

**INRAE**



## **Rapport Recherches et Innovations TRANSFORM 2022**

Département Aliments, produits biosourcés et déchets  
**TRANSFORM**

# SOMMAIRE

P. **4**

Nos plateformes et Infrastructures

Comprendre comment les bioressources  
peuvent être exploitées

P. **7**

P. **21**

Intégrer les connaissances et établir des  
procédés durables

Raisonner l'élaboration et la perception  
de nos aliments

P. **33**

P. **50**

Concevoir des produits et matériaux bio-  
sourcés

Contacter nos unités

P. **62**

## MENTIONS LEGALES

**Editeur:** Michael O'Donohue, Chef de département

**Comité éditorial:** Jean-Philippe Steyer, Carole Tournier, Olivier Tranquet, Olivier Vitrac, Catherine Garnier, Patrick Dabert, Fabrice Beline, Maïa Meurillon, Laetitia Theron, Yassin Refahi, Carole Antoine-Assor, Rachel Boutrou, Laurence Fournaison, Mélanie Delclos.

**Design:** Mélanie Delclos

© INRAE - Photos: médiathèque INRAE, Adobe Stock, Pixabay

INRAE

Département TRANSFORM

3 impasse Yvette Cauchois

CS 71627 44316 Nantes Cedex 03

Tél. +33 (0)2 40 67 51 45

[transform@inrae.fr](mailto:transform@inrae.fr)

---

# Edito

Que vous soyez un lecteur curieux de découvrir notre département ou un connaisseur de TRANSFORM, l'édition 2022 vous réserve un très joli recueil de résultats tout à fait représentatifs des thématiques et des ambitions de notre collectif. Comme le révèle notre plan stratégique 2021-2025, le Département inscrit son action dans la transition vers la bioéconomie circulaire. En le faisant, il compte contribuer pleinement à la réalisation des ambitions d'INRAE 2030 en matière d'accompagnement aux transitions alimentaires, en faveur d'un développement durable, ou encore pour la science ouverte et accélérée par l'adoption d'approches numériques.

Nous ouvrons ce numéro avec les approches numériques. Depuis de nombreuses années, nos équipes adoptent la modélisation et la simulation comme approches clef pour développer leurs recherches. Dans ce numéro, nous illustrons l'importance de ces méthodes et outils pour la transition vers la bioéconomie circulaire, une économie qui repose sur l'utilisation de ressources d'origine biologiques comme matières premières pour l'industrie.

Le second chapitre de ce rapport traite de deux autres enjeux majeurs pour la bioéconomie circulaire que sont le développement de procédés durables, moins consommateurs en énergie et en eau, et moins impactants sur l'environnement, ainsi que le développement de la biocatalyse comme cœur technologique d'une nouvelle ère industrielle. Vous trouverez dans ce chapitre de nombreux exemples de travaux conjuguant l'acquisition de connaissances fondamentales et recherche appliquée.

Enfin, dans les deux derniers chapitres, vous trouverez au travers des illustrations de travaux présentés deux des grands marqueurs du département qui sont les aliments et les matériaux biosourcés. En feuilletant ces pages, vous constaterez que ces domaines s'interpénètrent, car en bioéconomie les coproduits de la production alimentaire peuvent constituer des matières premières pour l'élaboration de matériaux.

Je termine en vous souhaitant une excellente lecture et en espérant que le contenu de ce rapport vous incitera à suivre plus régulièrement les activités de nos équipes en visitant notre site web (<https://www.inrae.fr/departements/transform>).

**Michael O'Donohue**  
**Chef de Département TRANSFORM**



## Nos plateformes scientifiques



PROBE Platform for probing properties of food and industrial products

### AGRORESONANCE - UR QUAPA

Sous la forme de spectres ou d'images (IRM), la résonance magnétique nucléaire (RMN) offre un large éventail de méthodes analytiques capables d'identifier la structure chimique des composés, de quantifier la concentration et la dynamique de petites molécules ou de caractériser l'agencement des constituants de la matière à différentes échelles. Elle donne donc des informations précieuses sur la composition et la structure des tissus ou matériaux, ainsi que sur le fonctionnement du vivant.

