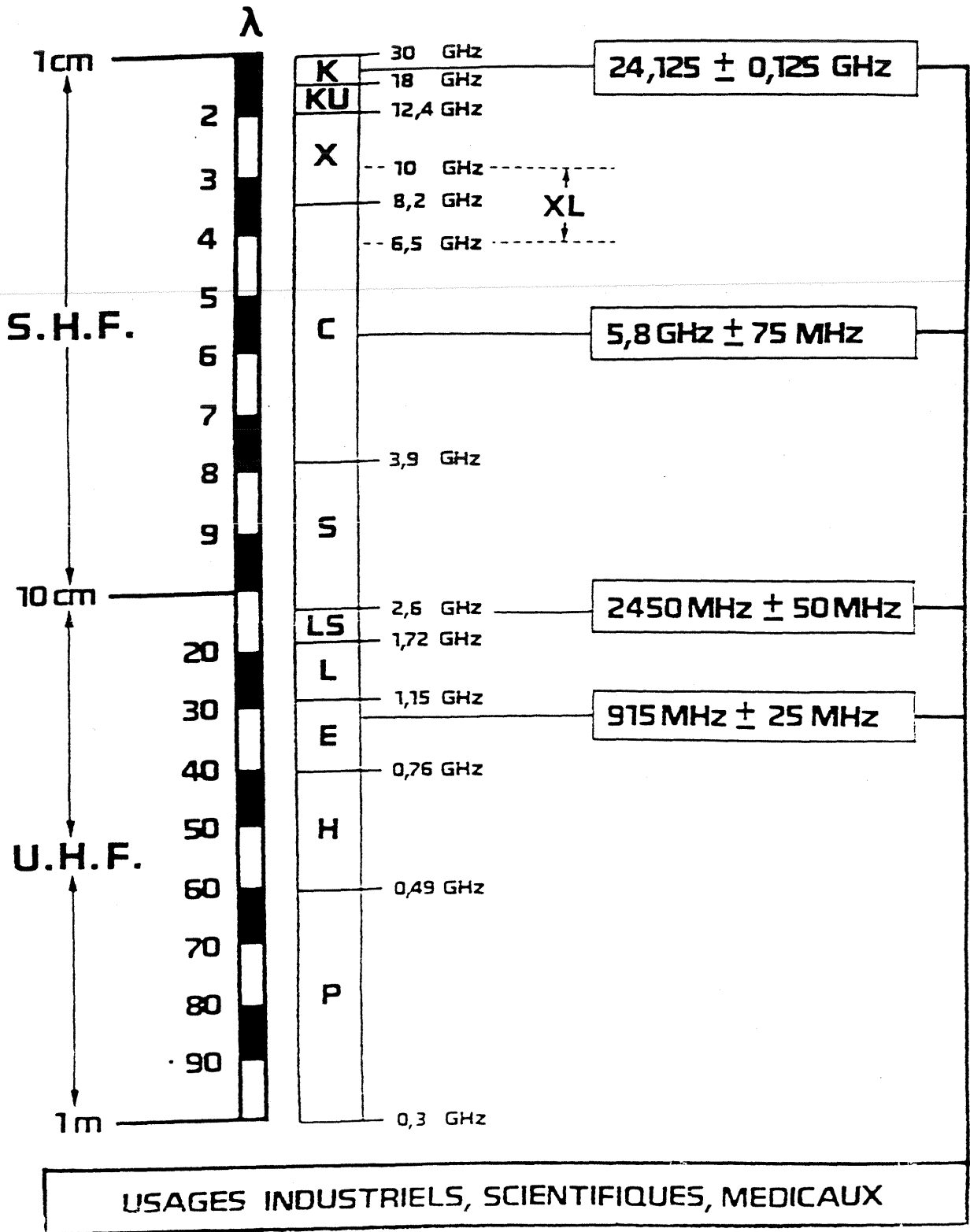
L'intérêt d'associer les micro-ondes à un autre mode de chauffe nous permettrait dans le cas des algues soit de l'appliquer en début de séchage afin d'éliminer rapidement l'eau de constitution ou en fin de séchage de façon à optimiser le séchage traditionnel.

En tout état de cause cette technique sera un complément d'une méthode traditionnelle.

ANNEXES

SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

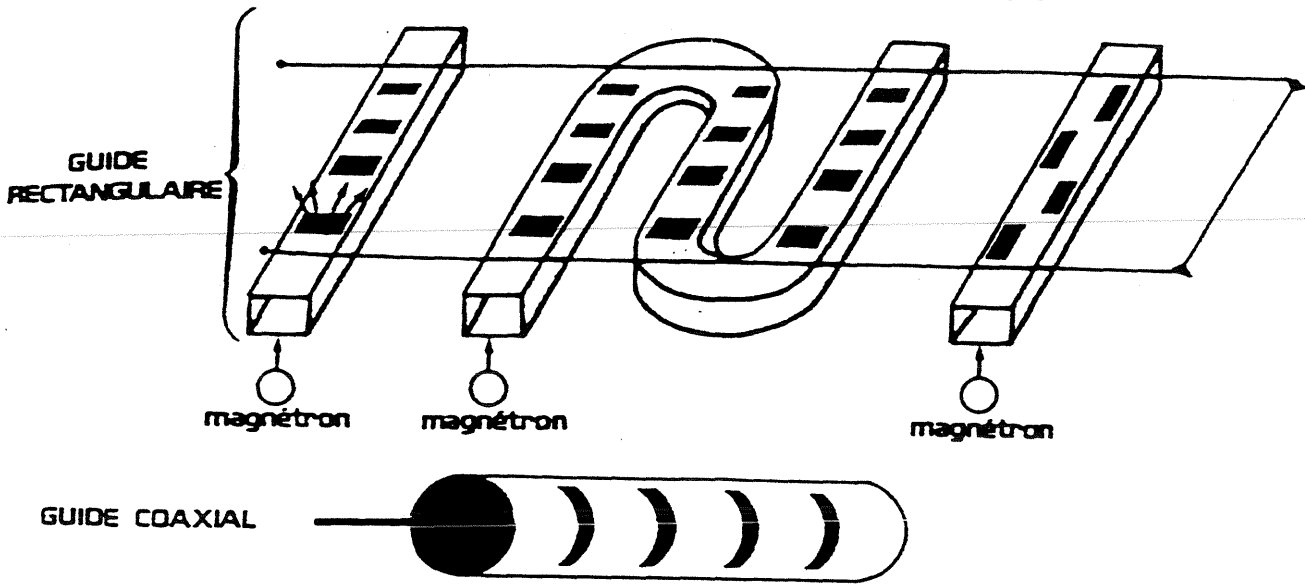
MICRO ONDES, HYPERFREQUENCES, U.H.F.



