

TRANSFORMATION DU SOJA A LA FERME

Technologies disponibles



itab

l'Institut de l'agriculture
et de l'alimentation biologiques



PREAMBULE

Ce texte a été élaboré dans le cadre du projet OK-NET EcoFeed, sur la base d'un document traduit de l'allemand qui présentait différentes installations dédiées à la transformation du soja. Ce document initial a ensuite été révisé par Patrick Carré, ingénieur technologique Terres Inovia / ITERG qui a rédigé la première partie théorique. On y trouvera des explications sur l'importance de la cuisson et sur son mode d'action.

Le document initial issu de l'allemand a été remanié dans le but d'une meilleure classification des technologies. La présentation d'une installation d'extraction utilisant un solvant non autorisé pour les produits issus de l'agriculture biologique a été supprimée tandis que quelques équipements disponibles en France et à l'étranger ont été ajoutés. Enfin, pour chaque technologie présentée, des commentaires ont été formulés lorsque cela semblait nécessaire afin de compléter les informations originales.

Le lecteur aura probablement le sentiment qu'un certain nombre de données sont encore teintées d'incertitude tant il est vrai qu'il reste difficile d'établir des connaissances satisfaisantes dans ce domaine encore assez mal étudié en France. Le rédacteur de ces lignes espère toutefois que les connaissances générales présentées en première partie donneront les outils nécessaires au lecteur pour élaborer sa propre réflexion quant aux choix d'équipements à réaliser.

Nous invitons les personnes qui souhaiteraient approfondir cette réflexion à nous contacter.

Patrick Carré – Terres Inovia – 05.56.07.97.13 - p.carre@terresinovia.fr

OUVRAGE DE REFERENCE ET SOUTIEN FINANCIER

Référence de la version originale de ce guide, rédigée en allemand par le FiBL et dont la réalisation a été soutenue par Bundesprogramm ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft Deutschland :

“Asam, L., Spory, K.; Spiegel, A., 2014. Sojaaufbereitungsanlagen. FiBL (Forschungsinstitut für biologischen Landbau). 29 p. ”

La traduction et l'adaptation de ce guide en français ont été réalisées dans le cadre d'un projet qui a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, dans le cadre de la convention de subvention n° 773911. Les informations contenues dans ce manuel reflètent uniquement le point de vue de l'auteur. L'Agence exécutive pour la recherche n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations fournies”.

Edition ITAB

- ▶ **Auteur principal** : Patrick Carré, Terres Inovia / ITERG
- ▶ **Relecteurs** : Stanislas Lubac, ITAB ; Florence Maupertuis, Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire ; Laurent Alibert, IFIP ; Alain Quinsac, Terres Inovia
- ▶ **Traductrice** des éléments issus du document initial du FiBL : Romane Lesage
- ▶ **Traduction et adaptation** réalisées dans le cadre du projet OK-NET ECOFEED.
- ▶ **Date** : janvier 2021
- ▶ **Pour citer cet ouvrage**: Carré P. , 2020. Transformation du soja à la ferme, technologies disponibles. Edition ITAB. 49 p

Sommaire

PREAMBULE	1
Sommaire	2
PARTIE I	3
Pourquoi et comment cuire la graine de soja destinée aux monogastriques ?	3
1. Principaux facteurs antinutritionnels thermolabiles du soja.....	3
2. Effet de la cuisson sur les facteurs antinutritionnels	5
3. Quels contrôles analytiques pratiquer ?.....	8
PARTIE II	10
Principes de fonctionnement des équipements de cuisson	10
1. Typologie des méthodes de cuisson.....	10
3. Transformation avec déshuilage.....	13
PARTIE III	16
Description des équipements disponibles	16
1. Transfert de chaleur par conduction majoritaire.....	16
2. Transfert de chaleur par circulation d'air surchauffé	21
3. Les dispositifs à flamme directe ou semi-directe.....	24
4. Extrusion : transformation d'énergie mécanique en chaleur par friction/cisaillement	33
5. Installation hydrothermique : Meika Tierernährung	39
6. Installations issues de la combinaison de différentes techniques –	41
7. Equipements Innovants.....	46



PARTIE I

Pourquoi et comment cuire la graine de soja destinée aux monogastriques ?

1. Principaux facteurs antinutritionnels thermolabiles du soja

► Les facteurs antitrypsiques : des facteurs antinutritionnels majeurs

Le premier des facteurs antinutritionnels du soja par ordre d'importance est un ensemble de protéines ayant pour propriété de se fixer de manière durable aux protéases digestives des animaux, réduisant leur activité et la valeur nutritionnelle de l'ensemble des protéines du soja. On parle en général de facteurs antitrypsiques (FAT). La plus connue de ces protéines est l'inhibiteur de trypsine de Kunitz identifié en 1945, qui est spécifique de la trypsine et constituée de 181 acides aminés. On cite également l'inhibiteur de Bowman Birk (BB), une protéine de 71 acides aminés, active à la fois sur trypsine et chymotrypsine. Celle-ci serait thermiquement plus stable que l'inhibiteur de Kunitz, lequel possède deux ponts disulfure susceptibles d'être brisés à la chaleur¹. On attribue généralement l'activité antitrypsique résiduelle après un traitement thermique à la présence de l'inhibiteur BB. Le mécanisme d'action de l'inhibiteur de Kunitz ne semble pas se limiter à l'effet sur les enzymes digestives. Kakade et al.^{2,3} ont montré que cet effet n'expliquait que 40 % de la dépression de croissance observée sur animaux. La diminution du taux de trypsine libre dans le jéjunum stimule la production de cholécystokinine, une hormone médiatrice de la production de trypsine par le pancréas, lequel est stimulé pour produire plus de trypsine consommant par ce fait une part non négligeable des acides aminés disponibles, notamment des acides aminés soufrés ce qui pénalise la croissance. Globalement, ces inhibiteurs de protéases réduisent la digestibilité des protéines (74-77% contre 89% pour le soja cuit à la vapeur⁴).

► Activité uréasique

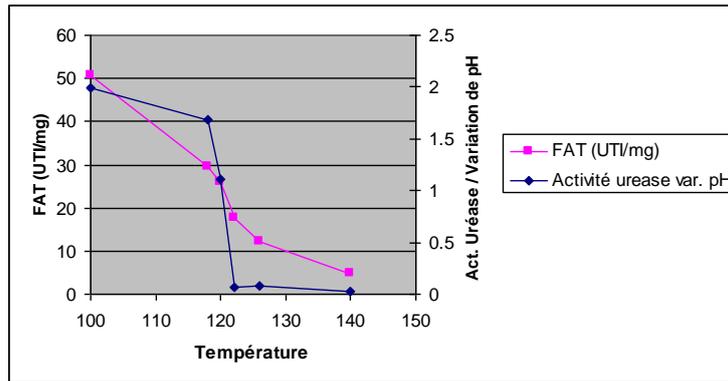
L'activité Uréase est avant tout un marqueur de la cuisson des sojas. Il est plus facile à mesurer que l'activité antitrypsique car il suffit de suivre la variation de pH liée à la décomposition de l'urée en ammoniac et CO₂ par l'uréase du soja. Snyder note que la valeur correcte d'un soja normalement traité est une variation de pH inférieure à 0.25. L'uréase n'est pas en soi une enzyme nocive, son activité plus facile à mesurer que l'activité antitrypsique est un marqueur de cuisson. Toutefois, il est à noter que si son inactivation est proche de celle de l'activité antitrypsique (AAT), elle n'est pas totalement équivalente et que des valeurs basses d'activité uréase sont compatibles avec des valeurs d'AAT encore trop élevées (figure 1).

¹ KeShun Liu, SOYbean : Chemistry, Technology and utilization, Springer 1997 p49

² Kakade et al. (1974) Cereal Chem. 51 : 376-382

³ Kakade M.L. Hoffa D.E. and Liener I.E. Contribution of trypsin inhibitor to deleterious effects of unheated soybeans fed to rats. The Journal Of Nutrition 103 :1772-1778, 1973

⁴ Shin, D.-J., Kim, W., & Kim, Y. (2013). Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed, and roasted soy flour. Food Chemistry, 141, 517-523.



► Figure 1 : variation comparées de l'activité antitrypsique et activité uréase selon Ruiz et al.⁵

► Autres facteurs antinutritionnels

Les **hémagglutinines (lectines)** sont des glycoprotéines qui ont la particularité de provoquer l'agrégation des érythrocytes (globules rouges). On en trouve classiquement dans toutes les légumineuses. Ces protéines se combinent avec les polysaccharides présents à la surface des cellules et les lient entre elles. Cette caractéristique a un effet déplétif sur la croissance démontré en 1943 sur des rats. Le mécanisme de cet effet serait assez complexe incluant une réduction de l'insulinémie, l'inhibition de disaccharides et de protéases dans l'intestin, des dégénérescences rénale et hépatiques ainsi qu'une interférence avec l'absorption du fer non hémique et des lipides alimentaires. Snyder⁶ dans son ouvrage sur les utilisations du soja note que les hémagglutinines du soja, contrairement à celles d'autres plantes, n'ont pas d'effets importants sur la valeur nutritive du soja.

Comme les facteurs antitrypsiques les lectines sont thermolabiles. Les conditions qui éliminent l'effet antitrypsique sont généralement efficaces sur les lectines. On note toutefois que les lectines résistent à l'action de la chaleur sèche⁷.

On cite également un **facteur goitrigène** de nature peptidique et également thermolabile qui accroît les besoins en iode et entraîne une hypothyroïdie⁸. Il semblerait toutefois que les phyto-œstrogènes, et plus particulièrement la génistéine soient à l'origine de ce problème, et que par conséquent cet effet antinutritionnel ne soit pas thermolabile⁹.

► Valeurs d'activité antitrypsique de la graine et valeur cible du traitement

Des facteurs antinutritionnels (FAN) thermolabiles cités, on a vu que les facteurs antitrypsiques étaient les plus difficiles à réduire et qu'en les réduisant convenablement, on peut s'assurer de la non-nocivité des autres FAN (hors phyto-œstrogènes).

Les valeurs d'activité antitrypsique rencontrées dans les graines crues (non soumises à un traitement thermique) se situent généralement entre 30 et 60 UTI/mg et typiquement autour de 45 UTI/mg.

Les recommandations du secteur de l'alimentation animale varient selon la sensibilité des animaux. Les monogastriques et surtout les jeunes animaux (poussins, porcelets) sont très sensibles alors que cette sensibilité diminue chez les monogastriques en croissance. Pour le porc en croissance, le seuil a été fixé à 3 UTI/mg au niveau de l'aliment par l'IFIP¹⁰, soit pour un aliment à 18% de soja environ 15 UTI/mg (en l'absence d'autres aliments comprenant des FAT dans la ration). En ce qui concerne les porcelets post sevrage, un essai récent réalisé sur des tourteaux produits à l'atelier pilote de Pessac¹¹ a montré qu'avec une valeur d'activité antitrypsique légèrement supérieure à 7 UTI/ mg de tourteau, la digestibilité iléale des acides aminés est négativement impactée et la performance est dégradée. Sur volailles, le seuil est fixé à 4 UTI/mg¹².

⁵ Ruiz N., de Belacazar F. and Diaz G. J. Quality Control Parameters for Commercial Full-Fat Soybeans Processed by Two Different Methods and Fed to Broilers. J. Appl. Poult. Res. 13:443-450. 2004

⁶ Snyder H. E., Kwon T.W., Soybean Utilization, 1987, AVIBOOK New York.

⁷ De Muelenaere, H. J. H. (1964). Effect of heat treatment on the haemagglutinating activity of legumes. Nature, 201(4923), 1029-1030

⁸ Konijn, A. M., Edelstein, S., & Guggenheim, K. (1972). Separation of a thyroid-active fraction from unheated soya bean flour. Journal of the Science of Food and Agriculture, 23(5), 549-555.

⁹ Doerge, D. R., & Sheehan, D. M. (2002). Goitrogenic and estrogenic activity of soy isoflavones. Environmental health perspectives, 110(suppl 3), 349-353

¹⁰ https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/fiche_bilan2014_075.pdf

¹¹ HALAS, V., ROYER, E., CARRE, P., BIKKER, P., QUINSAC, A., KNUDSEN, K. E. B., ... & van WIKSELAAR, P. Impact du décorticage et des traitements thermiques du soja sur la valeur nutritionnelle des tourteaux partiellement déshuilés chez le porcelet. JRP 2020

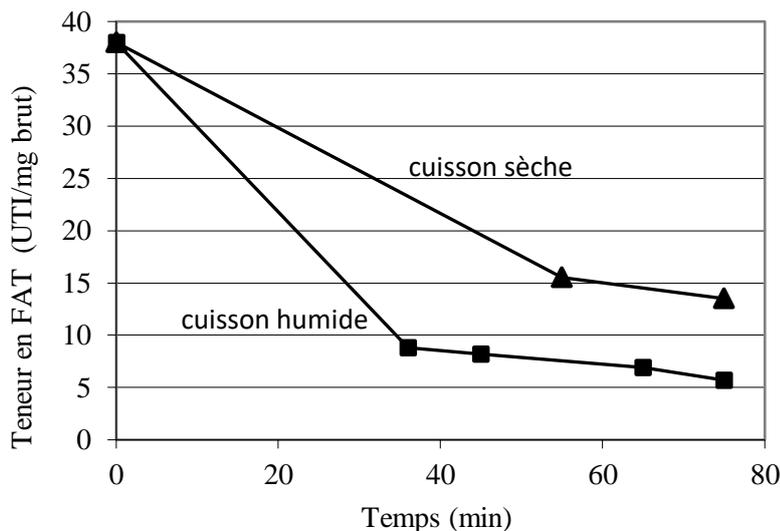
¹² Sakkas, P., Royer, E., Smith, S., Oikeh, I., & Kyriazakis, I. (2019). Combining alternative processing methods for European soybeans to be used in broiler diets. Animal feed science and technology, 253, 45-55.

2. Effet de la cuisson sur les facteurs antinutritionnels

► Efficacité de la chaleur humide versus chaleur sèche.

Le mode de cuisson, notamment la nature humide ou sèche des conditions de cuisson, a une influence majeure sur les températures et la durée d'exposition à la chaleur nécessaire à la réduction des FAT. La figure 2 montre un exemple de l'effet de la cuisson humide sur la réduction des FAT. Ici, les graines ont été placées dans la même enceinte de cuisson avec et sans eau. Le résultat est une AAT encore élevée après 80 minutes de cuisson pour la cuisson sèche et une valeur proche de la cible pour la cuisson humide.

Il semblerait que dans le cas des facteurs antitrypsiques, les protéines soient moins thermiquement stables lorsque l'activité de l'eau est élevée.



► Figure 2 : cinétiques de réduction des FAT dans un cuiseur à pression atmosphérique de soja avec et sans ajout d'eau.

La température a pour effet de modifier la conformation tridimensionnelle de la protéine. La conformation native est maintenue par des interactions faibles (liaisons hydrogène, interactions hydrophobes) que la cuisson humide détruit de façon plus ou moins réversible, conduisant à des pertes de solubilité et des agrégations..

► Eviter la surcuisson, qui dégrade la digestibilité des acides aminés

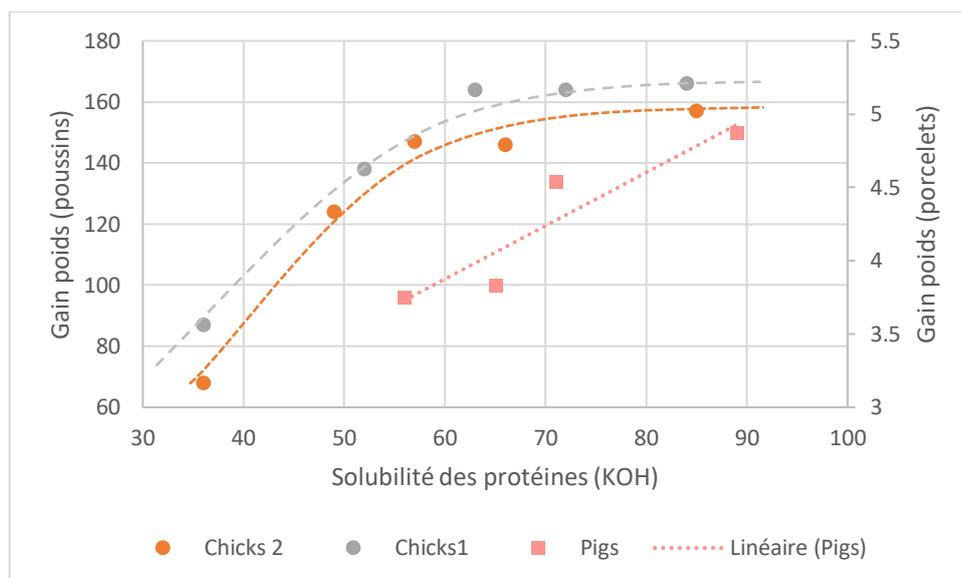
Dans le cas du soja comme dans celui de toutes les graines oléagineuses, les traitements excessifs entraînent des problèmes de digestibilité des acides aminés essentiels et pour certains d'entre eux des pertes par modification chimique. Ces pertes sont liées aux réactions de sucres réducteurs avec les fonctions amines libres des acides aminés des protéines (réaction de Maillard).

Les acides aminés les plus sensibles sont par ordre : la lysine, la cystéine et l'arginine (dans le cas de la cystéine, le mécanisme est différent de la réaction de Maillard, les groupements SH de deux cystéines formant un pont S-S en perdant leur hydrogène). Par exemple, un passage en autoclave (cuisson sous 1 bar de vapeur) de 60 min conduit à perdre 21.6% de lysine, 12.3% de cystéine et 10% d'arginine sur un tourteau conventionnel déjà toasté lors de la désolvantation.¹³ Pour la plupart des autres acides aminés, les pertes sont de l'ordre de 4-5%.