La plateforme AgroResonance est une infrastructure du centre INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes. Elle réunit des compétences et un parc technologique de haut niveau pour proposer analyses et développements et répondre à des questions dans les domaines de l'agro-alimentaire, du végétal, de la nutrition et de la santé.

AgroResonance est certifiée ISO9001 et labellisée Infrastructure Scientifique Collective. Elle est membre fondateur de la plateforme régionale multimodale In Vivo Imaging in Auvergne (IVIA), labellisée par IBiSA, et a ainsi accès à la plupart des autres modalités d'imagerie in vivo clermontoises depuis l'animal jusqu'à l'homme.

**Contact:** jean-marie.bonny@inrae.fr



PROBE Platform for probing properties of food and industrial products

### BIORESSOURCES : IMAGERIE, BIOCHIMIE & STRUCTURE (BIBS) - UR BIA

BIBS réunit des expertises dans différents domaines analytiques et en traitement des données, permettant de décrire - par différentes modalités et sur une gamme d'échelles allant du millimètre au nanomètre - les structures et architectures de systèmes agrosourcés et d'étudier les biopolymères qui les composent (polysaccharides, protéines, lipides).

Les méthodes permettent : i) de caractériser la structure des biopolymères (identification, quantification, modifications), leurs interactions, leur organisation (ordres locaux, mobilité), leur localisation ; ii) de suivre leur dégradation ou leur transformation ; iii) de cribler des collections d'échantillons sur des critères chimiques et structuraux ; iv) d'imager les systèmes par différentes modalités et à différentes échelles, de réaliser des imageries corrélatives ; v) d'aborder des paramètres dynamiques (diffusion).

**Contact:** contacts-bibs@inrae.fr



### PLATEFORME BIO2E - UR LBE

La plateforme Bio2E, Biotechnologie et Bioraffinerie Environnementales, du LBE conduit des activités de R&D technologique pour la valorisation des bioressources, la production de bioénergies, avec une expertise en méthanisation, bio-méthanation, bio-hydrogène, microalgues et procédés physico-chimiques. Elle offre des solutions pour concevoir, mettre en œuvre et optimiser des bioprocédés sobres, performants, fiables et évolutifs, autour de filières durables de valorisation et/ou traitement de différents résidus issus des activités humaines. Bio2E héberge INRAE-Transfert Environnement (IT- E) qui réalise les prestations de services basées sur les connaissances du LBE. La plateforme est en mesure d'accompagner les projets d'innovation de la recherche fondamentale, en passant par la preuve de concept jusqu'à la démonstration (TRL 1 à 6).

**Contact:** audrey.battimelli@inrae.fr







**PROBE** Platform for probing properties of food and related products

## CHEMOSENS- UMR CSGA

ChemoSens est la plate-forme de recherche et développement méthodologique du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, basé à Dijon, dont l'originalité repose sur l'utilisation combinée de la chimie et de l'analyse sensorielle pour développer de nouvelles approches de caractérisation des aliments et du comportement alimentaire.

Les techniques d'analyse physico-chimique permettent de caractériser les molécules actives de la flaveur d'un aliment et de suivre leur libération lors de la mastication. La plate-forme possède aussi une expertise dans l'analyse des lipides constitutifs de l'aliment et des tissus neurosensoriels.

ChemoSens jouit aussi d'une réputation internationale en sensométrie et certains de ses développements, comme la Dominance Temporelle des Sensations (DTS), sont mondialement reconnus. Elle a pu construire de vastes bases de données et elle a développé le logiciel Internet TimeSens® pour l'acquisition et l'analyse des données sensorielles.

