

Projet CEE - DG XII - STD3

"Valorisation du manioc en Amérique Latine"

coordonné par le CIRAD-SAR



Evolution des propriétés physicochimiques et fonctionnelles de l'amidon de manioc (Mcol 1522) au cours de la fermentation

Mise en évidence du rôle de l'acide lactique et de l'exposition au soleil sur l'acquisition du pouvoir de panification de l'amidon aigre



CIAT, Cali, Colombie
Aout 1994

Mathieu ASTÉ
Ingénieur ENITA (Bordeaux)
CSN en agro-alimentaire

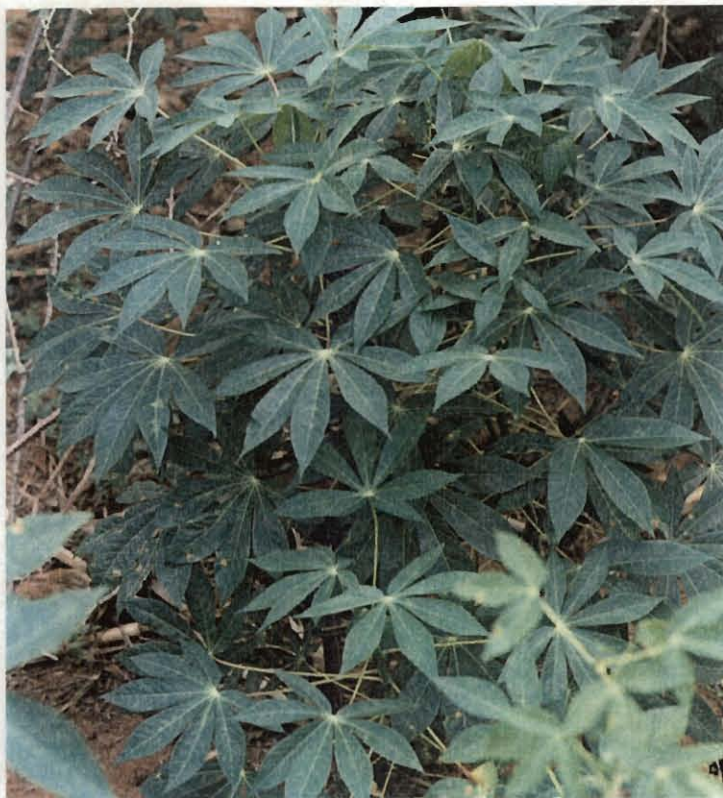
SB
211
.C3
A87
c.1

SB
211
.C3
A77
C.1.

Projet CEE - DG XII - STD3

"Valorisation du manioc en Amérique Latine"

coordonné par le CIRAD-SAR

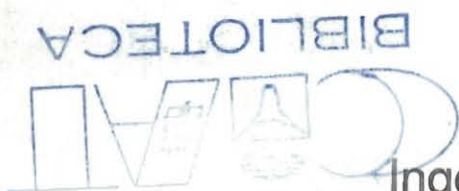


Evolution des propriétés physicochimiques et fonctionnelles de l'amidon de manioc (Mcol 1522) au cours de la fermentation

Mise en évidence du rôle de l'acide lactique et de l'exposition au soleil sur l'acquisition du pouvoir de panification de l'amidon aigre



CIAT, Cali, Colombie
Aout 1994



Mathieu ASTÉ
Ingénieur ENITA (Bordeaux)
CSN en agro-alimentaire

18498
13 MAR. 1995

RÉSUMÉ

L'amidon aigre de manioc fermenté et séché au soleil a des propriétés de panification largement utilisées dans la fabrication de différents produits alimentaires traditionnels en Amérique Latine.

L'étude d'un suivi de fermentation réalisé sur la variété "Algodona" (Mcol 1522 du germoplasme du CIAT) a permis de caractériser l'évolution de certains paramètres au cours de la fermentation: le pH diminue fortement en début de fermentation et se stabilise aux alentours de 3,5 après 8 jours de fermentation. L'acidité totale augmente, les propriétés viscoélastiques sont modifiées et corrélées au pouvoir de panification qui augmente jusqu'au 12^e jour de fermentation.

Le séchage au soleil est indispensable à l'acquisition des propriétés de panification et il agit comme révélateur des transformations des propriétés de l'amidon dues à la fermentation.

Le lavage à l'eau de différents amidons aigres avant séchage solaire a mis en évidence une forte diminution du pouvoir de panification et a par ailleurs montré qu'un composé indispensable à l'acquisition du pouvoir de panification au cours du séchage solaire a été éliminé.

L'imprégnation en acide lactique (0,02M) de tous les échantillons du suivi de fermentation a montré que:

- sans exposition au soleil, l'imprégnation entraîne très peu de modifications des propriétés de l'amidon,
- après séchage solaire, l'imprégnation abaisse les valeurs des premiers optimums de viscosité et améliore les pouvoirs de panification jusqu'au 6^e jour de fermentation.

L'acide lactique seul n'est pas suffisant pour obtenir un pouvoir de panification optimum en début de fermentation. Des transformations de la structure de l'amidon sont indispensables à l'apparition des propriétés fonctionnelles étudiées.

Trois paramètres indispensables doivent être réunis pour le développement d'un bon pouvoir de panification:

- la modification de l'amidon par la fermentation,
- la présence d'une quantité suffisante d'acide lactique,
- une bonne irradiation solaire.

La concentration optimale en acide lactique semble être voisine de 0,02M.

Mots clés : amidon de manioc, fermentation, acide lactique, soleil, panification, propriétés physico-chimiques, rhéologie, Colombie.

SUMMARY

Fermented and sun-dried sour cassava starch presents bread-making properties that are widely used in the making of different traditional foodstuffs in Latin America.

The study of a kinetic fermentation realised on the "Algodona" variety of Cassava (Mcol 1522 germoplasm of CIAT) allowed characterisation of the evolution of certain parameters during the fermentation process : there's a large drop in pH at the beginning of the process, stabilizing at 3,5 after 8 days of fermentation. The bread-making capacity of the starch, which increases along with total acidity up to the 12th day of fermentation, is highly dependant on the viscoelastic properties.

The sun-drying phase is essential to the acquisition of the bread-making capacity and reveals the transformation of the starch properties due to the fermentation.

The washing of different types of sour starch before sun-drying caused a large decrease in bread-making capacity and, furthermore, showed that an essential component for acquiring the capacity of bread-making during sun-drying was eliminated.

The impregnation with lactic acid (0,02M) of all the samples of the kinetic fermentation showed that :

- without exposure to the sun, the impregnation leads to very few changes in the starch properties.

- impregnation with lactic acid improved the bread-making capacity and lowered the viscosity first optimum, up to the 6th day of fermentation.

The lactic acid alone is not sufficient to optimise the bread-making capacity at the beginning of fermentation.

The transformation of the starch structure is essential for the development of the studied functional properties.

Three essential parameters are required for the development of good bread-making capacity:

- modification of the starch through the fermentation process
- the presence of a sufficient amount of lactic acid
- good solar radiation.

The lactic acid's optimum concentration seems to be around 0,02M.

Keywords : Cassava starch, fermentation, lactic acid, sun, bread-making, pasting properties, Colombia.

REMERCIEMENTS

Ce rapport fait la synthèse de 7 mois de travaux réalisés au CIAT (Centro internacional de agricultura tropical) dans le cadre d'un programme européen sur la valorisation du manioc en Amérique Latine. En appui à ce programme, le MAE (Ministère des affaires étrangères du gouvernement français) a financé un poste de CSN ouvert en janvier 1994, que j'ai la chance d'occuper depuis lors et qui constitue pour moi une véritable première expérience professionnelle.

Tous mes remerciements vont à:

- Antoine Collignan du CIRAD-SAR de Montpellier qui m'a accueilli dans le monde de la recherche en coopération et qui m'a offert son appui lors de la sélection des candidats à ce poste de CSN,

- Nadine Zakhia et Dominique Dufour qui ont défini le cadre de la présente étude et qui suivent l'évolution de mes travaux,

- Dominique Dufour encore pour son accueil à Cali, son encadrement au CIAT, sa disponibilité, sa franchise et son énergie,

- Ruppert Best, le responsable du programme "manioc" du CIAT ainsi que tout le personnel de la section "utilizacion de Yuca", avec un clin d'oeil particulier à Stella Narvaez pour son accueil et son aide toujours précieuse, à Luz Mila Murcia pour sa participation aux travaux, et à Anne Vernerey qui m'a appuyé pour la réalisation de cette étude.

- enfin tous les gens que je côtoie régulièrement au CIAT et qui contribuent par leur bienveillance et leur bonne humeur au bon déroulement de mon séjour en Colombie.

Enfin un grand merci aux différentes institutions impliquées:

- au MAE qui m'autorise 16 mois de recherche d'appui au développement à Cali dans l'environnement du CIAT,

- au CIAT et à ses dirigeants qui perpétuent un cadre et des conditions de recherche exceptionnels,

- au CIRAD-SAR pour développer des recherches en coopération sur la valorisation des matières premières tropicales.

TABLE DES MATIÈRES

Contexte du travail	1
Introduction	5
Bibliographie	
1- Production mondiale d'amidon.....	7
2- Composition de l'amidon.....	7
21- Composition chimique	7
22- Organisation du grain d'amidon	7
3 Comportement rhéologique des suspensions d'amidon	8
4 L'amidon de manioc	8
41- Généralités	8
42- Production de l'amidon de manioc	9
43- Modification de l'amidon de manioc par la fermentation.	9
44- Modification de l'amidon de manioc par traitement acide	9
5- Panification	10
51- Panification traditionnelle de la farine de blé; rôle de l'amidon	10
52- Panification de l'amidon de manioc.....	10
521- Panification d'amidon aigre.....	10
522- Importance des rayonnements Ultra-Violets dans l'acquisition d'un pouvoir de panification.	11
523- Panification d'amidons doux acidifiés	11
Matériel et Méthode	
1- préparation des échantillons	13
11- Matière première	13
12- Les prélèvements	13
13- La conservation des échantillons	14
2- Les essais de trempage dans l'eau et d'imprégnation en acide lactique	14
21- Influence du trempage dans l'eau	14
211- Trempage unique.....	15
212- Trempage successifs.....	15
22- Influence d'un imprégnation par une solution 0,02M d'acide lactique	15
221- Essai préliminaire: mise au point d'un protocole.....	15
222- Pour le suivi de fermentation	15
3 - Le séchage	15
4- analyses.....	16
41- tamisage.....	16
42- matières sèches	16
42- Le pH et l'acidité totale	16
43- La teneur en acide lactique	16
44- Propriétés rhéologiques	17
45- La mesure du pouvoir de panification	17
46- La teneur en amylose.....	17

LE CONTEXTE DU TRAVAIL

La coopération française en Amérique du Sud repose sur l'activité de délégations régionales de coopération scientifique et technique, qui couvrent plusieurs pays et coordonnent les actions de recherche et de développement entre ces pays.

La délégation des pays andins (Vénézuéla, Colombie, Equateur, Pérou, Bolivie) basée à Caracas, a mis en place un programme régional "technologie agricole et agroalimentaire" qui s'appuie en particulier sur des projets de recherche et développement.

L'un d'eux (projet CEE-DGXII-STD3) s'intitule "**Valorisation des produits, sous-produits et déchets de la petite et moyenne industrie de transformation du manioc en Amérique Latine**". Le CIRAD-SAR (Nadine Zakhia et Dany Griffon) le coordonne et travaille en partenariat avec d'autres institutions françaises (ORSTOM, CIRAD-CA, INRA, INA-PG) ou étrangères (le CIAT et UNIVALLE pour la Colombie, l'UBA pour l'Argentine, l'UNESP pour le Brésil et le NRI pour l'Angleterre).

Ce projet d'une durée de 3 ans est financé à hauteur de 760 000 écus par la CEE. La structure d'accueil retenue pour la coordination locale sur les pays andins a été le CIAT de Cali en Colombie, dont les travaux sont largement reconnus et qui, compte tenu de son mandat international, offre un terrain privilégié pour donner une dimension régionale aux actions qui y sont conduites. De plus, le CIAT rassemble la collection mondiale de manioc (5300 variétés connues) et la met à disposition pour la réalisation de ce projet.

Deux chercheurs du CIRAD-SAR ont été délégués en Colombie et au Brésil, avec la responsabilité de déroulement du projet sur la zone andine pour le premier (Dominique Dufour) et sur le cône sud pour le second (Gérard Chuzel).

Les objectifs de ce projet CEE sont multiples:

- identifier des variétés de manioc répondant aux critères technologiques des utilisateurs, au sein de la collection mondiale du CIAT,
- améliorer les propriétés physicochimiques, fonctionnelles et nutritionnelles des farines et amidons de manioc et de leur dérivés,
- développer de nouveaux produits de seconde transformation et évaluer leur faisabilité technico-économique,
- offrir des alternatives technologiques compatibles avec les moyens technico-économiques en terme de traitement et de valorisation des déchets de la transformation.

Sept actions de recherche ont été engagées pour arriver à ces objectifs. L'une d'entre elles est l'"**Evaluation de la matière première, des procédés de transformation et de la qualité des farines et amidons de manioc**" et regroupe les recherches menées par le CIAT, UNIVALLE, le NRI, l'INRA et le CIRAD.

C'est en appui à cette action de recherche que le poste de CSN que j'occupe a été ouvert par le MAE suite à une demande de Dominique Dufour. Deux thèmes de travail ont été retenus:

-La caractérisation de l'effet de l'acide lactique sur les propriétés de l'amidon de manioc après séchage solaire, et la mise en évidence de l'importance relative de la fermentation et de l'acide lactique dans l'acquisition du pouvoir de panification.

-La mise en évidence de la réaction photochimique nécessaire à l'obtention d'amidon aigre panifiable et sa reproduction dans un séchoir artificiel.

Le premier thème a été traité de janvier à aout 1994, et le deuxième fera l'objet des recherches des 8 mois suivants.

Ces recherches sont réalisées dans le but de mieux comprendre les mécanismes intervenant dans l'acquisition de propriétés de panification par les amidons de manioc. Des développements industriels d'amidon panifiable ou d'auxiliaires de panification sont envisageables et intéressent des industriels français (Le pain Jacquet et Valpi forme).

Après avoir décrit le cadre général dans lequel s'inscrit ce travail, la structure d'accueil (le CIAT), et la structure d'encadrement (le CIRAD) vont faire l'objet d'un descriptif plus précis.

LE CIAT DE CALI ET LE PROGRAMME "MANIOC"

Le CIAT a été créé en 1967 par les fondations Rockefeller et Ford, et avec l'appui du gouvernement Colombien. Actuellement, 20 pays, des agences internationales et des fondations privées financent le CIAT à travers le CGIAR (Consulting Group on International Agricultural Research).

Le CIAT comprend 8 programmes de recherche: le haricot, le riz, le manioc, les forages, l'agriculture dans les zones de piémont, de marge forestière, de savanne et l'utilisation du sol.

Le programme "manioc" rassemble des physiologistes, pathologistes, entomologistes, généticiens, virologues, pédologues, biotechnologues, biochimistes, technologues alimentaires et économistes. Tous ces chercheurs travaillent principalement sur l'amélioration variétale et culturale, sur la diffusion au niveau mondial de variétés adaptés aux principaux écosystèmes, sur l'étude des résistances aux maladies et aux parasites, sur l'amélioration génétique, sur le marché mondial du manioc et de ses dérivés ainsi que sur les **différentes voies d'obtention de produits de première ou de seconde transformation**. Son budget est de 2,5 millions de dollars.

La section "Calidad y utilizacion de la yuca" traite tous les aspects post-récolte du manioc (conservation en frais, biodétérioration, analyse de la qualité des racines de la collection mondiale, **production de farines et d'amidons**).

En collaboration avec le CIAT, l'université del Valle et les producteurs d'amidon de la région du Cauca, une **unité pilote de production d'amidon algre** (la Agustina, Cauca) a été créée en 1993. Elle est de taille comparable à celle des 150 unités de la région qui traitent 500 à 1000 tonnes de racines fraîches par an. Cette unité permet de suivre les procédés de fabrication, d'améliorer les équipements, d'optimiser la qualité du produit et de tester de nouveaux modes de traitement des effluents.

LE CIRAD (CENTRE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT)

C'est un organisme scientifique spécialisé en agriculture des régions tropicales et subtropicales. Sous la forme d'un établissement public, il est né en 1984 de la fusion d'instituts de recherche en sciences agronomiques, vétérinaires, forestières et agroalimentaires des régions chaudes.

Sa mission : contribuer au développement de ces régions par des recherches, des réalisations expérimentales, la formation, l'information scientifique et technique.

Il emploie 1800 personnes dont 900 cadres qui interviennent dans une cinquantaine de pays. Son budget s'élève à près d'un milliard de francs dont plus de la moitié provient de fonds publics.

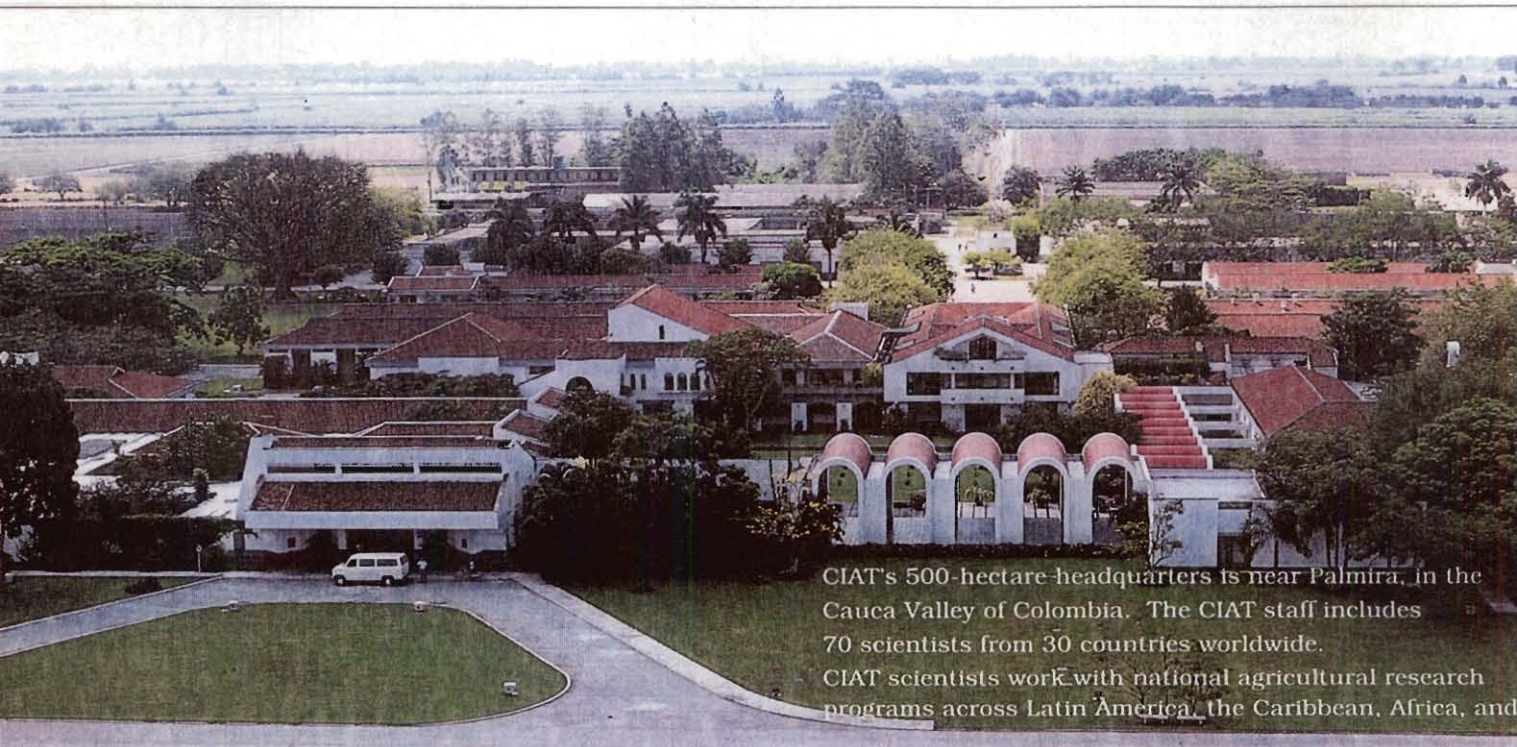
Il comprend 7 départements de recherche dont le SAR, "**Systèmes agroalimentaires et ruraux**", qui a un effectif de 128 personnes pour un budget de 63 millions de francs (43% de ressources propres).

L'objectif du CIRAD-SAR est d'accompagner le **développement des sociétés rurales en aidant les entreprises agroalimentaires** à répondre à la demande urbaine. La mobilisation des capacités d'innovation, la détermination des conditions de reproductibilité des unités de production et l'organisation des acteurs de la recherche et du développement sont les 3 outils à même d'aider le CIRAD-SAR à atteindre ses objectifs.

Planche n°1: Le cadre du travail

Photo n°1: Le CIAT (Centre International d'Agriculture Tropicale), Cali, Colombie

Photo n°2: Une unité traditionnelle de production d'amidon aigre- la rallanderia "la Agustina" où sont effectués les essais de fermentation



CIAT's 500-hectare-headquarters is near Palmira, in the Cauca Valley of Colombia. The CIAT staff includes 70 scientists from 30 countries worldwide. CIAT scientists work with national agricultural research programs across Latin America, the Caribbean, Africa, and



2.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'amidon de manioc fermenté et séché au soleil a des propriétés de panification largement utilisées dans différents produits alimentaires traditionnels d'Amérique Latine.

Afin d'améliorer la qualité et d'optimiser la production d'amidon aigre, plusieurs études ont été conduites et ont donné des résultats essentiels résumés ici:

1- Un diagnostic technologique d'une unité traditionnelle a été effectué et a permis l'élaboration de machines améliorées mises au point par les étudiants d'Univalle. Ces machines ont été assemblées au sein d'une unité pilote (Rallanderia "La Agustina") dans le Cauca (SEEMAN, 1992).

2- Le pouvoir de panification est le critère le plus important d'évaluation de la qualité de l'amidon aigre. Un protocole répétable et reproductible a été mis en place pour son évaluation. Ce protocole constitue un outil indispensable pour la caractérisation de différents amidons aigres de manioc (LAURENT, 1992).

3- La production d'un amidon aigre de qualité est conditionnée par deux étapes essentielles, la fermentation lactique et un séchage au soleil. La fermentation confère des propriétés organoleptiques à l'amidon et le séchage solaire permet l'expression des qualités acquises au cours de la fermentation (LARSONNEUR, 1993).

4- Durant le processus de fermentation se développent principalement des bactéries lactiques amylolytiques et l'amidon est le principal substrat fermentable (BRABET et DUFOUR, 1993). 75 souches ont été isolées au cours de 3 suivis de fermentation: la plupart d'entre elles sont du genre lactobacillus. Lactococcus et Pediococcus sont présents mais secondaires (GOMEZ, 1993). La caractérisation de ce type de fermentation aux potentialités industrielles reconnues est en cours (FLORES, 1992).

5- L'imprégnation en acide lactique d'amidon doux de la variété "Algodona" modifie ses caractéristiques physico-chimiques et permet d'obtenir un pouvoir de panification après exposition au soleil. Différentes concentrations d'imprégnation ont été testées et les meilleurs résultats de panification ont été obtenus avec une solution d'imprégnation de concentration 0,02M (VERNEREY, 1994).

Fortes des travaux réalisés précédemment sur les mécanismes régissant l'acquisition du pouvoir de panification par l'amidon aigre, la présente étude a pour but:

1- l'étude de l'acquisition du pouvoir de panification par un amidon de la variété "Algodona" réputée la meilleure pour la production d'amidon aigre (Mcol 1522 du germoplasme du CIAT),

2- la caractérisation des modifications des propriétés physicochimiques et rhéologiques de cet amidon au cours de la fermentation et du séchage solaire,

3- la confirmation de l'influence des radiations solaires sur l'apparition des propriétés fonctionnelles de l'amidon,

4- la mise en évidence du rôle de l'acide lactique dans l'évolution de ces propriétés fonctionnelles.

Les résultats de ces travaux devraient permettre d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le développement d'amidons panifiables industriels et devraient apporter de nombreuses recommandations au niveau rural sur la conduite du procédé de fabrication de l'amidon aigre.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1- PRODUCTION MONDIALE D'AMIDON

La production d'amidon est l'une des agro-industries les plus importantes au niveau mondial, avec un volume proche de 33 millions de tonnes par an (Ostertag, 1994). Les principales sources d'amidon sont le maïs, la patate douce, le manioc, la pomme de terre, le riz et le sorgho.

En 1992, les pourcentages respectifs en volume étaient de 64 % pour le maïs, 13 % pour la patate douce, 11% pour le manioc, 6% pour le blé et 6 % pour la pomme de terre. La production d'amidon de maïs et de pomme de terre est réalisée en majorité dans les pays développés, alors que le manioc et la patate douce sont principalement cultivés dans les pays du sud.

2- COMPOSITION DE L'AMIDON

21- COMPOSITION CHIMIQUE

L'amidon se présente sous l'aspect d'une poudre blanche, insoluble dans l'eau froide.

Ils contiennent une fraction non glucidique dont la valeur dépend de l'origine de l'amidon (tableau 1) (Duprat et al, 1984)

Tableau 1: Fraction non glucidique et teneur en amylose de divers amidons (%)

	Protéines	Lipides	Cendres	P	Amylose
Manioc	0,1	0,1	0,3	-	17 *
Pomme de terre	0,05	0,09	0,3	0,04	23
Riz	-	1,04	-	-	14-32
Maïs	0,3	0,61-65	0,1	0,015	28

22- L'ORGANISATION DU GRAIN D'AMIDON

L'amidon est composé de deux types de polymères : l'amylose et l'amylopectine. L'amylose est une molécule linéaire en hélice composée de résidus glucose associés entre eux par des liaisons α 1,4. L'amylopectine est une molécule ramifiée en grappe : chaînons linéaires α 1,4 greffés les uns sur les autres par des liaisons α 1,6. Son degré de polymérisation peut aller jusqu'à 109 (Duprat et al, 1984).

Duprat et al (1984), ont montré que la teneur en amylose varie selon l'origine de l'amidon (cf. tableau 1)

* D'après Wheatley et al (92), la teneur en amylose de l'amidon de manioc varie de 16 à 28 %, avec une moyenne de 22 %.

Des liaisons hydrogène existent entre les molécules d'amylose et d'amylopectine. Lorsque ces liaisons sont nombreuses et régulières, les chaînes s'associent en réseaux cristallins qui diffractent les rayons X. A côté de ces zones cristallines, existent des zones amorphes, où les macromolécules sont plus indépendantes, et donc plus sensibles à l'hydrolyse acide (Darbon, 1988).

3 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES SUSPENSIONS D'AMIDON

L'insolubilité dans l'eau de l'amidon natif s'explique par la présence d'une organisation semi-cristalline des grains d'amidon. Cependant, l'amidon présente une structure chimique fortement hydrophile.

A température ordinaire, l'amidon à saturation peut retenir environ 40 g d'eau pour 100g de M.S. La sorption de l'eau est due à la fixation des molécules aux hydroxyles de l'amidon par des liaisons hydrogène (Balagopalan et al, 1986).

Les molécules d'amylose et d'amylopectine sont associées par des liaisons inter et intra moléculaires, soit directement soit par l'intermédiaire de pont aqueux, pour former des zones micellaires. De la force du réseau micellaire dépendent de nombreuses propriétés de l'amidon (Thibault et Colona, 1988).

Lorsqu'une suspension aqueuse d'amidon est chauffée, les molécules d'eau qui entourent les granules rompent les liaisons hydrogène, pénètrent dans les granules, et le granule gonfle. Cette hydratation-gonflement est un processus irréversible appelé gélatinisation. Le processus de gélatinisation se produit lorsqu'une température critique est atteinte.

Trois facteurs accompagnent la gélatinisation : perte de biréfringence, augmentation de la transmittance et augmentation de la viscosité (Schoch, 1961).

.La température de gélification varie en fonction de l'origine de l'amidon :

elle est de 58,5°C à 70°C pour le manioc, 55 °C à 66 °C pour la pomme de terre, et de 62 à 72 °C pour la maïs (Balagopalan et al, 1986).

Le grain continue à gonfler lorsque la température augmente, jusqu'à ce que les granules aient adsorbé une quantité maximale d'eau

La conséquence d'un gonflement important est que les granules deviennent fragiles et susceptibles à la désintégration par agitation mécanique. Le grain gonflé éclate alors, ce qui provoque une diminution de la viscosité et conduit à l'apparition d'une phase colloïde dispersée qui, au cours du refroidissement, peut présenter une nouvelle augmentation de la viscosité. Ce dernier phénomène est appelé rétrogradation (Thibault et Colona, 1988).

4 L'AMIDON DE MANIOC

41- GÉNÉRALITÉS

Le manioc (*Manihot Esculenta*) est une plante cultivée entre 30° de latitude Nord et 30° de latitude sud, dans les régions où les précipitations annuelles sont supérieures à 750 mm et la température moyenne supérieure à 18 - 20 °C (Cardenas et Buckle, 1980).

Les racines de manioc sont une source de calories pour de nombreuses personnes sous les tropiques.

Le manioc est une source très importante d'amidon : 85% de sa matière sèche en est composée (Chuzel, 1990).

42- PRODUCTION DE L'AMIDON DE MANIOC

En Colombie, l'amidon aigre (fermenté) de manioc est produit dans de petites unités artisanales : les rallanderias (Laurent, 1992.).

Après lavage et râpage des racines, la lechada (lait d'amidon) est séparée du tourteau (afrecho) dans une tamiseuse. La lechada est collectée dans des bacs de décantation dans lesquels l'amidon sédimente. Après évacuation de l'eau surageante, il reste à la surface une couche grisâtre, la mancha (riche en impuretés et en protéines, qui sera évacuée et commercialisée comme aliment pour les animaux). L'amidon doux (non fermenté) est alors obtenu.

Fermentation :

L'amidon est ensuite transféré dans une cuve de fermentation d'une capacité voisine de 1 à 3 m³. Il est recouvert d'une couche d'eau ou d'afrecho qui sera maintenu durant toute la fermentation. Dans certains cas, l'amidon est inoculé à l'aide d'un "pied de cuve", provenant des fermentations antérieures.

En fin de fermentation, l'amidon est ensuite émietté, étalé au rouleau et séché au soleil, jusqu'à ce qu'il atteigne une humidité de 10 % environ. Le séchage au soleil dépend des conditions climatiques, et dure de 1 à 2 jours. L'amidon fermenté est également appelé amidon aigre.(almidon agrio).

43- MODIFICATION DE L'AMIDON DE MANIOC PAR LA FERMENTATION.

• microflore :

Au cours de la fermentation de l'amidon, la flore lactique prédomine. Les bactéries lactiques se développent au cours des premiers jours, puis restent présentes dans le milieu où elles continuent à métaboliser et à produire de l'acide lactique (Brabet et Dufour, 1993).

• propriétés physico-chimiques :

Une modification importante des propriétés rhéologiques de l'amidon aigre survient au cours de la fermentation. La viscosité chute lorsque le temps de fermentation augmente, cette modification survenant principalement dans les 7 premiers jours de fermentation (Dufour et al, 1993).