Au-delà de ces pertes la digestibilité est réduite proportionnellement à l'intensité du traitement. Un traitement à l'autoclave de 40 minutes diminue la digestibilité chez le poulet de l'histidine (-18.4%), de la cystéine (-16.8%), de l'arginine (-9.3%) et de la lysine (-8.7%).

Concrètement ces effets sont visibles sur la performance des animaux d'élevage comme le montre la figure 3 où les performances de croissance de poussins et de porcelets sont mesurées en fonction de la solubilité des protéines. Dans ces essais, on a travaillé avec des tourteaux de soja dont les FAT étaient déjà désactivés puis traités dans un autoclave selon des durées comprises entre 0 et 40 minutes.

¹³ Parsons, C. M., Hashimoto, K., Wedekind, K. J., Han, Y., & Baker, D. H. (1992). Effect of overprocessing on availability of amino acids and energy in soybean meal. Poultry science, 71(1), 133-140.



► **Figure 3 : Effet sur la croissance de poussins et porcelets de tourteaux de soja surcuits¹⁴**

L'effet de la surcuisson semble impacter plus fortement la croissance du porcelet que celle des poussins où la perte de croissance n'est vraiment significative que pour des solubilités inférieures à 60%.

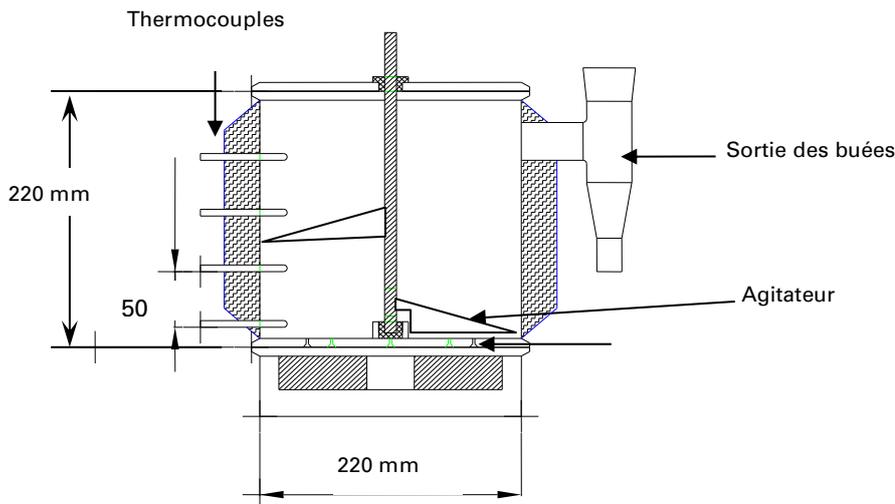
On considère généralement qu'une solubilité (KOH) supérieure à 70% est correcte mais si la technique le permet, il est préférable de viser >80%.

► **Comment atteindre le meilleur compromis entre solubilité des protéines (KOH) et réduction des facteurs antitrypsiques ?**

Un essai a été réalisé au laboratoire de Terres Inovia à l'aide d'un cuiseur expérimental pour modéliser les effets des traitements hydrothermiques sur la réduction des FAT et sur la variation de la solubilité (mesurée dans la potasse) des protéines. De la graine préalablement aplatie a été chauffée à une température de 100°C pendant 60 minutes en présence de vapeur à raison de 300 g de vapeur pour 1 kg de flocons de soja.

Le cuiseur utilisé est un appareil d'une capacité d'environ 2 kg de flocons muni d'une résistance chauffant le fond de l'appareil et permettant un apport de vapeur au niveau d'orifices aménagés également dans le fond (figure 4). Une agitation vigoureuse permet d'assurer l'homogénéité de la température dans la masse de flocons. La graine de variété Isidor a été traitée en faisant varier la durée de cuisson et de l'injection de vapeur. Les effets des traitements thermiques ont été contrôlés sur la réduction de l'activité antitrypsique et sur la solubilité KOH des protéines.

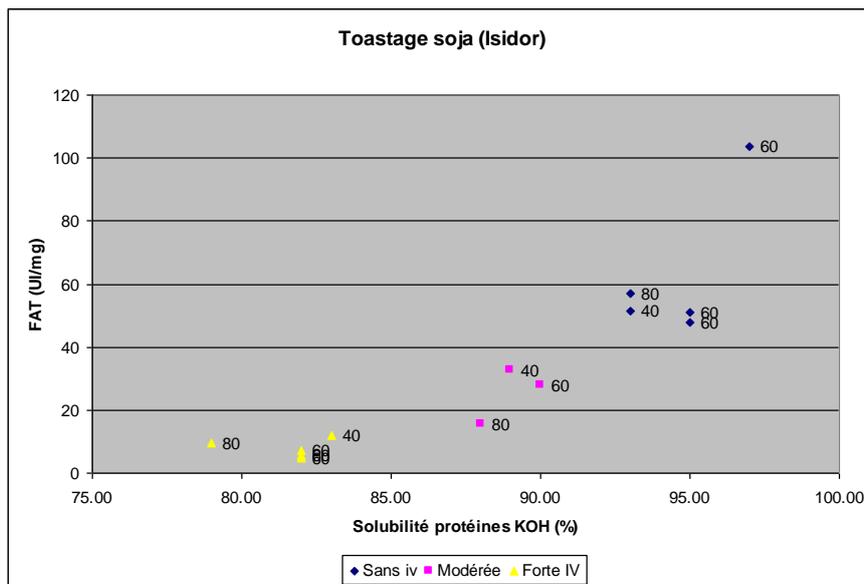
¹⁴ Parsons, C. M., Hashimoto, K., Wedekind, K. J., & Baker, D. H. (1991). Soybean protein solubility in potassium hydroxide: an in vitro test of in vivo protein quality. *Journal of animal science*, 69(7), 2918-2924..



► Figure 4 : schéma du cuiseur de laboratoire

On a ainsi comparé l'effet d'une cuisson sans vapeur (sans IV), avec 150 g/h de vapeur (IV modérée) et 300 g/h de vapeur (forte IV) pour des durées de 40, 60 et 80 minutes.

La figure 5 présente les résultats de cet essai.



► Figure 5 : Effet de la durée de cuisson et de l'injection de vapeur sur la solubilité des protéines et les facteurs antitrypsiques du soja. IV : injection de vapeur, modérée : 150 g/h/kg de soja, forte 300 g/h/kg de soja. 40, 60 et 80 sont les durées de cuisson en minutes. La température appliquée était de 100°C.

Il apparaît clairement au vu de ces résultats que l'injection de vapeur joue un rôle très important dans la réduction des facteurs antitrypsiques et qu'un simple chauffage à sec à 100°C n'est pas efficace.

On retiendra également que l'atteinte de la cible en matière de réduction des FAT est compatible avec une solubilité des protéines supérieure à 80%.

Conclusion : une cuisson efficace est une cuisson dans laquelle on parvient à une ambiance très humide. Une température de 100°C est suffisante pour atteindre l'objectif de réduction des FAT et un temps de contact de l'ordre de 60 minutes est nécessaire. Précisons qu'une mauvaise application de ces conditions est possible dans un équipement industriel en raison de la dispersion des temps de séjour et de l'hétérogénéité du traitement thermique, avec un effet défavorable sur la qualité du soja traité.

3. Quels contrôles analytiques pratiquer ?

► Activités antitrypsique et uréasique

►► L'activité antitrypsique :

Elle se mesure à partir d'une réaction de l'échantillon avec une solution de trypsine. Cette méthode a été publiée et enregistrée sous la référence A.O.C.S. Ba 12-75 et est utilisée par différents laboratoires français.

L'unité de mesure est le plus souvent le mg de trypsine inhibée par g d'échantillon. D'autres expriment cette activité en unité de trypsine par mg d'échantillon. Le passage de l'un à l'autre se fait de la façon suivante :

$$mg\ trypsine / g = UI\ trypsine / mg * 1.2$$

►► L'activité uréasique :

L'activité uréasique comme signalé préalablement varie dans le même sens que l'activité antitrypsique avec cependant des cinétiques assez différentes (figure 1). Cette mesure est néanmoins plus répandue que celle de l'activité antitrypsique car elle est plus facile à réaliser. En effet, elle consiste à mesurer la quantité de NH₃ libéré par l'action de l'uréase résiduelle sur une quantité d'urée ajoutée et peut se mesurer par la variation de pH causée par la libération du NH₃.

Les variations mesurées vont de 2 unités de pH pour un soja cru à 0.1 et moins pour un soja suffisamment cuit.

Cette mesure est un indicateur à manier avec prudence car une activité nulle peut laisser croire à tort que l'activité antitrypsique est détruite. En revanche, une activité uréase élevée est un indicateur sûr d'une cuisson insuffisante. Sachant cela, cet indicateur peut aider dans le cadre de contrôles de routine.

► Solubilité des protéines

►► Test au rouge de crésol (Frölich) :

Ce test consiste à mesurer la capacité du tourteau à absorber le rouge de crésol qui ne se lie pas aux protéines crues. Il est exprimé en mg de colorant/g de tourteau brut.

Valeurs	Qualité de cuisson
inf. à 5	sous-cuit
5 à 6.5	correctement cuit
sup. à 6.5	surcuit

Cette méthode est assez imprécise. On peut la mettre en pratique dans le cadre d'une activité de contrôle de routine en suivant un protocole assez rigoureux pour limiter les erreurs, mais l'incertitude demeurera importante.

Ce test est surtout utilisé pour évaluer la surcuisson préjudiciable à la digestibilité des protéines.

►► Solubilité des protéines KOH :

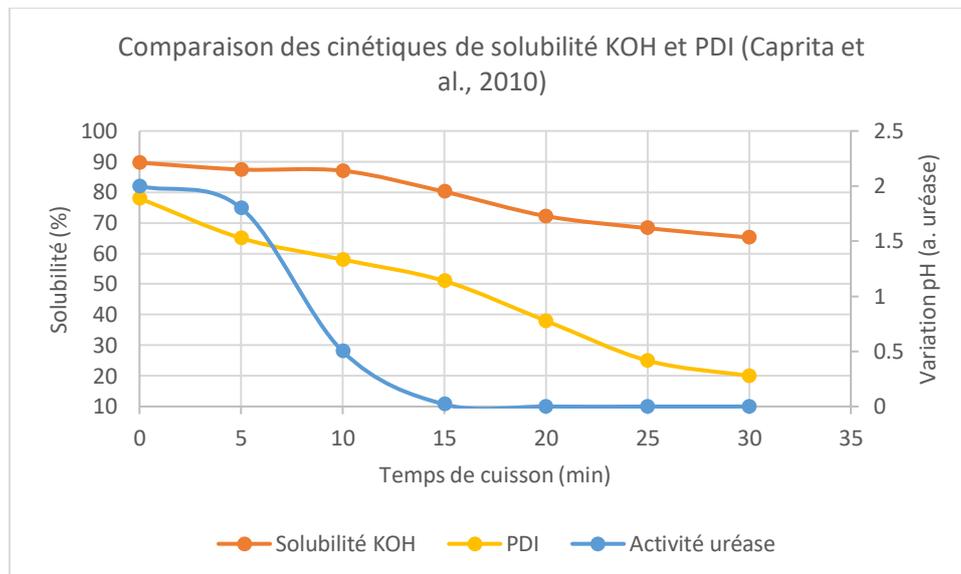
Ce test consiste à doser la solubilité des protéines dans une solution très alcaline (pH voisin de 10). Il nécessite de doser d'abord la teneur en protéines de la matière puis de doser les protéines qui ont été solubilisées dans la solution alcaline. La méthode de dosage est la méthode de Kjeldahl. Ce test est laborieux mais donne des résultats fiables et reproductibles. Il est bien corrélé aux mesures de digestibilité chez les monogastriques.

Valeurs	Qualité de cuisson
90 à 99	soja cru
sup. 85	soja insuffisamment cuit
75 à 85	soja correctement cuit
inf. à 70	soja surcuit

►► PDI (Proteins dispersibility index)

Cet indice mesure la dispersibilité des protéines dans l'eau à pH neutre après un broyage poussé réalisé au moyen d'un appareil à haute vitesse de rotation qui réduit fortement la taille des particules.

Cet indice est plus sensible à la température que la solubilité KOH et commence à baisser pour des traitements auxquels la solubilité KOH n'est pas sensible. Un exemple de comparaison des deux solubilités est donné dans la figure 6. Après 10 minutes à 120°C, le soja ne perd que 3% de solubilité KOH alors qu'il perd 26% de sa PDI.



► Figure 6 : Comparaison des cinétiques de réduction de la solubilité des protéines de soja selon 2 méthodes (KOH et PDI) en fonction du temps de cuisson (four à convection forcée, 120°C) et réduction de l'activité uréasique selon Caprita et al.¹⁵

■ QUE RETENIR ?

Idéalement, la mesure de l'activité antitrypsique couplée à une mesure de solubilité KOH devrait donner les indications les plus fiables et les plus faciles à relier aux performances des animaux.

Comme on l'a vu les cibles pour des FAT sont entre 2 et 7 UTI / mg – de préférence 3 à 5 UTI/mg.

La solubilité KOH ne devrait pas descendre à moins de 80%, mais la désactivation des FAT restant prioritaire, des valeurs jusqu'à 75 % sont possibles.

¹⁵ Căpriță, R., Căpriță, A., & Crețescu, I. (2010). Protein solubility as quality index for processed soybean. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 43(1), 375-378.



PARTIE II

Principes de fonctionnement des équipements de cuisson

1. Typologie des méthodes de cuisson

► Conduction - convection forcée

La chaleur est transmise à la matière dans un premier temps par contact avec un corps plus chaud puis dans un second temps par échange de chaleur de particule à particule tant qu'il existe un différentiel de chaleur entre elles. Les particules n'étant pas mobiles, il faut les agiter pour répartir la chaleur dans la masse, c'est la convection forcée.

►► Chaleur transmise par une surface métallique

C'est le principe de la casserole à sec, il faut une agitation importante pour transférer la chaleur dans la masse du grain car la conduction de particule à particule est faible et la surface de contact est faible. Il faut donc déplacer les particules au contact de la surface chauffante pour leur permettre de chauffer. Cette méthode demande donc beaucoup de travail mécanique.

►► Chaleur transmise par un flux d'air chaud

Un flux d'air très chaud circule autour des particules ce qui permet de profiter de l'ensemble de la surface d'échange constituée par la surface des particules. On peut donc en principe parvenir à élever la température de la matière plus rapidement que par le contact d'une surface chauffante. Toutefois ce principe nécessite d'utiliser beaucoup d'air pour véhiculer la température, la chaleur spécifique de l'air sec n'étant que de 1 kJ/°C/kg. Par exemple pour passer 1 kg de soja de 20 à 100°C en supposant une chaleur spécifique du soja à 2 kJ/°C/kg et un rendement de 80%, il faut apporter 200 kJ. Pour transporter ces 200 kJ avec de l'air sec, en supposant d'entrer à 120°C et de sortir à 40°C, on transfère 80 kJ par kg d'air, il faut donc 2.5 kg d'air par kg de soja, soit 2.3 m³ d'air chaud/kg.

Idéalement, le flux d'air doit être assez lent pour permettre à la chaleur de passer de l'air à la matière solide. La difficulté est de parvenir à sortir du système avec un air le plus froid possible pour éviter les pertes thermiques.

On peut utiliser plusieurs solutions pour améliorer les rendements comme réchauffer l'air entrant avec l'air sortant, travailler en circuit fermé où l'air sortant est repris pour être réchauffé et renvoyé au contact des graines.

Les points d'attention avec ces systèmes sont :

- 1) la température de l'air qui doit rester raisonnable pour ne pas risquer de points de surcuisson,
- 2) le fait qu'on se trouve de facto en cuisson sèche qui nécessite des températures plus élevées que la cuisson humide pour atteindre la cible de FAT,
- 3) la gestion des poussières (on travaillera de préférence des graines non-broyées mais la taille des particules va imposer des temps de séjour suffisamment longs pour que la cuisson atteigne le centre des fèves),
- 4) les rendements énergétiques.

►► Chaleur transmise par un liquide

Le plus courant est l'eau. Les graines sont plongées dans l'eau bouillante pour être cuites. On bénéficie alors d'une cuisson humide qui n'endommage pas les protéines et la transmission de la chaleur est rendue efficace par la chaleur massique de l'eau qui est de 4.2 kJ/°C/kg. Le problème majeur est que le produit sort humide et doit être séché pour être utilisé. On pourrait néanmoins envisager ce type de cuisson dans des installations fermières où le soja pourrait être préparé juste avant son utilisation. La contrainte est d'avoir à gérer l'eau de cuisson qui ne pourra pas être gardée d'un jour à l'autre à cause du risque de développements bactériens et que l'on devra recycler pour l'alimentation des animaux en raison de sa richesse en nutriments solubles.

On pourrait envisager de plonger les graines dans l'huile chaude dans le cadre d'une cuisson suivie de pression en utilisant l'huile issue des graines pour la cuisson. Ce traitement est à déconseiller car la presse va être perturbée par l'huile absorbée par les graines dans le bain et surtout, si la température du bain est supérieure à 100°C, la vaporisation de l'eau contenue dans les fèves va créer de la mousse au-dessus du bain d'huile et entraîner des débordements incontrôlables.

►► **Chaleur produite mécaniquement dans un extrudeur**

Le principe de l'extrusion est de forcer le solide à passer dans une filière de faible diamètre sous l'effet de la poussée d'une ou deux vis d'Archimède. Le travail mécanique produit par les vis pour forcer ce passage engendre beaucoup de friction et de cisaillement qui se traduisent par une production de chaleur intense et rapide. Dans le cas du soja extrudé à sec, on peut atteindre 150°C en 30 secondes. Ce traitement à haute température sur une courte durée est capable de réduire efficacement les facteurs antitrypsiques. Cela reste une cuisson sèche qui s'accompagne d'une perte de solubilité des protéines significative. On peut également envisager l'extrusion humide qui demande moins d'énergie mécanique mais requiert un conditionnement à la vapeur (nécessité de disposer d'une production de vapeur et d'un conditionneur).