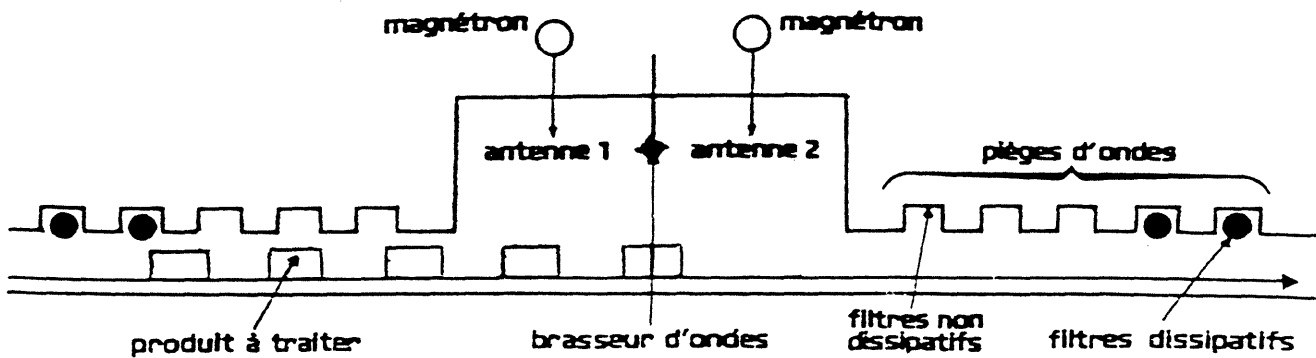
EXEMPLES D'APPLICATEURS

U.H.F. TYPES

1 ANTENNES GUIDES RAYONNANTS SIMPLES OU A MEANDRES (produits en nappes)



2 CAVITE MULTIMODE (produits en masse)



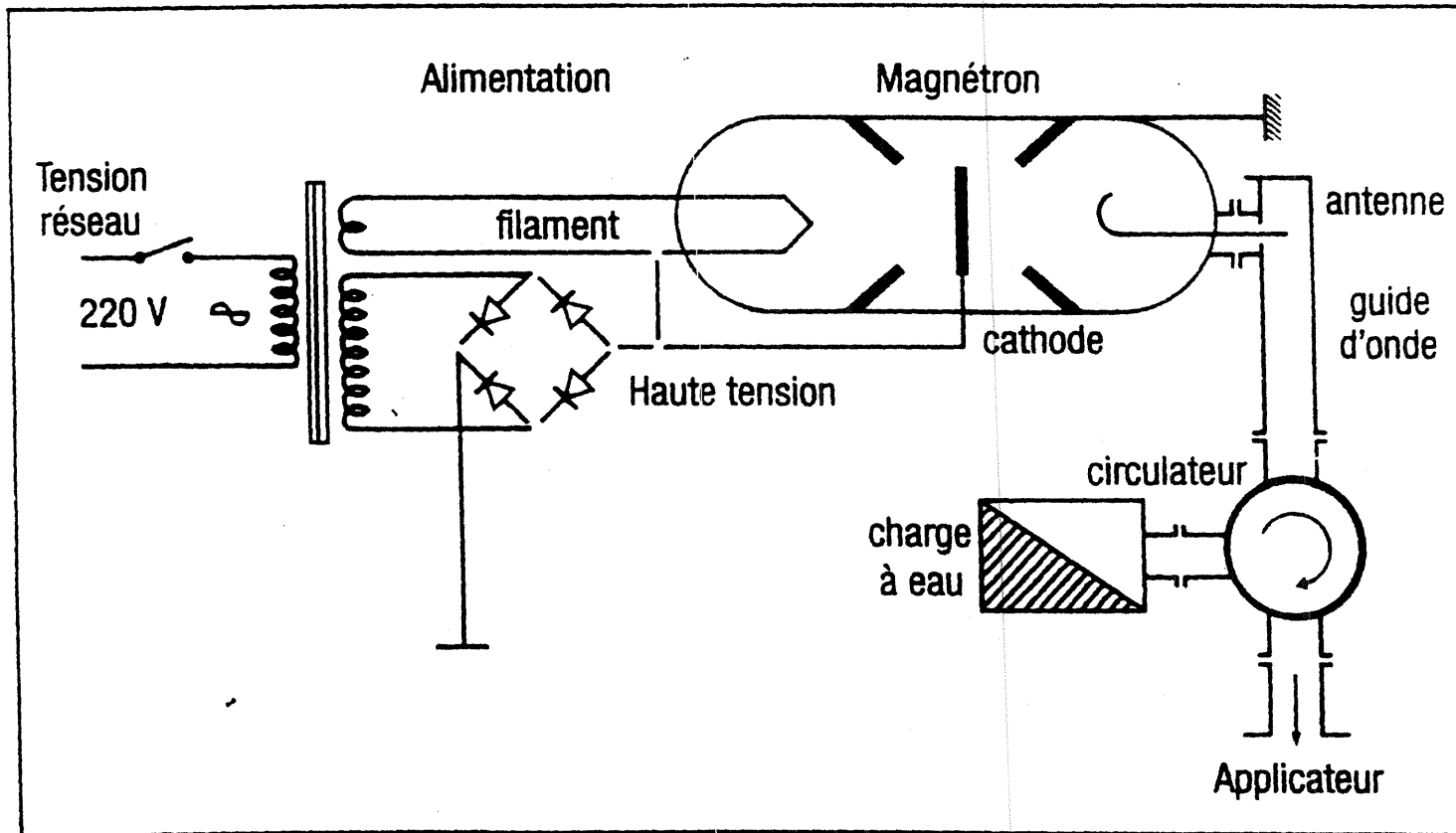
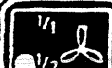
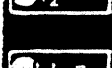