Contact: geraldine.Lucchi@inrae.fr



## PLATEFORME LAIT (PFL) - UMR STLO

La PFL est une Installation Expérimentale capable de mettre en œuvre divers processus technologiques laitiers sur une même unité de lieu, à différentes échelles, et selon des itinéraires technologiques flexibles et maîtrisés incluant le fractionnement des constituants du lait, la réalisation de matrices plus ou moins concentrées, fermentées ou non (produits frais, fromages ou lait concentré) et le séchage de matrices laitières. D'autres matrices (ovoproduits, jus de céréales ou légumineuses) peuvent également être étudiées (seules ou mixtes). D'une surface de 800 m², elle a été entièrement réaménagée en 2013 et est certifiée ISO 9001 depuis 2009. La plateforme est ouverte aux partenariats académiques et industriels. Son fonctionnement s'appuie sur des expertises internes (technologie, génie des procédés, biochimie, microbiologie, nutrition et écoconception) mises en œuvre dans des projets de recherche académiques ou privés ainsi que dans les programmes de formation des futurs cadres de l'industrie alimentaire.

Contact: gilles.garric@inrae.fr



## DISPOSITIF PLANET - UMR IATE

La plateforme Processing of Plan products with Emergent Technologies est une plateforme technologique de l'UMR Ingénierie des Agro polymères et Technologies Emergentes, labellisée Infrastructure Scientifique Collective par INRAE depuis 2018. La plateforme PLANET a pour missions de participer à des programmes de recherche et de contribuer au développement de méthodes et de procédés pour la valorisation de matières premières végétales pour divers domaines d'applications (aliments, biomatériaux et bioénergie) et développer des collaborations scientifiques avec des partenaires extérieurs. Les activités de la plateforme PLANET concernent 5 thématiques : le fractionnement de céréales et graines ; la raffinerie sèche de la lignocellulose ; la mise en forme d'agrocomposites ; le traitement et la structuration alimentaires ; et la caractérisation des matières premières et des produits. La plateforme PLANET regroupe un ensemble original d'équipements pilotes instrumentés permettant d'étudier les principales opérations unitaires de transformation des végétaux (tri, mouture, structuration, séchage...).

Contact: contact-planet@inrae.fr



## TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (TWB)

Expert dans la conduite de projets de recherche et développement (R&D), TWB accompagne l'industrie dans le développement de solutions innovantes et durables pour le bien de la planète et des hommes. TWB monte et conduit, dans le domaine des biotechnologies industrielles, des projets de R&D en collaboration avec des laboratoires publics et des industriels, accompagne le développement de start-up en leur proposant notamment un hébergement dans ses locaux dans un environnement scientifique et technologique de pointe et favorise l'émergence d'innovations de rupture. En réunissant chercheurs, entrepreneurs, financeurs, institutionnels et industriels, TWB intègre et valorise toutes les compétences et expertises et crée des synergies tout en simplifiant la relation contractuelle.

Depuis son lancement en 2012 sous la triple tutelle INRAE, INSA et CNRS, et fort de son consortium de 49 membres privés et publics au 1er janvier 2022, TWB a contribué à la réalisation de près de 260 projets collaboratifs de R&D et à la croissance de nombreuses start-up qui ont levé au total plus de 250M€.

Contact: laurie.rey@inrae.fr



# PLATEFORMES LABELLISÉES

## PROBE, une infrastructure ouverte pour caractériser les bioressources



**P**ROBE (Platform for profiling properties of food and biobased products) est une des 14 infrastructures de recherche distribuée labellisée par INRAE.

Les agro-ressources sont caractérisées par leur structure complexe et évolutive influençant grandement leurs propriétés d'usage. Ainsi, que ce soit dans une optique d'utilisation alimentaire ou non-alimentaire, il convient de développer des méthodes et concepts pour analyser ces agro-ressources et appréhender les modifications structurales qui ont lieu au cours des trajectoires de transformation en lien avec les fonctionnalités des produits.

**P**ROBE constitue une offre unique d'investigation multi-échelle des agro-ressources, de la structure moléculaire à la sensorialité. Ses chercheurs, ingénieurs et techniciens mettent en œuvre des technologies de pointe complémentaires : spectrométrie de masse, RMN, IRM, microscopie, chemotypage, analyses sensorielles et études du comportement alimentaire et s'appuient sur une expertise innovante en traitement des données pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés de la biomasse, des produits transformés et des aliments.