► **Traitement à la vapeur (transfert de chaleur par changement d'état)**

Le principe de la cuisson à la vapeur est de permettre une élévation de température rapide par condensation de la vapeur sur les particules froides. L'eau en passant de l'état vapeur à l'état liquide cède 2250 kJ/kg. Pour passer 1 kg de soja de 20 à 100 °C, il faut condenser 90 g de vapeur. La prise d'humidité est encore significative mais bien moindre que dans le cas d'une immersion dans l'eau.

On peut accentuer la cuisson vapeur dans des autoclaves en passant sous une pression de 1 bar (120°C). Ce traitement est efficace mais uniquement en mode batch (discontinu) et nécessite des équipements devant respecter la réglementation des appareils sous pression qui impose des contraintes non négligeables.

► **Traitement mixte (vapeur + conduction/convection)**

Dans ce cas, on va apporter la vapeur sur un produit déjà chaud de manière à éviter de condenser beaucoup d'eau pour sortir un produit qu'il ne sera pas nécessaire de sécher ultérieurement. La vapeur utilisée peut être produite par une chaudière mais on peut plus facilement apporter de l'eau liquide sur les parois chaudes du cuiseur pour vaporiser l'eau localement et faciliter le transfert de chaleur.

De cette manière, on pourra modifier la cinétique de chauffe qui se caractérise en conditions sèches par un ralentissement du réchauffage lorsque la température de la matière se rapproche de la température des parois de l'enceinte de chauffage

► **Procédés alternatifs**

►► **Microondes et hautes fréquences.**

On appelle chauffage diélectrique l'utilisation de champs électromagnétiques à hautes fréquences (13.56 MHz et 27.12 MHz pour les hautes fréquences et 915 MHz et 2450 MHz pour les microondes) à des fins de chauffage. Ils reposent sur la polarité de l'eau, chaque molécule présentant un dipôle comme un nano aimant qui s'aligne sur la polarité du champ, laquelle varie aux fréquences indiquées ce qui a pour effet d'absorber l'énergie de ces champs et de la transformer en agitation moléculaire, c'est-à-dire en chaleur.

C'est essentiellement l'eau qui absorbe cette énergie et les matières pauvres en eau comme les graines sèches absorbent assez mal l'énergie microondes. Il est nécessaire de disposer d'applicateurs très bien conçus pour éviter les pertes. Par ailleurs les générateurs de champs microondes ont des rendements qui plafonnent à 80% ce qui les rend moins thermiquement efficaces que de simples résistances qui transforment l'intégralité du courant qui les traverse en chaleur. Ces générateurs sont également beaucoup plus chers à construire. Toutefois, les microondes ont l'avantage de chauffer rapidement la matière à cœur ce qui les rend utiles dans les applications pour lesquelles le transfert de chaleur est difficile en raison de mauvaise conductivité.

Ces dispositifs se rencontrent rarement dans le secteur de la transformation du soja.

►► Rayonnement infrarouge.

Le chauffage par rayonnement infrarouge est une technique utilisée lorsque l'on a besoin d'effet de surface car le pouvoir de pénétration des infrarouges est assez faible. Il existe plusieurs types de générateurs d'infrarouge : long (3.3-4.5 μm), moyen (2.45-3.3 μm) et court (1.27-2.43 μm). L'absorption des matériaux présente des pics pour certaines longueurs d'ondes, généralement autour de 3 μm pour les produits alimentaires. Les sources d'infrarouge émettent cependant dans une gamme de longueurs d'ondes plutôt que dans une longueur d'onde spécifique. On utilisera donc plutôt des sources d'émission situées dans l'IR moyen. Il en existe qui sont chauffées par des résistances électriques et d'autres qui sont chauffées par la combustion d'un carburant, généralement du gaz.

Dans ce type de chauffage, la chaleur est absorbée par la surface des particules puis elle pénètre par conduction à l'intérieur. La conductivité de la matière étant relativement limitée, il est préférable de ne pas exposer les surfaces trop longtemps au rayonnement pour éviter une surchauffe locale. Ces appareils vont par conséquent mettre les graines en mouvement permanent.

Par rapport à la conduction convection forcée, ce mode de chauffage sans contact permet de diffuser la chaleur sur une surface plus importante d'où une chauffe théoriquement plus courte. Il faut néanmoins préserver l'ambiance de la poussière et des buées qui interceptent une partie de la chaleur. On le réservera de préférence à des graines non broyées ou des graines concassées tamisées sans pellicules.

3. Transformation avec déshuilage

Dans le domaine de la transformation du soja « AB » la seule méthode praticable est l'extraction mécanique. En agriculture conventionnelle, le procédé standard est un procédé qui passe par une extraction avec un solvant pétrolier : l'hexane. Néanmoins, sur le territoire national, la plus grande part de la trituration du soja produit est faite également dans des unités sans extraction à l'hexane. A titre d'information, on présente ci-dessous une brève description du procédé hexane avant de présenter l'extraction mécanique.

► Extraction conventionnelle dans des unités de grande capacité

Le principe de l'extraction par solvant est de dissoudre l'huile dans une substance qui présente le même caractère d'hydrophobicité que l'huile tout en étant particulièrement volatile et donc facile à évaporer après extraction. Cette substance est une essence légère produite par distillation du pétrole et raffinée pour éliminer les impuretés les plus toxiques comme le benzène. Chimiquement c'est un ensemble d'isomères de l'hexane, un alcane à 6 atomes de carbones. Ce mélange contient environ 50% de la forme linéaire, le n-hexane qui est la plus toxique de ces formes. Ce n-hexane est classifié comme neurotoxique et potentiellement reprotoxique si bien que les installations qui l'utilisent sont classées Seveso seuil bas. Par ailleurs ses vapeurs sont hautement inflammables et peuvent former des atmosphères explosives. Heureusement, il est mis en œuvre dans des installations complètement fermées d'où il ne peut pas se répandre dans l'air.

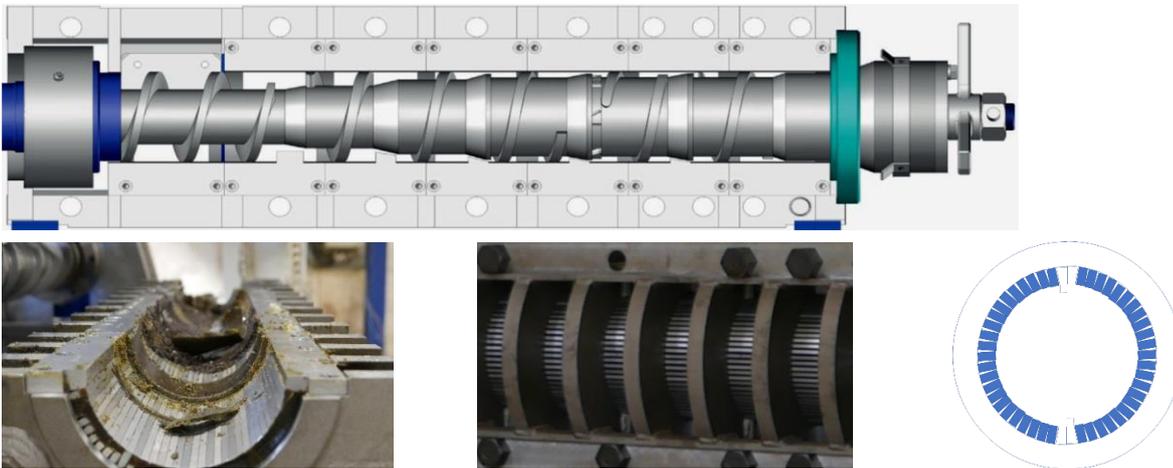
Avant de pouvoir extraire l'huile avec ce solvant la fève doit être aplatie pour que l'huile soit accessible. Pour cela elle est concassée au moyen de broyeurs à cylindres corrugués puis conditionnée à 50-60°C pour être ramollie avant d'être aplatie entre deux gros cylindres faiblement écartés (0.2mm).

Les flocons, lorsqu'ils sont bien faits, rendent l'huile parfaitement extractible tout en conservant une structure poreuse qui permet la percolation du solvant dans le lit de l'extracteur. L'extraction est faite en continu dans des dispositifs à contrecourant avec de 0.8 à 1 kg de solvant par kilo de flocons. A la sortie de l'extracteur, on dispose d'un miscella (liquide composé d'hexane et d'huile) contenant approximativement 20% d'huile et un marc (solide composé de tourteau et de solvant) contenant environ 30 % de solvant. Le miscella passe dans un évaporateur qui permet de transformer le solvant en vapeurs. Ces vapeurs sont condensées pour être renvoyées à l'extraction tandis que l'huile passe encore par une étape de finition où elle est exposée sous vide à une température d'environ 100°C en présence de vapeur vive qui sert à entraîner les résidus de solvants. Le marc à son tour est désolvanté dans un appareil constitué de plateaux chauffants. Arrivant par le haut, il est pré-désolvanté par la chaleur indirecte sur des premiers plateaux puis en atteignant les étages intermédiaires, il rencontre un flux de vapeur d'eau qui le traverse et qui en se condensant dans le tourteau permet de réaliser à la fois la désolvantation finale et l'inactivation des facteurs antinutritionnels. Les conditions typiques sont une température de sortie de 105°C, un temps de séjour de l'ordre de 20 à 40 minutes pour les températures hautes et une teneur en eau de 14 à 20% selon les équipements. L'ensemble des vapeurs qui sortent du désolvanteur est condensé pour être retourné à l'extracteur avant une étape de séparation de l'eau et du solvant.

Pour finir le traitement, le tourteau est séché puis refroidi.

► Extraction mécanique de l'huile

L'extraction mécanique est faite dans des presses continues dont le principe est de compresser le solide en le faisant passer dans une vis en entonnoir qui pousse la matière dans un volume de plus en plus étroit. On peut voir sur la figure 8 la représentation d'une de ces vis et de la cage qui l'entoure. La cage est constituée de barreaux disposés dans le sens axial et séparés par des cales d'épaisseur permettant d'ajuster la distance entre barreaux.



► Figure 7 : schéma en coupe longitudinale de la vis d'une presse et vues de la cage, face interne, face externe et schéma en coupe transversale illustrant la position des barreaux (© Patrick Carré pour les photos, Olexa pour la schéma)

► Effet de la cuisson sur l'efficacité du pressage.

►► Effet de la température

La chaleur a plusieurs impacts importants pour le comportement des presses :

1. Action sur la viscosité de l'huile :

La viscosité des huiles est dépendante de la température et cette viscosité a pour effet de rendre l'huile moins rapide dans son déplacement sous l'effet de la pression à travers un média filtrant (loi de Darcy).

2. Action sur la plasticité du gâteau de pression :

La plasticité du gâteau est la capacité à se déformer de manière irréversible sous l'effet d'une contrainte. Cette plasticité a deux conséquences contradictoires :

- Elle facilite la compression du solide en réduisant la résistance du solide à l'écrasement,
- Elle facilite la progression de la matière à travers les restrictions qui lui sont opposées dans la presse avec pour conséquence une réduction de la capacité à résister à la poussée de la vis et générer la pression nécessaire à la compression.

La température favorise la plasticité ce qui signifie qu'à chaud il peut être plus facile de comprimer la matière solide mais également plus difficile d'obtenir la pression nécessaire à une bonne extraction de l'huile.

3. Coagulation des protéines et coalescence des oléosomes :

L'huile est stockée dans la graine dans des organites appelés oléosomes ou corps lipidiques. Ces microgouttelettes sont stabilisées par des protéines, les oléosines. L'huile maintenue dans les oléosomes ne peut pas sortir facilement de la cellule. La chaleur a pour effet de coaguler ces protéines et contribue à rendre l'huile plus mobile.

▶▶ Effet de la teneur en eau sur l'efficacité du pressage.

L'eau est un plastifiant qui modifie le comportement du solide sous l'effet de la poussée de la vis. En séchant la matière, on réduit cette plasticité ce qui compense l'effet plastifiant de la température précédemment exposé.

En augmentant le séchage on tend à augmenter les pressions exercées sur le solide ce qui facilite la compression tant que la rigidification du solide et la baisse de sa compressibilité liée à l'épuisement de l'huile ne viennent pas contrarier les effets bénéfiques de la pression. Un séchage trop poussé rend le tourteau très difficile à faire avancer avec pour résultat l'extrusion d'une partie plus ou moins importante de la matière solide à travers les barreaux de la cage.

▶▶ Effet du pressage sur la réduction des facteurs antitrypsiques

Le pressage génère une certaine quantité de chaleur proportionnelle à l'intensité du travail mécanique. Le travail nécessaire au pressage du soja est estimé à 25-35 kWh/t. Cette énergie permet théoriquement une élévation de température de l'ordre de 35 à 50 °C sur un soja déjà chaud. En pratique, on n'observe pas ce niveau de chauffage additionnel mais plutôt un gain de 15 à 25°C. Cet effet n'a qu'une incidence marginale sur les paramètres antitrypsiques et sur la solubilité car le temps de passage dans la presse est assez court et la température diminue rapidement en sortie.

PARTIE III

Description des équipements disponibles

1. Transfert de chaleur par conduction majoritaire

► Cuiseur à vapeur indirecte

►► French (USA)



Le constructeur Américain de matériel d'huilerie propose un petit cuiseur de « laboratoire » fonctionnant à la vapeur qui dispose de 4 étages et permet d'alimenter une presse d'environ 250 kg/h de capacité. L'appareil nécessite un concassage en amont et un générateur de vapeur.

Son prix de vente départ Piqua (Ohio) était de 66 000\$ en 2019.

► Figure 8 : cuiseur vertical French (plateaux superposés à circulation de vapeur indirecte)
(© French)

AVANTAGES

- Contrôle de température simple déterminé par la pression de vapeur
- Cuisson « humide » possible
- Coûts de maintenance limités
- Rendement thermique correct (pertes de chaleur limitées)
- Robustesse et longévité.
- Dispersion des temps de séjour limitée par le nombre des étages.
- Peut fonctionner sans présence humaine.

INCONVENIENTS

- Nécessite de disposer d'une chaudière de production de vapeur (maintenance assez coûteuse)
- Gestion du traitement d'eau de la chaudière de production de vapeur exigeante et technique.
- Coût installé avec chaudière et annexes assez élevé.

► Cuiseur par fluide thermique

►► Vis sans fin sous double enveloppe à circulation d'huile thermique de Dilts-Wetzel

Ce cuiseur de soja, conçu par Jim Wetzel aux États-Unis, produit en continu des graines de soja cuites uniformément.

Fonctionnement

La vis est enclose dans une double enveloppe qui contient environ 600 litres d'une huile spéciale. L'huile est chauffée à l'électricité et mise en circulation dans l'enveloppe pour cuire le soja. À l'intérieur une vis sans fin transporte les graines en continu. La circulation de l'huile est assurée par le principe de dilatation thermique : elle monte lorsqu'elle est chaude et redescend lorsqu'elle se refroidit.



► Figure 10 : Cuiseur Dilts Wetzel (© Diltz Wetzel)

D'après la recommandation du fabricant, les graines doivent être chauffées pendant +/- 1h30 avec un fluide thermique à 180°C et sortent du cuiseur à 120°C. Le cuiseur travaille de manière entièrement automatique : la température est réglée à l'aide d'un thermostat. La commande se fait, d'une part, par la température, et, de l'autre, par la vitesse de rotation de la vis sans fin. L'installation fonctionne au courant monophasé de 220 Volts (l'électricité doit être convertie selon les normes d'électricité européennes).

Étant donné son prix d'acquisition relativement faible et son système uniforme et compact, il est possible d'intégrer la machine sur des exploitations ou de petites entreprises de fabrication d'aliments. Un achat commun de l'installation par plusieurs agriculteurs est également imaginable.

Tableau 2 : caractéristiques principales du cuiseur Dilts Wetzel

Paramètres	Valeurs
Hauteur	2 m
Longueur	10 m
Largeur	1 m
Poids	1,6 tonnes (sans huile)
Capacité en huile	600 litres
Rendement par jour	2,7 tonnes/jour

Entreprise exploitante en Europe

Depuis 2012, l'entreprise MOSEGÅRDEN au Danemark exploite une vis à double-enveloppe électrique de l'entreprise Dilts-Wetzel. En coopération avec le centre de recherche Aarhus, elle mène, sur une exploitation agricole, des expériences de conditionnement avec différentes légumineuses à graines. La machine a été convertie, par l'entreprise MOSEGÅRDEN, aux normes européennes d'électricité. L'importation d'autres machines au Danemark est prévue.

Une conversion technique de la machine pour d'autres sources de chauffage est en train d'être testée par l'entreprise MOSEGÅRDEN, grâce à laquelle il serait possible d'utiliser la chaleur résiduelle d'une installation de biogaz. Une combinaison de l'installation de Dilts-Wetzel avec une presse à huile n'a jusqu'à présent pas encore été testée.

AVANTAGES

- Temps de séjour contrôlé
- Les lots de soja humides peuvent être transformés directement après la récolte, sans séchage préalable (mais il n'est pas envisageable de faire baisser la teneur en eau suffisamment pour assurer la conservation si celle-ci est supérieure à >16% - par ailleurs, le débit de la machine étant faible, il est possible d'avoir un échauffement des graines en attendant le traitement).
- Commande et réglage faciles de la machine
- Prix d'acquisition relativement bas
- Absence de risque de contamination par HAP
- Pas de perte d'eau

INCONVENIENTS

- Consommation d'électricité pour chauffer la machine énergétiquement pas optimale et relativement chère
- L'huile doit être chauffée deux heures avant de commencer le traitement de graines
- Jusqu'à aujourd'hui, peu d'expérience avec cette machine en Europe

Fabricant	Interlocuteur fabricant	Contact Europe	Interlocuteur Europe
Wetzel Soybean Roaster Dilts-Wetzel Manufacturing Co. 2501 Washington road ITHACA, MI 48847 USA	Jim Wetzel sales@diltswetzel.com www.diltswetzel.com	MOSEGÅRDEN A/S: Dalgårdsvej 82 7600 Struer Danemark	Thorkild Kallestrup tk@mosegarden.dk www.mosegarden.dk

Le regard du technologue

Du point de vue de l'efficacité à l'égard des Dfacteurs antitrypsiques, ce procédé est plutôt favorable du fait de l'absence de séchage (cuisson de type humide) avec toutefois le problème potentiel du manque d'homogénéisation qui se produit dans une vis. Les vis d'Archimède ne sont pas conçues pour remuer la matière qu'elles transportent. Elles poussent plus qu'elles ne remuent. En conséquence, le grain au contact de la paroi chauffante subit une élévation de température plus élevée que celui qui se trouve au centre. Il est possible d'y remédier en utilisant des vis modifiées pour générer plus de mélange. Toutefois dans ce dispositif où le temps de séjour est long, la vitesse de rotation est forcément faible et le mélange restera limité.