Cardenas et al., 1980 ont montré que :

- le pH chute de 6,5 à 3,5 après 3 jours de fermentation;
- La fermentation engendre la production d'acides organiques :

Les acides lactique, butyrique et acétique sont produits. Ils représentent respectivement 70 % , 5% et 18 % de l'acidité totale de l'amidon fermenté.

44- MODIFICATION DE L'AMIDON DE MANIOC PAR TRAITEMENT ACIDE

Un traitement de l'amidon doux de manioc par l'acide montre que l'amidon doux traité par l'acide a des propriétés rhéologiques semblables à celles de l'amidon aigre (viscosité plus faible et tendance à la rétrogradation moins importante que celle de l'amidon doux). Une observation microscopique ne montre pas de différence entre les granules d'amidon doux et les granules d'amidon doux traités par l'acide. (Cardenas et Buckel, 1980).

5- PANIFICATION

51- PANIFICATION TRADITIONNELLE DE LA FARINE DE BLÉ - RÔLE DE L'AMIDON

La panification traditionnelle comporte 4 étapes (Godon, 1981):

- pétrissage

C'est la première opération de la panification. Elle permet de mélanger les divers constituants, et de leur donner, par l'établissement de liaisons chimiques, la structure indispensable pour conférer au pain son aspect. La pâte devient alors élastique, par formation du réseau gluténique.

- fermentation

Elle permet l'apparition de substances volatiles synthétisées par les levures. Elle produit également du CO₂ en utilisant les sucres de la farine ou ceux qui sont libérés à partir de l'amidon par les amylases, ce qui occasionne un début de levée de la pâte. Le CO₂ est alors emprisonné dans la pâte par un film élastique et continu du gluten.

- cuisson

Par action de la chaleur, les alvéoles de gaz carbonique se dilatent et font gonfler les pâtons. l'amidon est progressivement gélifié (empesé, et la mie se forme en cuisant.). Sa structure passe alors de l'état semi-cristallisé à l'état amorphe, et il acquiert une capacité d'absorption d'eau plus élevée).

52- PANIFICATION DE L'AMIDON DE MANIOC.

Pour des raisons climatiques, le blé ne peut pousser dans de nombreuses régions tropicales. Il doit alors être importé d'autres pays, à des coûts souvent élevés (Seyam et Kidman, 1975).

De nombreuses recherches ont donc été menées pour essayer de substituer partiellement ou totalement la farine de blé par des farines ou amidons d'autre origine (riz, manioc, igname.).

La farine de manioc en panification a fait l'objet de nombreuses études. Par contre,, l'amidon aigre, produit panifiable naturel, a été très peu étudié.

521- Panification d'amidon aigre.

L'amidon aigre de manioc possède une saveur caractéristique, et trouve de nombreuses applications dans les produits de boulangerie locaux, dans lesquels il est irremplaçable du fait de sa saveur et de ses propriétés fonctionnelles uniques (Camargo et al, 1988)..

La spécificité de ces pains réside dans le fait qu'ils sont exempts de farine de blé et ne subissent aucune fermentation par des levures avant cuisson (Dufour et al., 1993)

La fermentation et le séchage au soleil de l'amidon de manioc lui permettent d'acquérir un pouvoir de panification .

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer le gonflement des pains :

- Le gonflement de la pâte au moment de la cuisson peut s'expliquer, sous l'effet de la chaleur, par la désorption du CO₂ et/ou des acides lactiques et propioniques contenus dans les grains d'amidon (Camargo et al, 1988)
- Un séchage lent au soleil permettrait l'adsorption des acides volatils dans les grains d'amidon, fortement poreux à la suite des hydrolyses acides et enzymatiques. C'est la volatilisation de ces acides, qui, au moment de la panification, provoquerait l'éclatement précoce des grains d'amidon, permettant ainsi le gonflement du pain et la formation d'un réseau comparable à celui formé par le gluten dans le pain de blé (Jory, 1989)
- La formation d'un réseau tridimensionnel pourrait être due à une réaction photochimique mettant en jeu l'acide lactique et l'amidon fermenté (Larsonneur, 1993).

522- Importance des rayonnements Ultra-Violet dans l'acquisition d'un pouvoir de panification.

Différents travaux ont permis de mettre en évidence que les UVB et C sont responsables de l'acquisition du pouvoir de panification lors de l'exposition au soleil. Des essais d'irradiation à 254 nm (UVC) ont permis d'obtenir une augmentation significative du pouvoir de panification. Les UVB, en présence d'eau, induisent des réactions photo-chimiques qui consomment de l'acide lactique et confèrent à l'amidon aigre son pouvoir de panification (Larsonneur, 1993).

523- Panification d'amidons doux acidifiés

D'après Buckle et al (1980), indépendamment du degré d'acidité, l'amidon fermenté produit un pain qui présente un excellent volume spécifique. Au contraire, les pains préparés avec de l'amidon doux ou avec de l'amidon doux imprégné par l'acide ne présentent pas un volume aussi important.

D'après Buckle et al , le traitement acide de l'amidon doux par un mélange lactique, butyrique propionique produit une viscosité semblable à celle de l'amidon aigre, mais ne réduit pas le poids moléculaire comme au cours de la fermentation, et l'amidon après séchage à l'étuve de n' acquiert pas de pouvoir de panification.

D'après Camargo et al (1988), les amidons dégradés par l'acide lactique et les amylases puis séchés à l'étuve ne présentent jamais un pouvoir d'expansion semblable à celui de l'amidon fermenté. Cependant, des différences intéressantes ont été observées entre les amidons traités par l'acide lactique et les témoins non imprégnés.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

MATÉRIEL ET MÉTHODE

1- PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

11- MATIÈRE PREMIÈRE

Les variétés utilisées pour la réalisation des essais ne sont pas produites par le CIAT.

• Les échantillons A, B, C, et D ont été prélevés en fin de fermentation (de 25 à 40 jours de fermentation) dans des unités traditionnelles de production d'amidon aigre. Les variétés citées dans le tableau 1 correspondent aux noms mentionnés par les paysans chez qui les prélèvements ont été effectués. Les tanks de fermentation avaient des dimensions allant de 1 à 3m³, et l'un d'eux, celui de l'amidon (B) était recouvert d'une tôle le mettant à l'obscurité.

• L'échantillon (E) correspond à de l'amidon extrait par voie humide dans une rallanderia traditionnelle, "La Agustina", à partir de 5 tonnes de racines achetées à un petit producteur. Ces racines correspondent aux critères de la variété "Algodona" (Mcol 1522 du CIAT): elles sont allongées, de petite taille, et récoltées après 14 mois de culture.

Après l'extraction, le lait d'amidon sédimente pendant deux jours dans un tank de sédimentation avant que le surnageant ne soit éliminé et l'amidon transféré dans un tank de fermentation. Ce deuxième tank comporte des parois en bétons recouvertes de planches en bois et ses dimensions sont proches d'1 m³ (1m x 1m x 1m). Dix litres de surnageant d'un autre tank en fin de fermentation ont été versés dedans préalablement au transfert de l'amidon. La fermentation dans ce deuxième tank a duré 28 jours, mais 32 jours se sont écoulés entre l'extraction de l'amidon et la fin de la fermentation.

Matière première	Date de prélèvement	Variétés mélangées	Temps de ferm. (jour)	Désignation
(A)	2/3/94	Blanquita et Armaba	30	(A)
(B)	8/3/94	Blanquita et Algodona	25 (à l'obscurité)	(B)
(C)	8/3/94	CM5327, Chiroso, Valona, Blanquita	40	(C)
(D)	25/2/94	P40 et H1	30	(D)
(E)	Variable en fonction du temps de fermentation	Algodona	Variable: 0, 1, 3, 4, 6, 8, 12, 15, 20, 26, 32	J0, J1, J3, J4, J6, J8, J12, J15, J20, J26, J29, J32

12- LES PRÉLÈVEMENTS

Le prélèvement se fait à la pelle en surface du tank de fermentation pour (B), (C), et (D), une fois le surnageant éliminé. L'amidon (A) est prélevé au fond d'un tank exposé au soleil et à moitié vide.

Pour l'amidon (E), les échantillons suivants ont été prélevés tout au long de la production:

- du lait d'amidon lors de l'extraction par voie humide. Décanté puis mis à séché à l'ombre et au frais dans le laboratoire, il va donner l'amidon doux J0 dont la teneur en matière sèche est proche de 85%.
- de l'amidon provenant du tank de sédimentation, au premier et au troisième jour suivant l'extraction (J1 et J3).
- de l'amidon lors du transfert du tank de fermentation vers le tank de sédimentation (J4).
- de l'amidon issu du tank de fermentation à différents stades de la fermentation (J6, J8, J12, 15, J20, J26, J29, J32).

Dans le tank de sédimentation (J1 et J3), l'amidon est prélevé à la pelle au fond du tank.

Dans le tank de fermentation, le prélèvement s'effectue à l'aide d'une tarière de géologue sur toute la profondeur de la cuve (1m). Un échantillonnage total est réalisé de la manière suivante:

La surface du tank est divisée en 12 zones rectangulaires. Cinq points dans chacun de ces rectangles sont définis, le centre et 4 autres points, en général proches des 4 angles. A chaque date de prélèvement, on choisit un point dans une des 12 zones rectangulaires, différent de celui du prélèvement précédent et de l'amidon y est prélevé avec la tarière. Et on répète ensuite cette opération, pour une date de prélèvement donnée, sur le même point dans chacune des 12 zones rectangulaires.

13- LA CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS

(A) et (C) sont congelés le jour du prélèvement, puis décongelés avant d'être traités. (B) et (D) ont été conservés 5 jours au frigo (4°C) pendant 5 jours et utilisés sans congélation préalable.

Tous les échantillons issus de l'amidon (E) sauf J0 ont été mis dans des sacs plastiques immédiatement après le prélèvement et congelés au retour de la rallanderia, soit entre 1H et 3H après le prélèvement. L'amidon doux (J0) est conservé dans un sac plastique au réfrigérateur car sa faible teneur en humidité (environ 15%) le permet.

2- LES ESSAIS DE TREMPAGE DANS L'EAU ET D'IMPRÉGNATION EN ACIDE LACTIQUE

La teneur en matière sèche (MS) de l'amidon est variable. Pour procéder aux analyses nécessaires sur un amidon après imprégnation, environ 600g de MS sont nécessaires. 1400 ml de solution permettent de mettre en suspension et d'imprégner ces 600g de MS.

Dans tous les travaux présentés, sauf pour les trempages successifs où la mesure de la MS n'est pas possible entre chaque trempage :

$$\frac{MS(g)}{Vol.solution(ml)} = \frac{600}{1400}$$

21- INFLUENCE DU TREMPAGE DANS L'EAU

600 g d'amidon en MS sont prélevés et mis dans un béccher de 2 litres dans lequel 1400 ml d'eau VQSP sont versés.

211- Trempage unique

L'essai a été réalisé sur les 4 amidons aigres (A), (B), (C), (D). L'agitation magnétique est continue pendant 8 heures et suivie d'une décantation de 12 heures au réfrigérateur à 4°C.

212- Trempage successifs

Cet essai est réalisé sur l'amidon (E), après 29 jours de fermentation (J29). 600g d'amidon frais sont mis en solution dans 800 ml d'eau. L'agitation magnétique dure une heure et est suivie d'une centrifugation de 20 min à 7000 RPM. Un échantillon de surnageant ainsi que 150g d'amidon sont alors prélevés pour analyses ultérieures. Ces opérations sont répétées successivement 3 fois, l'eau étant changée avant chaque trempage.

22- INFLUENCE D'UN IMPRÉGNATION PAR UNE SOLUTION 0,02M D'ACIDE LACTIQUE

600 g de MS sont prélevées et mélangées dans un bécher à 1400 ml VQSP d'acide lactique 0,02M.

221- Essai préliminaire: mise au point d'un protocole

L'essai est réalisé sur l'amidon(B) et l'amidon(C). L'agitation magnétique est continue: 3 durées d'agitation ont été testées, 4, 8, 12 heures. Les agitations commencent ensemble. Au bout de 4 heures, le 1er bécher est mis au frigo, suivi du 2e au bout de 8 heures, et du 3e au bout de 12 heures. Les 3 béchers restent alors à 4°C à décanter respectivement 20 heures, 16 heures et 12 heures.

222- Pour le suivi de fermentation

Les 12 échantillons prélevés au cours du suivi de fermentation ont été imprégnés le même jour, en même temps. Le protocole est légèrement modifié: après 15 min d'agitation magnétique suit 1h45 de décantation à température ambiante. Cette opération est répétée 4 fois. Après la quatrième agitation, les béchers sont mis à décanter au frigo pour 12 heures. Le surnageant est alors éliminé et l'amidon mis dans des sacs plastiques au congélateur.

3 - LE SÉCHAGE

Les échantillons sont décongelés et séparés en deux parties égales. L'une est séchée à l'étuve, l'autre au soleil.

Le séchage au soleil se fait sur une bâche plastique noire, le même jour pour tous les échantillons d'une même expérience. La durée moyenne d'exposition au soleil est de 8 heures. Le jour du séchage solaire des échantillons du suivi de fermentation (28 au total), le ciel était partiellement voilé et le séchage n'a duré que 5h30. Les échantillons ont alors été conservés au réfrigérateur jusqu'au surlendemain où les conditions d'ensoleillement idéales ont permis 2h30 de séchage complémentaire.

Le séchage à l'étuve se fait sur des plateaux recouverts de papier d'aluminium. L'épaisseur d'amidon varie de 0,5 à 1 cm, et la température de l'étuve varie de 40 à 50 degrés. La durée du séchage est variable de 8 à 15 heures.

La conservation après le séchage est la même pour tous les échantillons. Ils sont placés dans des sacs plastiques fermés hermétiquement et dont l'air est éliminé au maximum. Ces sacs sont eux-même placés dans des grands sacs plastiques fermés par un élastique. Ces grands sacs sont conservés au frigo à 4°C.

4- ANALYSES

41- TAMISAGE

Tous les échantillons sont tamisés à 65 Mesh préalablement aux analyses. Cela permet d'éviter une variabilité des résultats liées à la taille des agrégats d'amidons séchés.

42- MATIÈRES SÈCHES

Une coupelle vide, sèche et propre est pesée (m1.1). Environ 5 grammes de l'amidon à analyser y est introduit, et on pèse le tout de nouveau (m1.2). Cette opération est répétée trois fois au total (m2.1, m2.2, m3.1, m3.2).

Dans le cas d'un amidon frais, on procède à un premier séchage de 2 heures à 60°C, avant de monter la température à 105°C pendant 24 heures. Ce "pré-séchage" permet d'éviter une gélatinisation de l'amidon. Dans le cas d'un amidon sec, les 3 coupelles sont laissées 24 heures à 105°C.

Au bout de ces 24 heures de séchage, les coupelles sont mises à refroidir 2 heures dans un dessiccateur avant d'être pesées à nouveau (m1.3, m2.3, m3.3).

La matière sèche de l'échantillon est donnée par:

$$MS = 100 - \left[\frac{m1.2 - m1.3}{m1.2 - m1.1} + \frac{m2.2 - m2.3}{m2.2 - m2.1} + \frac{m3.2 - m3.3}{m3.2 - m3.1} \right] \times \frac{1}{3}$$

$mj.2 - mj.3 =$ masse d'eau

$mj.2 - mj.1 =$ masse de l'échantillon humide

42- LE PH ET L'ACIDITÉ TOTALE

Une solution à 10% (g de MS / volume total en ml) de l'échantillon à analyser est agitée pendant 30 minutes avant d'être mise à décanter 30 minutes au réfrigérateur à 4°C. Le surnageant est filtré (Whatman, Glass microfibre filters, cat.1 820 150), puis 50ml en sont prélevés.

Après ajout de phénolphaléine (1%), ces 50 ml de surnageant sont titrés par de la soude (NaOH) 0,01 ou 0,05 M en fonction des cas. Le résultat est exprimé en 10^{-3} mol de H⁺/100 g de MS.

Le pH est mesuré à l'aide d'un pHmètre sur le reste du surnageant filtré.

43- LA TENEUR EN ACIDE LACTIQUE

15 ml de H₂SO₄ (0,06 M) sont ajoutés à 10g d'amidon en base sèche. Le mélange est agité une minute au vortex, homogénéisé au mixeur Ultraturax pendant une minute à 24 000 RPM puis suit une deuxième agitation d'une minute au vortex. Le surnageant est filtré à 0,45 micromètres et analysé par HPLC.

20 microlitres de filtrat sont injectés dans une colonne Aminex HPX874 (BIORAD) dont la température est maintenue à 65°C. La séparation est basée sur une combinaison des échanges d'ions, d'échanges hydrophobes et de tamisage moléculaire.

Une solution de H₂SO₄ (0,006 M) est utilisée comme éluant au débit de 0,8 ml.min⁻¹. Le pic d'acide lactique est détecté en UV à 210 nm et le résultat est exprimé en g d'acide lactique par 100 g d'amidon initial en base sèche.

44- PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

Les propriétés rhéologiques sont mise en évidence à l'aide d'un viscoamylographe Brabender. Dix minutes d'agitation magnétique permettent de mettre en suspension 25 g d'amidon en base sèche dans un des milieux réactionnels défini ci-dessous. Cette suspension est complétée à 500 ml et introduite dans le bol du viscoamylographe.

Différents essais ont été réalisés avec différents milieux réactionnels:

- l'eau,
- l'eau en présence d'inhibiteur (HgCl₂- 0,01M),
- un tampon phosphate (0,02 M),
- le même tampon phosphate en présence d'inhibiteur (HgCl₂- 0,01M).

La vitesse de rotation du module mobile du viscoamylographe est de 75 RPM et la température s'accroît régulièrement de 1,5°C/ min, de 25°C à 90°C. Elle est stabilisée ensuite à 90°C pendant 20 min avant d'être refroidie, toujours régulièrement de 1,5°C/min jusqu'à 50°C et d'être maintenue pendant 10 min à 50°C.

Les viscosités sont exprimées en unités Brabender.

45- LA MESURE DU POUVOIR DE PANIFICATION

La méthode de mesure des pouvoirs de panification a été développée au CIAT par LAURENT (1992), et par LARSONNEUR (1993).

85 g de l'amidon en base sèche sont mélangés à 100 g de fromage Campesino (Ets Alpina) dans un pétrin Hobart à vitesse lente (165 RPM) pendant une minute. De l'eau est ajoutée au mélange de façon à obtenir 65 ml d'eau dans la masse, et le tout est mélangé à vitesse moyenne (300 RPM) pendant 2 minutes.

De la masse obtenue, 6 patons de 30 g sont pesés et mis en forme d'anneau de 2 centimètres de diamètre intérieur. Ils sont introduits au four à 280°C pendant 17 minutes, puis laissés à température ambiante deux heures avant la mesure des poids et des volumes (volumètre).

Le pouvoir de panification s'exprime en cm³ par g (volume spécifique).

46 LA TENEUR EN AMYLOSE

Elle repose sur une mesure colorimétrique à 620 nm, après avoir établi une courbe d'étalonnage.

Préparation de la solution iodée à 2%

2 g de KI sont dissous dans un peu d'eau (environ 20 ml) et 0,2 g de cristaux d'iode sont incorporés à cette solution par agitation magnétique. Le volume est alors complété à 100 ml et la solution recherchée est ainsi obtenue.

Préparation des "blancs"

Dans une fiole de 100 ml, 50 ml d'eau sont ajoutés à 5 ml de NaOH 0,09M, 1 ml d'acide acétique 1M et 2 ml de solution iodée (KI, 2%). Après agitation, on complète à 100 ml avant de lire à 620 nm.

Préparation de la courbe d'étalonnage

La courbe d'étalonnage est établie à partir de 5 solutions de pourcentage en amylose connus (0, 10, 20, 25, 30 %). Il faut préparer des solutions mères d'amylose et d'amylopectine pour réaliser cette courbe d'étalonnage.

L'amylose

25 mg d'amylose sont imprégnés par 0,25 ml d'éthanol à 85% dans un fiole de 25 ml. 2,25 ml de NaOH (1M) y sont ajoutés et le tout repose 24 heures. On agite alors et on complète à 25 ml.

L'amylopectine

50 mg d'amylopectine sont imprégnés par 0,5 ml d'éthanol à 85% dans une fiole de 50 ml. 4,5 ml de NaOH (1M) y sont ajoutés et le tout repose 24 heures. On agite alors et on complète à 50 ml.

Le tableau 2 donne les mélanges à réaliser pour obtenir les solutions étalons.

% d'amylose recherché	Amylose (ml)	Amylopectine (ml)	NaOH 0,09M (ml)
0	0	9	1
10	1	8	1
20	2	7	1
25	2,5	6,5	1
30	3,0	6,0	1

De ces mélanges, 5 ml sont prélevés et ajoutés à 50 ml d'eau dans des fioles de 100 ml. On ajoute 1 ml d'acide acétique (1M), 2 ml de solution iodée à 2% et on complète à 100 ml avant d'agiter. Après un repos à l'obscurité de 20 min, on lit à 620 nm.

Préparation des échantillons

0,1 g de l'échantillon à analyser est mélangé dans une fiole de 100 ml à 1ml d'éthanol (85%) et 9 ml de NaOH (1M)

Après 24 heures de repos, on agite et on complète à 100 ml avec de l'eau distillée. 5 ml de cette solution sont alors mélangés dans une fiole de 100 ml contenant 50 ml d'eau à 1ml d'acide acétique (1M) et 2 ml de solution iodée à 2%. Après avoir complété à 100 ml avec de l'eau distillée, on agite et on laisse reposer 20 min à l'obscurité.

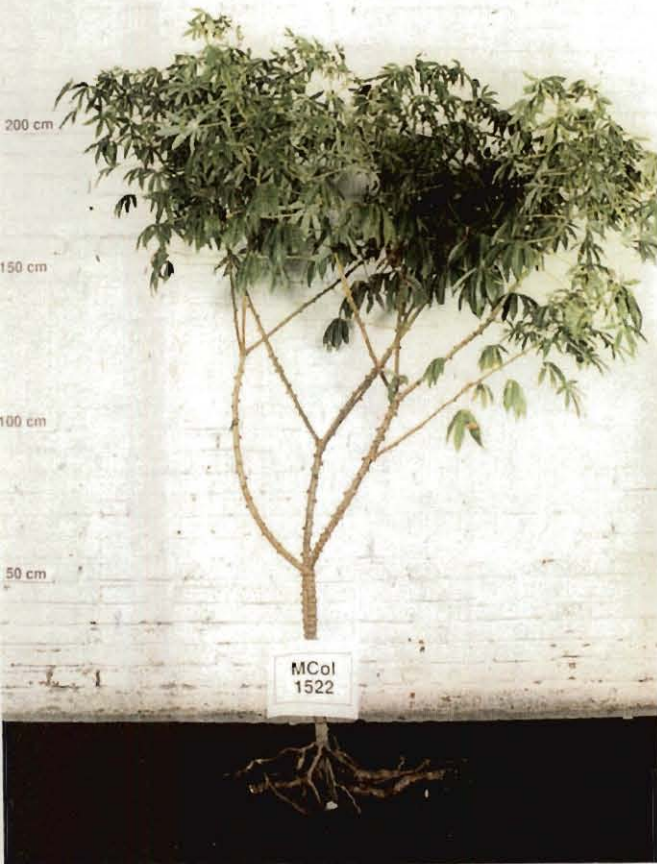
La lecture se fait alors à 620 nm après celle des échantillons standards.

Planche n°2: Le MANIOC (*Manihot Esculenta*)

Photo n°1: Plant de manioc de la variété "Algodona" cultivé au CIAT et récolté à 8 mois au lieu de 14 comme c'est généralement le cas pour cette variété, ce qui explique la faible taille des tubercules.

Photo n°2: Parcelles de manioc du CIAT- Essais réalisés pour le programme CEE "Valorisation du manioc en Amérique Latine".

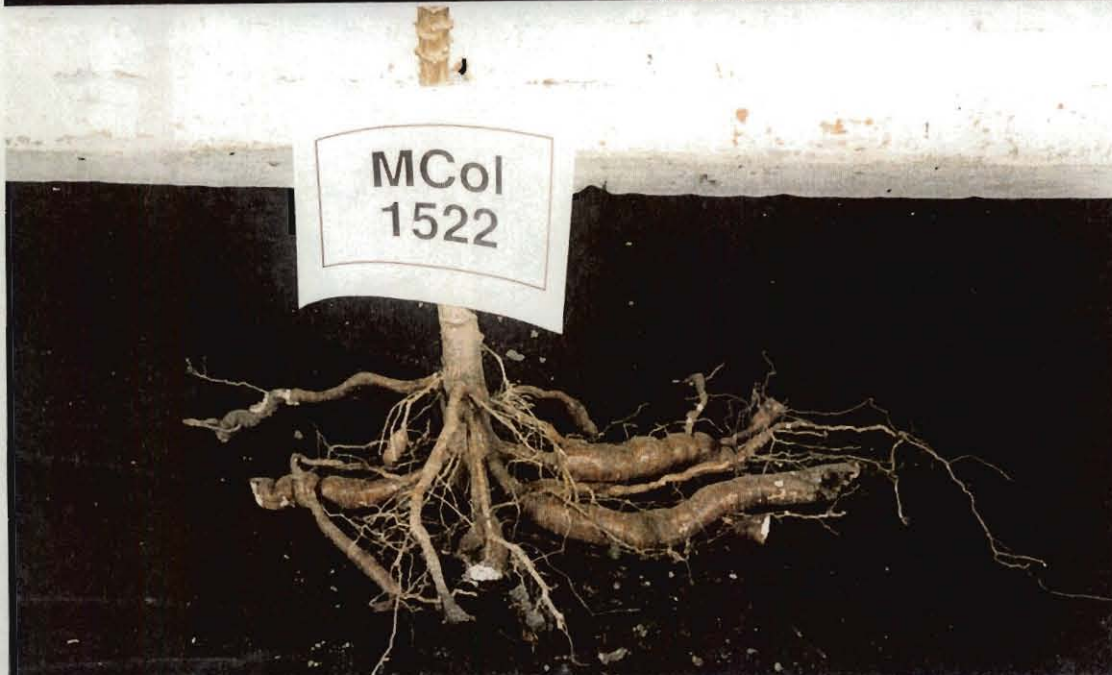
Photo n°3: Détail du pied de manioc de la variété "Algodona". C'est du tubercule qu'est extrait l'amidon servant à la réalisation des essais.



1.



2.



3.

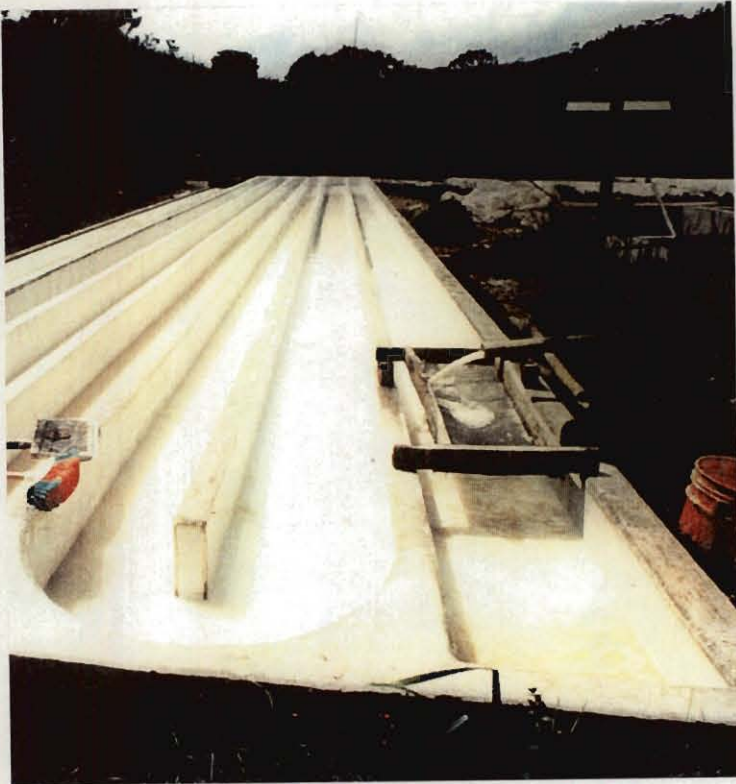
Planche n°3: La rallanderia

Photo n°1: Canaux de sédimentation où arrive le lait d'amidon après extraction par voie humide.

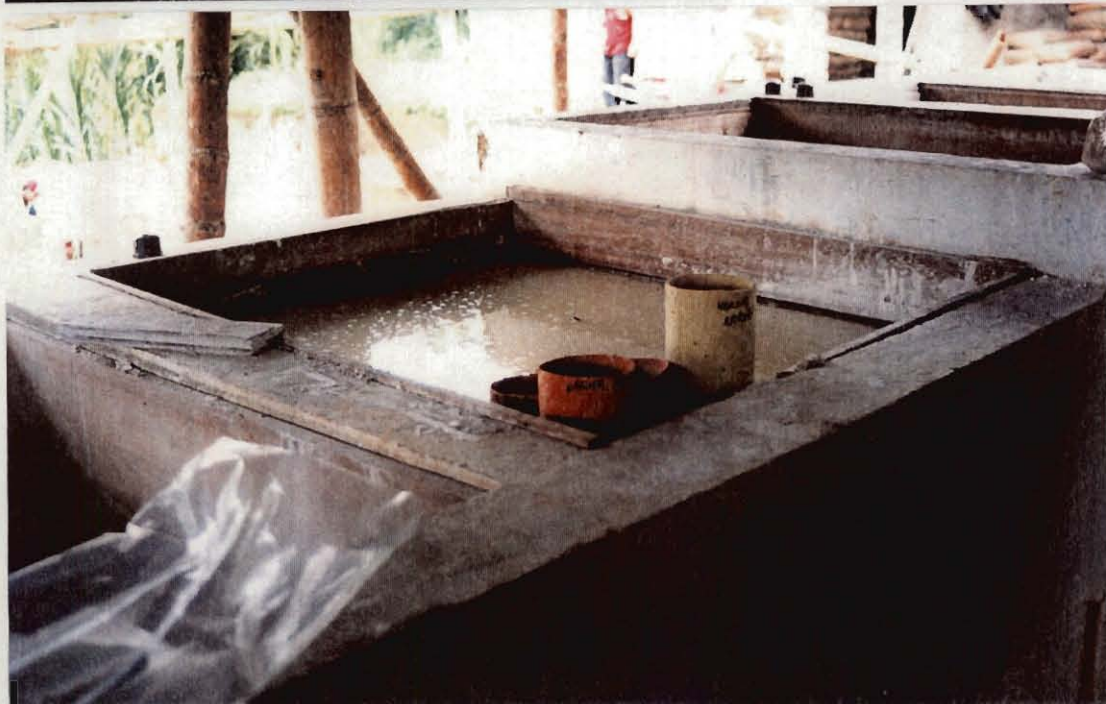
Photo n°2: Tank de fermentation- le 4e jour suivant l'extraction, l'amidon est transféré dans ce tank. Les parois sont recouvertes de bois permettant la conservation des germes favorables à la fermentation.

Photo n°3: Prélèvement d'amidon pour le suivi de fermentation à l'aide d'une tarière de géologue dans le tank de fermentation.

1.



2.