Contact: [marie.ralet@inrae.fr](mailto:marie.ralet@inrae.fr)

## TRANSFORM au coeur d'IBISBA



### EU-IBISBA

*Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Accelerator - Sharing the way to innovation*

Labellisée ESFRI 2018, IBISBA EU est une infrastructure de recherche translationnelle qui entend accélérer le développement des biotechnologies industrielle et environnementale en Europe en tant que pivot de la bio économie circulaire. Fédérant les infrastructures de recherche de pointe de 9 pays européens et associant les dernières technologies numériques, IBISBA propose aux communautés académique et industrielle un accès unique à des services R&D&I intégrés et innovants en biotechnologie, prenant le virage de l'ère de la « Bio-industry 4.0 ».

### IBISBA-FR

IBISBA FR, est une infrastructure française fruit de la coopération inter-organismes de plateformes technologiques offrant des services et formation à la recherche et à l'innovation dans les biotechnologies, dont une partie sont intégrés au sein d'IBISBA EU. Labellisée sur la feuille de route MESRI 2016 et reconduite en 2021, IBISBA FR entend favoriser le développement des biotechnologies en France. Son prochain défi sera de se structurer et coordonner pour former le nœud national d'IBISBA EU.

Plus d'informations : [ibisba.eu](http://ibisba.eu) - [ibisba.fr](http://ibisba.fr)

Contact: [ibisba-fr@ibisba.eu](mailto:ibisba-fr@ibisba.eu) - [network@ibisba.fr](mailto:network@ibisba.fr)

## Infrastructure CALIS Consommateur – Aliment-Santé



L'infrastructure de recherche CALIS est fondée sur la coordination nationale de plateformes labellisées organisées en 3 pôles :

- (i) le Pôle « Aliments » dédié à la conception et la caractérisation des aliments,
- (ii) le Pôle « Consommateur » spécialisé dans l'étude des choix alimentaires et des comportements de consommation,
- (iii) le Pôle « Santé » qui se consacre aux répercussions de l'alimentation sur la physiologie et la santé de l'Homme (intégrant son microbiote).

CALIS offre des services aux communautés scientifiques publiques comme privées, fondés sur des développements technologiques, la mise à disposition de données et de supports expérimentaux ou encore des actions de formation. Elle permet de pouvoir aborder les questions de recherche sur l'alimentation durable pour la santé de façon multidisciplinaire en intégrant toute la chaîne de valeurs depuis les matières premières agricoles et leur transformation en aliments jusqu'à l'effet sur la santé de l'Homme.

Contact: [didier.dupont@inrae.fr](mailto:didier.dupont@inrae.fr)

## ✓ Comprendre comment les bioressources peuvent être exploitées



Pour exploiter au mieux les bioressources, les chercheurs du département TRANSFORM développent des moyens d'étude et de simulation d'objets aussi divers que les eaux usées ou l'huile de friture. Accroître les connaissances sur les mécanismes clé mis en jeu et leur dynamisme exige d'acquérir et de traiter de nombreuses données en vue de leur meilleure valorisation.

**Page 8:** Accroître les connaissances des dynamiques des mécanismes, simuler, modéliser

**Page 16:** Acquérir, structurer et valoriser les données





©Vivien Dubois  
Photo illustrant une surface d'infiltration

# Caractérisation de la conductivité hydraulique des sols appliquée à l'infiltration des eaux usées traitées



## En savoir plus

Rabouli S. *et al.*

Spatialization of saturated hydraulic conductivity using the Bayesian Maximum Entropy method: Application to wastewater infiltration areas

Water Research . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117607>

## Partenariat

- Société Iris Instruments

## Contacts

Sara Rabouli et Rémi Clément

UR REVERSAAL

[sara.rabouli@inrae.fr](mailto:sara.rabouli@inrae.fr)

[remi.clement@inrae.fr](mailto:remi.clement@inrae.fr)



## Contexte

En France métropolitaine, le sol est de plus en plus considéré comme un réacteur biologique ou un exutoire naturel des eaux usées traitées, respectivement pour réduire les concentrations de polluants dans les milieux récepteurs superficiels (rivières) ou dans le cas d'absence de milieu récepteur.