À vérifier : aspect des produits en sortie : si présence de particules d'aspect très brun et de particules plus claires, la cuisson n'est pas suffisamment homogène.

Patrick Carré

► Spirajoule (chauffage électrique).



La technologie Spirajoule® est un procédé unique et exclusif de traitement thermique. Il est constitué d'une vis de convoyage sans âme chauffée par un courant électrique basse tension, transmettant au produit la chaleur générée par effet joule. La température du produit est contrôlée par une régulation précise de la température de chauffe de la spire ; le temps de séjour est régulé par la vitesse de rotation de la spire. Un procédé très simple avec une possibilité de confinement de la teneur en eau.

Le coût d'une installation de 350 kg/h est de l'ordre de 300 k€ sans les annexes.

► Figure 11 : spire chauffante par effet joule (© Spirajoule)

La spire est munie de petites ailettes qui permettent un retournement actif de la matière pour renouveler le produit au contact de la spire chauffante.

Le plus petit appareil a une puissance de 40 kW. Le temps de séjour maxi est de 10 minutes. Il est probable que cette durée ne soit pas suffisante pour la cible de réduction des FAT. Des tests seraient nécessaires pour évaluer le besoin d'une capacité de rétention supplémentaire qui pourrait prendre place dans une seconde vis à faible vitesse de rotation.

L'application principale de cette machine est de stériliser des matières granulaires.

Tableau 2 : caractéristiques principales du cuiseur Spirajoule

Paramètres	Valeurs
Diamètre	150 mm
Capacité volumique	500 L/h
Puissance électrique	40 kW
Capacité de transfert de chaleur	1.8 J/g/°C
Capacité en soja théorique	300 kg/h

Spirajoule n'a pas de référence sur soja mais des tests seraient possibles sur une plateforme du constructeur près de Compiègne.

AVANTAGES

- Contrôle de température piloté avec précision
- Temps de séjour contrôlé rigoureusement
- Cuisson « humide possible » (ajout d'eau dans le système facile à prévoir)
- Coûts de maintenance limités
- Consommation d'électricité relativement maîtrisée
- Système conçu pour la débactérisation.
- A priori ne nécessite pas de présence humaine pour fonctionner.

INCONVENIENTS

- Coûts d'investissement élevés
- Energie coûteuse
- Manque de recul en soja – inconnue sur la nécessité d'un maintien en température

ENTRÉE PRODUIT

Entrée à raccord standard pour adapter tout type d'appareil d'alimentation en continu (doseur, vis, tapis, vibrant...)

PRODUCT INLET

Inlet with standard linkage to connect all continuous feeding equipment (dosing screw, belt...)

JOINT TOURNANT ÉLECTRIQUE

Raccordement des polarités au bloc transformateur / armoire de commande

ROTATING ELECTRICAL JOINT

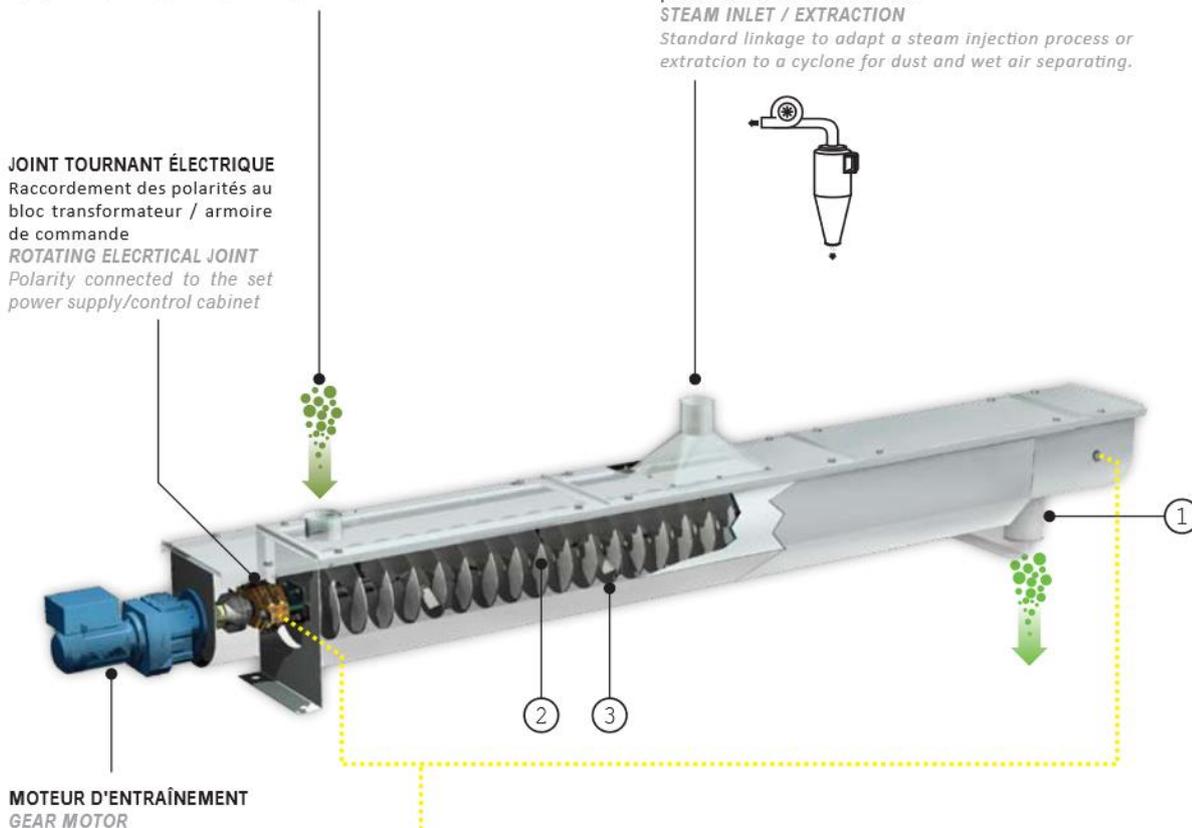
Polarity connected to the set power supply/control cabinet

ALIMENTATION / EXTRACTION DES VAPEURS

Raccords standards pour adapter tout type d'appareil d'alimentation de vapeurs ou d'extraction vers un cyclone ou tout autre moyen de séparation des poussières et de l'air humide.

STEAM INLET / EXTRACTION

Standard linkage to adapt a steam injection process or extraction to a cyclone for dust and wet air separating.



► Figure 12 : représentation du cuiseur Spirajoule (© Spirajoule)

2. Transfert de chaleur par circulation d'air surchauffé

► Toaster Rosatech (Afrique du sud)

Ce cuiseur produisant de l'air chaud tournant en circuit fermé est fabriqué par l'entreprise Roastech, en Afrique du Sud.



R50E Roaster

Roasting Capacity: 10 – 50 kg/hr
 Power Requirement: 10 kW(Electrically Heated)
 Alternative Heat Sources: Diesel/Paraffin, LPG
 Availability: Commercially 3-4 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)



R100E Roaster

Roasting Capacity: 100 kg/hr
 Power Requirement: 18kW(Electrically Heated)
 Availability: Commercially 3-4 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)



R300E Roaster

Roasting Capacity: 300 kg/hr
 Power Requirement: 48kW(Electrically Heated)
 Alternative Heat Sources: Diesel/Paraffin, LPG
 Availability: Commercially 5-6 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)



R500E Roaster

Roasting Capacity: 500 kg/hr
 Power Requirement: 80 kW(Electrically Heated)
 Alternative Heat Sources: Diesel/Paraffin, LPG
 Availability: Commercially 5-6 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)



R1000E Roaster

Roasting Capacity: 1000 kg/hr
 Power Requirement: 160kW(Electrically Heated)
 Alternative Heat Sources: Diesel/Paraffin, LPG
 Availability: Commercially 8-9 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)



R2500E Roaster

Roasting Capacity: 2500 kg/hr
 Power Requirement: 320kW(Electrically Heated)
 Alternative Heat Sources: Diesel/Paraffin, LPG
 Availability: Commercially 8-9 weeks
 Optional: Incubator, Cooler, Conveyors, Augers
 Material: Mild Steel, Stainless Steel (304L/316)

[Download Brochure](#)

► Figure 13 : Extrait de la brochure Rosatech présentant les différents modèles de cuiseur (© Rosatech)



► Figure 14 : Cuiseur Rosatech en situation (© Rosatech)

Fonctionnement

La machine est constituée d'une enceinte statique et d'un rotor constitué d'une vis d'Archimède enclose dans un cylindre perforé qui tourne à la même vitesse que la vis. L'air circule dans l'enceinte en mode confiné, c'est-à-dire qu'il n'y a que peu d'apport d'air frais et de rejets dans l'atmosphère. La machine n'a pas de conduit pour l'évacuation des buées. Cela n'est pas précisé dans la documentation, mais elle est probablement équipée d'écluses pour limiter les pertes d'air.

Selon le constructeur, le chauffage de la matière fait que l'air présent au démarrage est progressivement remplacé par de la vapeur surchauffée qui est un vecteur de transfert thermique plus efficace que l'air et devrait permettre de réduire le temps de traitement.

Enfin, le produit cuit est refroidi (l'entreprise Roastech propose des refroidisseurs séparés). Le toasteur traite des graines de minimum 2,5 mm de diamètre (telles que les graines de soja ou les pois). Il est important de traiter des lots dont les graines ont une taille à peu près homogène car le temps de cuisson dépend de la taille et en présence de petites et de grosses graines, la répartition des temps de cuisson ne serait pas satisfaisante (les grosses insuffisamment cuites et les petites excessivement).

Selon le taux d'humidité de la matière initiale, le rendement thermique de ce cuiseur électrique se situe entre 105 et 166 kWh/t pour la cuisson du soja. La commande de la machine se fait par la température de l'air chaud introduit ainsi que par la vitesse du tambour.

La machine est disponible en acier et en acier inoxydable. Un torréfacteur fonctionnant à l'énergie biomasse est actuellement en train d'être réalisé.

Tableau 3 : Données techniques du modèle R 100

Paramètres	Valeurs
Hauteur	0.86 m
Longueur	1.92 m
Largeur	0.58 m
Poids	0.115 tonne
Consommation de fioul	2.2 kg /h
Puissance	0.025-0.1 tonne/heure

AVANTAGES

- Système simple, une seule pièce mobile sur la machine
- Commande et réglage simples de la machine (vitesse du rotor et température)
- Prix d'acquisition relativement bas
- Léger, facile à transporter
- Usure faible : les pièces de rechange peuvent être commandées
- Peu d'entretien requis
- Énergétiquement rentable (recirculation de l'air et/ou de la vapeur chaude, provenant de l'humidité du produit, dans la machine)

INCONVENIENTS

- Consommation d'électricité relativement élevée pour chauffer la machine énergétiquement pas optimale et relativement chère
- Jusqu'à aujourd'hui, aucune expérience avec cette machine en Europe

Le regard du technologue

Les rendements indiqués sont effectivement assez mauvais. Théoriquement, la cuisson ne devrait coûter que la chaleur nécessaire pour hausser la température d'environ 90°C, soit pour 1 t avec un Cp de 2.2 kJ/°C/kg, 180 000 kJ de l'ordre de 55 kWh/t (valeurs approximatives et ne tenant pas compte des pertes du système). Cela étant, ils ne peuvent pas être pires que ceux du procédé Cimbria qui ne recycle pas l'air usé et qui disperse en permanence la chaleur dans l'air usé.

Le système peut fonctionner avec des énergies thermiques moins chères que l'électricité avec toutefois le risque relatif à l'envoi des fumées de combustion dans la chambre de chauffe.

Il y a une contrainte assez sévère sur l'homogénéité de taille de particules et l'absence de poussières et débris végétaux qu'on retrouve pour tous les appareils où le fluide thermique est un gaz qui doit passer dans un dispositif de réchauffage.

Le prix départ est de 5 728 € pour le modèle R100 (20 kW) et 13 615€ pour le modèle R300 (48 kW). En supposant un prix installé à 2.4 fois le prix d'achat (transport, montage, environnement), un prix du kWh électrique de l'ordre de 12 €/ 100 kWh et une durée d'amortissement sur 650 t le prix de revient à la tonne traitée est de 33 €/t

Capacité 20 kW *0.9/130 = 130 kg/h sur 1000 h par an pendant 5 ans.

Patrick Carré

Fabricant	Interlocuteur fabricant
Roastech Forced Convection Roasting	Fritz Teseling 4C Mill Street, Hamilton Bloemfontein Afrique du Sud info@roastech.com www.roastech.com

3. Les dispositifs à flamme directe ou semi-directe

► Généralités

Dans ces dispositifs, la chaleur est produite par combustion de gaz ou de fuel et les gaz de combustions entrent en contact avec le produit traité. La combustion est le point faible de cette technique par ailleurs généralement assez simple, donc peu coûteuse. En effet, selon la composition du combustible, il peut être plus ou moins difficile d'obtenir une combustion totale ne produisant que de l'eau et du CO₂. L'apport d'air doit être soigneusement calibré : s'il n'est pas suffisant, une partie du combustible ne se consume pas totalement et peut produire des composés toxiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP). Un excédent trop important peut également refroidir la flamme et arrêter la combustion des carburants liquides composés de molécules à poids moléculaire important. Ce problème est plus particulièrement à craindre pour les installations mobiles fonctionnant avec des carburants liquides.

► Le cuiseur mobile de Schnupp's Grain Roasting

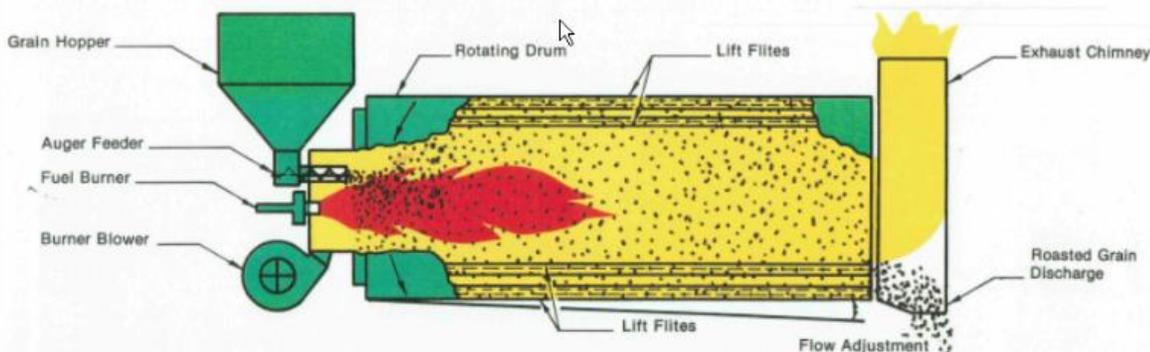


Ce cuiseur mobile a été développé aux États-Unis où il est fréquemment utilisé par les entreprises de travaux agricoles (ETA). Le fabricant propose un petit cuiseur « modèle 50 » et deux machines plus grosses pour l'utilisation interentreprises.

► Figure 15 : cuiseur mobile de Schnupp's Grain Roasting (© Schnupp's Grain Roasting)

Fonctionnement

Les graines sont transportées à travers une trémie de remplissage par une vis sans fin, à vitesse variable contrôlant le débit, dans un tambour rotatif en acier inoxydable. Puis, les graines sont transportées à travers une vis sans fin où elles sont directement toastées par une flamme du brûleur générée au propane (le « flame kissing »). À l'intérieur des graines de soja la température peut atteindre 132°C. Dans ce procédé, les graines sont directement exposées à la flamme nue. Elles sont maintenues constamment en mouvement afin d'éviter d'être brûlées. Le temps de cuisson des graines de soja est déterminé, d'une part, par la vitesse de rotation du tambour, et de l'autre par l'angle d'inclinaison de la vis sans fin. Enfin, les graines sortent du cuiseur par l'orifice de sortie. Une combinaison de différents dispositifs de chargement tels que les vis sans fin ou les convoyeurs est possible. À la sortie du cuiseur, les graines sont très chaudes et doivent être refroidies. En raccordement au processus de cuisson, il est possible de procéder au refroidissement par transport pneumatique. Dans une autre version, le refroidissement est mené dans un séchoir dont seul le ventilateur est utilisé. Par ailleurs, des refroidisseurs instantanés sont aussi proposés.



► Figure 16 : représentation schématique du cuiseur Roastamatic (© Schnupp's Grain Roasting)

► **Tableau 4 : données techniques du modèle 50**

Paramètres	Valeurs
Capacité en t/h	1.5 t/h
Longueur / Hauteur / Largeur (mètres)	3.81x1.78x1.83
Tension (V mono)	230
Intensité (A)	25
Consommation d'énergie (et kW/h)	250
Consommation de gaz (gal/t (imperial))	5
Consommation par t métrique (kWh)	183.72

AVANTAGES
<ul style="list-style-type: none"> • Les lots de soja humides peuvent être transformés directement après la récolte, sans séchage préalable • Installation mobile • Commande et réglage faciles de la machine
INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> • Les graines rentrent directement en contact avec la flamme : risque de formation de points chauds et de composés potentiellement toxiques (graines brûlées) • Risques de résidus de type HAP lors du fonctionnement au fioul • Jusqu'à aujourd'hui, aucune expérience avec cette machine en Europe

Le regard du technologue

L'efficacité énergétique semble supérieure à Mecmar mais moindre que Roastech (selon données des constructeurs).