3.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

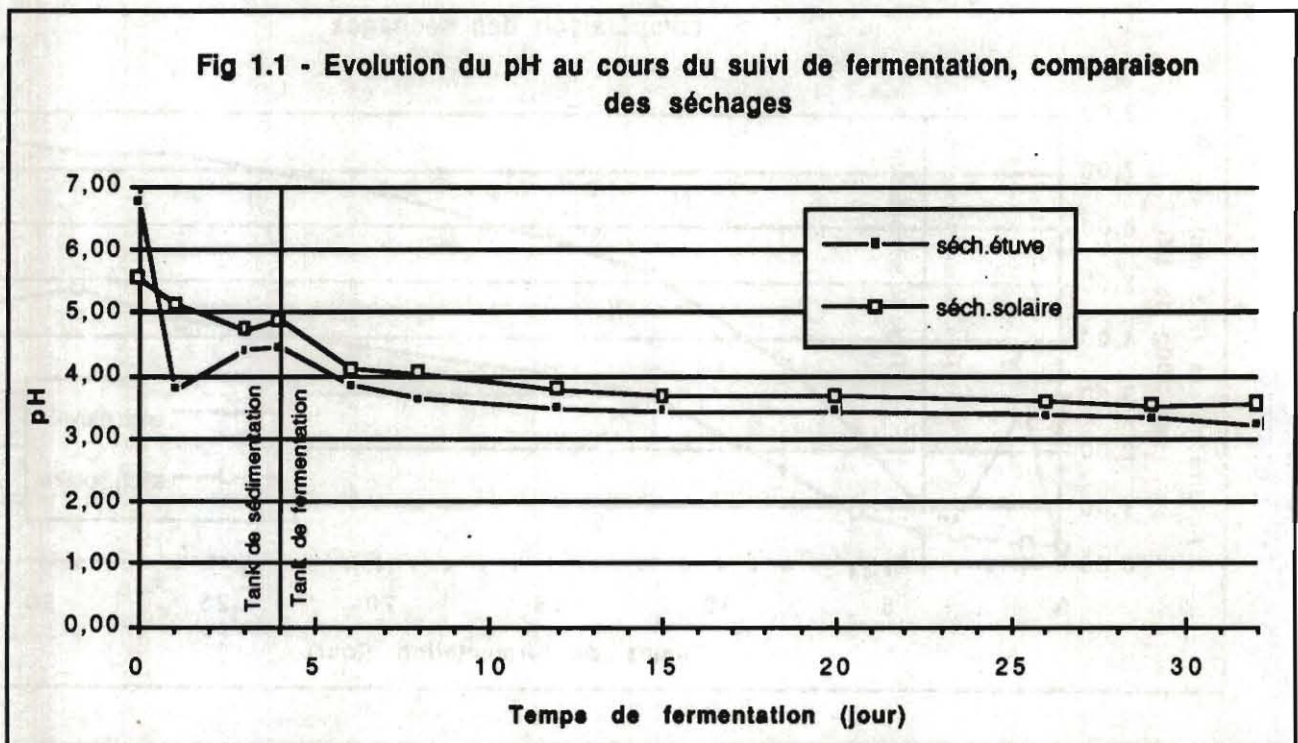
RÉSULTATS ET DISCUSSION

PARTIE I- EFFET DE LA FERMENTATION SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE L'AMIDON DE MANIOC

1- PH. ACIDITÉ TOTALE ET ACIDE LACTIQUE

1.1- EVOLUTION DU PH

(cf. fig 1.1)



Quelque soit le type de séchage, le pH décroît très rapidement pour se stabiliser au 15^e jour à 3,5. La différence de pH, pour une date donnée, entre le séchage solaire et le séchage à l'étuve n'excède pas les 0,5 après le 1^{er} jour de fermentation.

Pour tous les prélèvements, le pH après séchage solaire est légèrement supérieur au pH après séchage étuve.

discussion

Le pH se stabilise à une valeur très proche du pKa de l'acide lactique (3,45). L'acide lactique doit donc être responsable d'un effet tampon qui stabilise le pH.

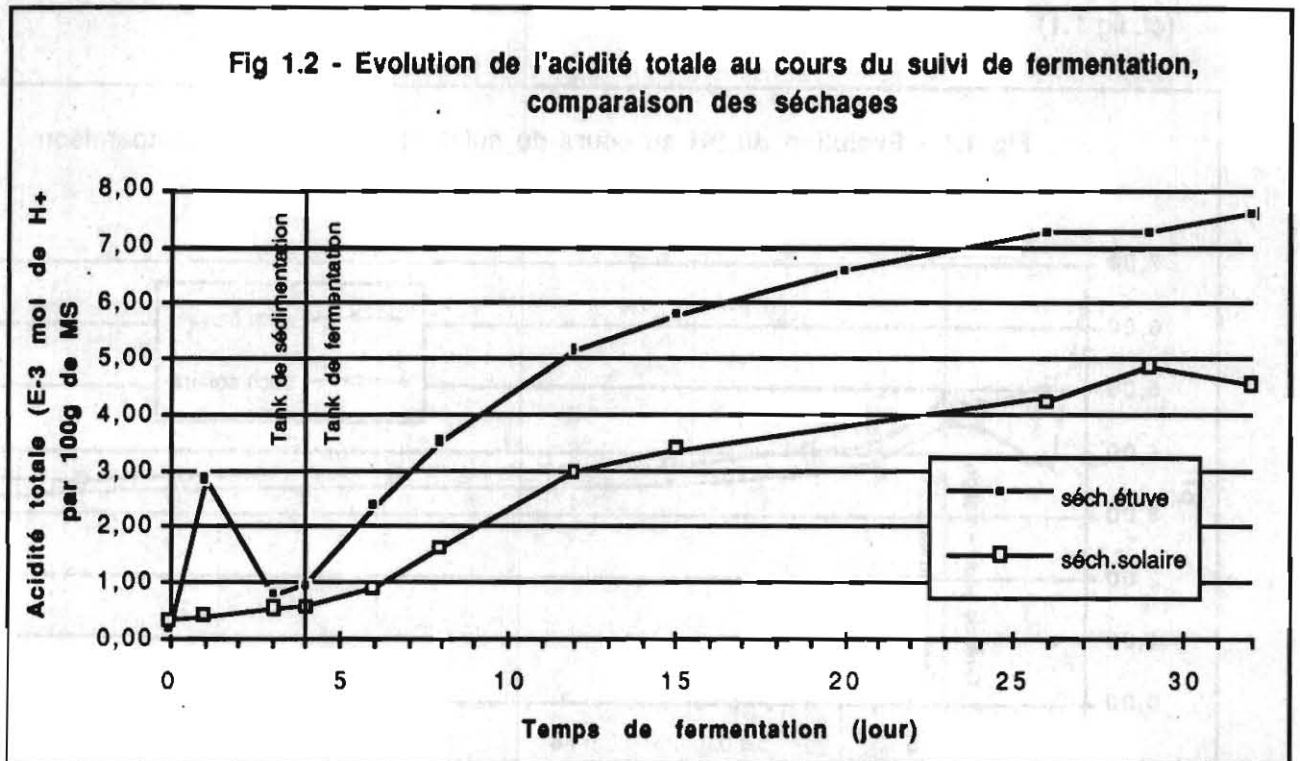
La brusque diminution du pH durant les 6 premiers jours de fermentation est liée au développement de la flore lactique (BRABET et al, 1994). Après le 5^e jour, le milieu de fermentation se stabilise mais de l'acide lactique est toujours produit.

La légère hausse de pH après séchage solaire peut être liée:

- à une volatilisation de l'acide lactique,
- à une utilisation de l'acide lactique dans une réaction photochimique,
- à un déplacement de l'équilibre lactique/lactate en faveur du lactate (LARSONNEUR, 1992).

1.2- EVOLUTION DE L'ACIDITÉ TOTALE

(cf. fig 1.2)



Quelque soit le séchage, les 2 courbes ont une allure semblable: l'acidité totale augmente faiblement durant les 5 premiers jours, puis beaucoup plus rapidement après. Jusqu'au 5^e jour, les valeurs sont très proches (0,7 mmol de H⁺/100g de MS). Puis la différence entre les deux courbes, pour une date de prélèvement donnée, va croissante selon le séchage. En fin de fermentation, l'acidité totale est beaucoup plus forte après séchage à l'étuve (7,5 mmol de H⁺/100g de MS) qu'après séchage solaire (4,5 mmol de H⁺/100g de MS).

Remarque:

Le point J1 séché à l'étuve présente une valeur anormale: jusqu'au 3^e jour inclu, les valeurs ne correspondent pas à la fermentation stabilisée. Le tank de fermentation est rempli le 4^e jour.

discussion

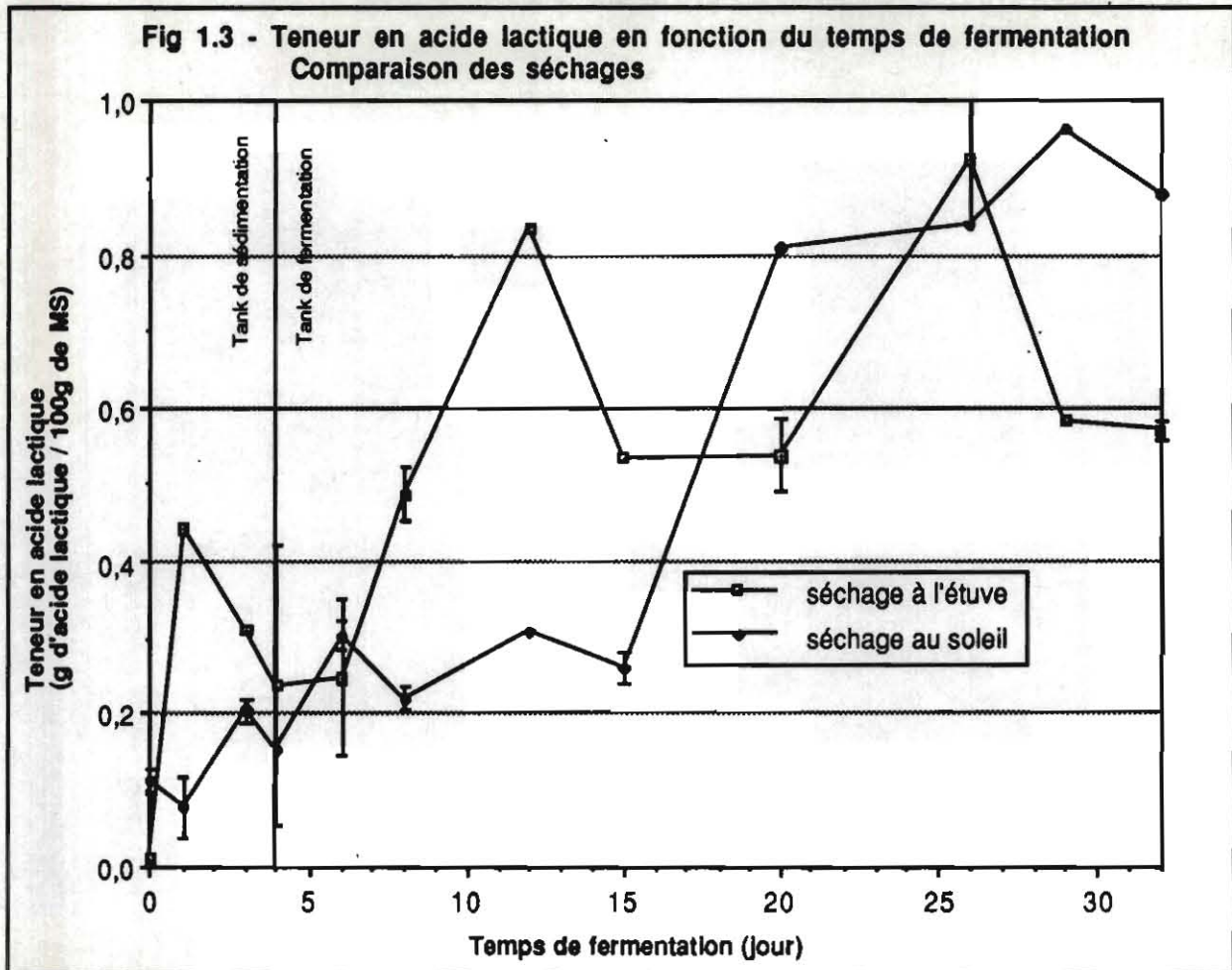
L'évolution de l'acidité totale ne reflète le développement de la fermentation qu'à partir du 4^e jour de fermentation. Les 4 premiers jours correspondent à différentes phases d'extraction et de sédimentation. Un début de fermentation s'y est déjà produit, ce qui explique la diminution du pH après séchage étuve de 6,8 à 4,5, et la légère augmentation de l'acidité totale après séchage étuve de 0,3 à 0,9 mmol de H⁺/100g de MS.

A partir du 4^e jour, la production d'acides est régulière jusqu'en fin de fermentation, alors que dans le même temps, le pH ne diminue que de 1 pour se stabiliser à 3,5. Cette faible diminution du pH est liée à l'effet tampon de l'acide lactique pour des valeurs de pH proche de son pKa.

Dans les 5 premiers jours, le pH diminue très fortement, alors que l'acidité totale augmente faiblement. Du 5^e au 15^e jour, le pH varie très peu, alors que l'acidité totale augmente beaucoup.

1.3- EVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE LACTIQUE

(cf. fig 1.3 - Toutes ces analyses sont en cours de répétition)



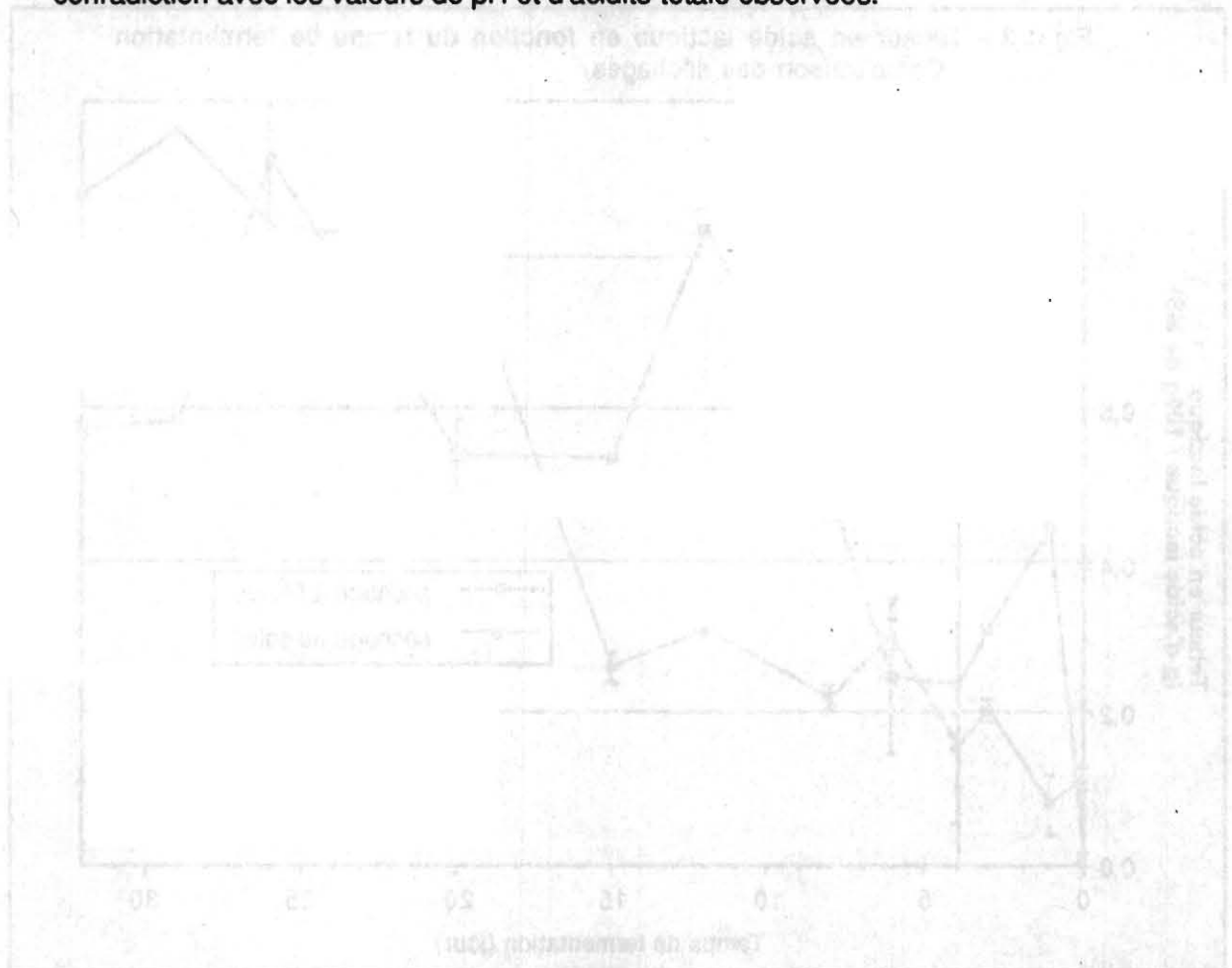
Jusqu'au 15^e jour, la teneur en acide lactique après séchage solaire est inférieure à la teneur en acide lactique après séchage à l'étuve. Cette tendance s'inverse après le 15^e jour. Après séchage à l'étuve, les valeurs vont de 0,09g/100g de MS à un peu plus de 0,8g/100g de MS. Après séchage solaire, les valeurs oscillent entre 0,1g/100g de MS à un peu plus de 0,9g/100g de MS.

Remarque:

Les valeurs obtenues sont mauvaises d'une manière générale. On devrait assister, comme cela s'est vu pour d'autres suivis de fermentation, à une croissance régulière de la teneur en acide lactique au cours du suivi de fermentation. Il est surprenant, compte tenu des résultats de pH et d'acidité totale corrects obtenus, d'avoir des résultats d'HPLC aussi mauvais.

discussion

LARSONNEUR (1992) a montré qu'après séchage solaire, les teneurs en acide lactique sont inférieures à celles observées après séchage étuve. Les résultats obtenus ici sont en contadiction avec ceux de LARSONNEUR après le 15^e jour de fermentation, et en conradiction avec les valeurs de pH et d'acidité totale observées.



2- EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

21- L'INFLUENCE DU MILIEU RÉACTIONNEL

Quatre milieux réactionnels ont été testés:

- de l'eau (milieu I),
- une solution d'inhibiteur enzymatique HgCl₂ à 0,01M (milieu II),
- du tampon phosphate 0,02M (milieu III),
- Une solution d'inhibiteur HgCl₂ 0,01M en tampon phosphate 0,02M (milieu IV).

Trois échantillons issus du même amidon (E) ont été utilisés: de l'amidon doux (J0), de l'amidon au 8^e jour de prélèvement (J8), et de l'amidon aigre au 32^e jour de prélèvement (J32).

(cf. fig 1.4, fig 1.5, fig 1.6)

Fig 1.4 - Amidon doux de manioc après séchage à l'étuve - test de différents milieux de réalisation du viscoamylogramme

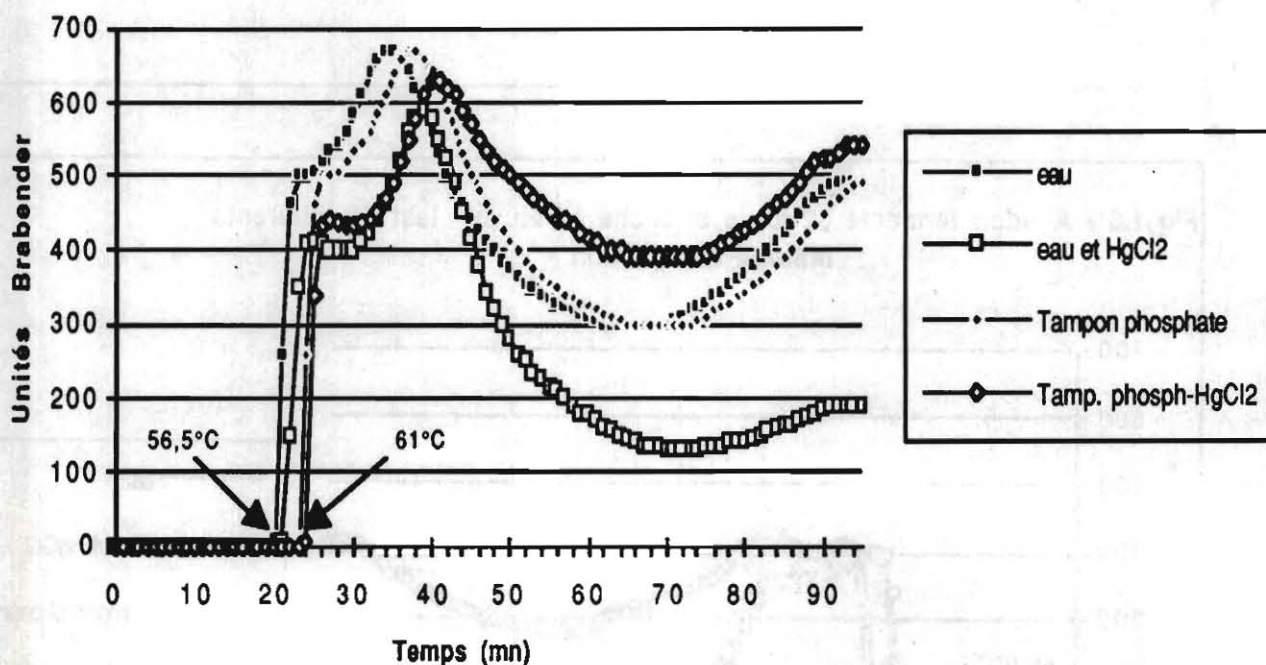


Fig 1.5 - Amidon fermenté 8 jours et séché à l'étuve - test de différents milieux de réaction

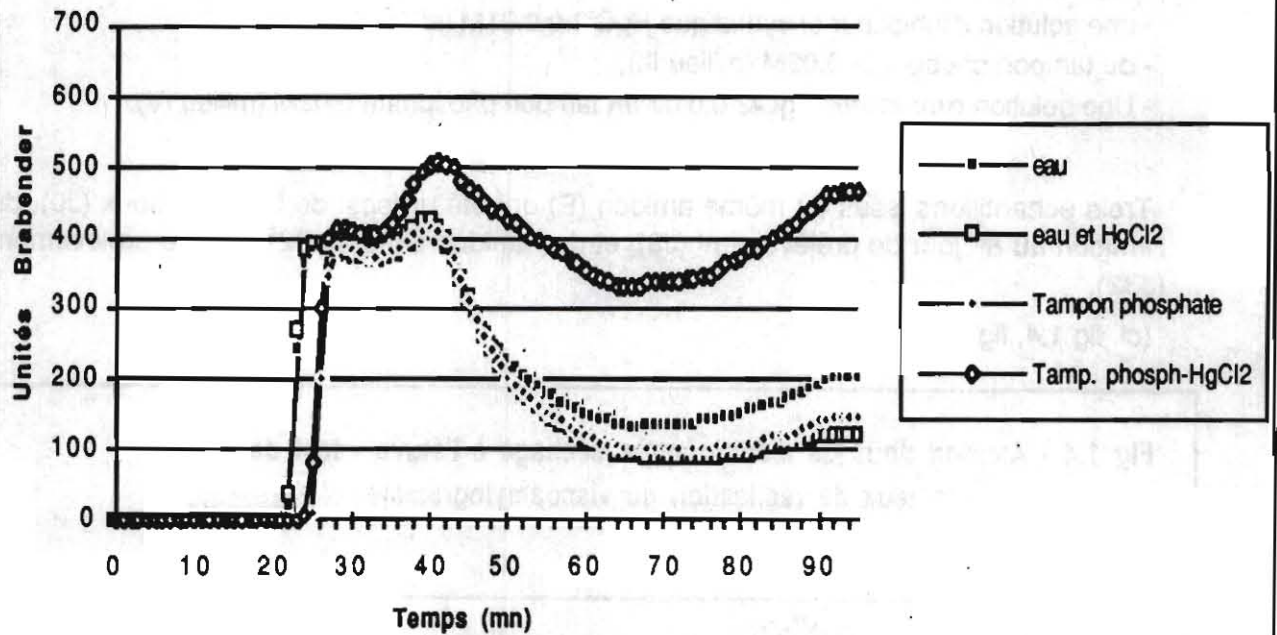
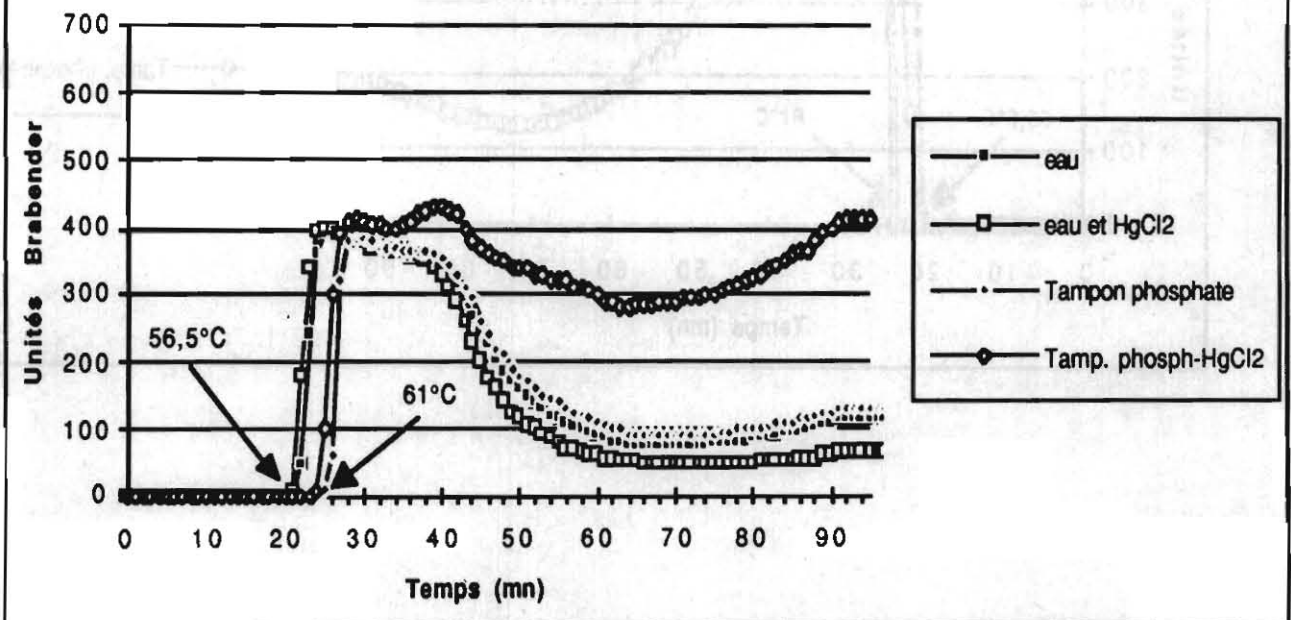


Fig 1.6 - Amidon fermenté 32 jours et séché à l'étuve - test de différents milieux de réaction



L'EFFET DU TAMPON PHOSPHATE

• Pour les viscoamylogrammes réalisés dans l'eau, la gélatinisation intervient à 56,5°C. En tampon phosphate, la température de gélatinisation est de 61°C. Un pH contrôlé et égal à 6,5 entraîne donc une augmentation de la température de gélification.

• La figure 1.4 met par ailleurs en évidence des différences de température d'obtention de la viscosité maximale qui sont reportées sur le tableau 1.1.

Milieu	Viscosité maximum (unité Brabender)	Température correspondante (°C)
eau (I)	670	76,0
solution d'inhibiteur (II)	590	83,5
tampon phosphate (III)	670	81,4
Solution d'inhibiteur en tampon phosphate (IV)	630	85,8

La présence du tampon phosphate entraîne une augmentation de 5,4°C de la température d'obtention de la viscosité maximale quand il n'y a pas d'inhibiteur dans le milieu, et de 2,25°C l'analyse est faite en présence d'inhibiteur.

Le tampon joue donc aussi sur l'obtention de la viscosité maximale qu'il retarde, et son effet est atténué en tampon inhibiteur. Sur l'amidon fermenté, ce phénomène ne s'observe plus, et les températures d'obtention de la viscosité maximale sont toutes les mêmes.

• Le tableau 1.2 montre les pH en début et en fin de viscoamylogrammes en fonction du prélèvement et du milieu réactionnel utilisé.

Milieu réactionnel	Jour 0		Jour 8		Jour 32	
	pH début	pH fin	pH début	pH fin	pH début	pH fin
(I)	/	/	3,65	3,85	3,45	3,55
(III)	/	/	6,65	/	6,55	/
(II)	4,50	/	3,65	/	3,45	3,40
(IV)	6,55	6,45	6,54	6,50	6,55	6,45

Si une hydrolyse acide intervenait pour expliquer la différence de température de gélatinisation avec ou sans tampon phosphate, on devrait observer des différences de température de gélatinisation entre J0, J8 et J32 pour les courbes I et III.

L'EFFET DE L'INHIBITEUR

L'ajout d'inhibiteur au milieu réactionnel n'entraîne pas de modification de la température de gélatinisation.

Pour l'amidon doux

(cf. fig 1.4)

La comparaison des courbes I et II d'une part et des courbes III et IV d'autre part montre que l'ajout d'inhibiteur entraîne une diminution nette des 2 pics de viscosité maximums, de même qu'il s'accompagne d'un décalage dans le temps du 2e pic de viscosité. La rétrogradation en tampon+inhibiteur est moins forte qu'en tampon, alors que la rétrogradation en eau+inhibiteur est plus forte qu'en eau.

La tendance donnée par l'ajout de d'inhibiteur au début du viscoamylogramme est une diminution de la viscosité. Dans l'eau, cette tendance reste la même sur la fin du viscoamylogramme alors qu'elle s'inverse dans le tampon phosphate.

On observe que l'inhibiteur agit plutôt sur la première phase du viscoamylogramme, alors que le phosphate couplé à l'inhibiteur agit plutôt sur la phase de rétrogradation.

La comparaison des milieux eau et tampon montre que le tampon seul modifie très peu le viscoamylogramme. La comparaison eau+inhibiteur / tampon+inhibiteur montre au contraire une différence importante entre les courbes.

Pour l'amidon fermenté 8 jours

(cf. fig 1.5)

Les milieux eau et eau+inhibiteur donnent des courbes (I et II) quasiment identiques. Les pics de viscosité ne changent pas et on constate que la rétrogradation est plus forte avec l'inhibiteur.

La comparaison des milieux tampon et tampon+inhibiteur (II et III) montre qu'avec inhibiteur, les pics de viscosité sont plus élevés, et que la rétrogradation est plus faible.

L'ajout d'inhibiteur, contrairement à ce qu'on observe avec l'amidon doux, augmente les pics de viscosité lorsqu'il est dissout dans le tampon phosphate. Comme dans le cas de l'amidon doux, l'inhibiteur favorise la rétrogradation dans l'eau, et la réduit dans le tampon.

Pour l'amidon fermenté 32 jours

(cf. fig 1.6)

On remarque que le 2nd pic de viscosité disparaît. Le comportement de l'amidon dans les différents milieux de viscosité est sinon le même que dans le cas de l'amidon fermenté 8 jours. Par rapport à la figure 1.8, les courbes de rétrogradation des milieux eau et tampon se sont simplement inversées.

SYNTHÈSE

- Le tampon phosphate influe surtout sur la température de gélatinisation. Son effet sur les maximums de viscosité ne se manifeste que pour l'amidon doux et son effet sur la rétrogradation est faible.