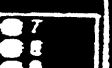







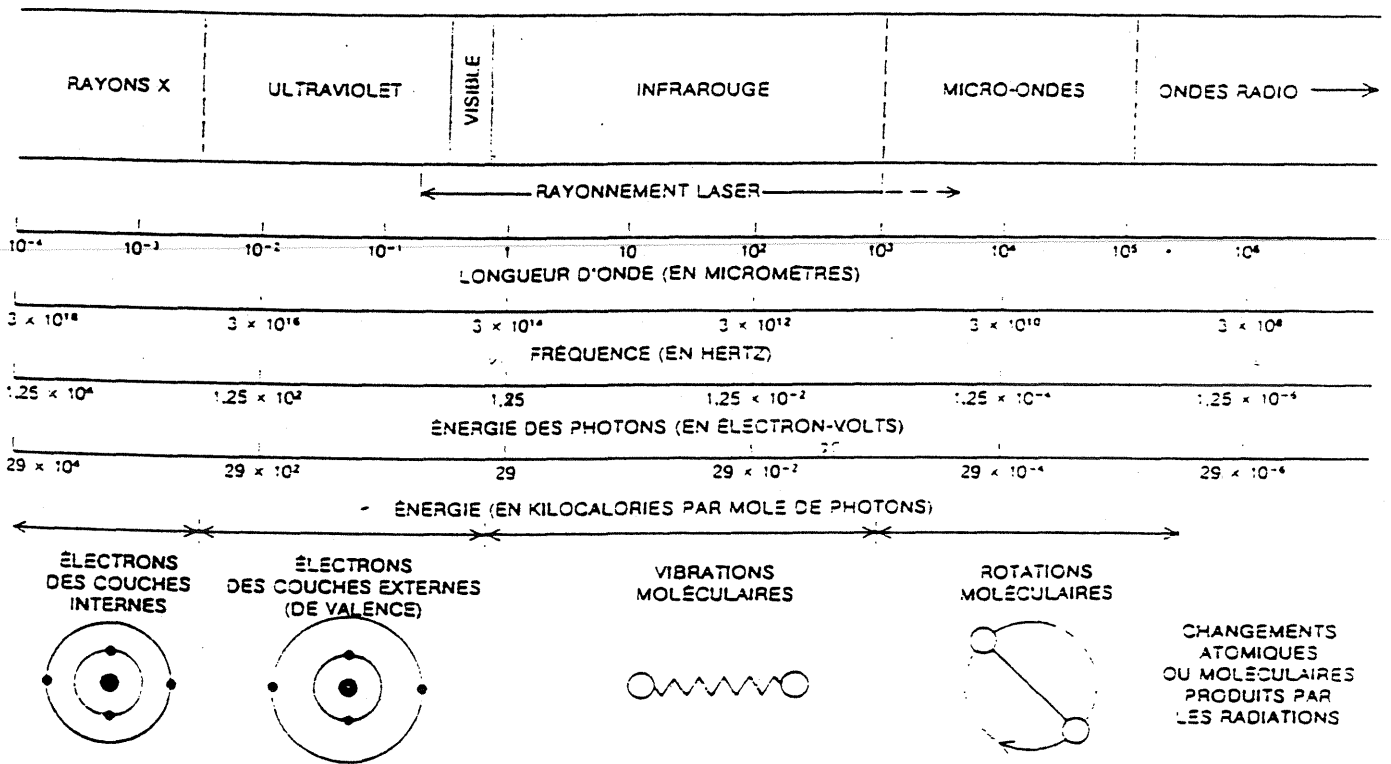


Fig. 2 : Schéma d'une installation micro-onde.

ZONE D'INDICATION POUR TOUTES LES FONCTIONS DE COMMANDE

1		1.Sortie relais	" sole "
2		2.Sortie relais non affectée	
3		3.Sortie relais	" extraction vapeur "
4		4.Sortie relais non affectée	
5		Sorties relais non affectées	
6			
7			
8		8.Sortie relais	" spray "
9		9.Sortie relais non affectée	
10		Sorties relais non affectées	
11			
			
		Sortie relais	" générateur 1 "
		Sortie relais	" générateur 2 "
		Sortie relais	" générateur 3 "
		Sortie relais	" générateur 4 "
17		Sortie relais	" séquenceur "
18		Sortie relais	" infra-rouge "
19		Sortie relais	" charge en eau "
20		Sortie relais	" CO ₂ "
		Sortie relais	" vapeur "