Patrick Carré

Fabricant	Interlocuteur fabricant
Schnupp's Grain Roasting 416 Union Road Lebanon, PA 17046 Pennsylvania USA	Paul Lehman www.roast-a-matic.com

► Le cuiseur mobile MecMar

L'entreprise Möhler Technik (Rainer Möhler) a mis au point en collaboration avec l'entreprise italienne Mecmar et Jürgen Möhler Transformation CNC le cuiseur de soja mobile. L'objectif était de réaliser un cuiseur de soja mobile avec lequel le soja puisse être cuit directement sur chaque exploitation agricole.



► Figure 17 : représentation du cuiseur mobile Mecmar (© Mecmar)

Fonctionnement

Les graines de soja sont d'abord réceptionnées par une remorque. Ensuite, elles arrivent sur le côté arrière de la machine, où elles sont pesées automatiquement puis conduites jusqu'au cuiseur.

Le produit circule sur un convoyeur à fond perforé, traversé par un flux d'air à une température d'environ 230°C qui chauffe les graines pendant une courte période. La circulation de l'air est assurée par un ventilateur centrifuge à haut débit. Ainsi, les graines de soja sont constamment traversées par un flux d'air propre et chaud. Le déplacement des graines par une chaîne à palette permet une translation horizontale en couche mince garantissant une certaine absence de chemins préférentiels. La chaleur est produite par un brûleur à flamme directe tandis que l'air usé traverse un dispositif de récupération de chaleur transférant une partie des calories de l'air usé à l'air entrant.

Après la chauffe, les graines de soja sont maintenues une heure dans le silo, à une température de 120°C. Puis, le soja est refroidi à la température extérieure par un ventilateur, chargé par une vis sans fin de transbordement et peut ensuite être directement stocké chez l'agriculteur.

Le cuiseur de soja mobile peut se décliner en 3 versions : T5, T10, T20.

Tableau 5 : caractéristiques principales des cuiseurs mobiles Mecmar

Paramètres	T5	T10	T20
Puissance thermique du brûleur [kW]	Max 395	Max 395	Max 593
Capacité [t/h]	0.4 - 0.6	0.8 - 1.2	1.5 - 2.5
Masse [kg]	1060	1260	2400
Moteur alimentateur [kW]	0.12	0.12	1.1
Ventilateur principal [kW]	3	4	7.5
Ventilateur du brûleur [kW]			2.2
Moteur du convoyeur à chaîne [kW]	0.18	0.18	0.25
Consommation théorique de fioul par t de soja (L/t)	19	19	19
Consommation théorique de gaz par t de soja (m ³ /t)	19	19	19
Consommation théorique de gaz de pétrole liquéfié par t (L/t)	28	28	28
kWh fioul / t de graines	204.06	218.5	218.5



► **Figure 18 : vue de l'intérieur du cuisEUR mobile Mecmar** (© Mecmar)

AVANTAGES

- Économie importante sur les coûts de transport (lorsqu'il faut amener le produit jusqu'aux cuisEURs éloignés)
- Cuisson dans la cour de la ferme
- Réduction suffisante des inhibiteurs de trypsine pour une meilleure appétence
- Possibilité de transformation de pois, fèves et lupins
- Possibilité de fabriquer son propre mélange d'aliment sur l'exploitation
- En cas de récolte humide, aucun séchage préalable requis
- Technique de cuisson pouvant aussi être introduite sur des exploitations biologiques

INCONVENIENTS

- En général, lors des procédés thermiques, la couche au contact du plancher perforé est plus exposée à la chaleur que la couche intérieure
- Possibilité de temps d'attente pour l'agriculteur s'il souhaite effectuer sa cuisson juste après la récolte.

Le regard du technologue

Ce procédé du point de vue de la consommation énergétique est loin d'être optimal mais il permet quand même un certain degré de récupération de chaleur. Il fonctionne néanmoins en chaleur sèche, ce qui a pour inconvénient d'endommager plus les protéines que les procédés en chaleur humide (il faut chauffer plus fort et plus longtemps pour une même réduction de FAT).

Une économie d'énergie semble possible en conservant les graines chaudes 30 à 60 min avant refroidissement (ce point devrait être vérifié expérimentalement).

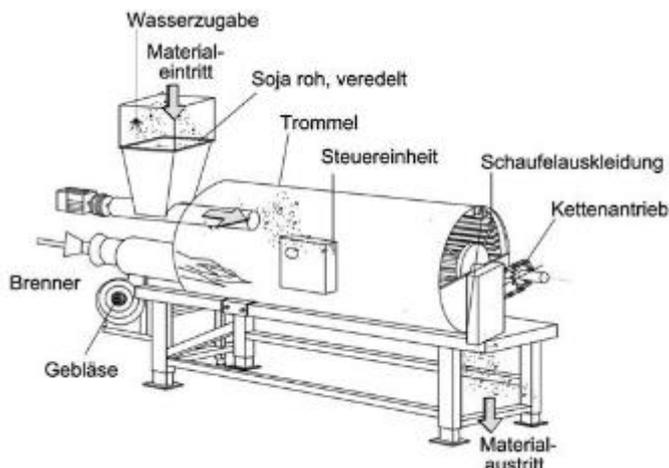
Patrick Carré

Entreprise distributrice en France	Service commercial
Ets Hervé 2 Route de Nantes BP 30005 85111 Chantonnay Cedex	Tél. 02 51 94 31 23 Fax. 02 51 94 57 33 Email : info@herve-silo.fr https://www.herve-silo.fr/toastage/

► Le cuiseur de soja par Stahlhuber Agrar

Importé d'outre-mer en 1993, un cuiseur de soja classique à tambour, chauffé au gaz naturel, est installé sur l'exploitation Stahlhuber Agrar.

Construction et fonctionnement



À l'origine, il s'agissait, sur le modèle installé, d'un cuiseur mobile, qui pouvait être transporté d'une exploitation à l'autre si nécessaire. Les graines sont humectées avant d'être chauffées afin d'une part, d'éviter d'abîmer les protéines et, de l'autre, de diminuer le risque d'incendie pour la machine.

► Figure 19 : Schéma de principe du cuiseur Stahlhuber Agrar (© Eichmann, Thurner, Zeindl)

Les graines de soja sont transportées par un convoyeur dans un élévateur. Celui-ci les transporte dans une petite trémie intermédiaire où elles sont alors arrosées par un gicleur. L'objectif est d'atteindre au minimum 14% d'humidité du produit traité. À la sortie de la trémie intermédiaire, les graines humidifiées rejoignent horizontalement le cuiseur par une vis de dosage. Dans le tambour incliné, légèrement penché à l'horizontale, les graines sont transportées par des pales en éventails, en continu vers le haut. Les graines tombent à l'intérieur du tambour vers le bas. En rebondissant au fond du tambour, elles traversent la flamme du brûleur, située au milieu et alimentée par un brûleur à gaz. Le produit transformé est, par la suite, refroidi avec de l'air extérieur par un refroidisseur et éventuellement de nouveau humidifié. Le processus exerce ainsi de la chaleur directe sur les graines : l'air est chauffé à environ 300°C par le brûleur modulant et encercle les graines durant presque tout leur passage dans le tambour. Durant tout le processus de traitement, l'humidité du produit s'évapore. Selon les données de Jansen & Friedrich (1985) et Ahmed (2001), un tel processus engendre généralement une perte d'humidité de 30 à 40%, selon le réglage. La température du tambour à la sortie des graines monte avec le réglage actuel à 230°C. La température des graines traitées à la sortie du tambour doit cibler la plage 110 - 115°C pour garantir une meilleure introduction dans l'alimentation des animaux monogastriques.

La difficulté pour l'utilisateur de la machine consiste à veiller à ce que l'intensité du traitement reste constante et ainsi à éviter une surcuisson superficielle combinée à une sous-cuisson à cœur. Ceci exige d'ajuster les paramètres de transformation tels que la durée de traitement et la température du brûleur, selon les propriétés de la graine brute.

AVANTAGES

- Technique simple, avec relativement peu d'entretien et à longue durée de vie
- Prix d'acquisition bas en comparaison à d'autres machines
- Toastage de légumineuses à graines également possible
- Possibilités d'usages variées : par exemple, éclatement de céréales

INCONVENIENTS

- Risque d'incendie en cas de défaut de mouillage préalable des graines
- Risque de traitement trop faible pour les grosses graines et trop intense pour les petites en cas de produit brut hétérogène
- En général, la partie extérieure sera toujours plus exposée à la chaleur que la partie intérieure de la graine
- La durée de traitement et la température doivent être ajustées selon les propriétés de la graine brute pour que les graines puissent être traitées avec l'intensité la plus homogène.

Le regard du technologue

On retrouve ici les risques sanitaires liés à l'emploi de flammes directes. Il semble de surcroît qu'ici les températures de traitement soient un peu plus élevées que dans d'autres dispositifs. Au point de vue énergétique, on est certainement loin de l'idéal – bien qu'aucune donnée ne soit indiquée.

L'ajout d'eau juste à l'entrée de la machine est probablement un dispositif qui ne permet pas un temps suffisant pour permettre à cette eau d'atteindre le centre des graines. L'effet protecteur est probablement efficace et il est possible que la vaporisation locale de l'eau permette de communiquer la chaleur plus efficacement dans l'ensemble des graines mais cela reste à vérifier.

Il faudrait des précisions sur le temps de séjour pour une meilleure analyse du fonctionnement. Le mouillage préalable des graines laisse penser que la machine permet une cuisson en conditions relativement humides avec toutefois une consommation énergétique probablement importante.

Patrick Carré

Entreprise exploitante	Contact
Stadlhuber Agrarservice GbR Thann 17 84544 Aschau am Inn Allemagne	Tel.: +49 8638 32 79 Fax : +49 8638 850 79 info@stadlhuber-agrarservice.de www.stadlhuber-agrarservice.de

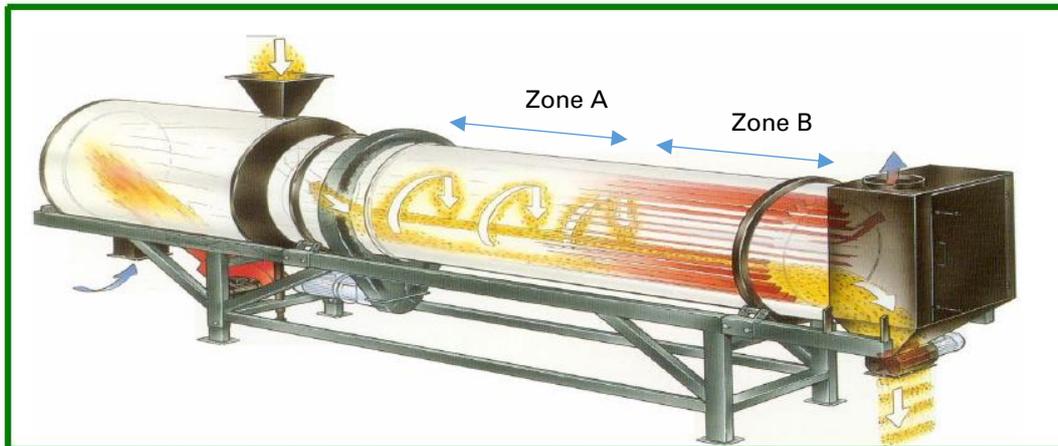
Bibliographie

Jansen, H. D., Friedrich, W. (1985): Verfahrenstechnische Einflußgrößen bei der Behandlung von Sojabohnen, in Kraftfutter, Heft 2, 68.Jahrgang

Ahmed N. O. (2001): Untersuchungen zur ernährungsphysiologischen Bewertung unterschiedlich behandelter Sojabohnen in der Broilerernährung. Dissertation Uni Göttingen

► Dantoaster 20/6000 Feedprocesseur de Cimbria

Le Feedprocesseur « Dantoaster » de Cimbria est un dispositif conçu pour appliquer des traitements thermiques en conditions séchantes. A la base, il s'agit d'un tambour de déshydratation proche de ceux qui équipent les usines traitant la luzerne et les pulpes de betteraves.

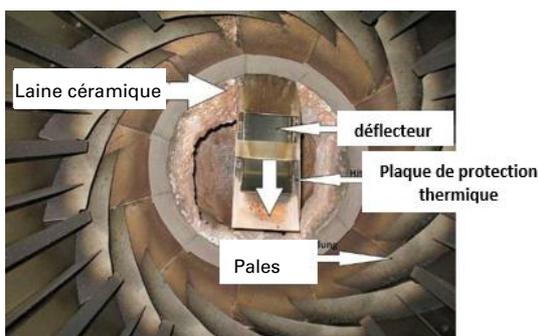


► Figure 20 : représentation schématique du toaster Dantoaster de Cimbria

La machine a été adaptée au Danemark pour combiner des effets thermiques comme la maîtrise des contaminations microbiennes, le séchage, la gélatinisation de l'amidon de céréales et le toastage des graines riches en protéines, en particulier du soja. Le Dantoaster produit en continu des graines de soja cuites uniformément. En Allemagne, le Dantoaster est implanté sur l'exploitation Gerauer, en Bavière.

Fonctionnement

La thermisation fonctionne selon le principe de la pasteurisation flash (haute température, temps court). Les quatre principaux éléments du dispositif sont la chambre à combustion, le tambour, la boîte de sortie et le châssis. Les graines de soja sont chauffées par rayonnement infrarouge et par la chaleur des gaz de combustion qui passent à travers le tambour à contre-courant.



► Figure 22 : générateur d'infrarouges (© R. Zeindl)



► Figure 9 : intérieur du tambour où se produit le toastage

La machine est distribuée en 3 modèles (10, 20 et 30, correspondant à des tonnes/heure d'orge devant passer de 20 à 16% d'eau). Les caractéristiques dimensionnelles données ici correspondent à la machine '20'. Dans la partie avant du tambour rotatif se trouve un brûleur à gaz de 970 kW de puissance. La flamme du brûleur chauffe, à une température d'environ 900°C un matériau en fibres de céramique qui recouvre la chambre à combustion. Ce matériau a la propriété d'émettre un puissant rayonnement infrarouge en direction de la cavité du tambour de séchage. Les graines de soja sont déposées à l'entrée du tambour côté flamme, sous protection d'une plaque qui leur évite la chaleur directe du brûleur. Les graines de soja restent environ 40 secondes dans la partie avant du tambour (zone A), où l'effet de chaleur est relativement élevé, et quatre minutes au total dans le « Dantoaster ». Le tambour, muni d'éléments semblables à des pales est mis en rotation par un moteur de 7,5 kW. Son inclinaison est variable. La durée de présence des graines de soja dans le tambour est, par conséquent, définie par la vitesse de rotation et l'inclinaison

du tambour. L'objectif, lors du réglage de la vitesse de rotation du tambour, est d'obtenir une répartition homogène des graines de soja dans le tambour rotatif et qu'elles forment une couche d'environ dix centimètres sur la paroi intérieure du tambour.

Pour éviter un endommagement des protéines dans les graines à cause d'un effet de chaleur trop long et non-contrôlé du processus de torréfaction original, le produit chauffé jusqu'à 110°C a besoin d'un refroidissement en-dessous de 20°C. L'installation de M. Gerauer fonctionne au gaz naturel puisque l'exploitation dispose déjà d'un raccordement au gaz naturel. Cependant, l'installation pourrait également être alimentée au fioul.

AVANTAGES

- Système compact et uniforme
- Haut rendement
- Les graines de soja humides peuvent être traitées directement après la récolte, sans séchage préalable
- Une technique qui nécessite peu d'entretien (l'anneau en laine de céramique doit être changé tous les deux ans environ).

INCONVENIENTS

- Il est obligatoire qu'une personne soit toujours aux commandes de la machine (aucune correction automatique des paramètres en cas de changement, par exemple du flux de produit)
- Produit final en partie trop sec (seulement 6% d'humidité résiduelle)
- Danger d'incendie : c'est pourquoi, le produit doit être nettoyé au préalable du mieux possible (par exemple, résidus de gousses et autres débris végétaux ne doivent pas être en proportion trop élevée).
- Aucune spécification du fabricant concernant le réglage de la durée et, par conséquent, de l'intensité de l'effet de chaleur. L'utilisateur doit tâtonner pour trouver lui-même le réglage optimal.

Fabricant	Contact fabricant	Contact Europe
Cimbria Unigrain A/S . Cimbria House Faartoftvej 22 P.O. Box 40, 7700 Thisted Danemark	holding@cimbria.com www.cimbria.com	Gerauer OHG Reith 4 94148 Kirchham Bavière / Allemagne Tel.: +49 08533 12 70 Fax: +49 08533 91 98 73

Le regard du technologue

Les valeurs thermiques données par la fiche technique me semblent fantaisistes. Pour passer 20t d'orge à 20% d'eau pour évaporer environ 1000 kg d'eau en supposant passer le grain de 10 à 100°C, il faut :

► **Tableau 6 : évaluation sommaire de puissance thermique nécessaire à l'évaporation de 1t d'eau dans 19 t d'orge.**

Masse (kg)	Température		Enthalpie (kJ ou kWh)
19 000	90	2 kJ/°C/kg	3 420 000
1 000		2 250 kJ/kg d'eau	2 250 000
Chaleur totale			5 670 000
Puissance thermique (kW)			1 575

La puissance indiquée sur la brochure n'est que de de 970 kW.

Sur le principe, la cuisson sèche n'est pas une technique performante pour inactiver les facteurs antitrypsiques et le séchage qu'elle induit n'est pas nécessaire. La consommation thermique du dispositif me semble excessive par rapport au besoin.

Par ailleurs il génère des risques non négligeables :

1. Comme indiqué : risque d'incendie lié à la présence de débris végétaux
2. En cas d'utilisation d'un combustible pétrolier, risque de production d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) toxiques.