- L'inhibiteur agit surtout sur les maximums de viscosité: ils sont diminués pour l'amidon doux, et augmentés pour le 8e et le 32e jour de fermentation.

Sur la phase de rétrogradation, l'inhibiteur agit en favorisant la rétrogradation lorsqu'il est dissout dans l'eau, et en la freinant lorsque qu'il est dissout dans le tampon phosphate.

Son effet lorsqu'il est dissout dans l'eau se manifeste très nettement dans le cas de l'amidon doux, et très faiblement dans le cas du 8e et du 32e jour de fermentation. Son effet se manifeste toujours de façon nette lorsqu'il est dissout dans le tampon phosphate.

DISCUSSION

Les ions phosphates apportés par le tampon modifient les propriétés de gonflement du grain d'amidon et retarde celui-ci. Les ions renforcent la cohésion entre les molécules d'amidon et confèrent ainsi une résistance à la gélatinisation.

Le fait qu'on constate une différence sur les viscoamylogrammes, en la présence et en l'absence d'inhibiteur peut traduire la présence d'enzymes dans l'amidon de manioc pendant le déroulement du viscoamylogramme.

Dans ce cas les enzymes présentes dans l'amidon auraient une activité forte en tampon phosphate. En effet, d'une manière générale, la différence entre les courbes eau et eau+inhibiteur est très faible (pH 3,5 à 4,5) -sauf dans le cas de l'amidon doux-, et la différence entre les courbes tampon et tampon+inhibiteur est très marquée (pH 6,5).

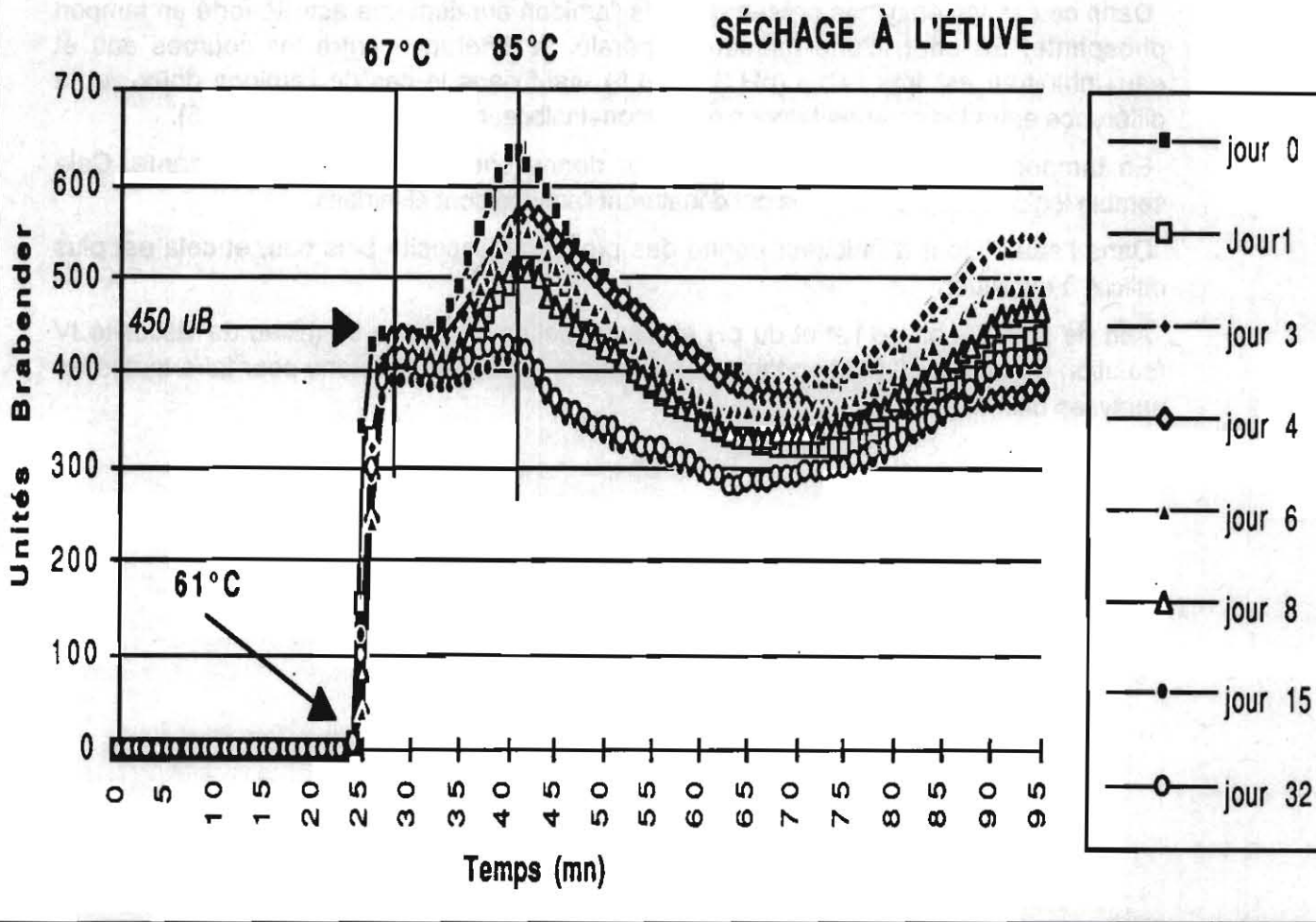
En tampon phosphate, l'ajout d'inhibiteur donne une viscosité plus importante. Cela semble logique car les enzymes qui dénaturent l'amidon sont éliminées.

Dans l'eau, l'ajout d'inhibiteur donne des profils de viscosité plus bas, et cela est plus difficile à expliquer.

Afin de s'affranchir de l'effet du pH et d'éventuelles amylases, le milieu de viscosité IV (solution d'inhibiteur 0,01M en tampon phosphate 0,02M) a été retenu pour faire toutes les analyses ultérieures.

2.2- PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES APRÈS SÉCHAGE À L'ÉTUVE
(cf. fig 1.7)

Fig 1.7 - Evolution des propriétés rhéologiques de l'amidon au cours de la fermentation



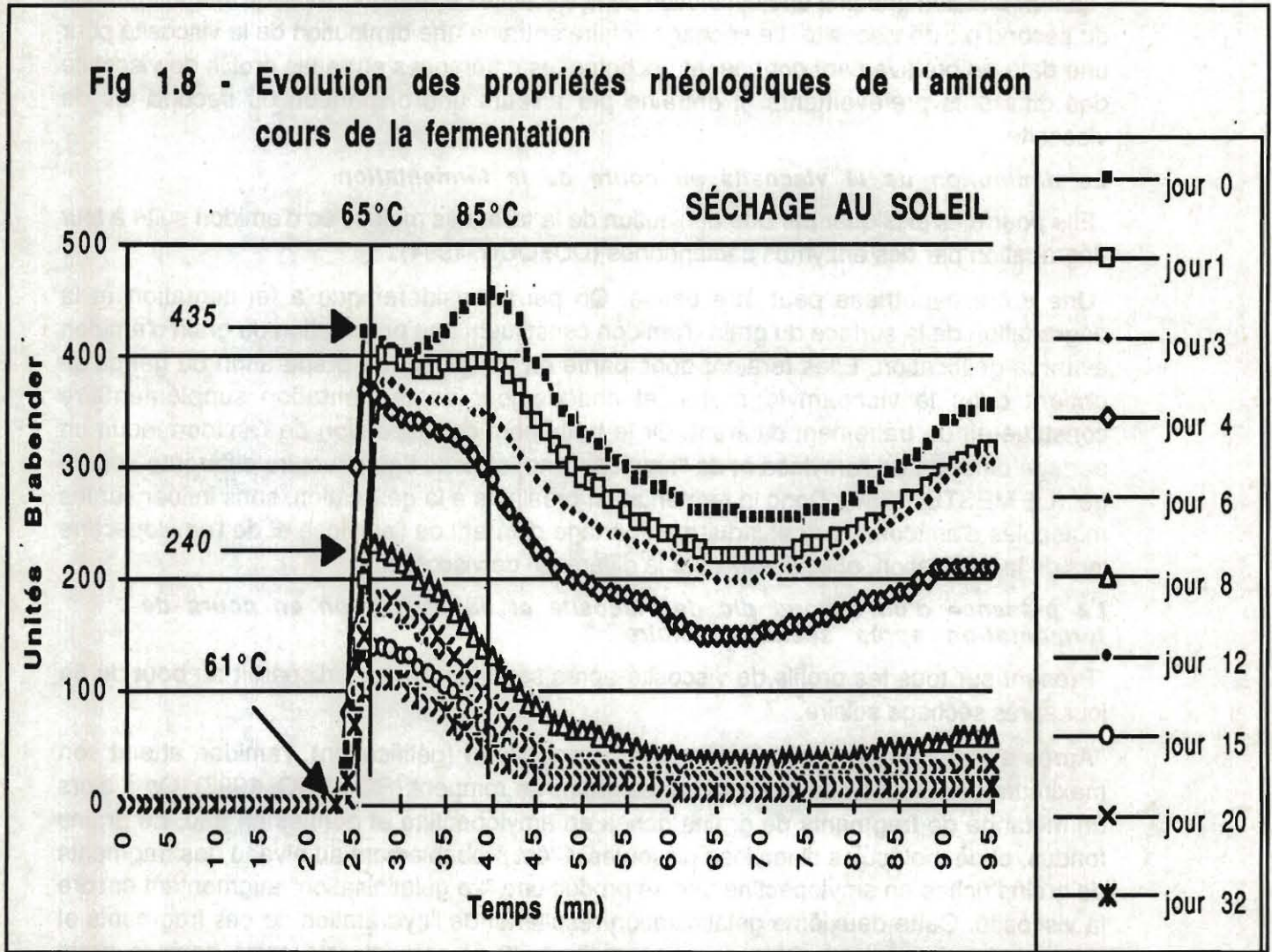
Les viscoamylogrammes montrent un léger changement des propriétés viscoélastiques de l'amidon au cours de la fermentation.

La température de gélatinisation (61°C) et le premier pic de viscosité (67°C, 450 unités Brabender) sont les mêmes pour tous les échantillons. C'est après 80°C, lorsque le second pic de viscosité apparaît (maximum à 88°C) que des différences apparaissent entre les profils de viscosité. Plus le temps de fermentation est important, plus la valeur du second pic de viscosité diminue. Elle passe ainsi de 650 à 400 unités Brabender au cours de la fermentation. Le second pic tend en fait à s'estomper en fin de fermentation.

La différence qui apparaît entre les profils vers 85°C se conserve jusqu'au bout du viscoamylogramme. Ainsi, les courbes de rétrogradation ont des allures très similaires, mais des valeurs différentes en fonction du temps de fermentation.

2.3- APRÈS SÉCHAGE AU SOLEIL

(cf. fig 1.8)



Le séchage solaire accentue les différences entre les viscoamylogrammes. La température de gélatinisation ne change pas (61°C). Les premiers pics de viscosité apparaissent tous à 65°C et ont des valeurs très variables, allant de 435 à 120 unités Brabender entre le début et la fin de la fermentation. On observe entre le 4^e et le 6^e jour une chute de 150 unités Brabender de ce premier pic.

Le second pic apparaît à 88°C. On le distingue jusqu'au 4^e jour et il disparaît entre le 4^e et le 6^e jour. Les valeurs de viscosité à 88°C décroissent de 450 à 150 unités Brabender entre le début et la fin de la fermentation.

La fraction de la courbe correspondant à la rétrogradation se modifie également entre le 4^e et le 6^e jour. Jusqu'au 4^e jour, les courbes de rétrogradation ont des allures très similaires, mais avec des valeurs de viscosité décroissantes avec le temps de fermentation. A partir du 6^e jour, la tendance à la rétrogradation disparaît

2.4- SYNTHÈSE

La fermentation entraîne une diminution de la viscosité de l'amidon, ainsi qu'une atténuation du second pic de viscosité. Le séchage solaire entraîne une diminution de la viscosité pour une date de prélèvement donnée, et accentue les différences entre les profils de viscosité des différents prélèvements. Il entraîne par ailleurs une disparition du second pic de viscosité.

La diminution de la viscosité au cours de la fermentation

Elle pourrait s'expliquer par une diminution de la taille des molécules d'amidon suite à leur dégradation par des enzymes bactériennes (DUFOUR, 1994).

Une autre hypothèse peut être émise. On peut considérer que la fermentation et la dégradation de la surface du grain d'amidon constituent une préparation du grain d'amidon avant la gélification. Elles feraient donc partie du traitement de préparation du gel qu'on obtient dans le viscoamylographe, et chaque jour de fermentation supplémentaire constituerait un traitement différent. Or le traitement de dispersion de l'amidon induit un partage différent de l'amylose et de l'amylopectine, et donc une structure différente pour le gel (LE MESTE, 1988). Donc la fermentation préalable à la gélification, sans influencer sur les molécules d'amidon, pourrait induire un partage différent de l'amylose et de l'amylopectine lors de la gélification, et ainsi expliquer la différence de viscosité.

La présence d'un second pic de viscosité et sa disparition en cours de fermentation après séchage solaire

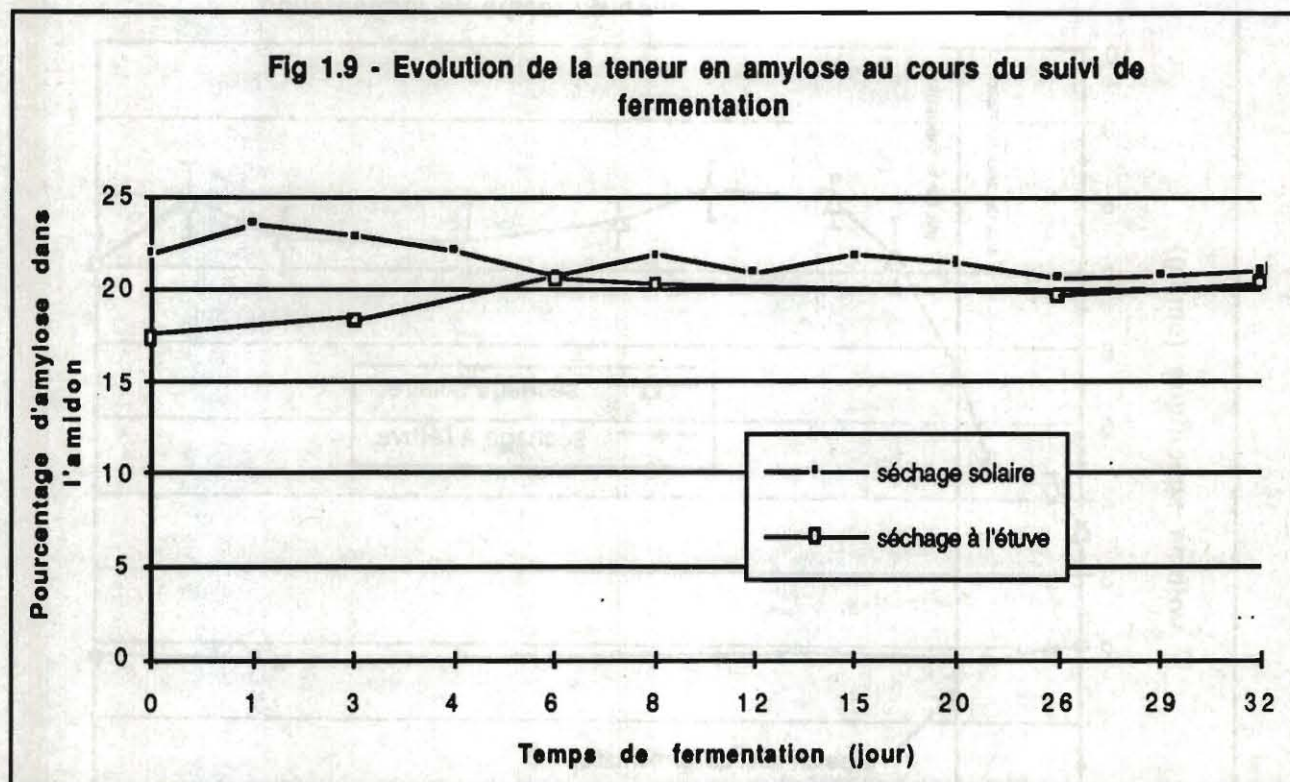
Présent sur tous les profils de viscosité après séchage étuve, il disparaît au bout du 6^e jour après séchage solaire.

Après s'être hydraté une première fois brusquement (gélification), l'amidon atteint son maximum de viscosité au moment où les grains se rompent (ROMERO, 1993). On a alors un mélange de fragments de grains riches en amylopectine et gonflés en eau, de grains fondus, et de molécules d'amylose dissoutes. C'est probablement au niveau des fragments de grains riches en amylopectine que se produit une "2^e gélatinisation" augmentant encore la viscosité. Cette deuxième gélatinisation résulterait de l'hydratation de ces fragments et d'une seconde rupture. Cela suppose qu'il y a 2 niveaux de structure dans le grain d'amidon, l'un dégradé à 61°C, l'autre dégradé à 88°C.

Après 6 jours de fermentation et séchage solaire, le second pic disparaît de tous les viscoamylogrammes. La fermentation combinée au séchage solaire détruirait le deuxième niveau de structure précédemment évoqué.

3- EVOLUTION DE LA TENEUR EN AMYLOSE DE L'AMIDON AU COURS DU SUIVI DE FERMENTATION

(cf fig 1.9)



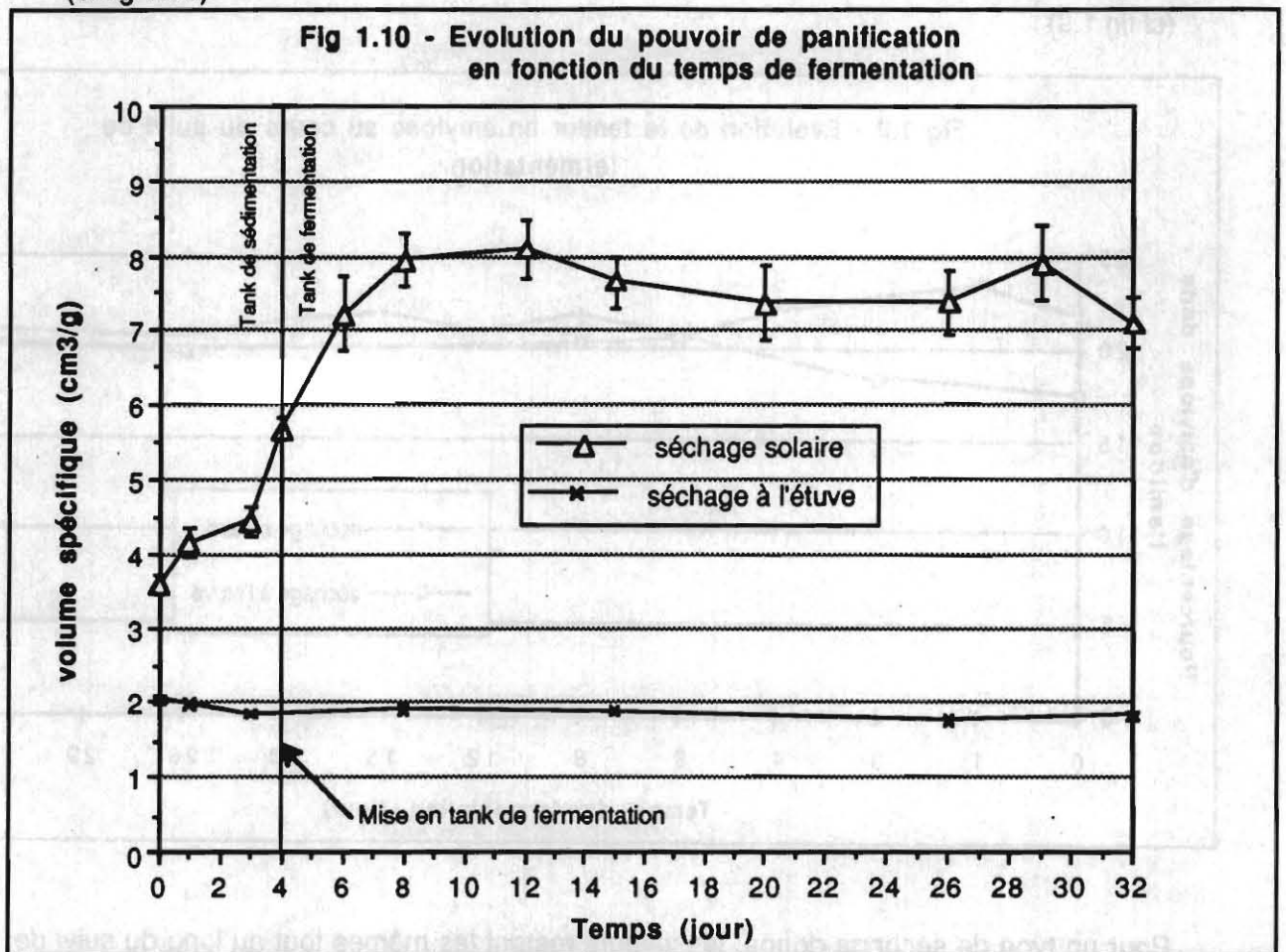
Pour un type de séchage donné, les valeurs restent les mêmes tout au long du suivi de fermentation. Après séchage à l'étuve, la teneur en amylose est proche de 20%, alors qu'après séchage au soleil, elle approche les 22%.

discussion

Ces résultats, corrélés avec ceux des viscoamylogrammes, montrent que la diminution des maximums de viscosité au cours du suivi de fermentation n'est pas dû à une hydrolyse des molécules constitutives de l'amidon.

4- L'ÉVOLUTION DU POUVOIR DE PANIFICATION

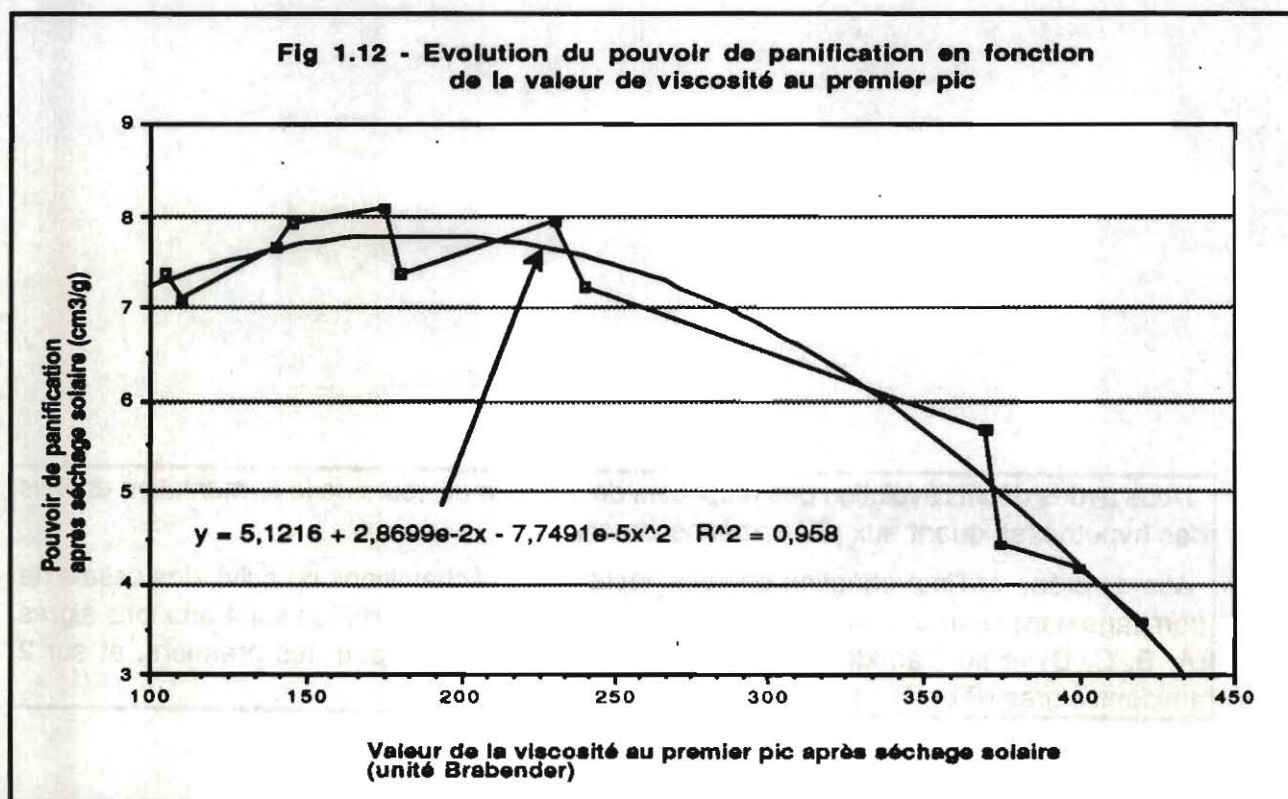
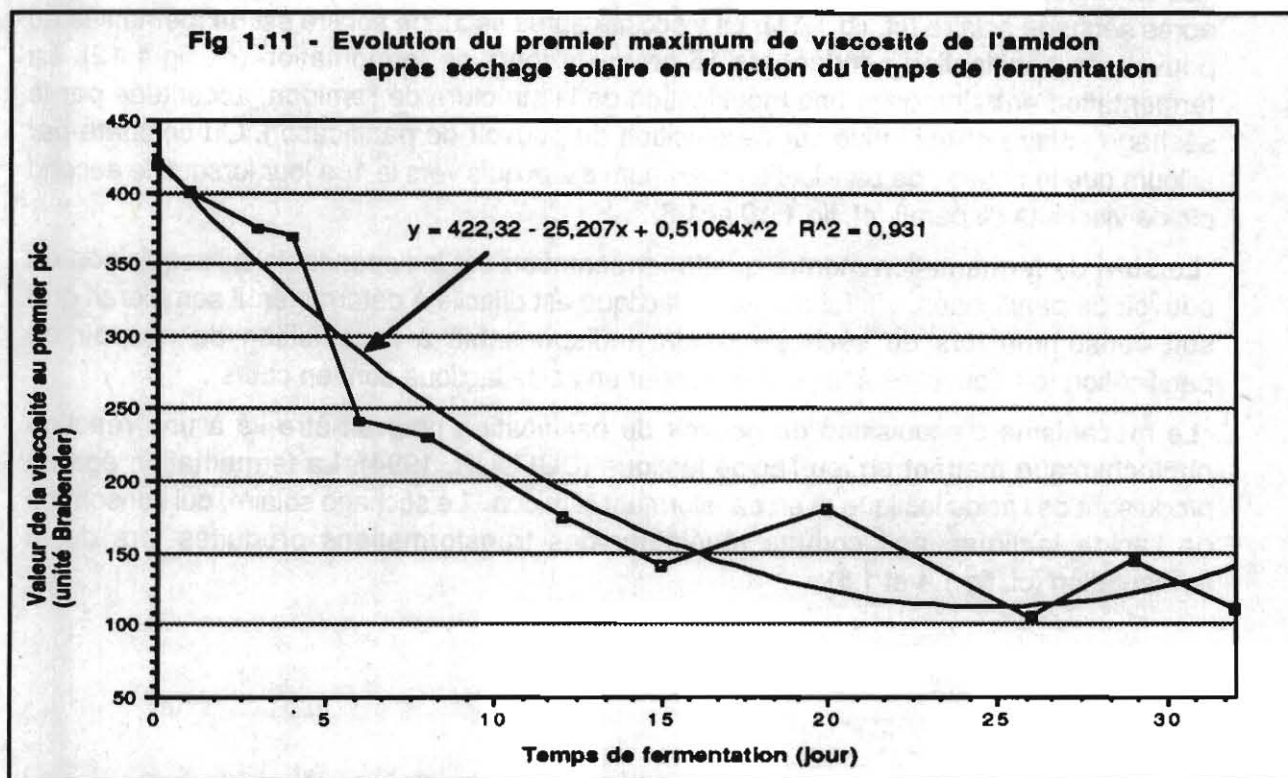
(cf fig 1.10)



Après séchage à l'étuve, le pouvoir de panification reste constant et environ égal à 2 cm³.g⁻¹. Sans aucune fermentation, la simple exposition au soleil de l'amidon fait passer le volume spécifique de 2 à 3,5 cm³.g⁻¹. Après séchage solaire, il augmente de 3,5 pour l'amidon doux, à un peu plus de 8 au 15^e jour de fermentation, puis il se stabilise. On notera une très légère de la viscosité lorsque la panification se poursuit.

5 - SYNTHÈSE

Les profils de viscosité obtenus avec l'amidon (E) présentent 2 optimums. Le second optimum tend à disparaître après séchage solaire et au fur et à mesure que le temps de fermentation augmente.



La viscosité Brabender est liée au temps de fermentation et cela de manière très nette après séchage solaire (cf. fig 1.11). La viscosité après séchage solaire est de même liée au pouvoir de panification pendant les 15 premiers jours de fermentation (cf. fig 1.12). La fermentation entraîne donc une modification de la structure de l'amidon, accentuée par le séchage solaire et qui influe sur l'acquisition du pouvoir de panification. On constate par ailleurs que le pouvoir de panification maximum est acquis vers le 10^e jour lorsque le second pic de viscosité disparaît (cf. fig 1.10 et 1.8).

Le suivi de fermentation montre que la fermentation est indispensable à l'acquisition du pouvoir de panification. L'effet de l'acide lactique est difficile à déterminer. Il semblerait qu'il soit consommé lors du séchage solaire indispensable à l'acquisition du pouvoir de panification (de nouvelles analyses de teneur en acide lactique sont en cours).

Le mécanisme d'acquisition du pouvoir de panification pourrait être lié à une réaction photochimique mettant en jeu l'acide lactique (DUFOUR, 1994). La fermentation agit en produisant de l'acide lactique et en transformant l'amidon. Le séchage solaire, qui consomme de l'acide lactique, agit comme révélateur des transformations produites lors de la fermentation (cf. fig 1.4 et 1.5).

Nous avons décrit l'évolution des propriétés de l'amidon au cours de la fermentation et émis des hypothèses quant aux phénomènes observés.

Afin de préparer l'imprégnation en acide lactique des échantillons du suivi, des essais de trempage dans l'eau et d'imprégnation en acide lactique ont été réalisés sur 4 amidons aigres (A, B, C, D) et sur l'amidon (E) fermenté 3, 26 et 29 jours pour les premiers, et sur 2 amidons aigres (B et C) pour les seconds.