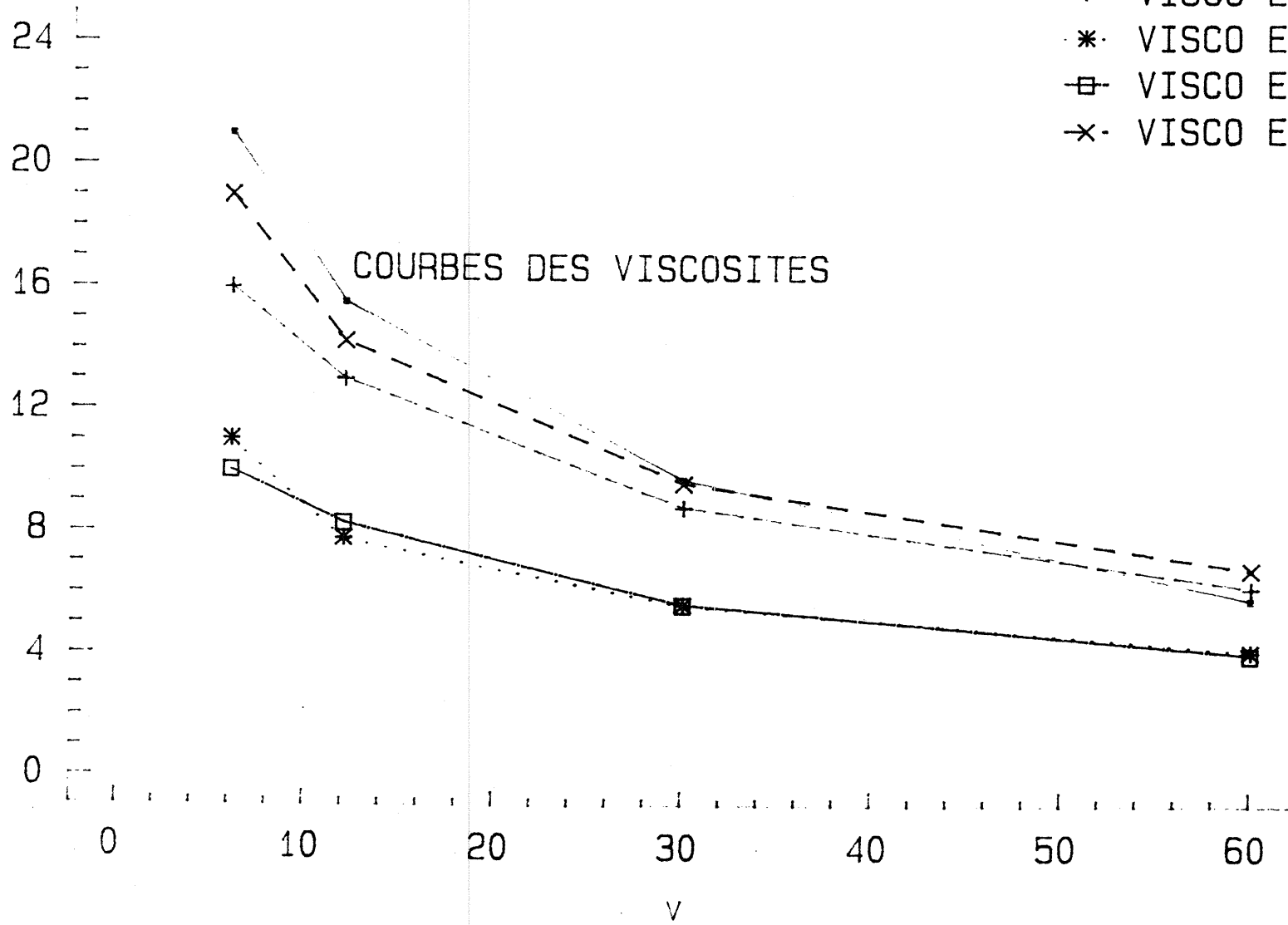
CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS RAYONNEMENTS



VISCOSITE

(X 1000)

- VISCO ECH1
- +— VISCO ECH2
- *— VISCO ECH3
- VISCO ECH4
- x— VISCO ECH5



DOSAGE DES CHLOROPHYLLES

MATERIEL

1 g de feuilles broyées
1,5 g de Ca CO₃
25 g de sable de Fontainebleau

Le matériel est broyé longuement à sec dans le mortier dans lequel on aura ajouté le sable de Fontainebleau et le Ca CO₃

la fine poudre ainsi obtenue sera recouverte de 3,3 ml d'acétone pure puis 40 ml d'acétone à 80%.

Broyer de nouveau, laisser décanter et filtrer sous vide garder le résidu solide dans le mortier.

Faire 2 autres extractions avec 20 ml d'acétone à 80 % à chaque opération, verser l'ensemble des extraits dans une fiole jaugée de 100 ml. Ajuster la jauge avec l'acétone à 80%.

Lecture au spectro à la longueur d'onde 664 nm
 630 nm

Pour les Rhodophycées:

$$\text{chl a (mg.l}^{-1}\text{)} = 11,47 D_{663} - 0,40 D_{645}$$

$$\text{chl d (mg.l}^{-1}\text{)} = 24,36 D_{645} - 3,73 D_{663}$$

LA METHODE DES PLANS DES PLANS EXPERIMENTAUX

D) LES PLANS COMPLETS

La différence capitale avec la méthode classique tient au fait que l'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience. Le fait de faire varier tous les facteurs à la fois n'est pas un inconvénient mais au contraire offre de nombreux avantages (diminution du nombre des essais, nombre de facteurs étudiés très grand, détection des optimaux, meilleure précision sur les résultats). Les plans d'expériences permettent l'étude de nombreux facteurs tout en maintenant le nombre des essais à des hauteurs raisonnables, c'est pourquoi, l'une de leurs applications principales est la recherche des facteurs influents. Au lieu de limiter le nombre de facteurs à étudier, l'expérimentateur réduira, dans un premier temps, le nombre des points d'expérience par facteur.

exemple: minéralisation par voie humide d'une matrice végétale (voir Feinberg[18])

Les facteurs dont on désire étudier l'influence sur la minéralisation sont les suivants: X_1 =volume d'acide, X_2 =durée de chauffage, X_3 =filtration, X_4 =prédigestion.

Fixons pour chaque essai, les facteurs avec des niveaux prédéterminés. Notons par un signe -, le niveau bas et par un signe + le niveau haut, et observons la réponse obtenue.