Autre faiblesse, les infrarouges ont un pouvoir pénétrant faible. La chaleur est forte à la surface des graines mais il lui faut du temps pour pénétrer à cœur. La température effective des fèves en sortie de tambour pourrait être trop élevée en périphérie ce qui pourrait avoir des effets de perte de digestibilité qui ne seraient probablement pas détectés par des mesures de solubilité des protéines. En moyenne la solubilité serait satisfaisante mais cette moyenne ne serait que le reflet d'un mélange de matière trop cuite et de matière insuffisamment chauffée.

Patrick Carré

4. Extrusion : transformation d'énergie mécanique en chaleur par friction/cisaillement

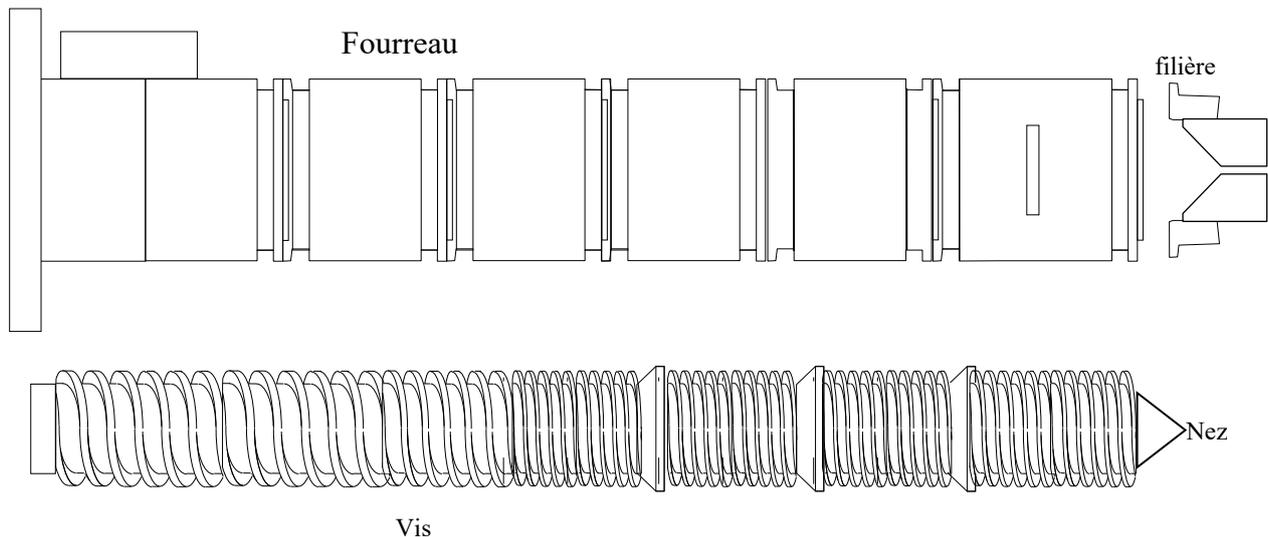
► Farnet : transformation du soja par extrusion mono-vis

En République Tchèque et dans d'autres pays d'Europe de l'Est, les graines de soja sont traitées principalement par la technique d'extrusion, qui y est très répandue. L'extrudeuse de l'entreprise Farnet est entre autres exploitée par l'entreprise Primasoja, présentée ci-dessous.

Chez Primasoja, les agriculteurs peuvent choisir entre trois aliments à base de soja différents : Primasoja classic (soja non déshuilé), Primasoja By-Pass (tourteau de soja) et un mélange entre ces deux aliments. Les graines de soja sont achetées dans la région.

Fonctionnement

Avant le traitement, les graines de soja doivent être séchées à un niveau d'humidité de maximum 14% et nettoyées. Ensuite, elles passent dans un broyeur à cylindre où elles sont concassées à un quart de leur taille initiale. De là, elles arrivent dans une trémie doseuse qui alimente l'extrudeur par une vis à vitesse variable. L'extrudeur (Farnet E1000) est constitué d'un arbre horizontal sur lequel sont assemblés alternativement des éléments de vis et des restrictions coniques forçant la graine à passer dans un orifice de diamètre réduit. La rotation de l'arbre est commandée par un moteur d'une puissance de 110kW.



► **Figure 23 : représentation schématique d'un extrudeur mono-vis.**

En haut, le fourreau composé de chambres amovibles assemblées par des colliers de serrage.

En bas la vis composée de tronçons à simple et double filet séparé par des écluses (rondelles coniques).

À l'intérieur de l'extrudeuse, la température est mesurée à trois points différents par des capteurs thermiques. Plus la matière première se rapproche de la sortie de l'extrudeuse, plus la température est haute. L'apport énergétique se fait principalement en transformant l'énergie mécanique du moteur en chaleur par frottement et cisaillement. Le principe de l'extrusion est en effet de forcer le passage de la matière à travers un orifice réduit grâce à la poussée axiale de la vis. La filière par laquelle se fait l'extrusion est constituée d'un canal rond précédé d'un cône creux monté sur un insert fileté permettant par serrage de rapprocher la filière du nez de la vis lui-même constitué d'un cône plein. En jouant sur l'entrefer, on peut ajuster la contrainte mécanique et agir sur la quantité d'énergie nécessaire au passage de la matière. Afin que l'activité uréase baisse suffisamment pendant le traitement, l'entreprise exploitante précise que le produit devrait atteindre, dans la partie arrière de l'extrudeuse, une température de 130°C. Un apport énergétique de 60kWh/t y est alors nécessaire. Après un temps de traitement d'environ 30 secondes, le soja sort de la filière en même temps que de la vapeur formée par l'eau du soja qui passe instantanément de l'état liquide à l'état de vapeur.



Ainsi, 2 à 3 % de l'humidité initiale est perdue avant même que le produit n'arrive sur un refroidisseur vibrant vertical. Dans ce refroidisseur, le produit extrudé monte par mouvements vibratoires sur une pente de faible inclinaison tournant autour d'un axe vertical. Ce refroidisseur vibrant est équipé d'un ventilateur qui aspire l'air vers l'extérieur. Ainsi, le produit continue à refroidir et par le refroidissement, 1 à 2 % de l'humidité des graines de soja continue à s'évaporer. À la fin du traitement, l'humidité résiduelle est de 8 à 9 %, permettant un stockage du soja extrudé pendant au moins trois mois.

► Figure 24 : refroidisseur vibrant (© Ludwig Asam)

L'extrudeuse a une capacité d'une tonne par heure. L'usure des éléments de l'arbre et de la filière dépendent de l'intensité d'usage. Après avoir été refroidi, le soja extrudé est transporté soit en entrepôts pour être stocké, soit vers un autre silo où il sera alors réparti par une vis sans fin dans deux presses à huile de Farnet (modèle L200).

Les presses à vis sont conçues pour assurer une séparation solide/liquide en comprimant la matière extrudée dans une vis à faible vitesse de rotation qui pousse le solide contre des bagues coniques à l'intérieur d'une cage à barreaux. La pression engendrée par la vis force l'huile à traverser les barreaux. La force de compression peut être contrôlée en jouant sur l'écartement du cône de sortie de la matière et sur la vitesse de rotation des presses. L'huile obtenue est d'abord tamisée grossièrement puis filtrée avant d'être conditionnée en conteneurs de 1000l prêts à la vente.

AVANTAGES

- Construction simple et compacte
- Prix d'acquisition bas
- Possibilité de combinaison avec des presses à huile et de raccordement dans des installations déjà existantes

INCONVENIENTS

- Les graines de soja doivent être nettoyées et concassées avant le traitement pour éviter tout risque d'obturation
- Contrôle de l'usure des éléments de vis difficile (nécessité de démontage)
- Sans pré-conditionnement, il est difficile d'atteindre des valeurs de traitement optimales.

Fabricant	Entreprise exploitante	Contact France
Farnet Jirinkova 276 55203 Ceska Skalice République Tchèque	Marcela Pluharova Brezina 41 Loukov un Mnichova Hradiste République Tchèque Tel.: +42 487 87 46 32	Jérôme Wallet Tél : +33 644 233 610 Annecy (France) Tel: +42 491 45 01 11 Mobile: +42 774 71 57 38 www.farnet.cz

Le regard du technologue

L'extrusion sèche est assez exigeante pour atteindre une réduction des FAT correcte. La valeur de 130°C indiquée me semble un peu faible pour des FAT en-dessous de 7 UTI/mg. La consommation électrique indiquée est compatible avec une augmentation de température de l'ordre de 110°C – ce qui est compatible avec la valeur de 130°C pour une température initiale des graines de 10-20°C. Il faudrait probablement ajouter 10 à 20°C pour une performance satisfaisante.

Le concassage des graines en amont de l'extrudeur n'est pas obligatoire mais cela a pour conséquence de demander un peu plus de travail à la machine et donc de réduire sa capacité. Sur une petite installation, cela est probablement plus intéressant que d'acheter un broyeur à cylindre assez coûteux.

L'extrusion demande un peu plus de technicité que les cuissons thermiques. La mise en service de l'extrudeur demande du savoir-faire, de même que son entretien. Le coût de la maintenance est à prendre en compte dans le coût total.

Un problème généralement rencontré à la ferme est que la puissance électrique exigée est plus importante que la puissance disponible, qui peut être limitante en zone rurale.

Il est à noter que Farnet propose un modèle « fermier » de 16 kW qui permettrait de traiter de l'ordre de 100 kg/h de soja non concassé.

Patrick Carré

► L'extrudeuse mobile d'Eurosivo

L'entreprise Eurosivo a été créée par le chercheur en productions végétales ukrainien Ruslan W. Monitsch. Après avoir connu le succès avec la variété de soja Annushka en Ukraine, il aimerait s'implanter sur le marché européen et a dans ce but présenté ses variétés de soja en 2012 lors de plusieurs importantes rencontres agricoles en Allemagne. Annushka se cultive bien en Allemagne, principalement comme culture secondaire après du seigle vert ou des graminées d'hiver. Elle est mûre sept à dix jours plus tôt que Merlin et pousse sur des surfaces difficilement cultivables. Comme alternative à Merlin et avec un rendement plus élevé, l'entreprise a également inscrit la variété Mavka. Grâce à la recherche de nouvelles variétés de soja, il est désormais possible de cultiver cette légumineuse dans la partie ouest du pays, et pas seulement dans la partie est où elle est traditionnellement cultivée. À présent, l'Ukraine cultive près de 1,5 millions d'hectares de soja. C'est la raison pour laquelle Ruslan W. Monitsch a construit, à côté de son entreprise, une installation de traitement du soja avec une extrudeuse moderne de grande taille. Il y a quelques années, les possibilités de commercialisation des graines de soja ou de traitement pour alimenter les animaux étaient insuffisantes ; à présent, des installations de traitement sont disponibles sur tout le territoire.

En Allemagne, les structures agricoles sont plus petites qu'en Ukraine et on ne trouve pour l'instant de grosses installations de traitement qu'à proximité des ports. C'est pourquoi, des machines mobiles et plus petites se prêtent mieux au marché allemand. Eurosivo a donc fait construire une extrudeuse mobile pouvant être transportée dans une remorque de voiture d'agriculteur à agriculteur. L'extrudeuse a d'ailleurs été présentée lors de la rencontre du soja de l'exploitation Baumert & Hölzl, Naturland dans la région de Leuchtenberg en Bavière.

Fonctionnement



► Figure 25 : extrudeur Eurosivo (© Theresa Langer)

Les graines de soja doivent d'abord être nettoyées très minutieusement et avoir un taux d'humidité de maximum 14%. La mini-extrudeuse fonctionne selon le principe de pasteurisation éclair : les graines de soja restent deux à trois secondes dans l'extrudeuse, à 120-130°C. La machine est équipée d'un doseur vibrant asservie au fonctionnement de la vis principale. Le réglage du débit est fait en jouant sur la position d'une trappe en sortie de trémie d'alimentation. La vis est actionnée par un moteur de 16kW dont la puissance est transmise par courroies. Le profil de la vis assure un travail mécanique de la graine dès l'entrée. Comme pour la machine Farmet, la filière peut être serrée pour ajuster l'entrefer de sortie et faire varier l'intensité du traitement thermique. Le serrage se fait après démarrage pour permettre d'assurer une transition progressive vers un fonctionnement stabilisé. De même, plus l'entrefer se réduit, plus l'énergie de frottement des graines de soja augmente ainsi que le temps de séjour dans la vis. Lorsque les graines quittent l'extrudeuse, il se produit une chute de la pression se traduisant par une vaporisation instantanée de 1 % de la masse des graines (eau).

À la fin du traitement, le produit doit être refroidi et éventuellement séché. Sinon, les graines de soja doivent être données au bétail dans les trois à quatre jours. L'extrudeuse a un débit de 100 à 120 kg/h et consomme environ 10kW/h d'électricité. D'après Eurosivo, les graines de soja transformées par l'extrudeuse se prêtent uniquement à l'alimentation des bovins et des porcins. Pour l'alimentation des volailles, l'installation devrait être combinée avec d'autres machines afin de réduire suffisamment les inhibiteurs de trypsine. Le déshuilage peut être effectué par une presse à huile de colza en sortie de machine. Au vu de l'usure des éléments de la vis sans fin, il faut compter un remplacement après 200 tonnes.

AVANTAGES

- Montage facile, système compact
- Mobilité
- Prix d'acquisition abordable
- Possibilité d'intégrer une presse à huile dans l'installation déjà existante

INCONVENIENTS

- Les graines de soja doivent être nettoyées et brisées avant le traitement pour éviter tout risque de colmatage
- Peu de valeurs empiriques et de données pour le réglage de l'extrudeuse

Fabricant	Représentant Allemagne
Eurosivo s.r.o www.eurosivo.eu	Zoya Sayin Otto-Suhr-Allee 50 10585 Berlin Tel.: +49 30 99 25 96 19 Mobile: +49 157 37 54 56 91

Le regard du technologue

Les indications relatives à l'inactivation des FAT demandent à être objectivées sur la base de données analytiques. A priori, à 100 kWh/t, on devrait atteindre des performances tout-à-fait correctes.

Comme pour la machine Farnet, il est probablement possible de travailler sur des graines non concassées moyennant une réduction de capacité. Le fait de mettre des graines entières n'a pas à ma connaissance d'effets indésirables sur la génération de bourrages. Au contraire, l'utilisation de graines entières de soja est un remède aux bourrages que nous pouvons avoir sur des graines riches en huile comme le colza. Il faudrait avoir quelques informations supplémentaires comme le diamètre, la longueur, la métallurgie des pièces d'usure pour un avis plus documenté sur cette machine qui semble assez fragile. La qualité du moteur est peut-être également à vérifier (un moteur un peu plus cher avec un meilleur rendement peut permettre des économies intéressantes).

Patrick Carré

► SETREM (fabricant français d'extrudeurs)

Setrem est le spécialiste français de l'extrusion des graines oléoprotéagineuses. Cette entreprise est à l'origine de l'introduction de la technologie en France (fin des années 80). Elle propose plutôt des machines industrielles de grande capacité mais dispose également de puissances plus adaptées à la transformation en petites structures. La première machine est la S50 avec une puissance de 22 à 37 kW, elle peut traiter de 100 à 200 kg/h de soja à sec et 400 à 500 kg/h avec un pré-traitement à la vapeur. La seconde, équipée d'une puissance de 75 kW, peut traiter 300-500 kg/h de soja à sec et 1000 à 1200 kg/g en extrusion humide.

Tableau 7 : principales caractéristiques des extrudeurs fabriqués par Setrem

Modèles	Nombre de chambres	Puissance (en kw)	Production en KG / H.				
			Soja à sec (préparation pression)	Extrusion humide Soja	Mélange céréales	Petfood ou aliments poissons (Ø > 5mm)	Petfood ou aliments poissons (Ø < 5mm)
S50	3 – 5	22 – 37	100 – 200	400 – 500	150 – 300	300 – 450	150 – 300
X100	4 – 5	75	300 – 500	1000 – 1200	700 – 1000	800 – 1100	500 – 800
X125	5 – 6	90	500 – 750	1200 – 1500	1000 – 1200	1000 – 1800	750 – 1400
Y160	5 – 6	110	1000 – 1400	2000 – 2500	1200 – 1800	2500 – 3800	1500 – 3200
Y200	6 – 7	160	1200 – 2000	3000 – 4000	2000 – 4000	3800 – 5000	2500 – 3800
Z300	7 – 9	200 – 250	2500 – 4000	5500 – 9000	3000 – 6000	5000 – 8500	4000 – 6500

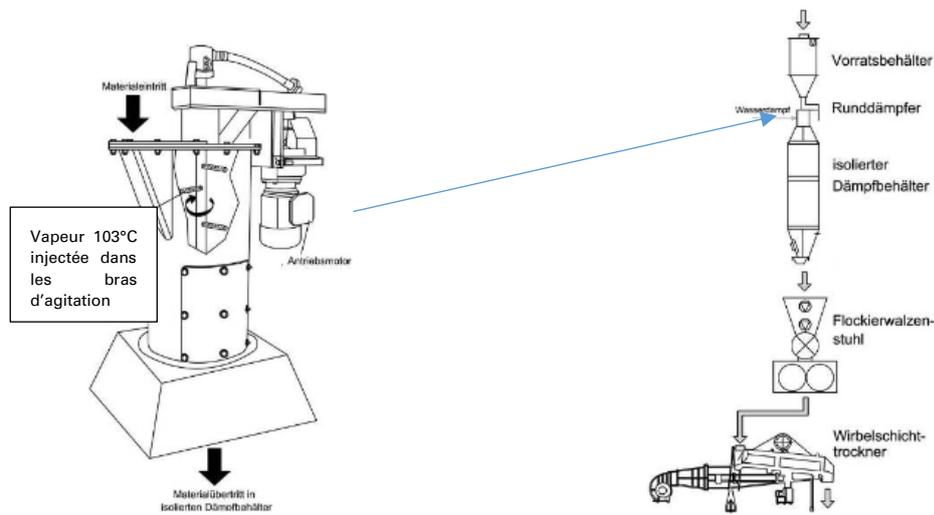
Les productions sont fournies à titre indicatif. Elles dépendent de la formule, des matières premières et de la granulométrie

L'extrusion humide nécessite une chaudière de production de vapeur et un conditionneur qui permet la mise en contact de la graine avec la vapeur.