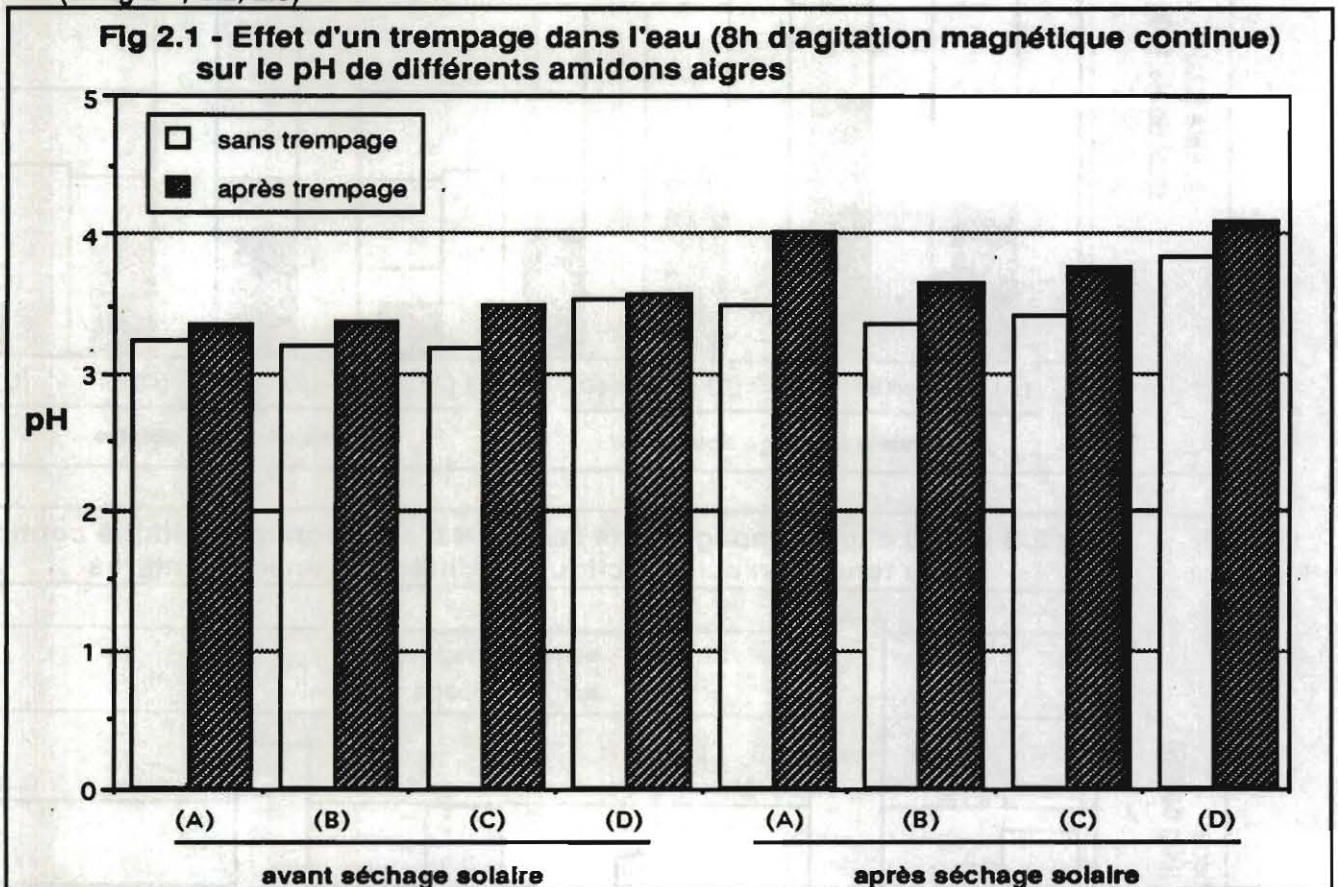
PARTIE II- ESSAIS DE TREMPAGE DANS L'EAU ET D'IMPRÉGNATION EN ACIDE LACTIQUE

1- INFLUENCE DU TREMPAGE DANS L'EAU

11- CAS D'UN TREMPAGE UNIQUE

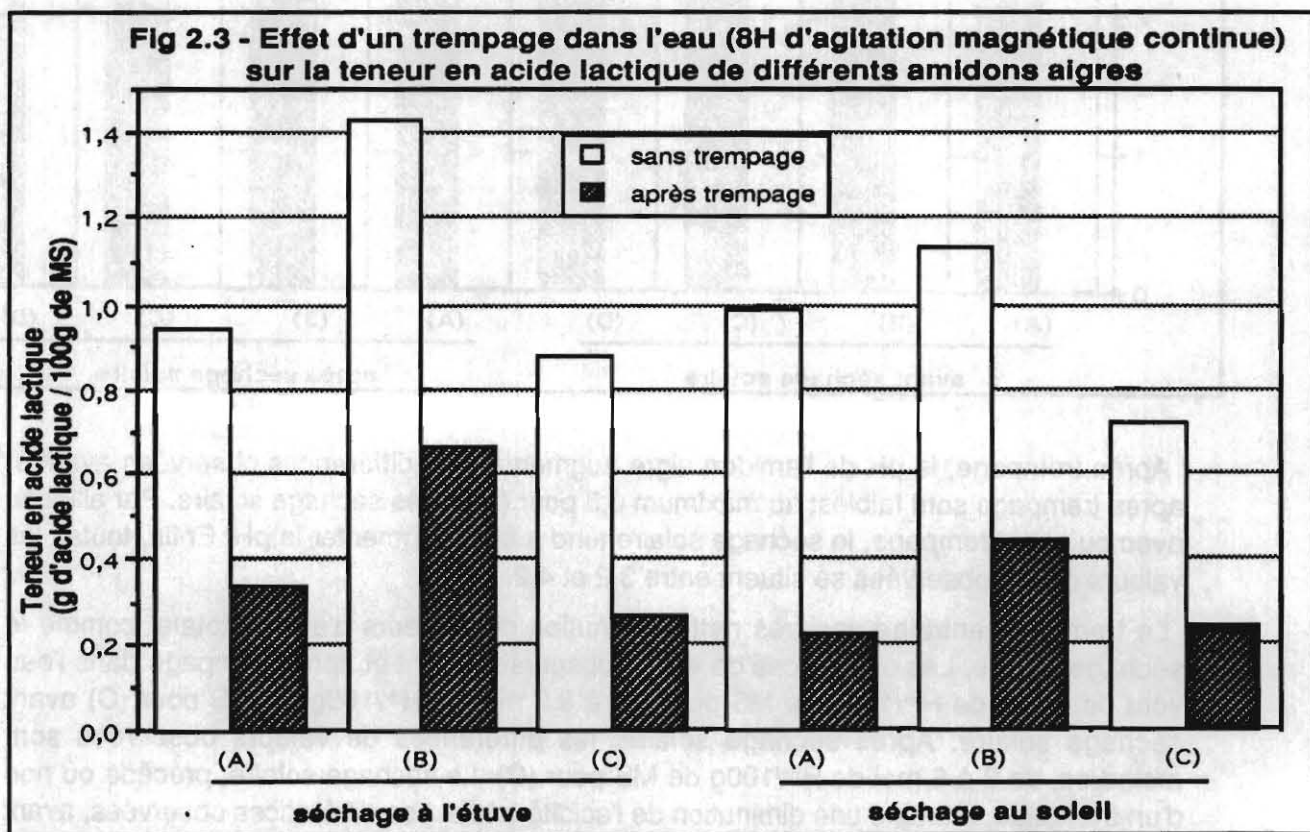
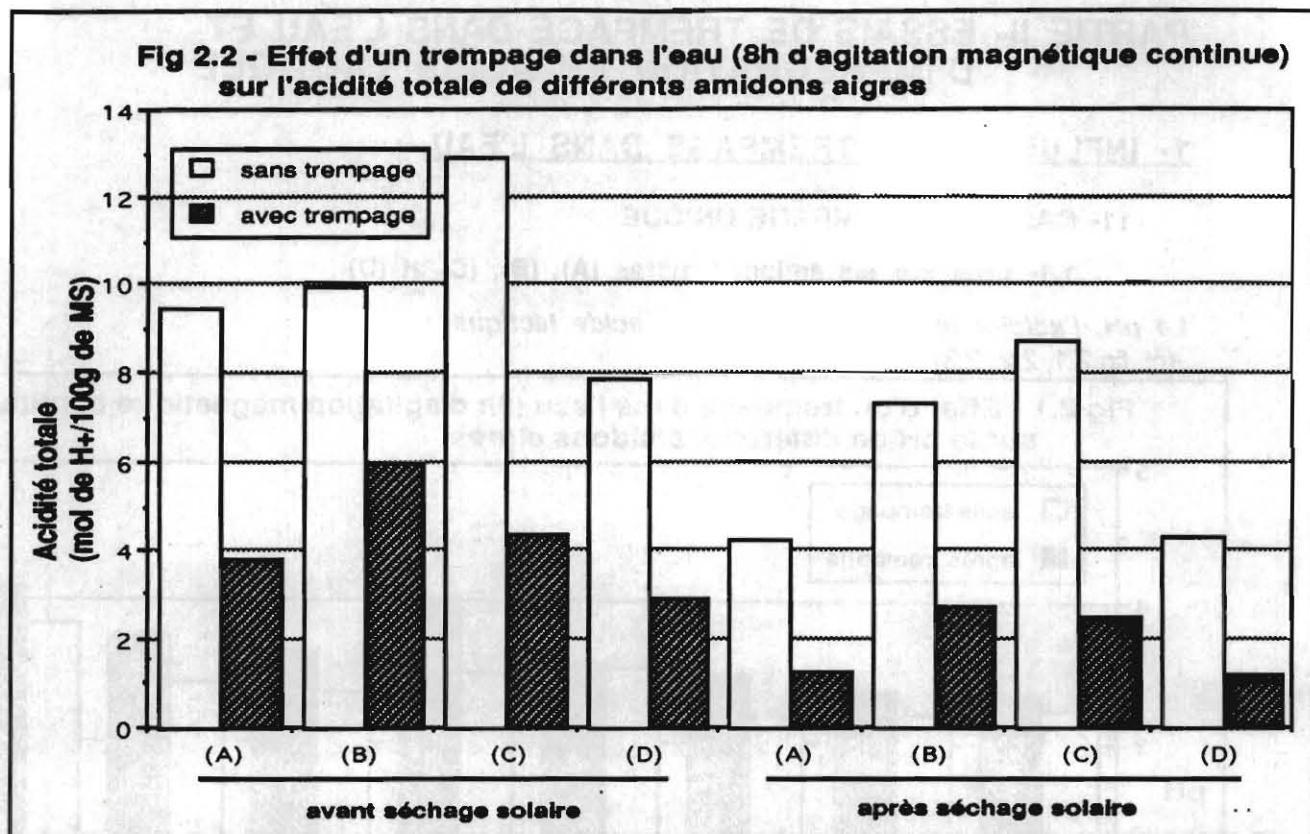
1.1- Effet sur les amidons algres (A), (B), (C) et (D)

Le pH, l'acidité totale et la teneur en acide lactique
(cf. fig 2.1, 2.2, 2.3)



Après trempage, le pH de l'amidon aigre augmente. Les différences observées avant et après trempage sont faibles: au maximum 0,5 pour (A) après séchage solaire. Par ailleurs, avec ou sans trempage, le séchage solaire tend à faire augmenter le pH. Enfin, toutes les valeurs de pH observées se situent entre 3,2 et 4,2.

Le trempage entraîne une très nette diminution des valeurs d'acidité totale, comme le séchage solaire. Les différences de valeur observées avant et après trempage dans l'eau vont de 4 mol de H^+ /100g de MS pour (B) à 8,2 mol de H^+ /100g de MS pour (C) avant séchage solaire. Après séchage solaire, les différences de valeurs observées sont moindres, de 3 à 6 mol de H^+ /100g de MS pour (C). Le séchage solaire, précédé ou non d'un trempage, entraîne une diminution de l'acidité totale. Les différences observées, avant et après séchage solaire sont moindres après trempage dans l'eau.



La teneur en acide lactique diminue après trempage dans l'eau. Le séchage solaire entraîne également une très forte diminution de la teneur en acide lactique.

Avec ou sans trempage, le pH des échantillons avant séchage solaire est très proche de 3,45 le pKa de l'acide lactique.

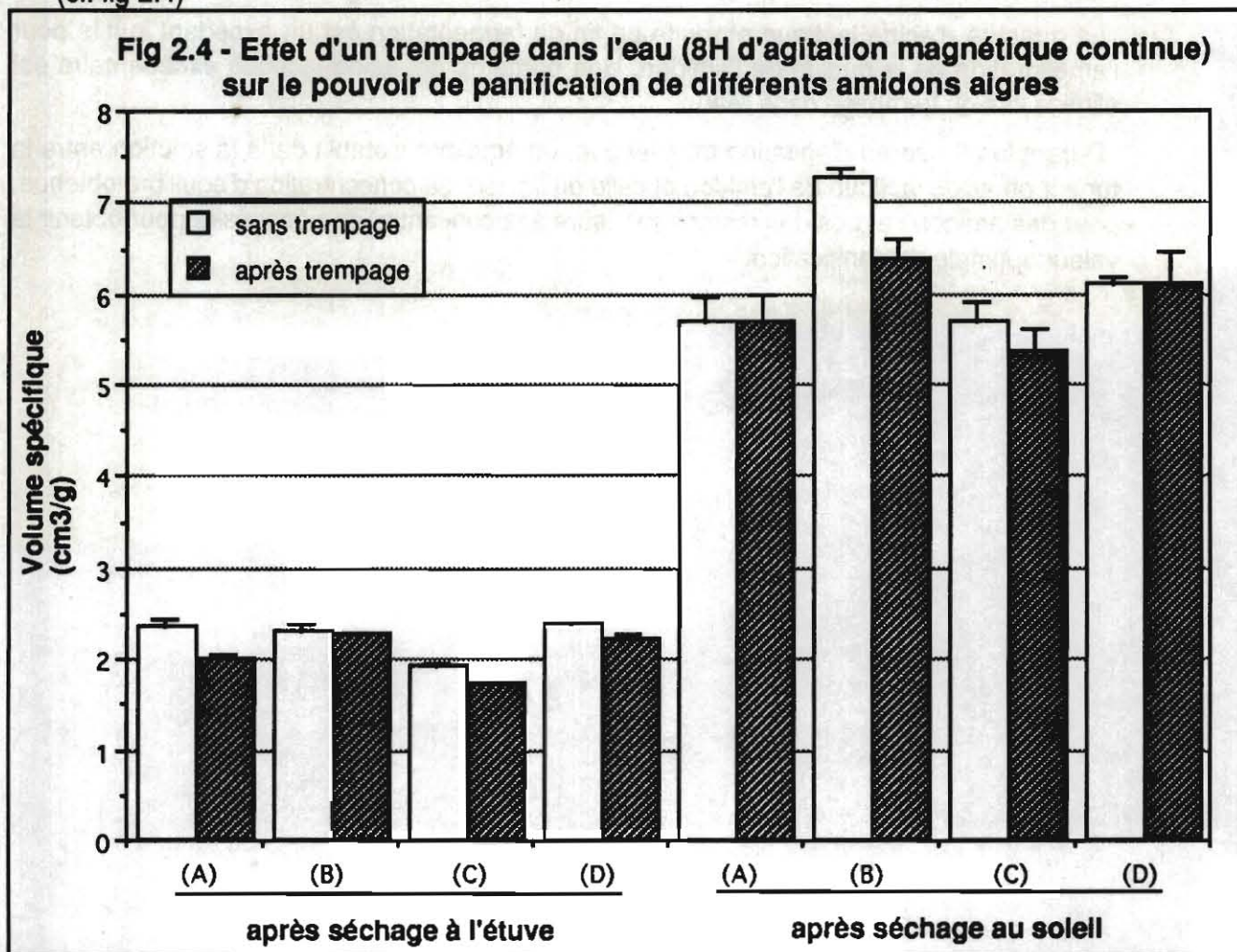
Discussion

L'augmentation du pH, la diminution de l'acidité totale et la diminution de la teneur en acide lactique après trempage sont dues à un effet de dilution.

Pour les paramètres acidité totale et teneur en acide lactique, les modifications occasionnées par le trempage dans l'eau se manifeste moins lorsque celui-ci est suivi d'un séchage solaire. Le trempage dans l'eau élimine de l'acide lactique. On peut faire l'hypothèse que l'acide lactique restant est moins disponible pour réagir lors d'une réaction photochimique. Le séchage solaire consomme alors moins d'acide sur les échantillons trempés que sur les échantillons non trempés, ce qui explique les différences plus faibles avant et après trempage de pH, d'acidité totale, et de teneur en acide lactique.

Les panifications

(cf. fig 2.4)



Après séchage étuve, le pouvoir de panification varie très peu avec le trempage dans l'eau. L'écart maximum observé pour (A) est de $0,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Mais compte tenu des écarts types très faibles, ces variations sont significatives : le trempage dans l'eau entraîne une baisse du pouvoir de panification après séchage à l'étuve.

Après séchage solaire, les différences de pouvoir de panification ne sont significatives que pour (B) pour lequel l'écart observé avec et sans trempage est de $0,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. (C) montre une différence avant et après trempage inférieure à $0,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, mais qui n'est pas significative compte tenu des écarts types. Pour (A) et (D), les valeurs de panification sont identiques avec et sans trempage.

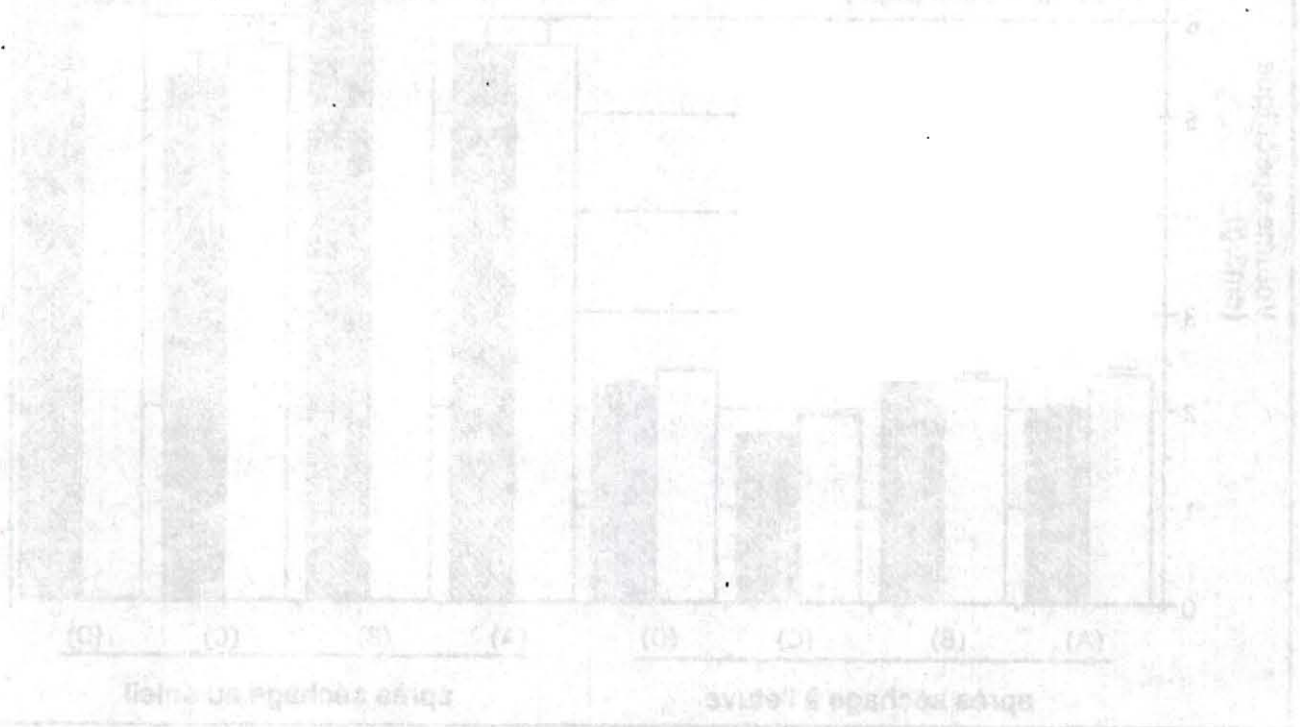
Synthèse

Les 8 heures de lavage de l'amidon aigre entraînent une augmentation du pH et une diminution de l'acidité totale, mais le pouvoir de panification n'est pas modifié.

Sur le suivi de fermentation précédemment réalisé, au 12^e jour nous avons un pouvoir de panification optimum de l'amidon. Ce pouvoir de panification se maintient jusqu'en fin de fermentation. Jusqu'au 32^e jour, de l'acide lactique est donc produit en plus de la quantité nécessaire à l'obtention des propriétés optimums de panification.

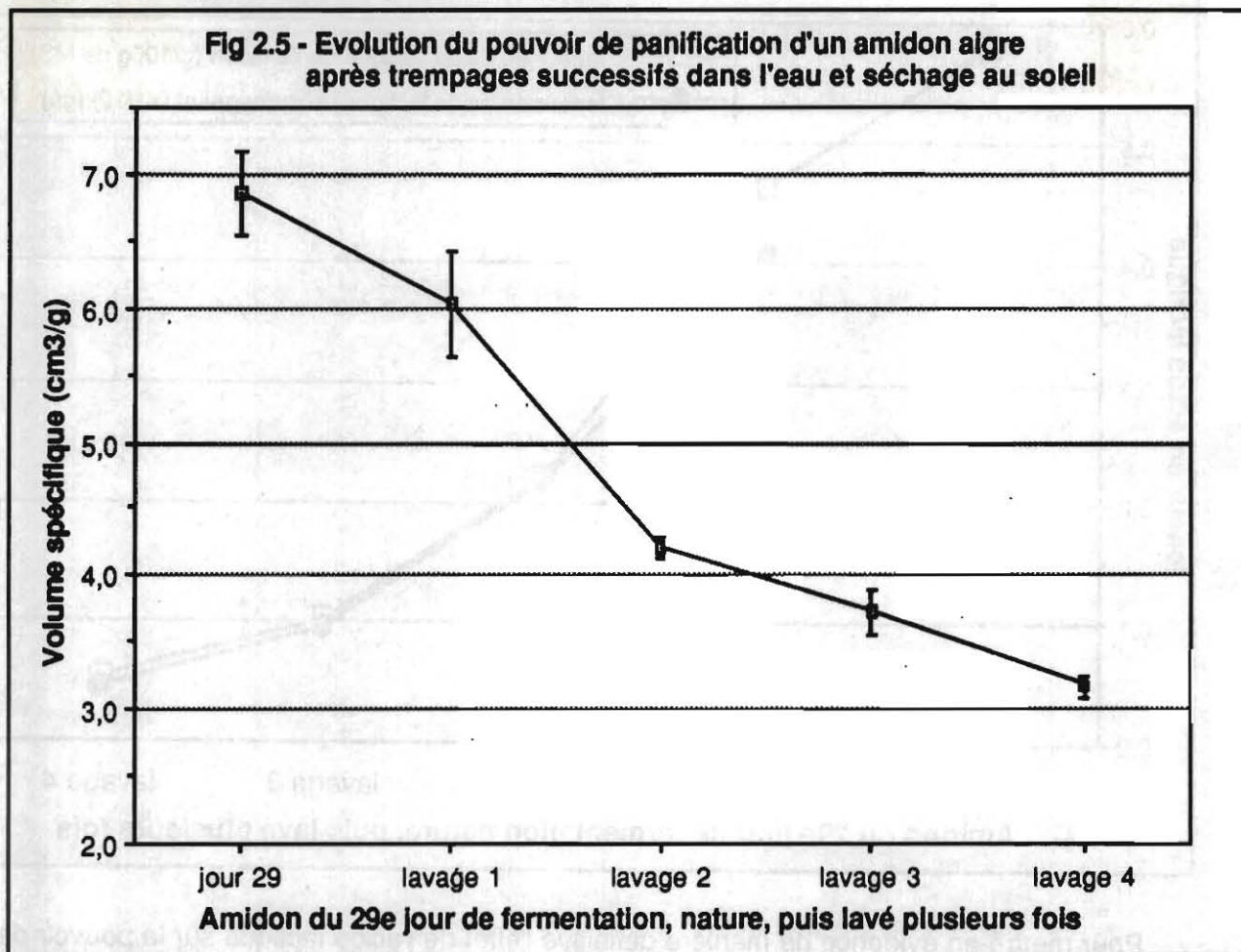
La quantité d'acide lactique produite en fin de fermentation est un excédent inutile pour l'amélioration de la qualité de l'amidon. Une partie de cet acide lactique excédentaire est éliminé lors du trempage dans l'eau.

Durant les 8 heures d'agitation magnétique, un équilibre s'établit dans la solution entre la teneur en acide lactique de l'amidon et celle du liquide. La concentration d'équilibre obtenue, pour des amidons aigres doit rester supérieure à la concentration nécessaire pour obtenir la valeur optimale de panification.



12- CAS DE 4 TREMPAGES SUCCESSIFS

L'amidon initial (J29), les amidons prélevés après chacun des trempages dans l'eau, ainsi que le surnageant restant après centrifugation ont été analysés.



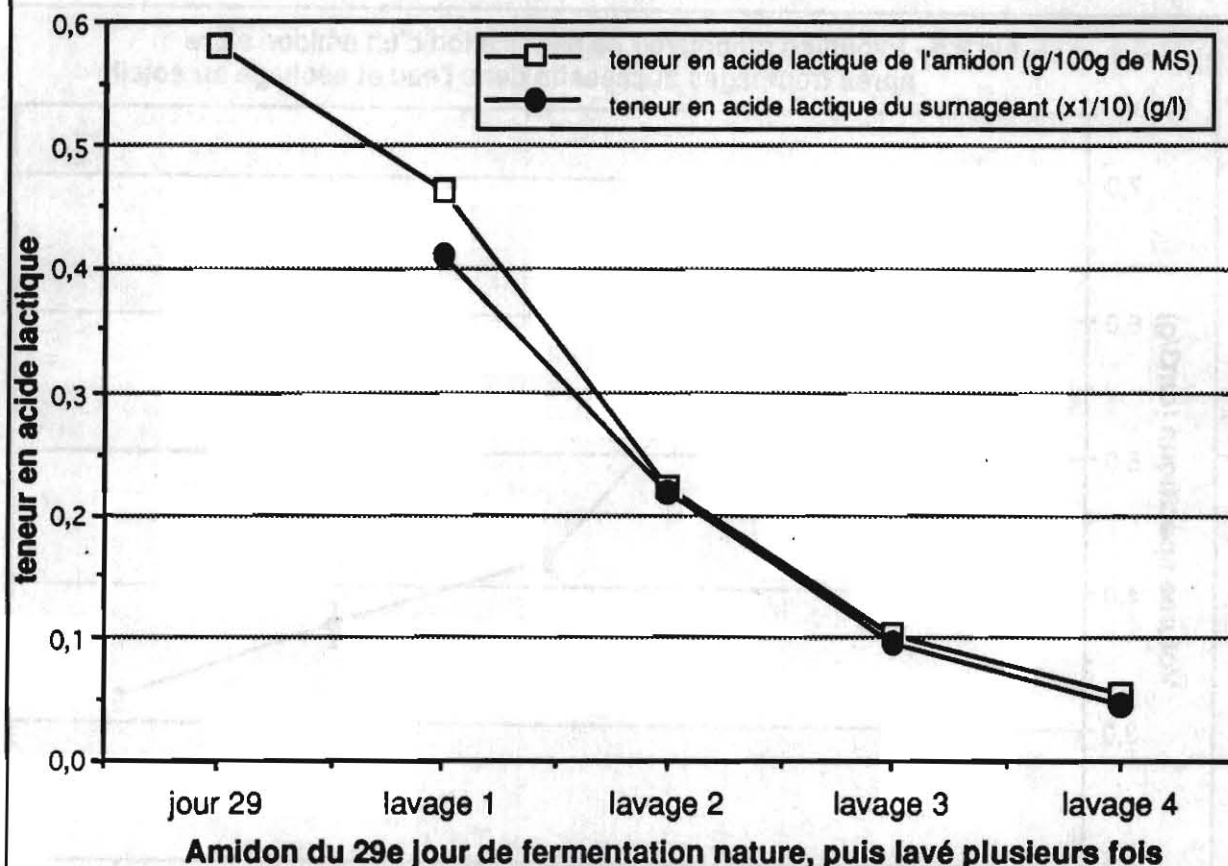
Le pouvoir de panification (cf. fig 2.5) décroît très nettement après chaque lavage de l'amidon, avec une chute de 6 à 4,2 cm³.g⁻¹ avant et après le second lavage. Après le 4^e lavage, le volume spécifique obtenu est de 3,2. Parallèlement, la teneur en acide lactique (cf. fig 2.6) des amidons diminue après chaque lavage, de même que celle des échantillons de surnageant prélevés.

Discussion

La corrélation entre la disparition de l'acide lactique dans l'amidon et la diminution du pouvoir de panification est très nette. Le premier lavage entraîne une diminution faible mais significative du pouvoir de panification. C'est après, lors du second lavage que la diminution du pouvoir de panification est la plus importante.

Lors du premier lavage, la concentration en acide lactique devient un facteur limitant pour l'obtention d'un bon pouvoir de panification. Après le second lavage, l'acide lactique manque réellement à la panification.

Fig 2.16 - Evolution de la teneur en acide lactique dans l'amidon et dans le surnageant après trempages successifs dans l'eau et séchage au soleil



Pour mettre en évidence de manière définitive l'effet de l'acide lactique sur le pouvoir de panification, nous allons réaliser une imprégnation en acide lactique suivi d'un séchage solaire de l'amidon obtenu après le 4^e lavage. Si nous obtenons de nouveau un pouvoir de panification semblable à celui de l'amidon non lavé, l'effet de l'acide sera clairement démontré (ces expériences sont en cours de réalisation).

Pour les expériences réalisées sur les amidons aigres (A), (B), (C) et (D), le pouvoir de panification ne présentait pas de différences significatives après trempage, sauf dans le cas de (B). 600g de MS étaient mis en solution dans 1400 ml d'eau.

Dans le cas de J29, 600g d'amidon frais sont mis en suspension dans 800 ml d'eau. Or l'amidon frais comprend environ 50% de MS. Environ 300g de MS de l'amidon J29 ont donc été mis en suspension dans environ 1100 ml de solution. Le lavage de J29 a donc été réalisé dans une quantité d'eau plus importante que le lavage des amidons (A), (B), (C) et (D). La différence significative de pouvoir de panification obtenue dès le premier lavage et qui ne s'observait pas chez (A), (C) et (D) s'explique peut être ainsi.

L'intensité du soleil peut aussi jouer sur les résultats: un soleil très intense peut permettre de mieux utiliser l'acide contenu dans l'amidon, même s'il est en quantité moindre, et donc de diminuer les différences de pouvoir de panification avant et après trempage.

13 - SYNTHÈSE

Le trempage dans l'eau intervient simplement en diluant les composants de l'amidon aigre et en permettant l'élimination d'une partie d'entre eux. Le pH augmente, l'acidité et la teneur en acide lactique diminue. Cependant, le pouvoir de panification n'est d'une manière générale pas modifié: cela dépend du protocole de trempage.

Tout l'acide lactique présent dans l'amidon après fermentation ne semble pas utile à l'acquisition du pouvoir de panification. Un trempage respectant la proportion $MS(g)/Vol.solution(ml) = 600/1400$ n'affecte pas le pouvoir de panification.

Un protocole d'imprégnation en acide lactique par trempage de l'amidon dans une solution d'acide lactique et respectant la proportion ci dessus est donc envisageable. Les résultats de panification et de viscoamylogrammes ne seront à priori pas affectés par un effet trempage.

2- INFLUENCE D'UNE IMPRÉGNATION EN ACIDE LACTIQUE 0.02M SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AMIDON

Les deux amidons (B) et (C) sont utilisés pour cette expérience.