Le modèle (dit "du premier degré") choisi pour cette étude est le suivant:

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{14}X_1X_4 + a_{23}X_2X_3 + a_{24}X_2X_4 + a_{34}X_3X_4 + a_{123}X_1X_2X_3 + a_{124}X_1X_2X_4 + a_{134}X_1X_3X_4 + a_{234}X_2X_3X_4 + a_{1234}X_1X_2X_3X_4 + e$$

On cherche alors à réaliser le plan d'expérience suivant:

n° de l'essai	valeurs naturelles				valeurs codées			
	volume	durée	filtr.	predig.	X1	X2	X3	X4
	acide	chauff.						
	X1	X2	X3	X4				
1	3 ml	2 h	non	non	-1	-1	-1	-1
2	8 ml	2 h	non	non	+1	-1	-1	-1
3	3 ml	5 h	non	non	-1	+1	-1	-1
4	8 ml	5 h	non	non	+1	+1	-1	-1
5	3 ml	2 h	oui	non	-1	-1	+1	-1
6	8 ml	2 h	oui	non	+1	-1	+1	-1
7	3 ml	5 h	oui	non	-1	+1	+1	-1
8	8 ml	5 h	oui	non	+1	+1	+1	-1
9	3 ml	2 h	non	oui	-1	-1	-1	+1
10	8 ml	2 h	non	oui	+1	-1	-1	+1
11	3 ml	5 h	non	oui	-1	+1	-1	+1
12	8 ml	5 h	non	oui	+1	+1	-1	+1
13	3 ml	2 h	oui	oui	-1	-1	+1	+1
14	8 ml	2 h	oui	oui	+1	-1	+1	+1
15	3 ml	5 h	oui	oui	-1	+1	+1	+1
16	8 ml	5 h	oui	oui	+1	+1	+1	+1

Il convient ensuite de faire un tirage aléatoire de l'ordre d'exécution des expériences, afin de respecter leur indépendance et ne pas introduire un biais. On répète également un essai afin de calculer l'écart-type de l'erreur expérimentale faite sur un essai. On note cet écart-type S_e .

Après tirage, on décide de réaliser la séquence suivante d'exécution des 16 essais: 2,7,15,10,1,6,9,3,14,16,8,13,5,4,12 et 11. La répétition de 3 mesures, dans les conditions de l'essai 1, donne un écart-type expérimental $S_e=20$ ng/g

On a obtenu le tableau suivant:

essai n°	réponse
2	655
7	370
15	1040
10	915
1	300
6	660
9	980
3	280
14	915
16	935
8	640
13	985
5	270
4	505
12	905
11	1010

On calcule les coefficients a_0, a_1, \dots par les formules

$$a_0 = \text{réponse} / N \quad N: \text{nombre d'essais}$$

$$a_1 = X_i(\text{codées}) \cdot \text{réponse} / N$$

on obtient $a_0=710.31$ $a_1=55.94$ $a_3=16.57$ $a_4=250.31$

Cependant, si on calcule $y_i = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4$ pour les valeurs codées du plan

$$y_1 = 710.31 + 55.94(-1) + 0.31(-1) + 16.57(-1) + 250.31(-1) = 387.18$$

$$y_2 = 710.31 + 55.94(+1) + 0.31(-1) + 16.57(-1) + 250.31(-1) = 499.06$$

.

et si l'on prend $e_i = y_i - \hat{y}_i$

$$\text{soit } e_1 = 300 - 387.18 = -87.18$$

$$e_2 = 655 - 499.06 = 155.94$$

.

Les valeurs des résidus e_i sont énormes et nettement supérieures à l'écart-type expérimental S_e

Cela signifie que le système n'est pas "linéaire", et qu'il faut tenir compte des différentes interactions.

Pour calculer les coefficients d'interactions, on construit la matrice suivante: (à l'aide des règles suivantes: si 2 facteurs sont de même niveau, leur interaction vaut +1, si 2 facteurs ont des niveaux différents, leur interaction vaut -1)

```

-----
|X0| X1| X2| X3| X4||X1|X1|X1|X2|X2|X3|X1|X1|X1|X2|X1|
| | | | | ||X2|X3|X4|X3|X4|X4|X2|X2|X3|X3|X2|
| | | | | || | | | | |X3|X4|X4|X4|X3|
| | | | | || | | | | |X4|
-----

```

```

-----
|+| -| -| -| -| +| +| +| +| +| -| -| -| -| +| |
|+| +| -| -| -| -| -| +| +| +| +| +| +| -| -|
|+| -| +| -| -| -| -| +| +| -| -| +| +| +| -| +|
|+| +| +| -| -| -| -| +| -| -| -| +| -| -| +| +|
|+| -| -| +| -| -| -| -| +| -| +| -| +| -| +| -|
|+| +| +| +| -| -| -| -| +| +| -| -| -| +| -| -|
|+| -| -| -| +| -| -| -| -| +| -| -| -| -| +| +|
|+| +| -| -| +| -| -| -| -| +| -| -| -| -| +| +|
|+| -| +| -| +| -| -| -| -| +| -| -| -| -| +| +|
|+| +| +| -| +| -| -| -| -| +| -| -| -| -| +| +|
|+| -| -| +| +| -| -| -| -| -| +| +| -| -| -| +|
|+| +| -| +| +| -| -| -| -| -| +| +| -| -| -| +|
|+| -| +| +| +| -| -| -| -| -| +| +| +| -| -| +|
|+| +| +| +| +| -| -| -| -| -| +| +| +| +| +| +|
-----

```

On calcule les coefficients d'interaction de la même manière que précédemment.

par exemple:

$$a_{14} = (300 - 655 + 280 - 505 + 270 - 660 + 370 - 640 - 980 + 915 - 1010 + 905 - 985 + 915 - 1040 + 935) / 16$$

on obtient $a_{12} = -20.31$ $a_{13} = 4.69$ $a_{14} = -99.06$ $a_{23} = 19.06$ $a_{24} = 11.56$
 $a_{34} = 11.56$ $a_{123} = 0.94$ $a_{124} = 10.94$ $a_{134} = -5.31$ $a_{234} = -12.19$ $a_{1234} = -0.31$

Une règle utilisée généralement pour définir une limite de signification des coefficients est la suivante:

la valeur absolue du coefficient doit être au moins supérieure à 2 fois l'écart-type expérimental S_e pour qu'il soit pris en compte dans le modèle. (Il existe d'autres règles plus sophistiquées, par exemple, la méthode de Box utilisant la technique de la droite de Henry, ou l'analyse de variance).