5. Installation hydrothermique : Meika Tierernährung

Au sein de l'entreprise du fabricant de mélanges d'aliments biologiques Meika Tierernährung SARL se trouve une installation de l'entreprise Streckl et Schrader de Hambourg. L'installation hydrothermique traitant les graines à la vapeur et par floconnage avec une option de déshuilage a été développée pour l'industrie agroalimentaire dans le but de fabriquer des flocons de céréales pour la consommation humaine. Dans l'entreprise Meika Tierernährung, l'installation traite thermiquement les graines de soja en veillant à ne pas endommager leurs protéines.

Fonctionnement / Composants



Aufbau Runddämpfer
© LfL, Eichmann, Thurner, Zeindl

Aufbau der hydrothermischen Aufbereitungsanlage mit Runddämpfer, Dämpfbehälter, Flockierwalzenstuhl und Wirbelschichttrockner. © LfL, Eichmann, Thurner, Zeindl

► **Figure 26 : Principe de fonctionnement de l'installation hydrothermique de Meika Tierernährung**

Le principe de base du cuiseur de soja repose sur un traitement à la vapeur directe et un maintien pendant 40 minutes des graines à 103°C suivi par le floconnage dans un laminoir à cylindre, puis à la fin du processus, un séchage dans un séchoir en lit fluidisé. A l'issue de ce traitement, l'extraction mécanique de l'huile est possible.

Les éléments centraux de l'installation sont le dispositif d'injection de vapeur RD 500 (Streckl et Schrader) et une enceinte de maintien en température qu'on peut décrire comme un tube vertical de 3.1 m³. Après un nettoyage rigoureux, la graine arrive dans un silo d'où elle est acheminée en continu dans la cellule d'injection de vapeur. La répartition homogène de la vapeur est assurée en faisant cette injection par les bras d'un rotor vertical qui remue la graine au passage. La vapeur entrant en contact des graines se condense en apportant beaucoup de chaleur et en permettant une élévation de la température à 103° en un temps très court. Une fois cette température atteinte, les graines passent dans le réservoir de maintien en température pour permettre une homogénéisation de l'humidité et la dénaturation complète des FAT. Ce maintien en température est passif car la trémie tampon est simplement isolée, ce qui permet l'optimisation du rendement énergétique. Ce silo, fabriqué entièrement en acier inoxydable, est déchargé uniformément à l'aide d'un dispositif permettant probablement d'éviter les passages préférentiels. Les graines chaudes sont directement passées dans un aplatisseur d'un mètre de large où elles sont floconnées. Un alimentateur constitué d'un cylindre cannelé permet une répartition homogène des graines sur toute la largeur de travail.

Les flocons cuits sont ensuite séchés dans un séchoir en lit fluidisé (Streckl et Schrader). Cette machine est spécialement conçue pour le séchage doux des flocons de céréales et, par conséquent, des flocons de soja. Le séchoir, dont l'effet est basé sur le principe de convection, est directement raccordé à l'aplatisseur. Dans cet appareil en acier inoxydable les flocons sont traversés successivement par de l'air chaud, puis par de l'air froid. La durée de présence du produit dans la machine, et par conséquent le niveau d'humidité du produit traité final, peuvent être ajustés en jouant sur l'inclinaison du lit fluidisé. L'air de séchage est chauffé à 105°C par un échangeur utilisant la vapeur indirecte. Pour un meilleur refroidissement, un ventilateur de 150 kW a été ajouté au dispositif original de manière à permettre une conservation optimale pendant les mois d'été.

Le débit de l'installation hydrothermique s'élève à 3-4 t/h et varie selon le réglage de la durée et les propriétés du produit brut. La consommation de vapeur est de 300 kg/t de produit cuit. La consommation de vapeur supplémentaire pour le séchoir en lit fluidisé est d'environ 100 kg/t. La puissance électrique de l'ensemble de l'installation monte à 150 kW.

AVANTAGES

- Qualité du produit homogène
- De nombreuses possibilités d'intervenir dans la régulation du processus en partie automatisé, c'est-à-dire de conserver constamment le même processus ou d'ajuster les paramètres de commande aux éventuelles oscillations qualitatives du produit brut ou aux souhaits des clients
- Réduction significative des substances thermolabiles et anti nutritionnelles
- N'abîme pas les protéines puisque les graines sont traitées à des températures plus basses que dans d'autres processus
- Stérilisation du produit assurée par la longue durée du traitement
- En comparaison, faible usure des constituants principaux de l'installation
- Possibilité de déshuilage partiel supplémentaire dans trois presses à vis propres de la FA. Florapower, allant jusqu'à une teneur en graisse de 11-12%

INCONVENIENTS

- Hauteur de construction conséquente
- L'adaptation et l'optimisation de l'installation - qui vient originellement de l'industrie agroalimentaire - est relativement onéreuse. Une reconstruction partielle a été nécessaire pour adapter l'installation au traitement des graines de soja.
- Séchage énergétiquement intensif pour les graines entières ou grossièrement floconnées (en comparaison avec les graines cassées après le processus de vaporisation)

Fabricant	Contact fabricant	Entreprise exploitante	Contact exploitant
Steckl & Schrader kg Hinschenfelder Straße 35 22041 Hamburg Allemagne	Tel.: +49 40 693 70 77 Fax: +49 40 693 53 10	Meika Tierernährung GmbH Bahnhofstrasse 95 - 99 86845 Großaitingen Allemagne	Tel. : +49 8203 960 80 Fax : +49 8203 95 19 86 kontakt@meika-biofutter.de www.meika-biofutter.de

Le regard du technologue

La consommation de vapeur directe semble trop importante par rapport à l'élévation de température indiquée. 300 kg de vapeur représentent 675 MJ, soit ~187 kWh/t. On a vu précédemment que l'ordre de grandeur du traitement thermique théorique se situe autour de 55 kWh/t. L'utilisation de la vapeur directe est un moyen relativement efficace de chauffer tant que la température est assez basse. A des températures proches de 100°C, la vapeur n'est plus condensable. Il est probable que l'on utilise de la vapeur 10 bars qui se surchauffe à la détente ce qui explique qu'une température supérieure à 100°C puisse être atteinte.

Par ailleurs, si on condensait 300 kg de vapeur par tonne de graine, on aurait des graines à 30% d'humidité ce qui engendrerait un besoin pour le séchage nettement plus important que ce qui est indiqué. A mon avis, la consommation de vapeur de 300 kg/h est suffisante pour traiter les 3-4 t/h de graines indiquées. Le dispositif tel qu'il est présenté me semble en mesure d'assurer l'élévation de température pour une consommation de vapeur de l'ordre de 85-100 kg de vapeur par tonne de graine. La teneur en eau de la graine passerait ainsi de 10% environ à 17-18% et une consommation de vapeur de 100 kg/t dans un appareil de type lit fluidisé est vraisemblable.

Les puissances de ventilation paraissent fantaisistes, au vu des quantités manipulées : y a-t-il un facteur 10 de trop ? Le principe me semble intéressant en ce qu'il assure une cuisson humide qui comme cela est revendiqué permet la réduction des FAT sans trop abîmer la protéine et la digestibilité des acides aminés. On peut lui reprocher toutefois de n'être pas optimal du point de vue des consommations énergétiques car il faut sécher à l'issue du traitement. Il faudrait vérifier les données relatives à la ventilation car si elles sont réelles, on a une installation qui n'est pas optimale.

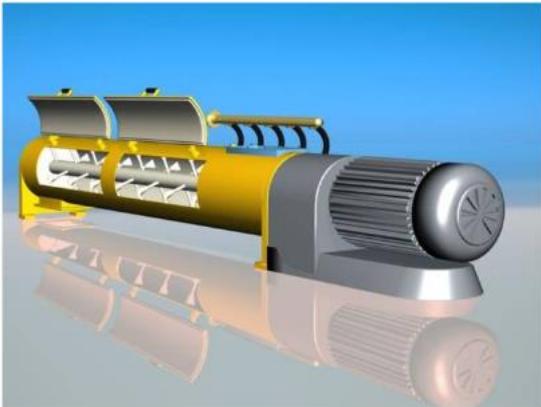
Patrick Carré

6. Installations issues de la combinaison de différentes techniques –

► Installation Asamhof Kissing

Sur l'exploitation Asamhof, à Kissing, se trouve une installation de traitement du soja de l'entreprise Amandus-Kahl qui traite les graines de soja par cuisson humide et par pressage. Le dispositif est spécialement optimisé pour le traitement thermique de diverses graines. Ainsi, l'installation produit en continu, entre autres, du soja cuit non-déshuilé ou encore des tourteaux de soja.

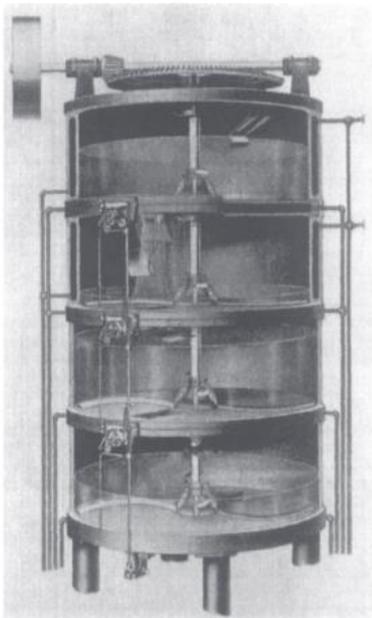
Fonctionnement



Les graines de soja et autres protéagineux tels que le pois ou la féverole sont traités en continu dans un expandeur qui assure une combinaison de travail mécanique et de traitement à la vapeur. Pour ce qui est du soja, il est également possible de le déshuilier, avant le traitement, par une presse à vis de l'entreprise Strähle.

► Figure 27 : Conditionner Kahl (© Armandus Kahl)

Durant le processus de traitement, les graines ou tourteaux de soja sont, dans un premier temps, broyés grossièrement par un broyeur à cylindres. Ils sont ensuite transportés dans une trémie tampon puis par une vis de dosage, dans un mélangeur en continu horizontal doté de palettes agitatrices. Ce conditionneur a pour fonction de permettre la mise en contact du produit avec de la vapeur directe. Il garantit un mélange homogène, sans grumeaux et permet l'échauffement à la vapeur du produit jusqu'à une température maximale de 95°C. Le réglage des pales influence la durée, qui s'élève à environ 30 secondes, tout comme l'intensité du mélange. Ainsi, il est possible d'adapter le conditionnement au produit.



Ensuite, le produit préconditionné arrive dans un cuisier vertical, qui ressemble à une grosse cocotte. Ce cuisier est composé d'une enceinte thermique à plusieurs étages, séparés par des fonds (avec des ouvertures) chauffables à la vapeur. Un traitement thermique à la vapeur indirecte, à pression atmosphérique, a lieu à une température de 102°C pendant une durée de 10 minutes. Au milieu du réacteur se trouve un arbre disposé de façon axiale et pourvu de pales de malaxage. Lorsqu'un niveau prédéfini de remplissage des étages est atteint (et ainsi la durée souhaitée), les clapets des ouvertures entre les étages s'ouvrent et les pales distribuent le produit par les ouvertures selon le principe du « premier entré, premier sorti (PEPS) ». Enfin, le cuisier permet une amélioration des propriétés du produit en assurant la diminution de composants nocifs tels que les lectines, les inhibiteurs de protéases et de trypsines. Dans cette section, les réglages séparés de la température et de l'humidité, et de manière limitée aussi de la durée assurent un traitement à la fois homogène et « doux » des graines.

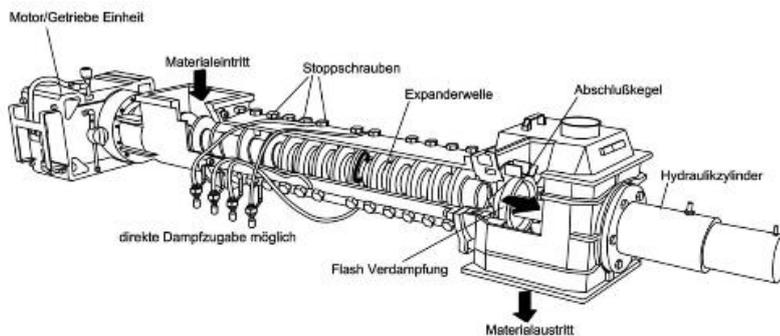
► Figure 28 : représentation en coupe d'un cuisier vertical



► Figure 10 : photographie de l'expander (© Ludwig Asam)

Le traitement par expander représente la spécificité de l'installation. L'expander est composé d'un fourreau à paroi épaisse avec des modules interchangeable et d'un arbre en porte à faux équipé d'éléments de vis, de malaxage et de pétrissage (tels que des « vis de butée », protubérances du fourreau s'opposant au transit de la matière). A la sortie de l'expander, on trouve un cône actionné par vérin hydraulique qui contrarie la sortie de la matière. Par le réglage de l'écartement de l'entrefer de sortie, l'intensité de frottement et par conséquent la température sont réglables en continu. La pression maximale est d'environ 50 bar. Lors de la sortie du produit, la pression chute, entraînant ainsi l'expansion de volume du produit sous l'effet de la vaporisation de l'eau. C'est l'évaporation flash. L'expander travaille selon le principe de flash-pasteurisation. L'avantage du traitement à courte durée (1-5s) et haute température (125-165°C) est que cette technique n'abîme pas trop les acides aminés fragiles tels que la lysine. Cependant, la structure cellulaire de la matière première peut changer de façon intensive en raison de la combinaison de pression, température et frottement. L'expansion peut gélatiniser jusqu'à 60 % de l'amidon dans le cas des céréales et entraîne une meilleure digestibilité des protéines de l'huile dans le cas du soja.

La machine est en mesure de traiter aussi bien du produit entier que du tourteau de soja (7 – 10% de matière grasse restante).



► Figure 3011 : représentation schématique de l'expander (© LfL, Eichmann, Thurner, Zeindl)

À la suite du traitement, le produit est séché et refroidi dans un sécheur/refroidisseur à bande sur l'exploitation Asamhof, afin d'assurer une conservation optimale du produit.

La capacité de la machine est actuellement d'environ 3,3t/h.

AVANTAGES

- Traitement n'abîmant pas trop les protéines du tourteau de soja et du soja entier, et très bonne régulation des paramètres
- Dégradation particulière de l'amidon et disponibilité d'huile grâce à la pression créée par expansion
- De nombreuses possibilités d'intervenir dans le processus (entre autre : régulation de la température) et d'ajuster les paramètres aux exigences du client
- L'installation est également utilisable de manière flexible pour la production d'aliments composés hygiénisés ainsi que de granulés composés.

INCONVENIENTS

- Coûts d'investissement relativement élevés
- Procédé relativement coûteux en énergie
- Le traitement à l'eau pour l'installation à vapeur demande beaucoup de maintenance et est très coûteux
- Maintenance coûteuse de l'expandeur de 130kW

Fabricant	Contact fabricant	Entreprise exploitante	Contact exploitant
AMANDUS KAHL GmbH & Co. kg Dieselstraße 5 - 9 21465 Reinbeck	Tel.: +49 (0) 40 7 27 71-0 Fax: +49 (0) 40 7 27 71-100 info@amandus-kahl-group.de www.akahl.de	Rieder Asamhof GmbH & CoKG PDG Josef Asam Hauptstraße 1 86438 Kissing	Tel. : +49 8233 56 76 Fax: +49 8233 606 63

Le regard du technologue

Cette installation semble bien adaptée pour le traitement à appliquer au soja. La cuisson humide proposée est effectivement intéressante pour une réduction des FAT sans perte élevée de solubilité des protéines. La consommation énergétique est a priori acceptable car le travail n'est jamais fait à des humidités excessives et les besoins de séchage sont probablement assez limités.

Pour un traitement avec déshuilage elle ne permet probablement pas un conditionnement correct des graines avant extraction mécanique qui doivent être séchées plus intensivement. D'ailleurs, le déshuilage est plutôt proposé en amont de la cuisson.

Le travail de l'expandeur, est probablement moins intensif que celui des extrudeurs à sec vus auparavant. Son utilité est à vérifier car l'amélioration revendiquée de la digestibilité des nutriments n'est probablement pas vérifiée sur tous les animaux. A mon avis, le traitement est peut-être justifié pour des aliments de démarrage sur jeunes animaux (poussins, porcelets) mais probablement non nécessaire sur des aliments croissance.

Patrick Carré

► Huilerie en container d'OLEXA :



Unité clé en main comprenant toute la chaîne nécessaire à la production d'huile à une échelle de l'ordre de 300-350 kg/h de soja.

► **Figure 31 : L'huilerie en conteneur Olexa** (© Olexa)



Cette unité permet à la fois la cuisson et le déshuilage. Elle comprend un concasseur (aussi appelé décortiqueur). Il s'agit d'un tambour rotatif équipé de couteaux tournant contre un stator également muni de couteaux. La matière est cisailée en passant dans l'appareil. La taille des particules peut être réglée en ajustant la distance entre les couteaux.

Le cuiseur est un appareil horizontal équipé de pales d'agitation qui remuent la matière au contact d'une paroi chauffante. Le chauffage est assuré par un fluide thermique lui-même chauffé par des résistances électriques. Il est possible de demander une version « vapeur » utilisant une source d'énergie moins onéreuse mais assez chère malgré tout.

► **Figure 32 : vue de l'intérieur de l'huilerie en conteneur Olexa** (© Olexa)

Une unité de cette sorte peut être mise en service en deux heures et transportée facilement d'un site à l'autre.