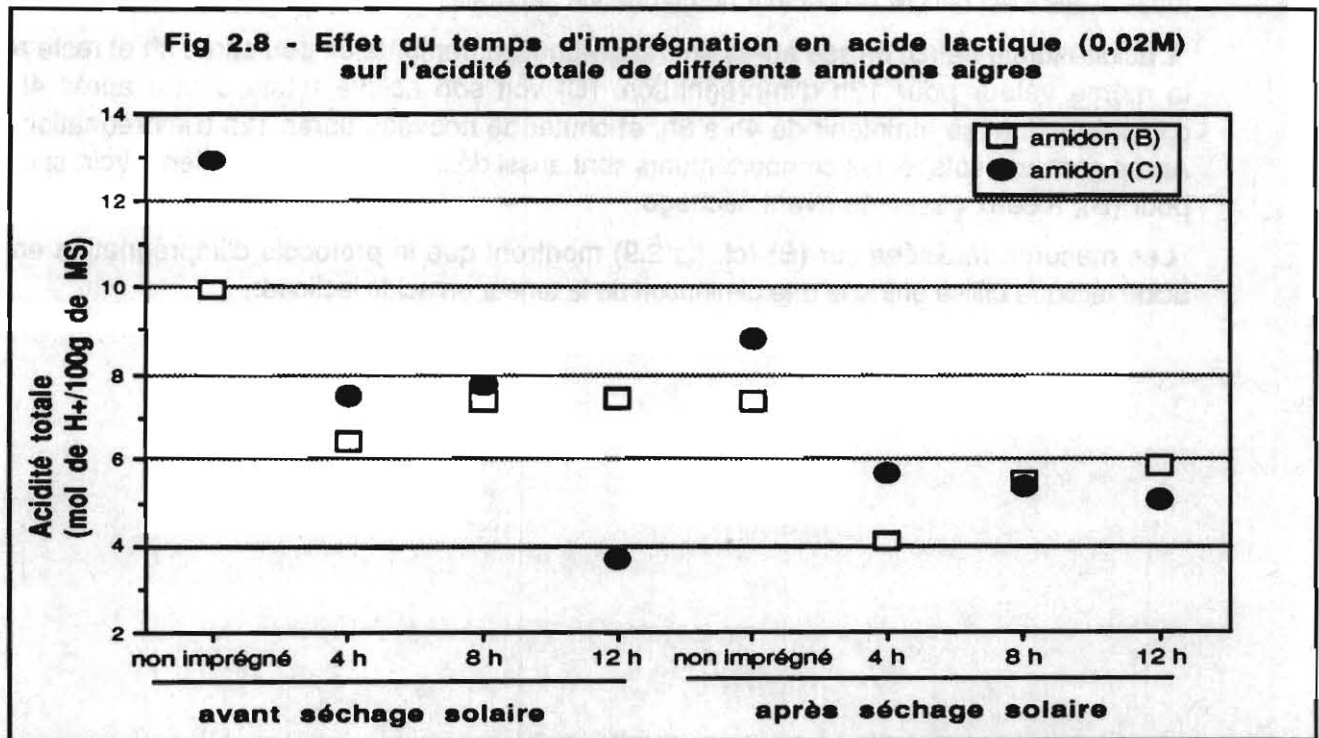
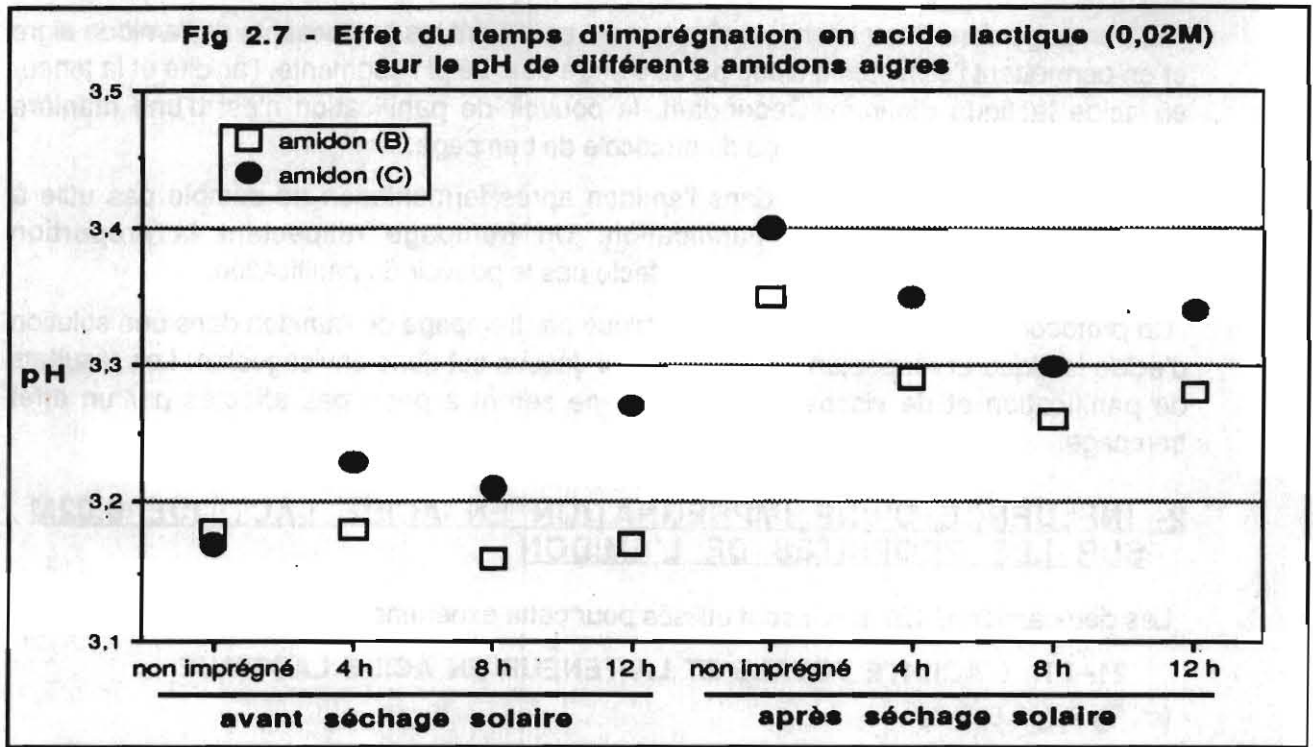
21- PH, L'ACIDITÉ TOTALE ET LA TENEUR EN ACIDE LACTIQUE

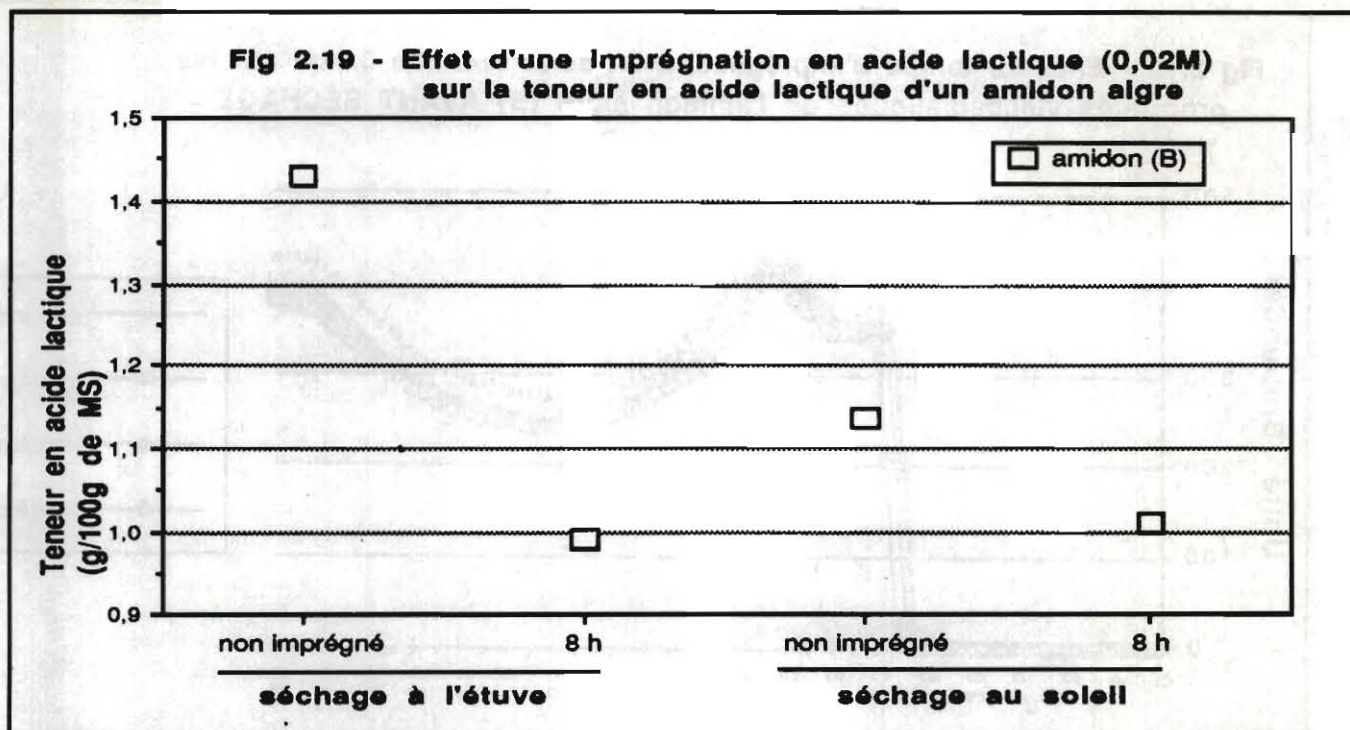
(cf. fig 2.7, 2.8, 2.9)

Quelque soit le temps d'imprégnation, le pH ne varie quasiment pas et reste à une valeur très proche de celle de l'amidon frais non imprégné. Des variations apparaissent sur l'acidité totale, mais il est difficile de déceler une tendance générale.

L'acidité totale de (B) baisse après 4h d'imprégnation, remonte un peu après 8h et reste à la même valeur pour 12h d'imprégnation. (C) voit son acidité totale chuter après 4h d'imprégnation, se maintenir de 4h à 8h, et chuter de nouveau après 12h d'imprégnation. Après séchage solaire, les comportements sont aussi désordonnés et n'ont rien à voir, sauf pour (B), à ceux observés avant séchage.

Les mesures réalisées sur (B) (cf. fig 2.9) montrent que le protocole d'imprégnation en acide lactique utilisé entraîne une diminution de la teneur en acide lactique.





Discussion

Les analyses réalisées ne permettent pas de mettre en évidence une tendance liée au temps d'imprégnation en acide lactique. Sur le pH, les variations observées sont négligeables. Sur l'acidité totale et sur la teneur en acide lactique, l'imprégnation en acide lactique entraîne une diminution des valeurs.

22 - VISCOAMYLOGRAMMES ET POUVOIR DE PANIFICATION

Le cas de l'amidon (B)

(cf. fig 2.10, 2.11, 2.14)

Avant séchage, les 4 viscoamylogrammes sont confondus. Après séchage solaire, les valeurs de viscosité diminuent très fortement et vont au pic de viscosité de 90 uB pour 4h d'imprégnation à 150 pour 12h d'imprégnation. Pour des valeurs très faibles de viscosité, de petites variations au premier pic n'entraîne pas de variation du pouvoir de panification: on le constate ici. Les pouvoirs de panification ne présentent pas de variations significatives, bien qu'on ait observé un maximum de viscosité inférieur aux autres pour (B) après 12H d'imprégnation et séchage au soleil.

Fig 2.10 - Effet du temps d'imprégnation en acide lactique 0,02M sur les propriétés viscoélastiques de l'amidon algre (B) AVANT SÉCHAGE

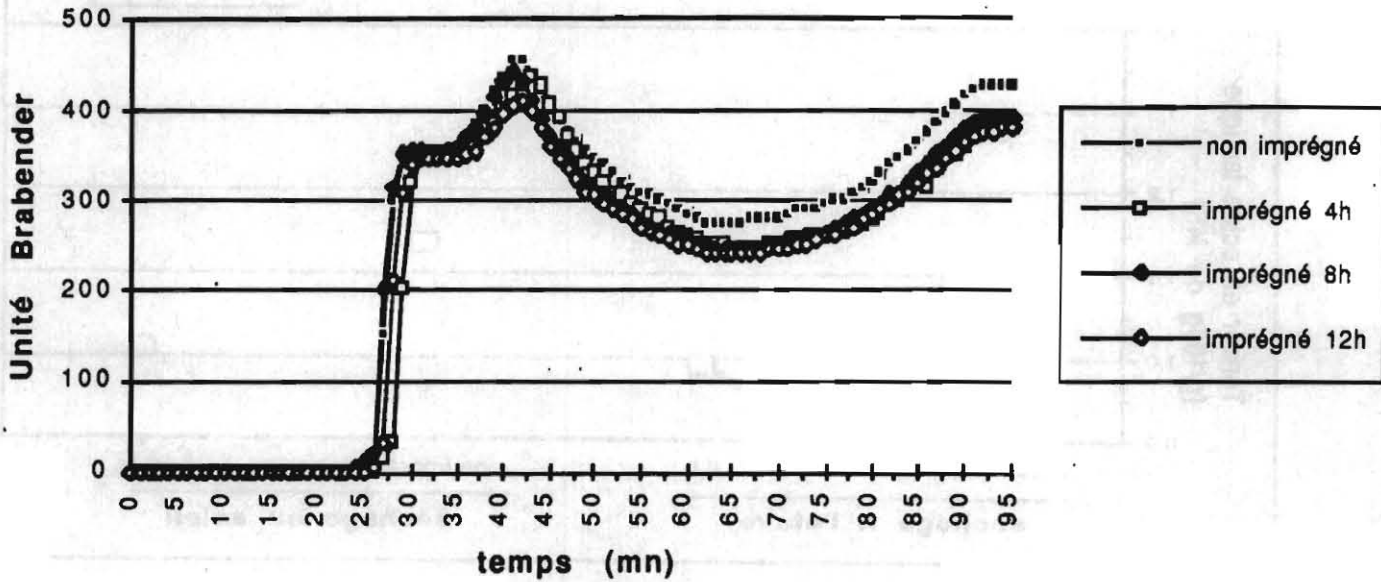


Fig 2.11 - Effet du temps d'imprégnation en acide lactique 0,02 M sur les propriétés viscoélastiques de l'amidon algre (B) APRES SECHAGE SOLAIRE

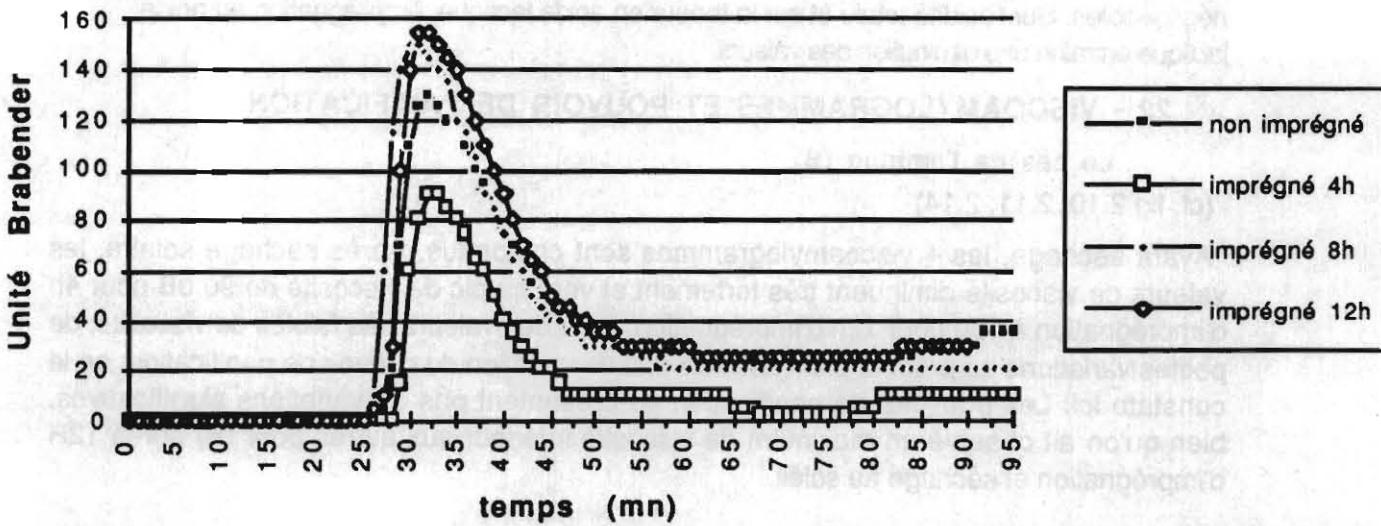


Fig 2.12 - Effet du temps d'imprégnation en acide lactique 0,02M sur les propriétés viscoélastiques de l'amidon aigre (C) AVANT SECHAGE

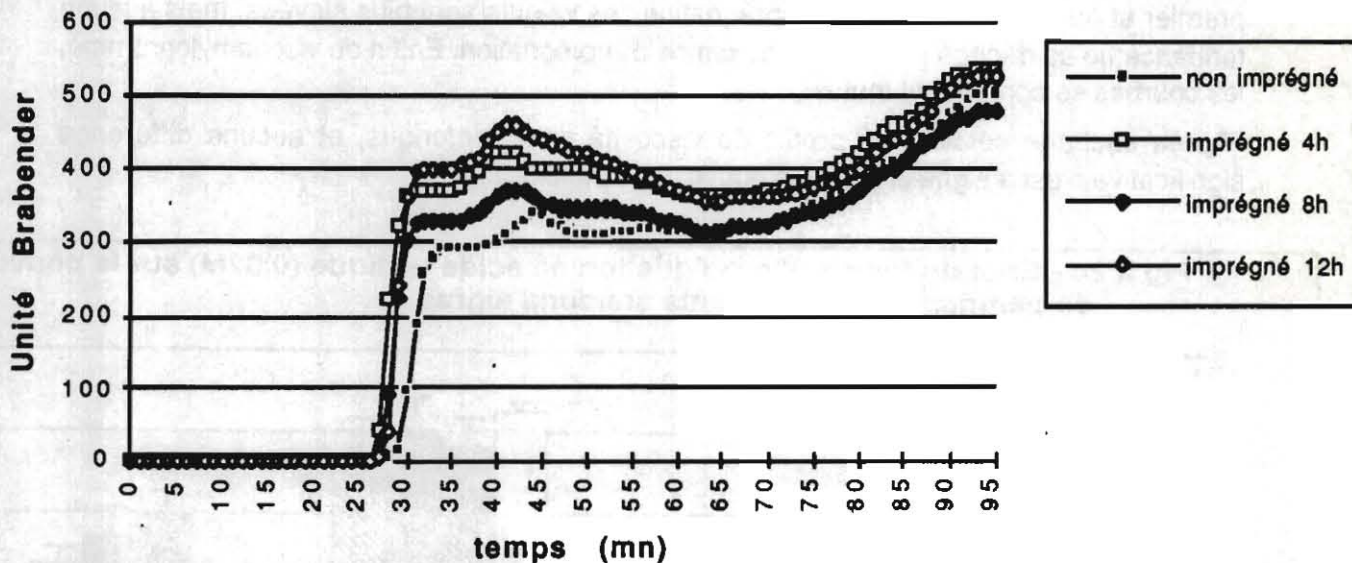
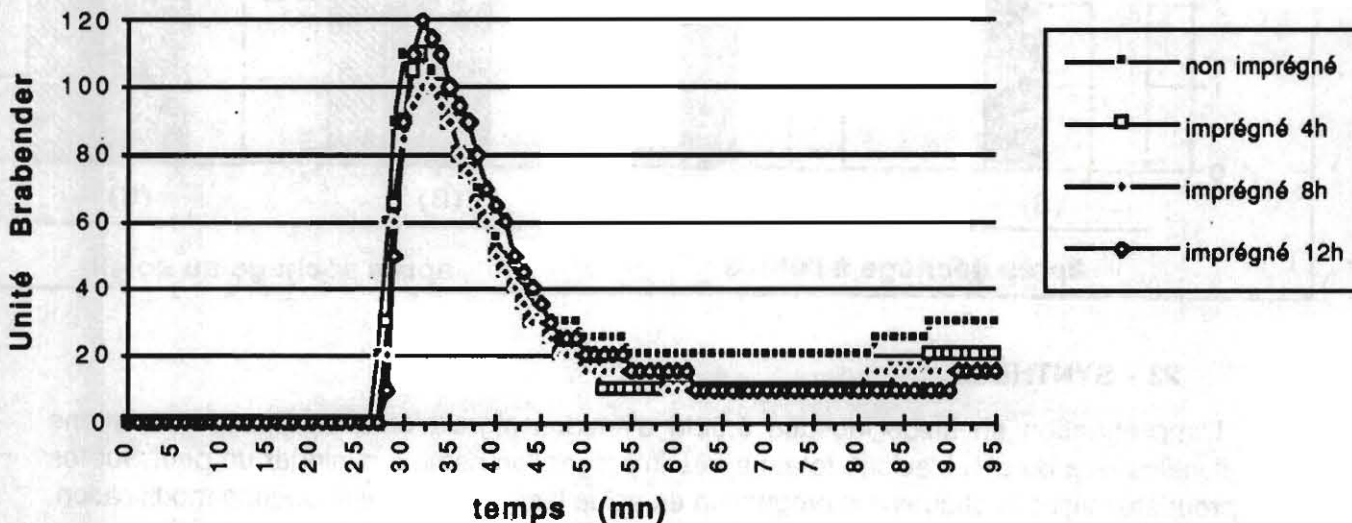


Fig 2.13 - Effet du temps d'imprégnation en acide lactique 0,02M sur les propriétés viscoélastiques de l'amidon aigre (C) APRES SECHAGE SOLAIRE



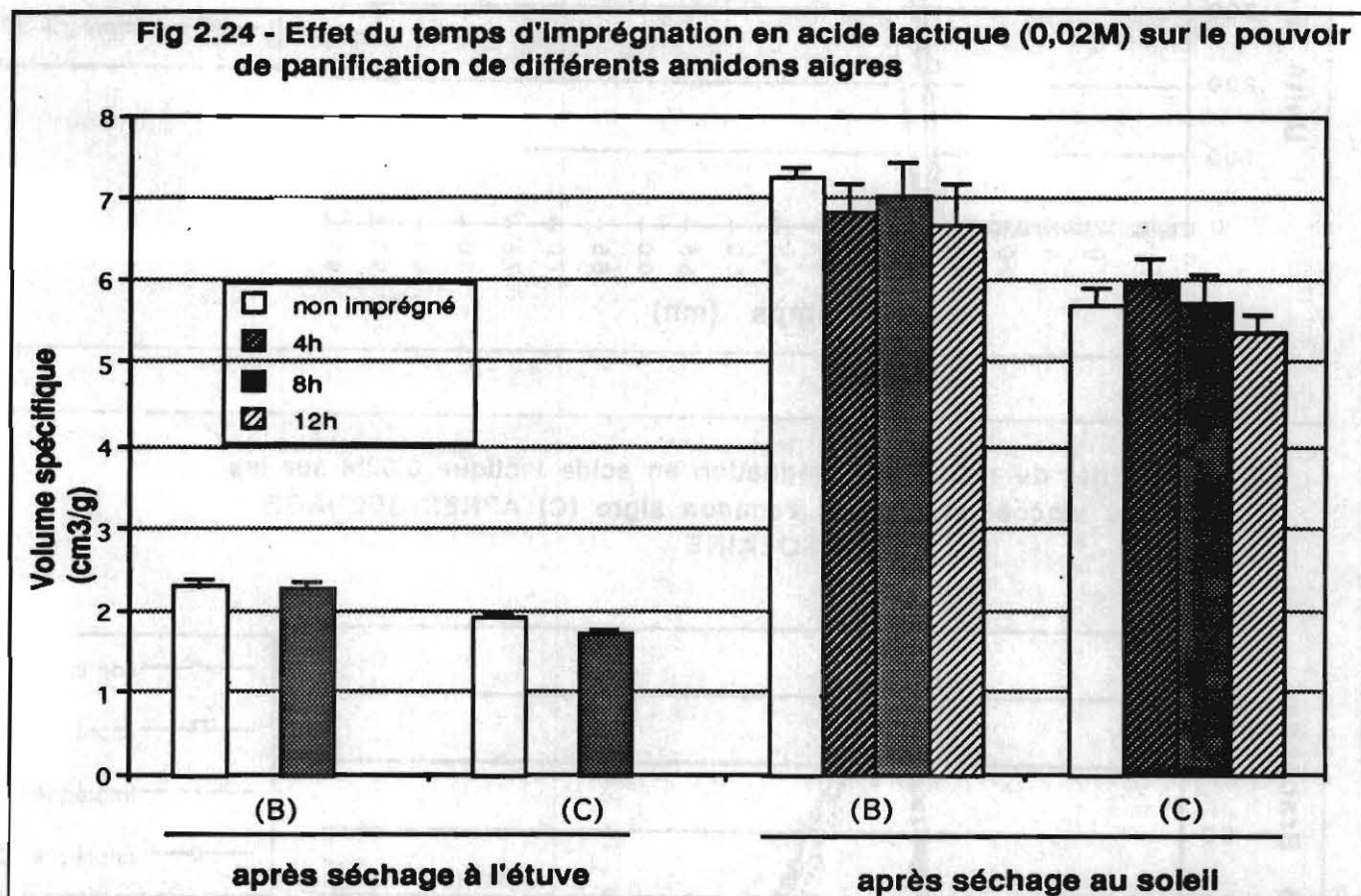
Le cas de l'amidon (C)

(cf. fig 2.12, 2.13, 2.14)

Avant séchage solaire, les profils ont des allures très similaires mais des valeurs différentes: les valeurs vont de 290 à 400 uB et de 320 à 430 uB respectivement au premier et au second pic. Après imprégnation, les valeurs sont plus élevées, mais aucune tendance ne se dégage par rapport au temps d'imprégnation. En fin de viscoamylogramme, les courbes se confondent toutes.

Après séchage solaire, les profils de viscosité sont confondus, et aucune différence significative n'est à signaler pour les pouvoirs de panification.

Fig 2.24 - Effet du temps d'imprégnation en acide lactique (0,02M) sur le pouvoir de panification de différents amidons aigres



23 - SYNTHÈSE

L'imprégnation en acide lactique 0,02M d'amidon aigre n'entraîne pas de variations significatives du pH. L'acidité totale après imprégnation semble diminuer un peu. Sur les propriétés viscoélastiques, l'imprégnation en acide lactique n'entraîne aucune modification, pas plus d'ailleurs que sur le pouvoir de panification.

L'imprégnation dans la solution d'acide lactique, comme le trempage dans l'eau, a simplement un effet de dilution des composants de l'amidon aigre et de ces acides en particulier.

Le temps d'imprégnation en acide lactique ne semble avoir aucune influence sur les propriétés ultérieures de l'amidon. En fait le protocole mis en place pour tester le temps d'imprégnation est mauvais. L'amidon est mis en suspension au même moment dans la solution d'acide lactique pour les 3 durées d'agitation. Au bout de 4, 8, et 12h respectivement, l'agitation est arrêtée et les suspensions obtenues sont mises au réfrigérateur. Douze heures après avoir mis le dernier échantillon au réfrigérateur, le surageant est éliminé pour les 3 échantillons et ils sont tous les 3 mis à sécher.

Deux hypothèses peuvent alors expliquer que le temps d'imprégnation ne modifie pas les propriétés de l'amidon:

-Au bout de 4h d'agitation, un équilibre est établi entre la solution d'imprégnation et l'amidon et un temps d'imprégnation plus important ne change plus rien.

-Après 4h d'agitation, la réaction entre l'acide lactique et l'amidon ne s'est pas équilibrée mais elle va se poursuivre pendant la décantation au frigo.

Globalement, cet essai a permis de tester l'effet d'une imprégnation en acide lactique sur l'amidon aigre, mais elle n'a pas permis de tester l'effet du temps d'imprégnation.

3 - CONCLUSION

Le trempage dans l'eau de l'amidon aigre entraîne une dilution de l'acide lactique qu'il contient. Il en résulte une augmentation du pH, une diminution de la teneur en acide lactique et de l'acidité totale. Cependant, les propriétés viscoélastiques et le pouvoir de panification ne sont pas affectés. Pour tester l'effet de l'acide lactique sur la panification de l'amidon de manioc, utiliser une solution d'acide lactique pour imprégner l'amidon semble adapté. En effet, les propriétés de panification n'étant pas affectés par le trempage, c'est bien l'effet de l'acide lactique qui sera testé.

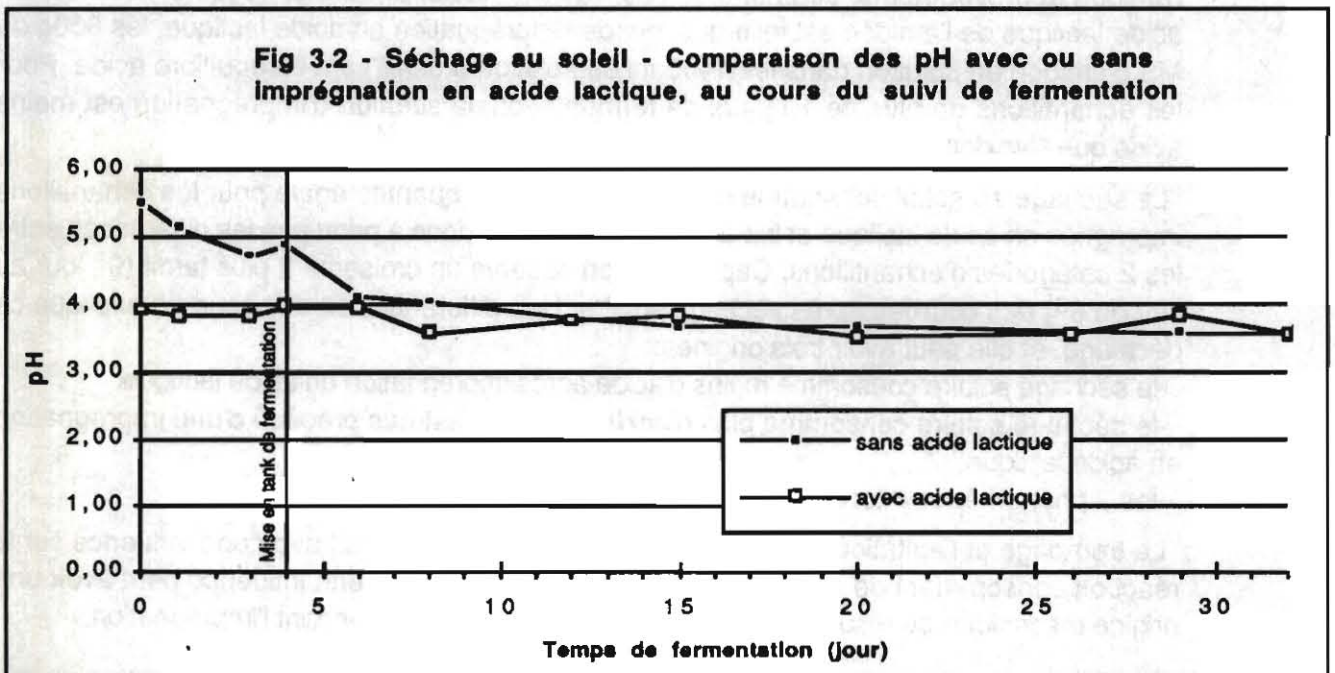
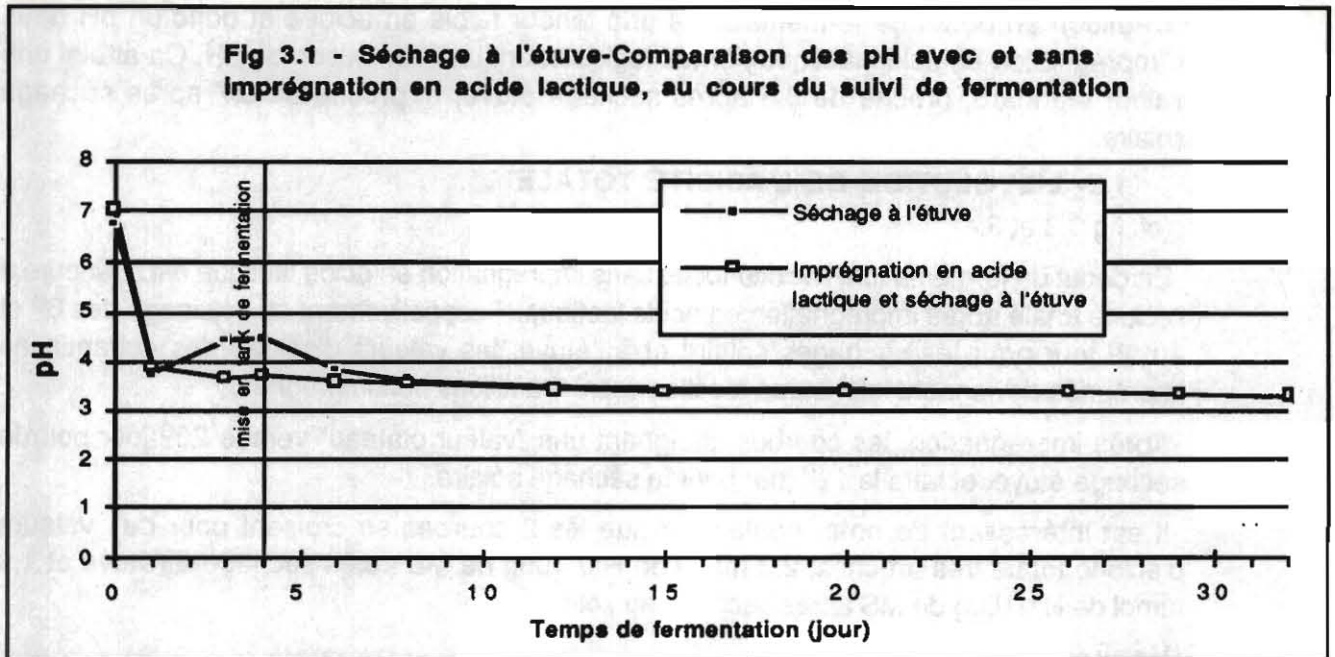
L'imprégnation en acide lactique 0,02M entraîne une amélioration du pouvoir de panification de l'amidon doux (VERNEREY, 1994). Dans la partie II, nous avons vu qu'elle avait peu d'effet sur les propriétés de l'amidon aigre. Nous allons maintenant réaliser une imprégnation en acide lactique de tous les échantillons du suivi de fermentation.