On s'aperçoit ainsi que les seuls coefficients que l'on puisse considérer comme significatifs sont:

$$a_0 = 710.31$$

$$a_1 = 55.94$$

$$a_4 = 250.31$$

$$a_{14} = -99.06$$

Pour notre exemple, et dans la limite de la plage d'étude, on peut donc approximer notre procédé par le modèle:

$$y = 710.31 + 55.94X_1 + 250.31X_4 - 99.06X_1X_4$$

(X_1 et X_4 en valeurs normalisées c-à-d $X_1 = -1$ équivaut à 3ml)

LA REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE

Le choix des plans fractionnaires comme plan pour l'étude de modèle du premier degré se déduit de considérations théoriques reposant sur les résultats de la méthode de régression linéaire multiple (RLM) au sens des moindres carrés, à l'aide de laquelle il est possible de développer toute la théorie sur l'organisation optimale des essais, appelés méthode des plans d'expériences (voir Goupy). En complément, la RLM permet aussi de proposer divers tests statistiques qui peuvent servir à vérifier si le modèle choisi est correct.

Pour calculer les effets à partir des résultats d'expériences, nous avons construit une matrice des effets. Dans le cas d'un plan 2 (plan à 2 niveaux et à 2 facteurs), nous avons:

	-moyenne facteur1 facteur2 interaction12-				
X=	+1	-1	-1	+1	
	+1	+1	-1	-1	
	+1	-1	+1	-1	
	+1	+1	+1	+1	

on peut écrire:

$$\begin{array}{l}
 \bar{y}_1 \\
 \bar{y}_2 \\
 \bar{y}_3 = X \bar{a}_2 \\
 \bar{y}_4 \\
 \text{---}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \bar{a}_0 \\
 \bar{a}_1 \\
 \bar{a}_2 \\
 \bar{a}_{12} \\
 \text{---}
 \end{array}$$

Cette relation obtenue pour un plan 2 se généralise à tous les plans factoriels complets à deux niveaux.

nous avons donc $Y = XA$

l'estimation des coefficients de A est calculée en minimisant la somme de carrés des écarts entre les valeurs observées y_i et les valeurs prédites \hat{y}_i . Cette condition

consiste donc à minimiser $(y_i - \hat{y}_i)$.
on obtient:

$A = [X'X]^{-1}X'Y$ Or la matrice X est une matrice d'Hadamard, possédant la propriété suivante:

$$X'X = nI \quad n: \text{nombre des essais} \quad I: \text{matrice identité}$$

d'où

$$A = X'Y/n$$

2 LES PLANS FRACTIONNAIRES

On peut encore diminuer le nombre d'essais sans perdre trop d'informations. Pour cela, il existe plusieurs plans tels que les plans de Plackett et Burman, les tables de Taguchi,

les plans de Doehlert, ... mais les plans les plus intéressants sont probablement les plans factoriels fractionnaires.

Les plans fractionnaires sont utiles lorsqu'il y a beaucoup de facteurs à étudier.

Reprenons l'exemple du plan 2 (minéralisation). Si l'expérimentateur décide de n'effectuer que la moitié des essais, il en fera 2⁴. Le problème consiste à savoir quels sont les 8 essais à conserver. On s'arrange pour que les effets principaux qui vont être déterminés soit le moins faussés possibles par l'absence des 8 essais éliminés. On montre qu'il faut utiliser une colonne de signes correspondant à une interaction d'ordre élevé pour étudier le quatrième facteur (voir Goupy ou Mathieu et Phan-Thân-Lu). Dans notre exemple, le quatrième facteur peut être étudié sur l'interaction 123 et l'on écrira:

$$X_4 = 123$$

On obtient le plan d'expérience suivant:

facteur	facteur	facteur	facteur	interact.	interact.	interact.
X1	X2	X3	X4=123	12	13	23

-	-	-	-	+	+	+	
+	-	-	+	-	-	+	
-	+	-	+	-	+	-	
+	+	-	-	+	-	-	
-	-	+	+	+	-	-	
+	-	+	-	-	+	-	
-	+	+	-	-	-	+	
+	+	+	+	+	+	+	

On constate que cela ne change pas l'orthogonalité de la matrice.

Si on calcule les 8 paramètres a' en utilisant la même formule que pour les plans complets, on va trouver que:

$$a_0' = a_0 + a_{1234} = 710.00$$

$$a_1' = a_1 + a_{234} = 43.75$$

$$a_2' = a_2 + a_{134} = -5.00$$

$$a_3' = a_3 + a_{124} = 27.50$$

$$a_4' = a_4 + a_{123} = 251.25$$

$$a_{12}' = a_{12} + a_{34} = -28.75$$

$$a_{13}' = a_{13} + a_{24} = 16.25$$

$$a_{23}' = a_{23} + a_{14} = -80.00$$

Ces résultats vont donc être plus délicats à interpréter que ceux obtenus avec le plan complet.

Tous les plans fractionnaires posent ce même problème d'interprétation des résultats. Les hypothèses de travail que l'on retient en général sont les suivantes:

- Les interactions du troisième ordre ou d'ordre plus élevé sont considérées comme négligeables.