L'unité comprend une vis d'alimentation et une vis de sortie des tourteaux qui peut servir à alimenter un big-bag. L'huile passe sur un tamis vibrant qui permet un recyclage des sédiments grossiers. Le filtre à huile est à démontage manuel.

L'ensemble est commercialisé pour un montant approximatif de l'ordre de 240 k€.

La consommation d'énergie pour la cuisson est estimée à 150 kWh/t pour la cuisson et 45 kWh/t pour les moteurs électriques.

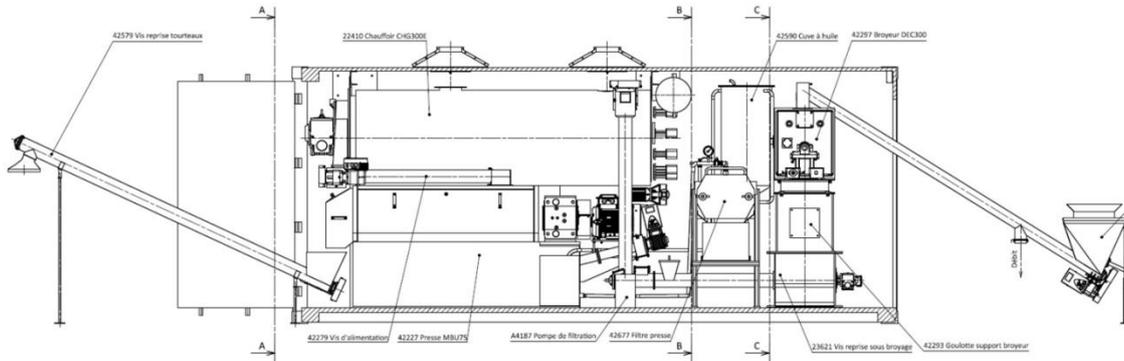


► **Figure 33 : vue de l'huilerie en conteneur Olexa avec vis d'alimentation déployée** (© Olexa)

Le dispositif permet de produire des tourteaux plus riches en protéines et moins riches en huile permettant d'élargir le domaine d'application et peut aussi créer de la valeur si l'huile peut être valorisée.

Toutefois, la valorisation de l'huile dans le domaine alimentaire reste un point difficile car le marché français n'est pas habitué à consommer l'huile de soja et le procédé de toastage préalable donne un goût fort à l'huile qui ne permet pas de la commercialiser sans un traitement de raffinage minimal.

Idéalement, il faudrait regrouper la production de plusieurs producteurs pour réaliser un traitement de semi-raffinage efficace et organiser la distribution. A priori, une organisation en coopérative de transformateurs serait à mettre en place.



► Figure 34 : Représentation schématique de l'huilerie en conteneur Olexa (© Olexa)

AVANTAGES

- Réduction de la teneur en huile des tourteaux et vente possible d'huile
- Gestion de la cuisson paramétrable selon objectifs
- Coûts de maintenance limités pour le cuiseur
- Robustesse et longévité.
- Installation facile et rapide – le container peut être déplacé d'une exploitation à l'autre. Pas d'annexes à prévoir

INCONVENIENTS

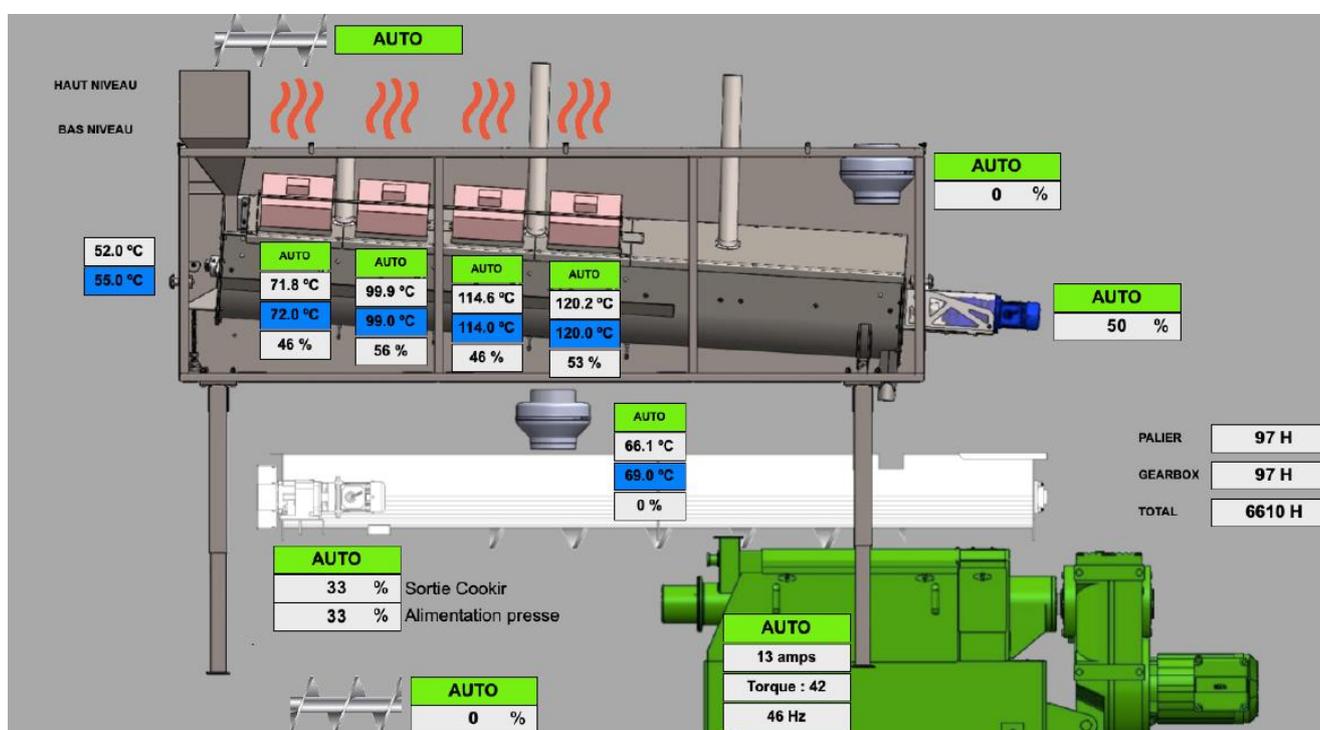
- Nécessite une présence humaine relativement fréquente (filtration, surveillance de la presse) – mais la personne peut accomplir d'autres tâches à proximité. Prévoir entre 10 et 35% du temps de la personne selon manutentions à réaliser en amont et en aval.
- Coût installé assez important.
- kWh électrique assez cher
- Maintenance de la presse à prendre en compte
- Nettoyage des graines poussé nécessaire
- Pas une vraie cuisson humide (cuiseur en un seul compartiment et nécessité de sécher pour bien déshuiler)

7. Equipements Innovants

► La cuisson à infrarouges du CookIR

Le CookIR est un dispositif de cuisson à infrarouges produit au Canada et couplé à une presse à vis se présentant sous forme de deux containers prêts à l'emploi. La cuisson est assurée au moyen de générateurs infrarouges (IR moyen) disposés au-dessus d'une vis inclinée permettant de contrôler le temps de séjour et la température de traitement. Ce système a été conçu en tenant compte du faible pouvoir pénétrant du rayonnement infrarouge. Il assure une circulation permanente de la graine sous les générateurs de sorte que la température de surface reste raisonnable et puisse se diffuser dans la masse du grain. Avec un temps de séjour un peu supérieur à 30 minutes, il est ainsi possible de limiter la température de la graine et éviter la formation de points chauds, ce qui est également un facteur d'économie d'énergie. Comme on le voit sur la figure 35, à cet effet, l'appareil comprend une zone de maintien en température en aval de la zone de chauffage. La consommation électrique (cuisson, manutentions, et pressage) est de l'ordre de 110 kW par tonne de soja pour les installations de plus grande capacité et 170 kWh/t pour les plus petites (40 à 45 kg/h).

Il faut compter 6.5 €/t de coûts de maintenance, principalement occasionnés par le remplacement des pièces d'usure.



► Figure 35 : représentation synoptique du dispositif CookIR disposé en 2 containers superposés (© Cookir)

Les recommandations du fabricant sont de présécher la graine à 10% d'eau avant cuisson de sorte qu'il parvienne entre 7 et 8% d'eau entrée presse. Il est possible d'ajuster le fonctionnement du cuiseur pour un séchage plus intensif en réduisant la température de consigne et en allongeant le temps de séjour. Au prix d'une réduction de la capacité, il est possible de traiter de la graine à 13% et produire un tourteau à 5% d'eau. Les teneurs en huile en sortie de presse peuvent atteindre 5-6% lorsque la cuisson est optimale.

Sur certains modèles, il est possible d'utiliser des générateurs d'infrarouges à gaz qui seraient probablement plus économiques dans les conditions de prix des énergies en France. Par ailleurs le fabricant pense pouvoir proposer prochainement une unité d'estérification de l'huile permettant de transformer l'huile produite en carburant.



► **Figure 36 : de gauche à droite, le générateur d'infrarouges et une vue des graines dans la chambre de traitement** (© Cookir)

Le dispositif travaille avec des graines entières, ce qui demande un temps plus long pour que la température de traitement soit atteinte. Mais par construction, le dispositif ne peut vraisemblablement pas fonctionner avec des produits poussiéreux : par conséquent, on ne pourra pas l'employer sur des graines broyées.

Les graines qui en sortent ont l'air exemptes de coloration excessive qui serait la trace de points chauds.



► **Figure 37 : Photographie de soja traité par le CookIR (à noter absence de traces de chaleur excessive)** (© Cookir)

Un ventilateur assure une pression positive dans l'appareil et une circulation d'air évitant la saturation de l'ambiance par la vapeur d'eau. Le risque d'incendie fait l'objet d'une gestion automatisée et demande un nettoyage de la partie située sous les générateurs à fréquence hebdomadaire. Le principal risque d'accident est localisé dans la cheminée de l'air usé où la poussière peut s'accumuler. Un nettoyage automatique par jet d'air évite ces accumulations ce qui impose de disposer d'air comprimé.

Fabricant	Contact fabricant
CookIR 37 Chemin Scott Lac Brome Québec Canada J0E 2P0	Yves Campeau tel: 450 919 0589 ycampeau@cookir.com www.cookir.com

Le regard du technologue

La maîtrise du risque d'incendie dans le cuiseur mérite une attention particulière : des dépôts de poussières qui stagneraient sous l'exposition aux IR pourraient engendrer une augmentation de la température jusqu'au point d'auto-inflammation. Il faut absolument respecter les consignes du constructeur à l'égard des opérations de nettoyage à fréquence hebdomadaire.

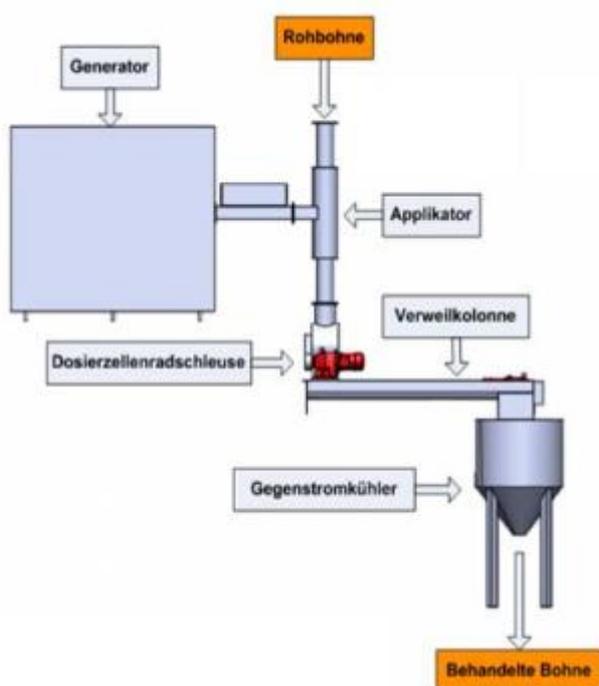
Le constructeur du CookIR ne diffuse pas de données sur les caractéristiques des tourteaux issus de son procédé. Il assure que la capacité de traitement permet aussi bien la réduction des facteurs antitrypsiques pour les monogastriques que le toastage pour les ruminants. Les indications qu'il donne en matière de consommation d'énergie sont compatibles avec cette indication mais un éventuel acquéreur aura intérêt à obtenir des informations plus précises, si possible en visitant une installation en fonctionnement et en discutant avec l'exploitant.

Dans l'idéal ces installations fermières devraient pouvoir fonctionner avec l'huile qu'elles produisent comme carburant, le kWh électrique étant cher pour les petits consommateurs et l'huile de soja obtenue par pression à chaud difficile à commercialiser.

Patrick Carré

► Installation haute-fréquence : agitation diélectrique de l'eau de Florapower

L'entreprise Florapower d'Augsburg a développé un procédé à micro-onde qui permet une inactivation thermique des facteurs antinutritionnels thermolabiles.



► Figure 38 : Schéma de principe du dispositif de cuisson par microondes Florapower
(© Florapower GmbH & Co. KG)

Le cuiseur diélectrique est un procédé basé sur la technique de haute fréquence, dans laquelle la graine de soja traverse un applicateur en continu. Durant ce procédé, les oscillations électromagnétiques stimulent les molécules d'eau à l'intérieur des graines et provoquent leur échauffement. Les champs électromagnétiques alignent les molécules d'eau qui sont constituées d'un dipôle chargé électroniquement. Les champs haute fréquence oscillent entre 3 et 30 millions de fois par seconde. A chaque oscillation, les molécules d'eau subissent un changement d'orientation qui, en raison des collisions avec les autres molécules environnantes, provoque une élévation de la température.

La graine est ainsi cuite grâce à sa propre teneur en eau (10-15%) et l'énergie nécessaire est utilisée de façon optimale. À travers le paramétrage variable de la température, la graine n'est chauffée que durant un temps et à la température nécessaire à la dégradation des composants antinutritionnels. 100°C sont en général suffisants. Grâce à cela, la grande partie des composants importants peuvent être conservés, en comparaison avec d'autres procédés à basses températures. Après le chauffage, la température peut être maintenue pendant une durée ajustable librement. Cette durée est nécessaire afin de dégrader les substances anti-nutritionnelles. L'installation du centre technique travaille avec un rendement de 2kW et peut transformer 35kg par heure. Pour l'utilisation industrielle, des rendements plus importants sont disponibles.

AVANTAGES

- Traitement délicat et homogène des graines de soja
- Préparation rapide
- Pas d'effet de pression sur les graines de soja
- Chauffage efficace de l'intérieur vers l'extérieur : pas d'énergie requise de l'extérieur
- La machine n'émet pas de radiation
- Commande exacte du traitement (paramètres de qualité)

INCONVENIENT

- Prix plus élevé pour la machine, étant donné qu'il s'agit d'une nouvelle technologie

Fabricant	Contact fabricant
Florapower GmbH & Co. kg Am Mittleren Moos 48 86167 Augsburg www.florapower.net	Thomas Kühnel Ingénieur industriel info@florapower.de

Le regard du technologue

Il y a une ambiguïté dans ce texte, les micro-ondes et les champs haute fréquence sont deux technologies différentes du point de vue des applicateurs. Avec les microondes, les générateurs ont des rendements qui ne sont pas optimaux et la pénétration de l'énergie n'est pas très importante. Avec les hautes fréquences, le produit passe entre deux plaques et il y a besoin de contact. Le coût des hautes fréquences est a priori moins élevé mais il reste assez élevé par rapport aux technologies plus conventionnelles. Au vu de l'illustration il semble qu'on ait affaire à un générateur de microondes.

Selon mon expérience acquise sur un tunnel de cuisson microondes de 12 kW 2 450 MHz, il est difficile de parvenir à une répartition homogène de l'énergie dans la veine de matière si bien qu'on observe des zones froides insuffisamment cuites. Par ailleurs sur des graines oléagineuses pauvres en eau, les rendements sont peu satisfaisants.

Patrick Carré

TRANSFORMATION DU SOJA A LA FERME

Technologies disponibles

Le guide « Transformation du soja à la ferme. Technologies disponibles » présente un état des lieux des principales technologies et équipements permettant la cuisson des graines de soja à la ferme, dans le but de fournir aux animaux monogastriques une matière première riche en protéines digestibles et pauvre en facteurs antinutritionnels. Il s'agit d'équipements fixes ou mobiles, pouvant faire l'objet d'investissements individuels ou collectifs. Un classement par type de technologie permet de réaliser un panorama complet de l'offre disponible : certaines installations disposent d'un certain recul sur leur niveau de performance, tandis que quelques technologies plus récentes sont encore en phase de validation. Pour chacune d'entre elles, les modes et principes de fonctionnement sont décrits. Une synthèse des avantages et inconvénients aiguillera le futur utilisateur dans son choix. La description de chaque équipement est éclairée par un commentaire de l'auteur : le regard du technologue. Enfin, des contacts de fabricants et d'exploitants permettront au lecteur désireux d'investir d'aller plus loin dans sa démarche.

La première partie de ce guide présente les principaux facteurs antinutritionnels pénalisant la croissance des animaux, et expose les bases théoriques de l'intérêt de la cuisson des graines.

Ce guide est composé de 3 parties principales :

PARTIE I - Pourquoi et comment cuire la graine de soja destinée aux monogastriques ?

PARTIE II - Principes de fonctionnement des équipements de cuisson

PARTIE III – Description des équipements disponibles

Ce guide a été rédigé par Patrick Carré, expert à l'ITERG / Terres Inovia, à partir d'une traduction et adaptation du guide « Sojaaufbereitungsanlagen », réalisé par le Fibl. Référence : Asam, L., Spory, K.; Spiegel, A., 2014. Sojaaufbereitungsanlagen. Fibl (Forschungsinstitut für biologischen Landbau). 29 p.

Avec le soutien financier de



Programme de recherche et d'innovation
Horizon 2020 de l'Union Européenne,
convention de subvention n° 773911.

Réalisé dans le cadre du projet