PARTIE III- L'IMPRÉGNATION EN ACIDE LACTIQUE DES ÉCHANTILLONS DU SUIVI DE FERMENTATION

1- PH. L'ACIDITÉ TOTALE. ET LA TENEUR EN ACIDE LACTIQUE

1.1 L'ÉVOLUTION DU PH

(cf. fig 3.1 et 3.2)



Après imprégnation en acide lactique, quelque soit le séchage, on observe que le pH prend dès le jour 1 une valeur proche du pKa de l'acide lactique (pH proche de 3,5). Il se stabilise plus rapidement que sans imprégnation en acide lactique. Quel que soit le séchage, au bout de 10 jours les courbes, avec ou sans imprégnation en acide lactique, atteignent des valeurs très proches.

Discussion

L'amidon en début de fermentation a une teneur faible en acides et donc un pH haut. L'imprégnation en acide lactique permet logiquement une diminution du pH. On atteint une valeur standard, proche de 3,5 après séchage étuve, et proche de 3,7 après séchage solaire.

1.2- L'ÉVOLUTION DE L'ACIDITÉ TOTALE

(cf. fig 3.3 et 3.4)

En début de fermentation, l'acidité totale sans imprégnation en acide lactique est inférieure à l'acidité totale après imprégnation en acide lactique. Respectivement au voisinage des 6^e et au 9^e jour pour les séchages solaire et à l'étuve, les valeurs d'acidité des échantillons imprégnés deviennent inférieures à celles des échantillons non imprégnés.

Après imprégnation, les courbes atteignent une "valeur plateau" vers le 20^e jour pour le séchage étuve, et vers le 12^e jour pour le séchage solaire.

Il est intéressant de noter également que les 2 courbes se croisent pour des valeurs d'acidité totale très proches: 2,3 mmol de H⁺/ 100g de MS après séchage à l'étuve et 1,9 mmol de H⁺/100g de MS après séchage au soleil.

Discussion

De 0 à 6 jours de fermentation, l'imprégnation en acide lactique apporte de l'acide lactique à l'amidon et provoque une augmentation de l'acidité totale. Entre 6 et 10 jours, la teneur en acide lactique de l'amidon est telle que lors de l'imprégnation en acide lactique, les 600g de MS d'amidon en solution dans les 1400 ml de solution 0,02 M sont en équilibre acide. Pour les échantillons de plus de 10 jours de fermentation, la solution d'imprégnation est moins acide que l'amidon, ce qui entraîne un effet de dilution de l'acidité.

Le séchage au soleil consomme de l'acide a priori en quantité égale pour les échantillons imprégnés en acide lactique et les autres. Il n'accentue donc à priori pas les différences entre les 2 catégories d'échantillons. Cependant, on observe un croisement plus tardif (9^e jour au lieu du 6^e) des courbes après séchage solaire. Une différenciation des courbes explique ce décalage, et elle peut avoir trois origines:

- le séchage solaire consomme moins d'acide après imprégnation en acide lactique,
- le séchage solaire consomme plus d'acide lorsqu'il n'est pas précédé d'une imprégnation en acide lactique,
- les 2 phénomènes interviennent à la fois.

Le trempage et l'agitation de l'amidon dans une solution pourrait avoir une influence sur la réaction consommant de l'acide pendant le séchage solaire. Cette influence peut avoir une origine mécanique ou résulter du lessivage d'un autre élément pendant l'imprégnation.

La consommation d'acide au cours du séchage solaire explique aussi la diminution de 2,3 à 1,9 mol d'H⁺/100g de MS de la teneur en acide lactique au moment du croisement des courbes.

Fig 3.3 - Séchage à l'étuve - Comparaison des acidités totales avec et sans imprégnation, au cours du suivi de fermentation

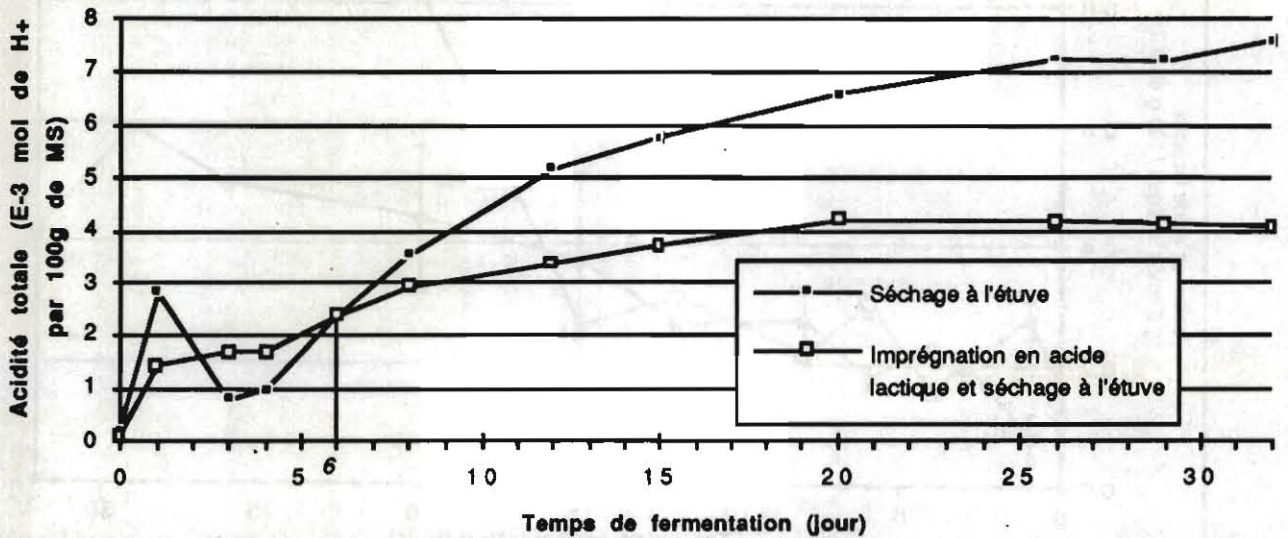
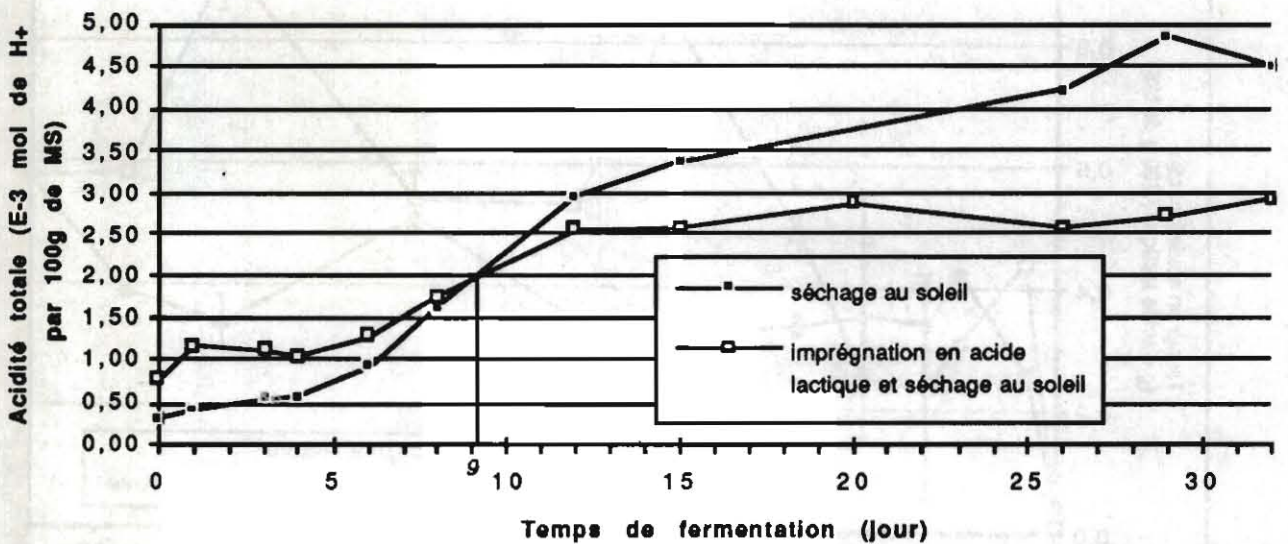
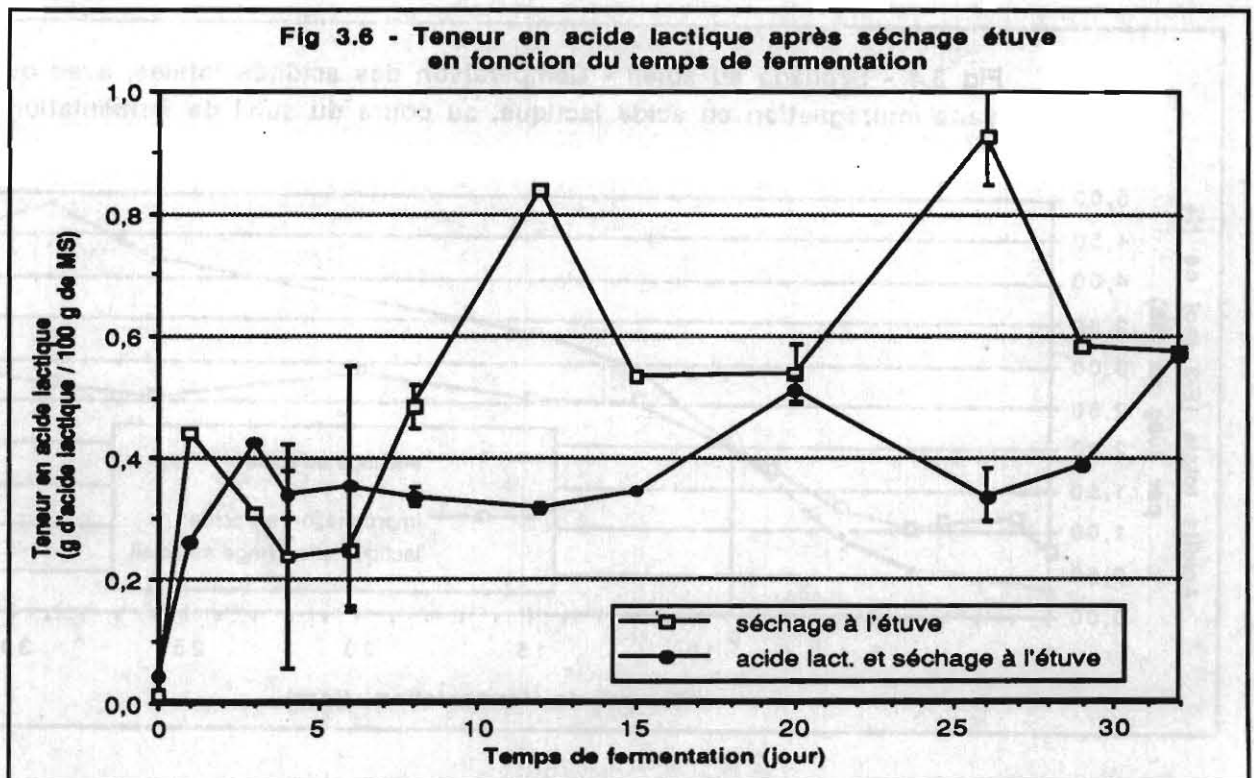
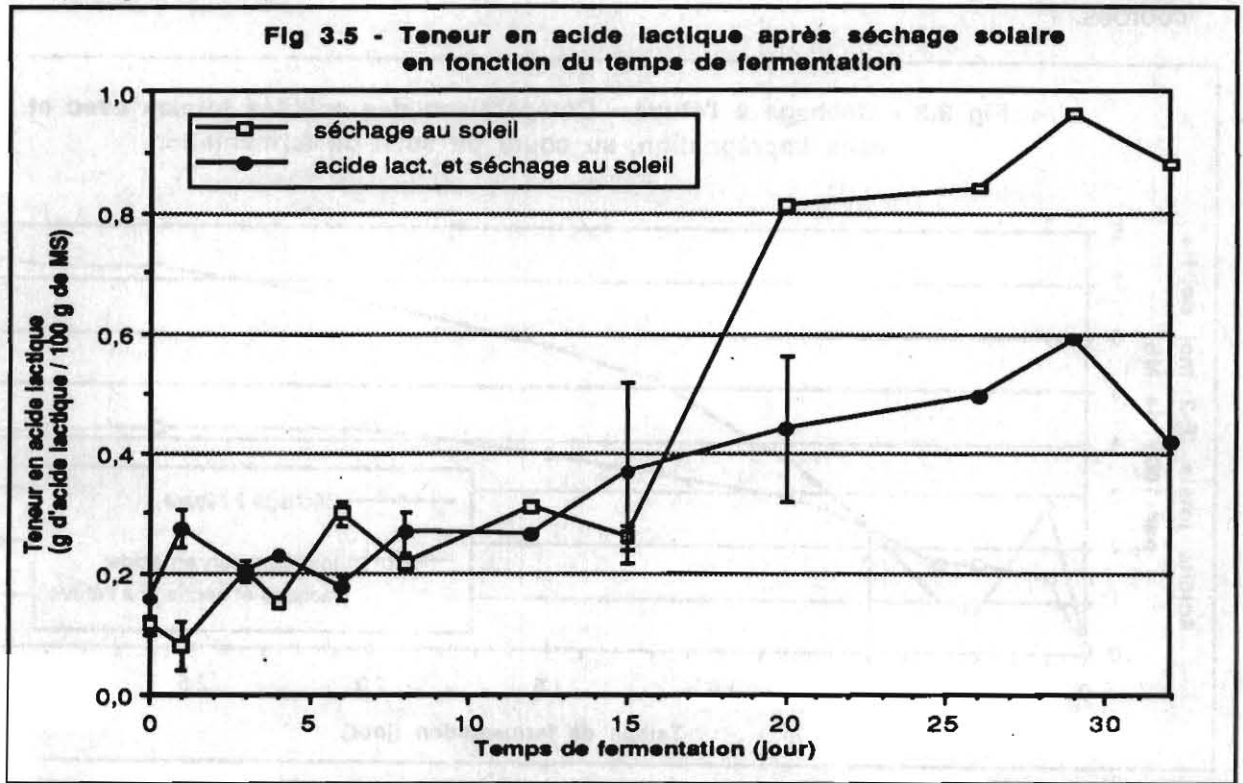


Fig 3.4 - Séchage au soleil - Comparaison des acidités totales, avec ou sans imprégnation en acide lactique, au cours du suivi de fermentation



1.3- L'ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN ACIDE LACTIQUE

(cf. fig 3.5 et 3.6)



Après séchage au soleil, jusqu'au 15^e jour, les courbes sont très proches avec des valeurs en moyenne plus élevées après imprégnation en acide lactique. Après le 16^e jour, la teneur en acide lactique est nettement plus élevée pour les échantillons non imprégnés en acide lactique.

Après séchage à l'étuve, le même phénomène s'observe. Jusqu'au 7^e jour, les teneurs en acide lactique sont proches mais légèrement plus importantes après imprégnation. Par la suite, la teneur après imprégnation est plus faible.

Après imprégnation en acide lactique, les teneurs en acide lactique après séchage à l'étuve et après séchage au soleil ne présentent pas de différences significatives.

Remarque:

La répétition de toutes les analyses d'acide lactique est en cours, les valeurs obtenues jusqu'ici étant anormalement mauvaises.

Discussion

Comme dans la cas de l'acidité totale, les courbes avec et sans imprégnation se croisent plus tard (15^e jour au lieu du 7^e) après séchage solaire qu'après séchage étuve.

1.4- SYNTHÈSE

L'imprégnation en acide lactique entraîne une augmentation de l'acidité dans un premier temps, puis sa diminution en fin de fermentation. Sur le pH, elle entraîne une nivelation des valeurs. La valeur de pH obtenue après le 10^e jour de fermentation est indépendante de l'imprégnation en acide lactique.

Au 32^e jour de fermentation, sans imprégnation en acide lactique, on constate que le séchage solaire entraîne une diminution de l'acidité totale qui passe de 7 à 4,5 mmol de H⁺/100g de MS. Après imprégnation en acide lactique, l'acidité passe de 4 à 2,7 mmol de H⁺/100g de MS après séchage solaire. Cette différence très nette d'acidité avant et après séchage solaire est en accord avec les résultats de LARSONNEUR (1992) qui mentionnait la disparition d'acide lactique au cours du séchage solaire.

Les effets de l'imprégnation en acide lactique sur la teneur en acide lactique sont à préciser par d'autres analyses d'HPLC.

2- EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

Après séchage étuve

(cf. fig 1.7 et 3.7)

- Avec et sans imprégnation en acide lactique et après séchage à l'étuve, les viscoamylogrammes obtenus ont des allures très proches. La température de gélatinisation est la même (61°C), les valeurs de viscosité au premier optimum (66°C) sont les mêmes (proches de 450 unités Brabender), et on observe une différenciation nette des courbes seulement entre 75 et 90°C lors de la formation du second optimum de viscosité.

Pour le second optimum, les valeurs sont plus faibles après imprégnation: elles vont de 580 à 340 uB, alors qu'elles varient de 630 à 400 uB sans imprégnation en acide lactique. On constate qu'après séchage à l'étuve, le second optimum ne disparaît pas, quelque soit le temps de fermentation.

Fig 1.7 - Evolution des propriétés rhéologiques de l'amidon au cours de la fermentation- SÉCHAGE À L'ÉTUVE

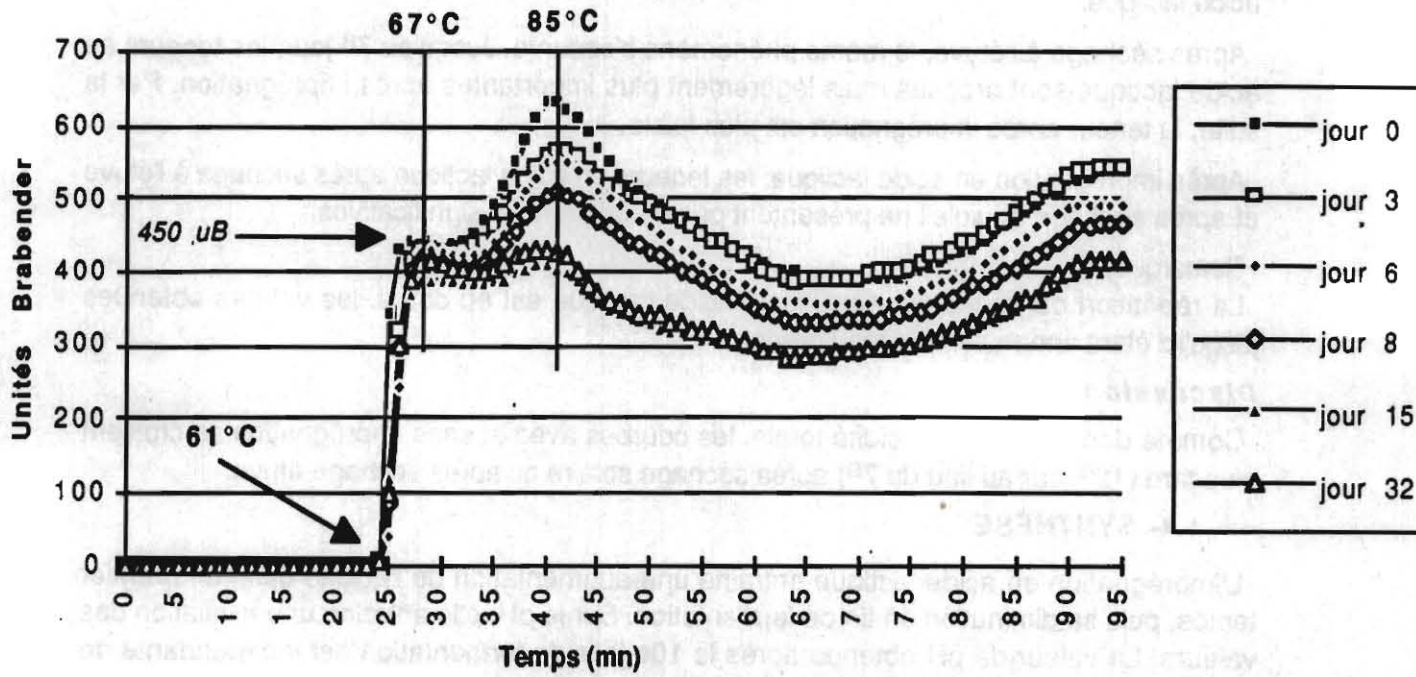


Fig 1.8 - Evolution des propriétés rhéologiques de l'amidon au cours de la fermentation - SÉCHAGE SOLAIRE

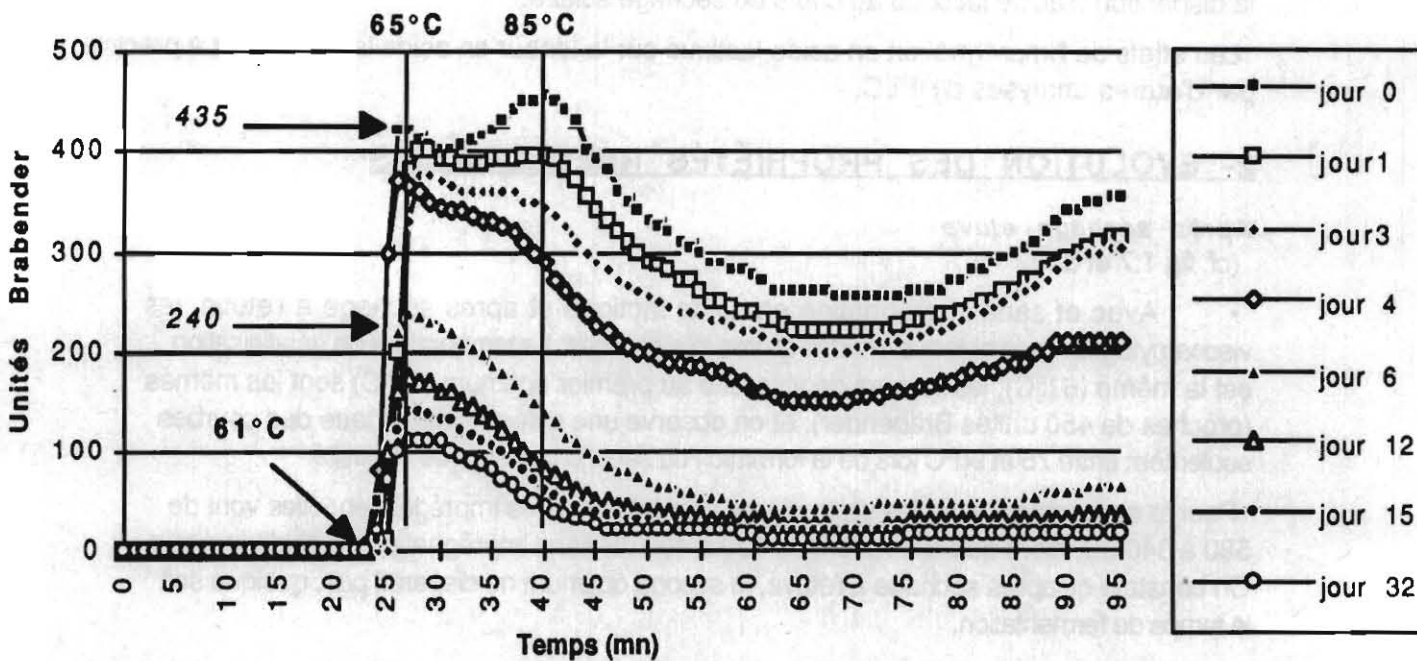


Fig 3.7 - Evolution des propriétés rhéologiques de l'amidon au cours de la fermentation - ACIDE LACTIQUE ET SECHAGE A L'ETUVE

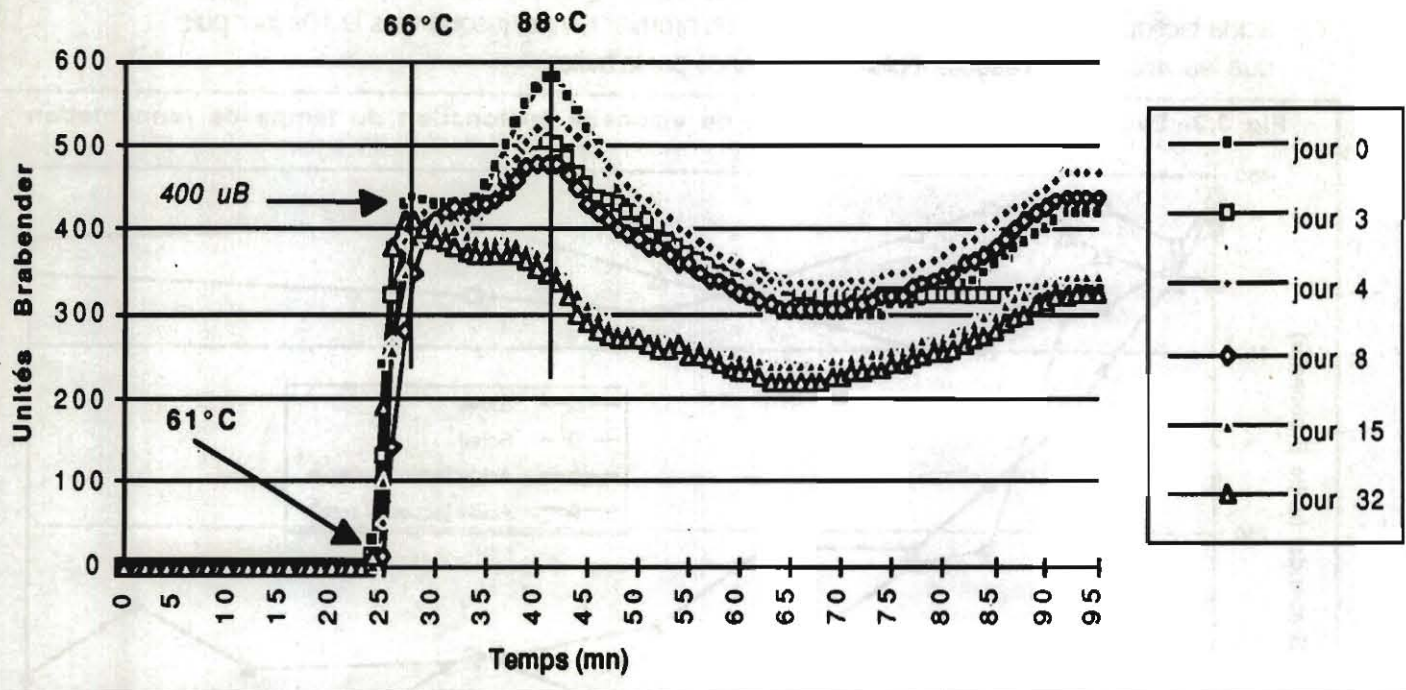
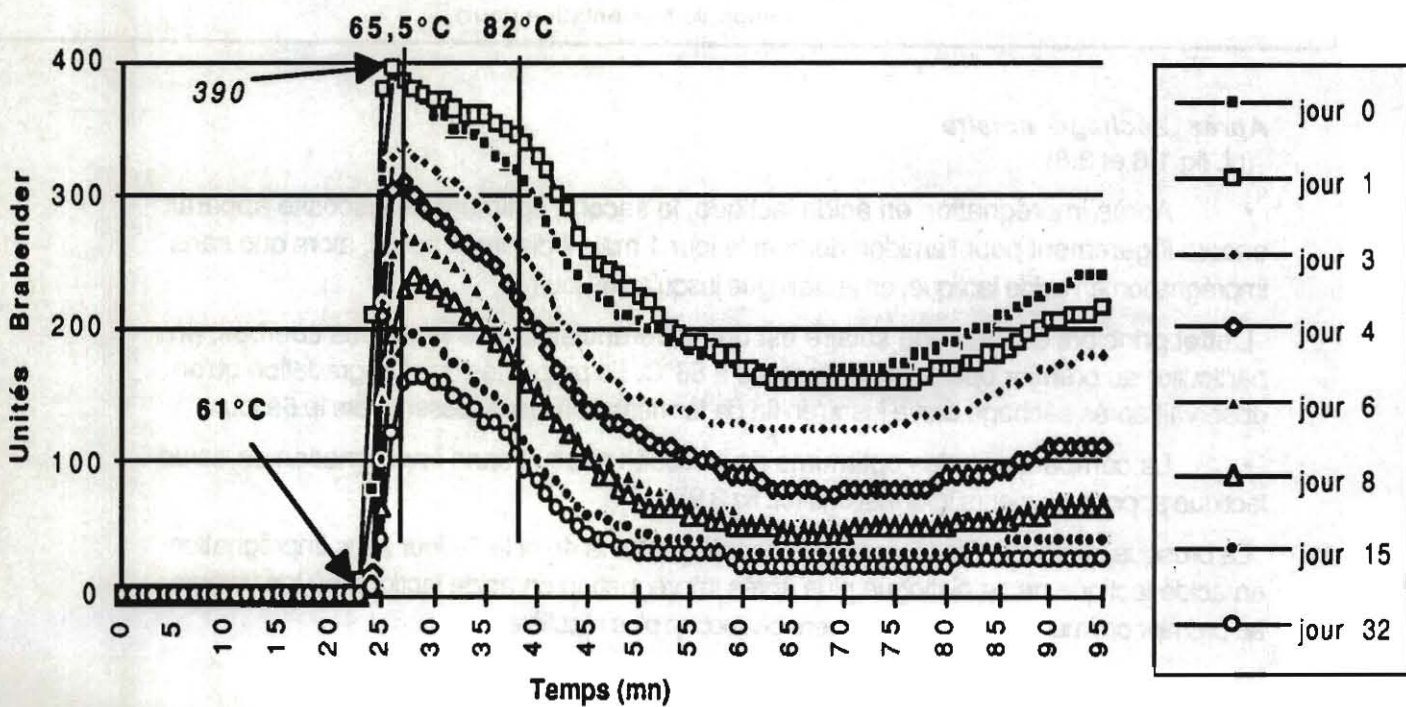