- Si un contraste (a_i') est nul, cela peut signifier:

* que les effets aliés (effets confondus : a_i) sont tous nuls, cas le plus probable que nous retiendrons généralement;

* que les effets aliés se compensent, cas rare à ne pas considérer dans une première approche.

- Si deux effets sont faibles, on supprime que leur interaction l'est aussi.

- Si deux effets sont forts, on se méfiera de leur interaction qui peut également être forte.

Comme pour le plan complet, on ne retient, par exemple, que les coefficients dont la valeur absolue est au moins supérieure à 2 Se.

$$a_0' = 710.00$$

$$a_1' = 43.75$$

$$a_4' = 251.25$$

$$a_{23}' = -80.00$$

* on néglige l'interaction a_{1234} (interaction du quatrième ordre) d'où

$$a_0' = a_0 = 710.00$$

* considérons maintenant que $a_4' = a_4 = 251.25$

$$\text{et que } a_1' = a_1 = 43.75$$

* En ce qui concerne a_{23}' , il est plus délicat de dire s'il

représente a_{14} ou a_{23} , mais puisque l'on considère que a_2 et a_3 n'ont pas d'influence, on peut donc supposer que ces interactions a_{14} qui prédomine.

d'où

$$a_{23}' = a_{14} = -80.00$$

On obtient donc le modèle:

$$y = 710.00 + 43.75X_1 + 251.25X_4 - 80.00X_1X_4$$

Il est évident que ce plan factoriel fractionnaire n'apporte pas autant d'information que le plan factoriel complet correspondant, et que, dans certains cas, on ne pourra pas trancher comme nous venons de le faire. Cependant, ces essais ne sont pas perdus puisqu'il est toujours possible de réaliser des essais complémentaires, permettant de lever les ambiguïtés. Un exemple très intéressant illustrant l'intérêt des plans fractionnaires est donné dans l'ouvrage de Goupy (plan 2).

Ces plans permettent une acquisition progressive et séquentielle des

connaissances. De plus, les plans factoriels peuvent parfaitement être complétés par des plans en étoile, permettant d'introduire des modèles du deuxième degré, si le modèle du premier degré n'est pas valable

3) PLANS EN ÉTOILE

c'est ce qu'on appelle les plans centrés composites. Ce sont des plans optimaux et bien adaptés aux modèles du second ordre

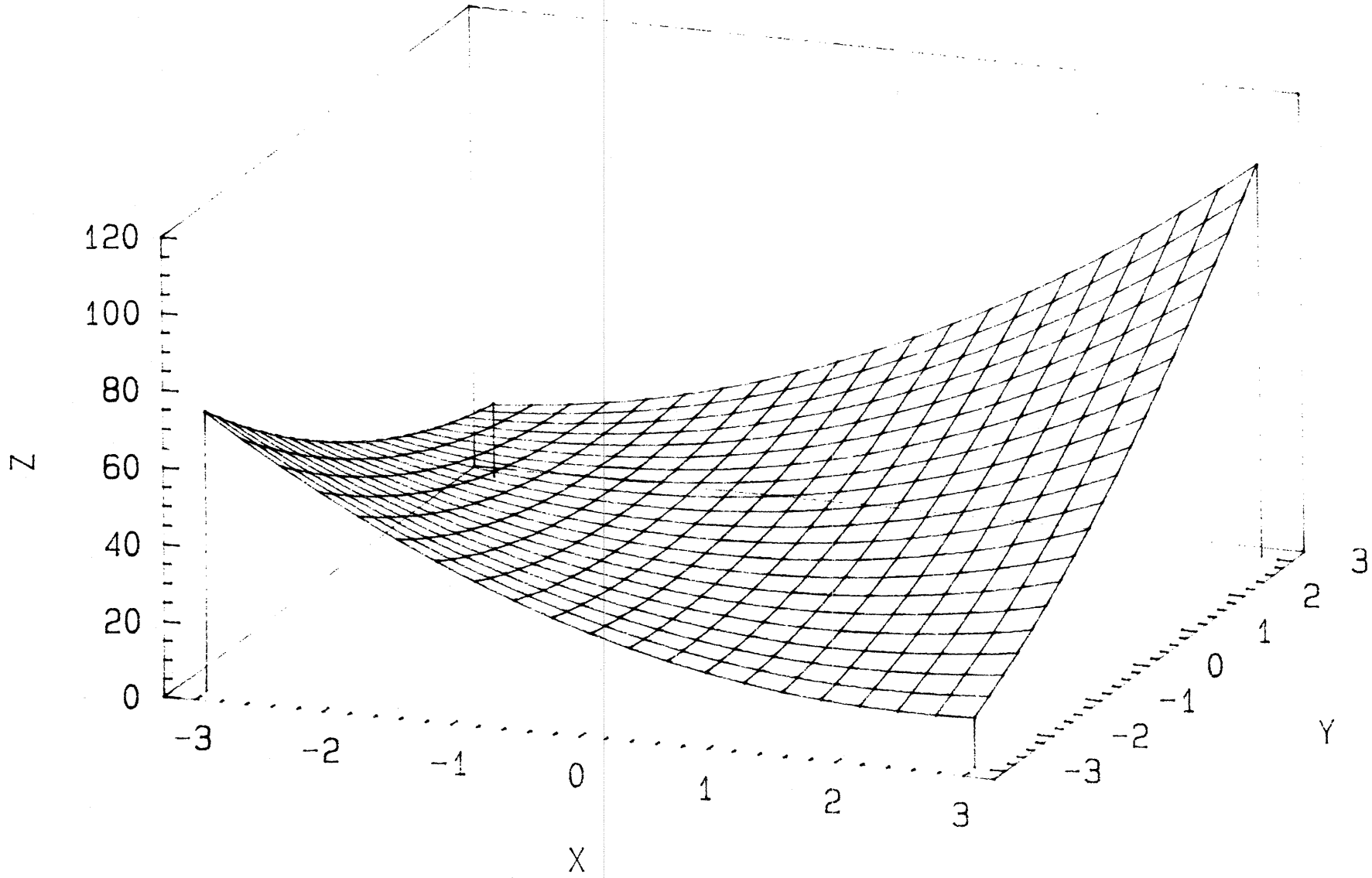
exemple:

si on a 5 facteurs à étudier on a la matrice d'expérience suivante:

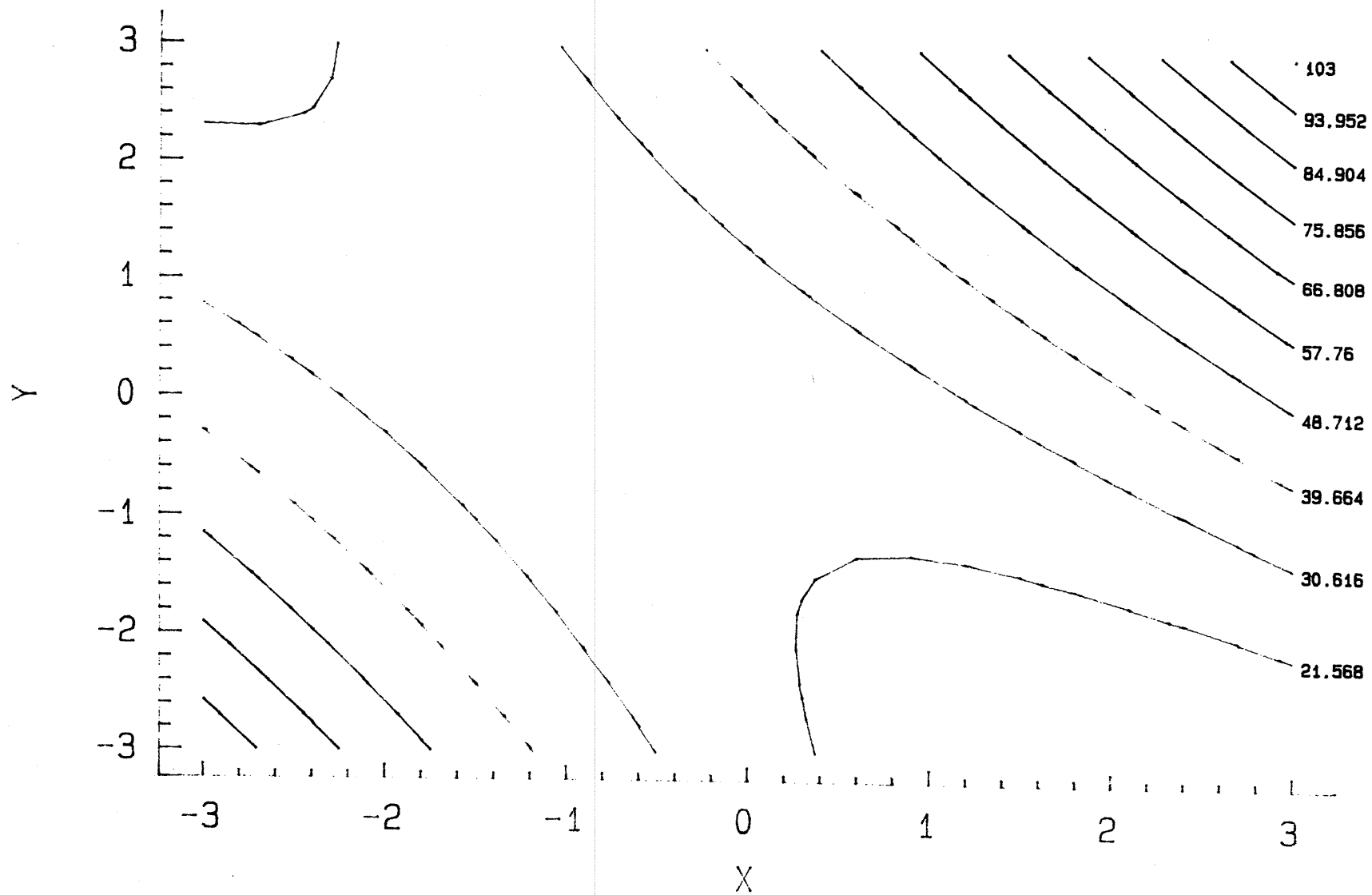
les surfaces de réponse et les courbes d'isoréponse permettent de mieux visualiser l'évolution des réponses ainsi que l'optimisation.

voir graphiques suivants:

XY Polynomial



XY Polynomial



run	factor_A	factor_B	factor_C	factor_D	factor_E
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000
3	1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000
4	-1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000
5	1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000
6	-1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000
7	1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000
8	-1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000
9	1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000
10	-1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000
11	1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000
12	-1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000
13	1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000
14	-1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000
15	1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000
16	-1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000
17	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000
18	-1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000
19	1.000000	-1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000
20	-1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000
21	1.000000	1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000
22	-1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000
23	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	1.000000	-1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000
25	-1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000
26	1.000000	1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000
27	-1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000
28	1.000000	-1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000

29	-1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000
30	1.000000	1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000
31	-1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
32	1.000000	-1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
33	-1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
34	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
35	-2.378414	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
36	2.378414	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
37	0.000000	-2.378414	0.000000	0.000000	0.000000
38	0.000000	2.378414	0.000000	0.000000	0.000000
39	0.000000	0.000000	-2.378414	0.000000	0.000000
40	0.000000	0.000000	2.378414	0.000000	0.000000
41	0.000000	0.000000	0.000000	-2.378414	0.000000
42	0.000000	0.000000	0.000000	2.378414	0.000000
43	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-2.378414
44	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2.378414
45	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000