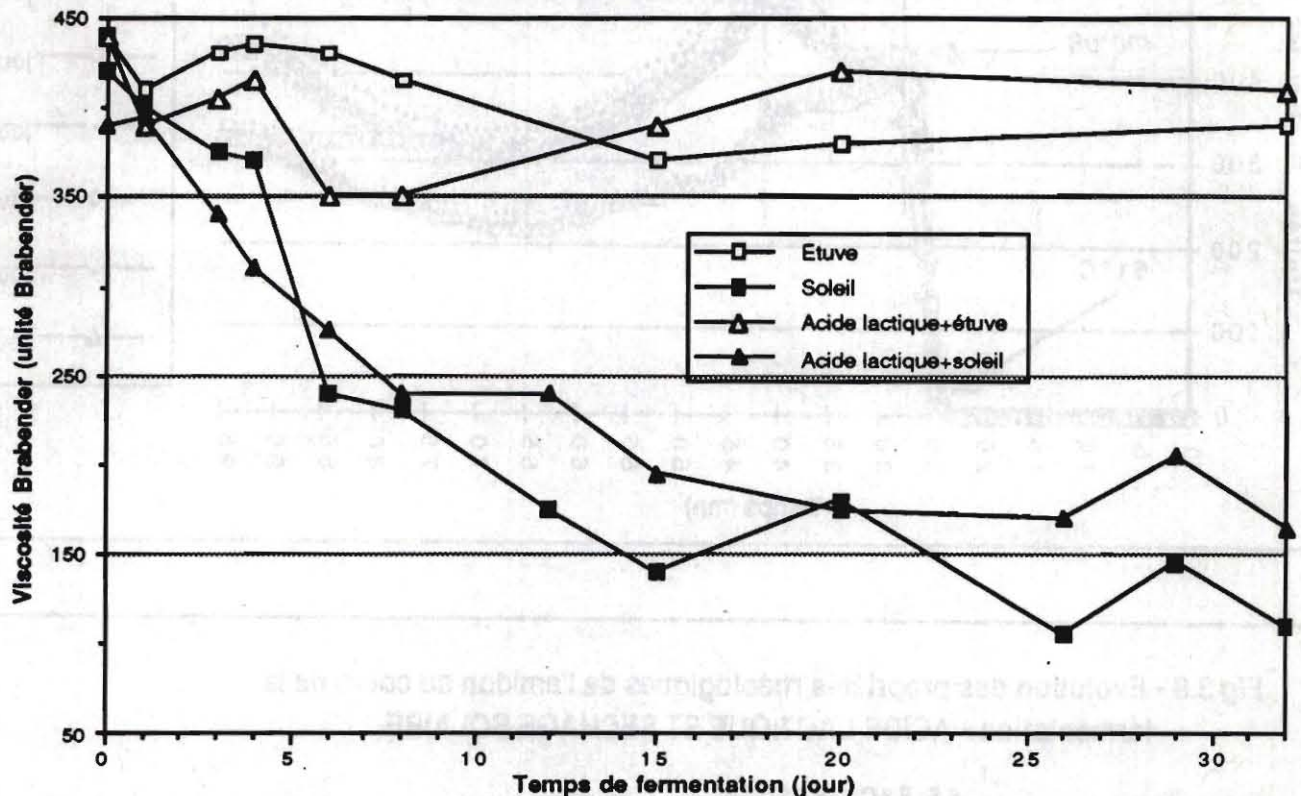
Fig 3.8 - Evolution des propriétés rhéologiques de l'amidon au cours de la fermentation - ACIDE LACTIQUE ET SECHAGE SOLAIRE



La tendance à la rétrogradation reste la même tout au long du suivi de fermentation. Les courbes se confondent sur la fin du viscoamylogramme.

- La comparaison des optimums de viscosité (cf. fig 3.9) montre que l'imprégnation en acide lactique tend à les faire diminuer dans un premier temps, jusque vers le 10e jour puis que les valeurs ne présentent plus de différence par la suite.

Fig 3.9- Evolution du premier optimum de viscosité en fonction du temps de fermentation



Après séchage solaire (cf. fig 1.8 et 3.8)

- Après imprégnation en acide lactique, le second optimum de viscosité apparaît encore légèrement pour l'amidon doux et le jour 1 mais il disparaît après, alors que sans imprégnation en acide lactique, on le distingue jusqu'au 6^e jour.

L'effet principal du séchage solaire est une différenciation très nette des courbes, en particulier au premier optimum de viscosité à 66°C. Les propriétés de rétrogradation qu'on observait après séchage étuve jusqu'en fin de fermentation disparaissent vers le 6e jour.

- La comparaison des optimums de viscosité avec et sans imprégnation en acide lactique apporte plusieurs informations (cf. fig.3.9).

La brusque diminution de la viscosité observée entre le 4e et le 6e jour sans imprégnation en acide lactique ne se distingue plus après imprégnation en acide lactique où les valeurs au premier optimum diminuent de manière beaucoup plus régulière.

Fig 3.10 - Propriétés physicochimiques de l'amidon doux en fonction du traitement

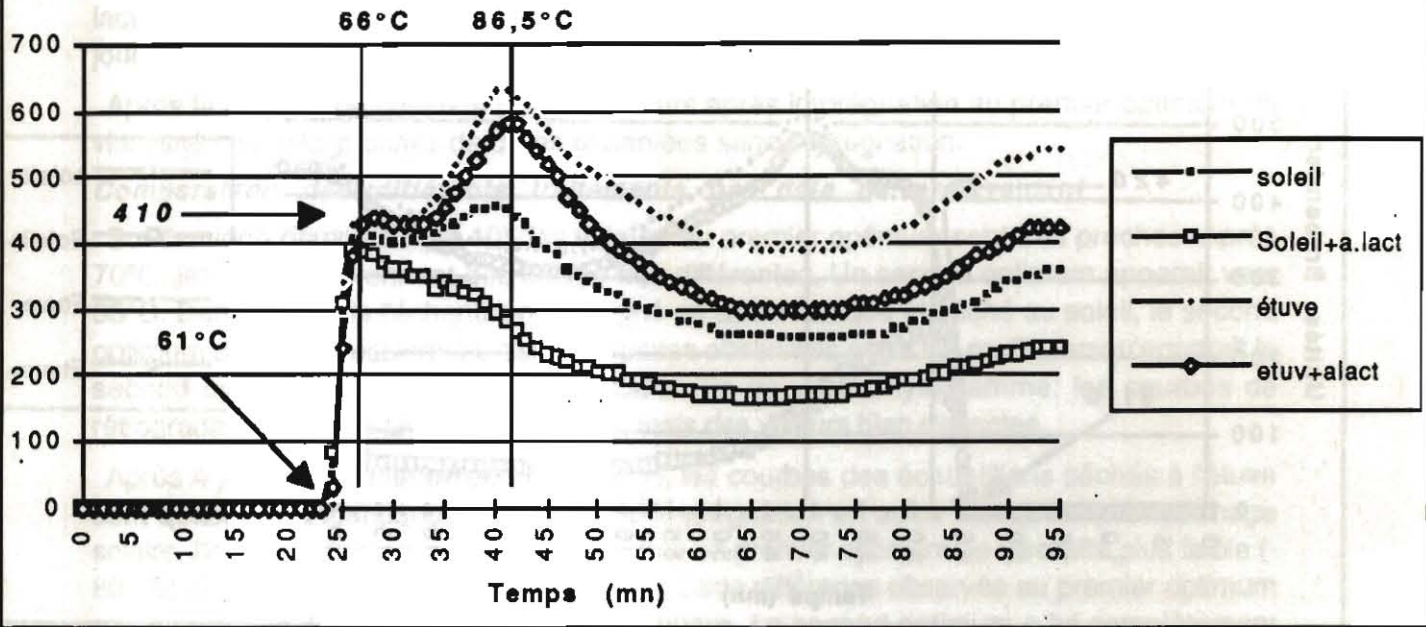
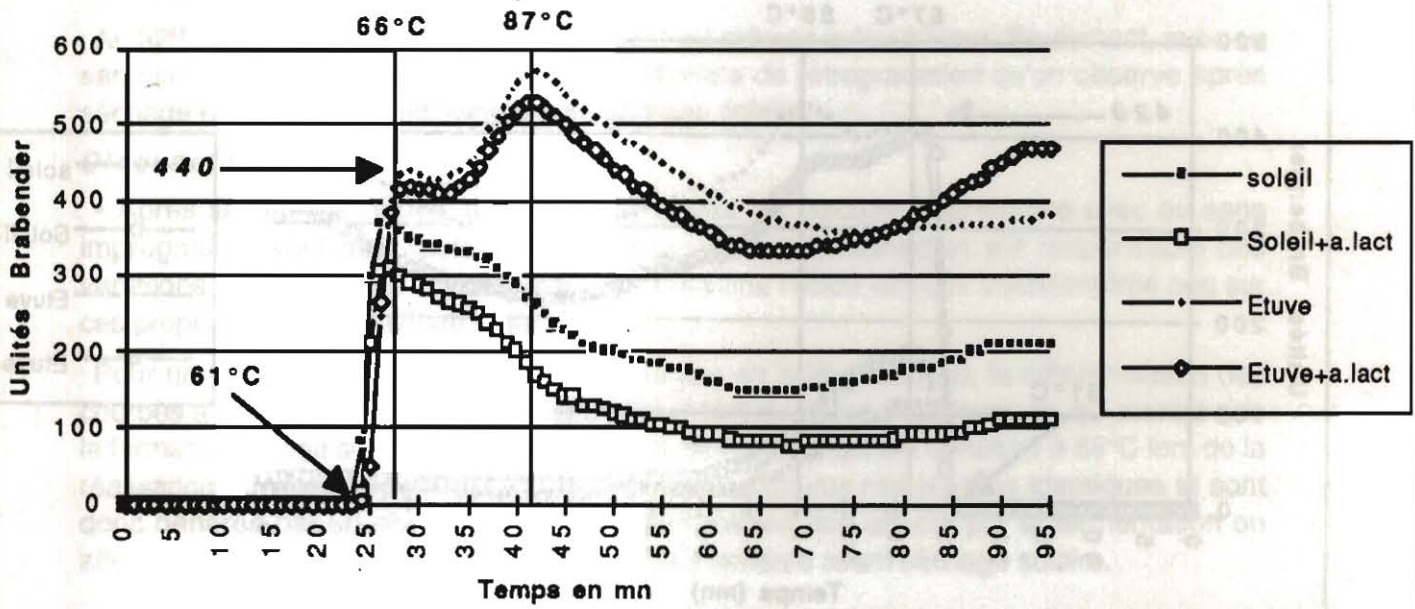


Fig 3.11- Propriétés rhéologiques de l'amidon au 4e jour fermentation en fonction du traitement



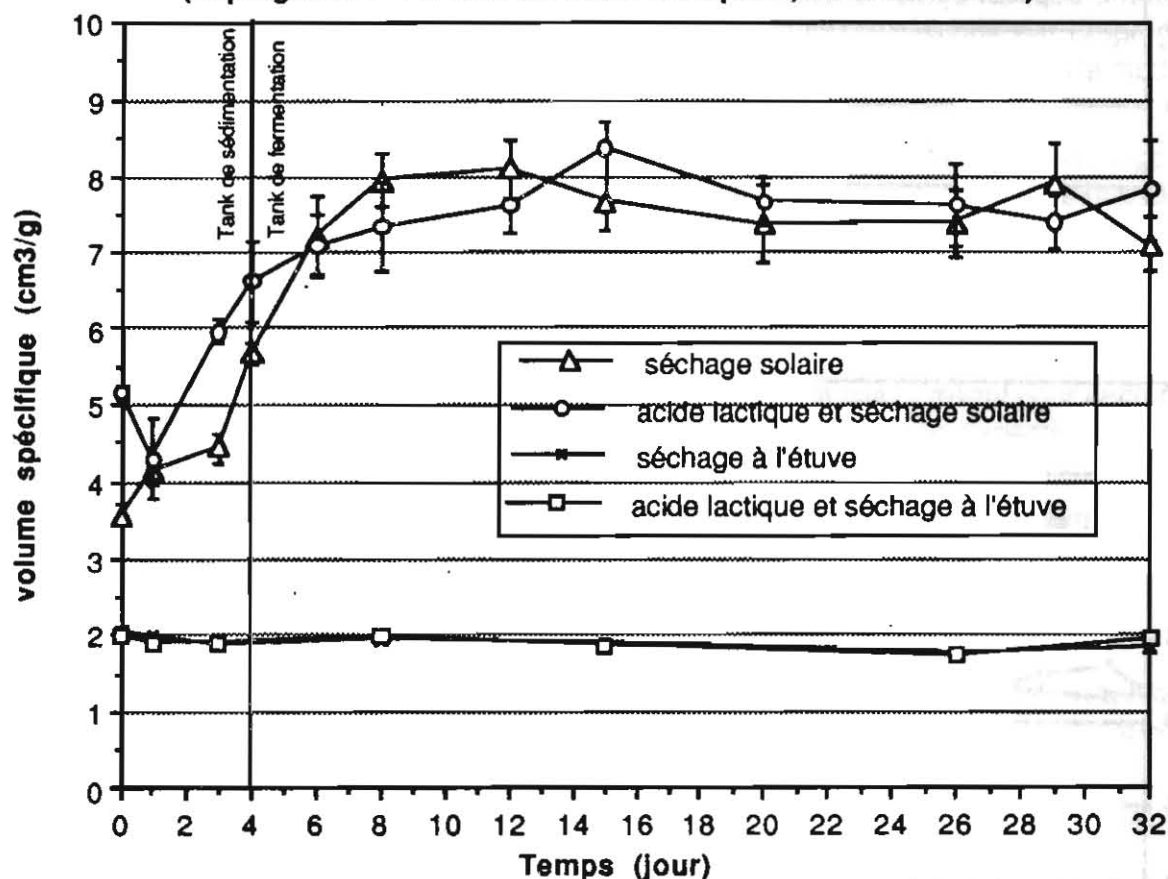
La méthode analytique utilisée ne permet pas de mettre en évidence de différences significatives de la teneur en amylose suite à l'imprégnation en acide lactique et quel que soit le séchage.

Ni la fermentation ni la teneur en acide lactique ne modifie la teneur en amylose de l'amidon. Les modifications de propriétés rhéologiques ne sont donc pas liées à la modification de la proportion amylose / amylopectine.

5 - LES PANIFICATIONS

(cf. 3.17)

Fig 3.17 - Evolution du pouvoir de panification en fonction du temps de fermentation (imprégnation ou non en acide lactique 0,02M - 8h - 25°C)



Les pouvoirs de panification obtenus après séchage à l'étuve sont faibles et constants (2 cm³.g⁻¹) quelque soit le temps de fermentation, et l'imprégnation en acide lactique n'y change rien.

Après séchage solaire, on constate des différences significatives, avec et sans imprégnation en acide lactique, de pouvoir de panification jusqu'au 4^e jour. A partir du 6^e jour (volume spécifique de 7 cm³.g⁻¹) les courbes tendent à se confondre alors que le pouvoir maximum de panification (supérieur à 7,5 cm³.g⁻¹) de l'amidon n'est pas atteint.

Discussion

L'imprégnation en acide lactique améliore le pouvoir de panification des échantillons du suivi de fermentation jusqu'au 6^e jour exclu. Cette observation confirme le rôle très important joué par l'acide lactique dans l'acquisition du pouvoir de panification. Cependant, la fermentation reste le facteur primordial car sans elle, l'optimum de panification ne peut pas être atteint.

Réaliser cet essai sur une autre variété possédant un moins bon pouvoir de panification aurait été plus intéressant car cela aurait permis une meilleure mise en évidence de l'effet de l'imprégnation en acide lactique.

6 - SYNTHÈSE

L'effet de l'imprégnation en acide lactique 0,02M ne se manifeste que durant les 10 premiers jours de fermentation et il est plus marqué après séchage solaire qu'après séchage étuve. L'imprégnation apporte de l'acide lactique à l'amidon jusque vers le 7^e jour. Par la suite, elle entraîne une dilution de l'acide lactique contenue dans l'amidon.

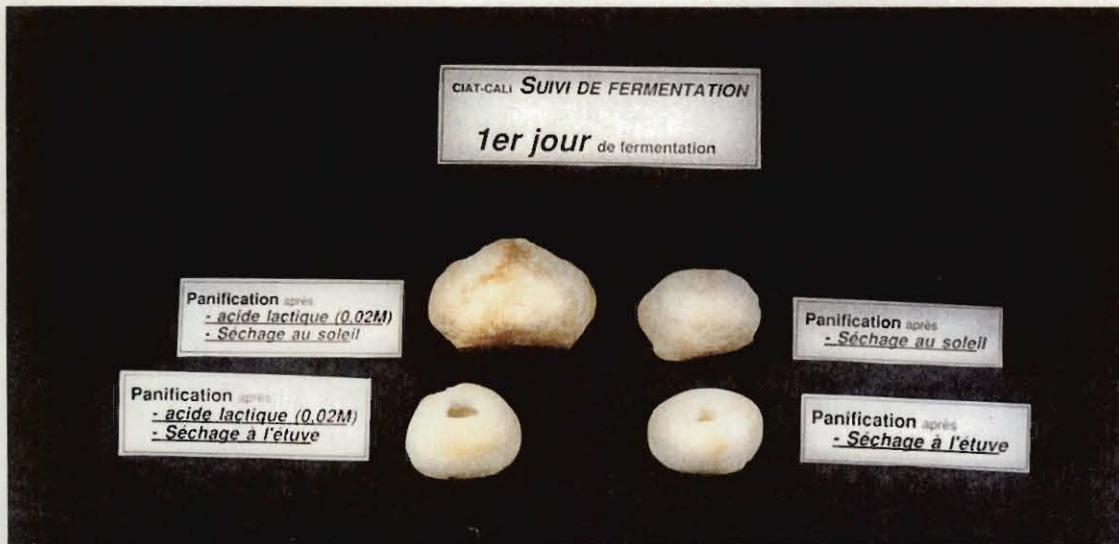
La fermentation est indispensable jusqu'au 12^e jour à l'amélioration des propriétés de l'amidon de manioc de la variété "Algodona" et son action ne se limite pas à produire de l'acide lactique. Après le 12^e jour, elle modifie les propriétés viscoélastiques et physico-chimique de l'amidon sans influencer sur le pouvoir de panification. Le prolongement de la fermentation du 15^e au 30^e jour a peut être simplement un intérêt organoleptique.

Planche n°4: Le suivi de fermentation

Photo n°1: Panification après le 1^{er} jour de fermentation.

Photo n°2: Panification après le 4^e jour de fermentation.

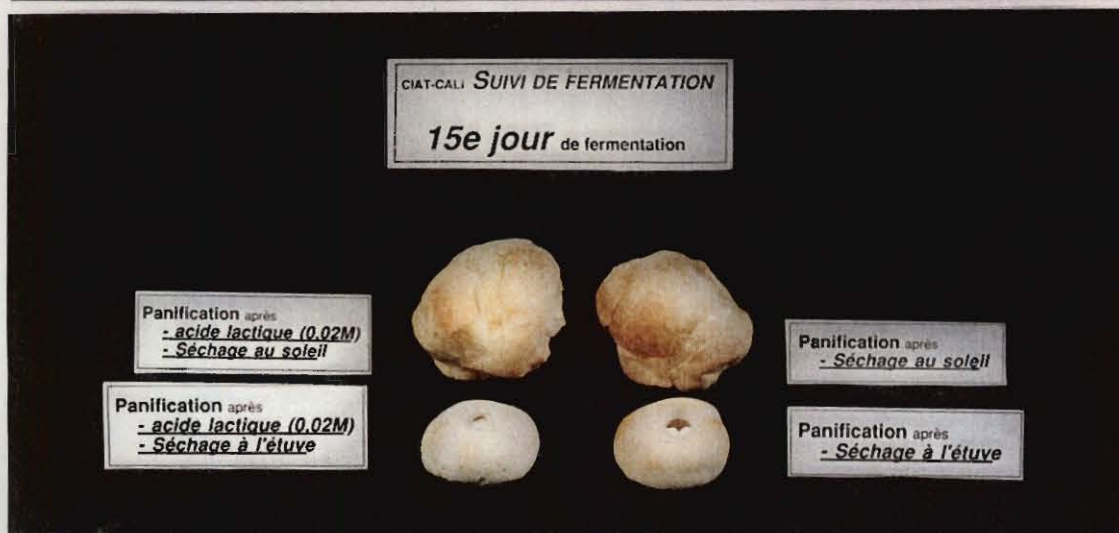
Photo n°3: Panification après le 15^e jour de fermentation.



1.



2.



3.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le pouvoir de panification de l'amidon aigre se manifeste traditionnellement après fermentation et séchage solaire.

Un suivi de la viscosité Brabender tout au long de la fermentation a permis de mettre en évidence que la fermentation entraîne des variations des propriétés viscoélastiques de l'amidon qui sont accentuées par le séchage solaire.

La température de gélatinisation reste 61°C pour tous les échantillons étudiés: c'est une caractéristique de la variété qui ne change pas avec le temps de fermentation.

Deux optimums de viscosité ont par ailleurs été mis en évidence pour les échantillons séchés à l'étuve pour des températures de 66 et 80°C. La viscosité au premier optimum ne varie pas avec le temps de fermentation.

Après séchage solaire, les valeurs de viscosité au premier optimum se différencient nettement, elles sont corrélées à l'acquisition du pouvoir de panification et très inférieures à la valeur observée après séchage à l'étuve.

La fermentation produit de l'acide lactique et modifie la structure de l'amidon, et le séchage solaire intervient comme révélateur de ces transformations.

Le trempage dans l'eau de l'amidon en respectant la proportion $\frac{MS(g)}{Vol.solution(ml)} = \frac{600}{1400}$ entraîne une augmentation du pH, et une diminution de l'acidité totale et de la teneur en acide lactique. Par contre, les propriétés viscoélastiques et le pouvoir de panification ne sont pas modifiées.

Ces expériences nous permettent de penser que l'acide lactique, qui intervient dans l'acquisition du pouvoir de panification (DUFOUR et al, 1994) est présent en excès dans l'amidon aigre en fin de fermentation.

Un lavage plus fort de l'amidon aigre par 4 trempages successifs entraîne une diminution très nette du pouvoir de panification et de la teneur en acide lactique de l'amidon. Les modifications engendrées par la fermentation, une fois l'acide lactique éliminé ne permettent plus l'acquisition d'un pouvoir de panification optimum. **Il faut de l'acide lactique en quantité donnée et suffisante** pour obtenir un bon pouvoir de panification après une exposition au soleil.

Une imprégnation en acide lactique 0,02M des échantillons du suivi de fermentation a mis en évidence une amélioration des propriétés de panification jusqu'au 6e jour exclu, en même temps qu'une diminution des valeurs de viscosité au premier optimum.

Avant le 10e jour de fermentation, l'imprégnation en acide lactique suivi d'un séchage solaire entraîne une différenciation des viscoamylogrammes dont les premiers optimums diminuent plus régulièrement et sont mieux différenciés que ceux des échantillons non imprégnés. En début de fermentation, les teneurs en acide lactique et en acides titrables sont supérieures après l'imprégnation .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Balagopalan, C., Padmaja, G., Nanda, S.K. & Moorthy, S.N., 1988 - Cassava starch. In: Cassava in food, feed, and industry. CRC Press, Inc. Cap.9, p 113-158.

Brabet, C. & Dufour, D., 1993 - El almidón agrio de yuca. Producción y estudio de las propiedades fisicoquímicas. Simposio en carbohidratos. Escuela Politecnica Nacional de Quito, 4-6 de octubre, - Quito, Ecuador

Buckle de, T. S., Zapata M., L. E., Cardenas, O. S. & Cabra, E. Small-scale production of sweet and sour starch in Colombia.

Camargo, C., Colonna, P., Buleon, A. and Richard-Molard, D. 1988 - Functional properties of sour cassava (*Manihot utilissima*) starch : polvilho azedo. J. Sci. Food Agric. 45 : 273-289.

Cardenas, O.S., de Buckle, T.S. 1980 - Sour cassava starch production : a preliminary study. J. Food Sci. 45 : 1509-1512, 1528.

Chuzel, G. 1990 - Cassava starch : current and potential use in Latin America. Cassava Newsletters, 15 (1), 9-11.

Darbon, P., 1988 - Le "roi" amidon. Biofutur Janvier, p. 23-34.

Dufour, D., Larsonneur, S., Alarcon F., Brabet C., Chuzel G. 1993 - Influence of Sundrying on Sour Cassava Starch Quality Pandebono Loaf Volume and Pasting Properties Studies. In International Meeting on Cassava Flour and Starch, 11-15 January, CIAT, Cali, Colombia.

Duprat, F., Gallant, D., Guilbot, A., Mercier, C. & Robin, J. P. 1984 - L'amidon. In: Polymères végétaux: Polymères pariétaux et alimentaires non azotés. Coste, C. Ed. Gauthier Villiar; p 177-231.

French, D. 1969 - Physical and chemical structure of starch and glycogen. In: Symposium on foods: carbohydrates and their roles. Schultz, H.W, Cain, R.F. & Wroldstad, R.W. Eds. AVI Publishing company, Inc. Cap 3, p 26-54.

Godon, B. 1981 - Le pain. Pour la science N°50: 74-87

Jory, M. 1989 - Contribution à l'étude de deux processus de transformation du manioc comportant une phase de fermentation : le gari au Togo, l'amidon aigre en Colombie. Mémoire de mastère en technologie alimentaire régions chaudes, 45 p., ENSIA/CIRAD, Montpellier, France.

Larsonneur, S. 1993 - Influence du séchage solaire sur la qualité de l'amidon aigre de manioc. Mémoire Ingénieur UTC, 114 p., Cali, Colombie.

Laurent, L. 1992 - Qualité de l'amidon aigre de manioc : validation d'une méthode d'évaluation du pouvoir de panification et mise en place d'une épreuve descriptive d'analyse sensorielle. Mémoire Ingénieur UTC, 88 p., Cali, Colombie.

Le Meste M., 1988 - PFMA, Cahier de l'ENSBANA n°6, p 167 à 169. Ed. Tech et Doc

Meraz, M., Shirai, K., Larralde P. & Revah, S. 1992 - Studies on the bacteric acidification process of cassava (*Manihot esculenta*). J. Sci. Food Agric., Vol. 60, 457-463.

Nakamura, I.M. and Park, Y.K. 1975 - Some physico-chemical properties of fermented cassava starch ("polvilho azedo"). Die Stärke, 27 (9), 295-297.

- Ostertag, C. F. 1993. World production and markets for starch. 1994 - Sour cassava starch production improvement in Colombia. In International Meeting on Cassava Flour and Starch, 11-15 January, CIAT, Cali, Colombia.
- Rickard, J.E., Asaoka, M. & Blanshard, J. M. V. 1991 - The physico-chemical properties of cassava starch. *Trop Sci*. Vol 31, 189-207.
- Romero, 1993 - Almidones naturales y modificados en productos alimenticios, Alimentos Hoy n°4, enero-marzo 1993.
- Seyam, A. M. & Kidman, F. C. 1975 - Starches of non-wheat origin: their effect on bread quality. *The bakers digest*, April p 25-31.
- Thibault, J. F. & Colonna, P. 1988 - Propriétés fonctionnelles: pectines et amidon. *Les Cahiers de l'Ensbana* N°6, p. 157-171.
- Wheattley, C.C., Orrego, J.I., Sanchez, T. & Granados, E. 1992 - Quality evaluation of the cassava core collection at CIAT Proceeding of the first international Scientific Meeting, Cartagena de Indía, Colombia, 25-28 August 1992. P. 255-264.
- Zobel, H.F. 1984 - Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes. In: *Starch: Chemistry and technology*. Whistkier, R.L., Bemiller, J.N. & Paschall, E. F. Eds. Academic Press, Inc. Cap 9, p. 285-309.
- Dardon, P. 1988 - Le "rot" amidon. *Biotrop*, Janvier, p. 23-24.
- Boulet, D., Lecomte, S., Aitoun, F., Babel, C., Chuzel, G. 1993 - Influence of starch on Sour Cassava Starch Quality. *Proceeding of the first international Scientific Meeting on Cassava Flour and Starch*, 11-15 January, CIAT, Cali, Colombia, 25-28 August 1992. P. 255-264.
- Guilford, A., Marlet, C. & Robin, J. P. 1984 - *Carbohydrate Chemistry*. Wiley, New York.
- Franco, D. 1989 - Physical and chemical structure of starch. In: *Symposium on Starch*, R.F. & Wolstead, R. V. Eds. Academic Press, Inc. Cap 1, p. 1-10.
- Gordon, J. 1987 - Pour la science. *Le Monde*, 27.05.87.
- Joly, M. 1989 - Contribution à l'étude des caractéristiques de transformation du manioc. *Manioc et produits dérivés*. Ed. ENSBANA, p. 1-10.
- Lacomte, S. 1993 - Influence de sécheresse sur la qualité de l'amidon aigre de manioc. *Mémoire Ingénieur UTC*, 114 p., Cali, Colombie.
- Laurent, L. 1992 - Qualité de l'amidon aigre de manioc : validation d'une méthode d'évaluation du pouvoir de panification et mise en place d'une éprouve descriptive. *Mémoire Ingénieur UTC*, 88 p., Cali, Colombie.
- Maza, M. 1988 - PFMA, Cahier de l'ENSBANA n°6, p. 187 à 189. Ed. Tech et Doc.
- Metz, M., Shirai, K., Lataste, P. & Fevri, S. 1992 - Studies on the bacterial acidification process of cassava (*Manihot esculenta*). *J. Sci. Food Agric.*, Vol. 60, 457-463.
- Nakamura, I.M. and Park, Y.K. 1975 - Some physico-chemical properties of fermented cassava starch ("povinho azedo"). *Die Stärke*, 27 (9), 295-297.