Lors du dimensionnement de la surface d'infiltration recevant les eaux usées traitées, la conductivité hydraulique à saturation est la mesure clé pour évaluer la capacité d'infiltration d'une parcelle de sol. De nos jours, il n'existe pas de technique satisfaisante pour évaluer la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) d'un sol hétérogène et sa variabilité à l'échelle d'une parcelle sur les 2 premiers mètres de sol. Ce manque d'information peut conduire à des dysfonctionnements de la surface d'infiltration (colmatage, court-circuit hydraulique). Ce travail présente une méthodologie de fusion d'informations innovante qui intègre des mesures géophysiques et géotechniques afin de mieux préciser l'hétérogénéité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  proche de la surface.

## Résultats

L'étude propose une représentation 2D de  $K_s$  à l'aide de la méthode de fusion d'informations BME (Bayesian Maximum Entropy) qui fusionne les essais d'infiltration et la tomographie de résistivité électrique (TRE).

Les résultats de cette étude, basés sur des données numériques et de terrain, ont montré que la BME est une méthode performante : elle permet d'établir pour la première fois des cartes de  $K_s$  avec une variance plus faible que toutes les autres méthodes testées dans la littérature. A partir de peu d'essais d'infiltration, cette méthode permet de détecter des anomalies non perceptibles par les méthodes traditionnelles et ainsi de mieux dimensionner la surface d'infiltration.

Dans certains cas de sols très hétérogènes, ces anomalies auraient pu générer de fausses estimations de la conductivité hydraulique à saturation, entraînant une erreur de dimensionnement des volumes à infiltrer estimée de plus ou moins 100%.

## Perspectives

Ce travail a permis de développer une approche multiméthodes, pour coupler les méthodes géophysiques et géotechniques pour la caractérisation des milieux poreux hétérogènes. Pour la société IRIS Instruments (<http://www.iris-instruments.com/>), qui co-finance le projet, le développement d'outils de fusion d'informations, autour des méthodes géophysiques ouvrent de nouveaux champs d'application. Au-delà, des surfaces d'infiltration, les premiers résultats sont majeurs pour l'utilisation future des méthodes géophysiques en particulier dans le domaine de l'environnement.



©Fillaudeau L.(TBI), Rouis S. (CBS), Kallassy M (USJ)

# Approche innovante pour la lutte intégrée contre les ravageurs des agrumes



## En savoir plus

Segura Monroy T. *et al.*

Dynamic model of d-endotoxin and spore productions by three *Bacillus thuringiensis ssp kurstaki* strains

Processes . 2021

<https://doi.org/10.3390/pr9122147>

## Partenariat

- Germany : JKI
- Italy : BIPCA (Private)
- Lebanon : USJ
- Turkey: BIYANS (Private)
- Tunisia: CTA, CBS, IPT, WIKI (Private), MEDIS (private)

## Contacts

Luc Fillaudeau, César Arturo Aceves Lara et Julien Cescut

UMR TBI et TWB

[luc.fillaudeau@insa-toulouse.fr](mailto:luc.fillaudeau@insa-toulouse.fr)

[aceves@insa-toulouse.fr](mailto:aceves@insa-toulouse.fr)

[julien.cescut@inrae.fr](mailto:julien.cescut@inrae.fr)



## Contexte

Le projet IPM-4-Citrus s'appuie sur une approche multidisciplinaire (biotechnologie, bioactivité et transfert) pour (i) le développement de bioprocédés pour une bioéconomie circulaire et (ii) l'étude et la maîtrise des changements d'échelle en biotechnologie. Il vise à développer 2 nouveaux bio-pesticides ( $\delta$ -endotoxines produites par *Bacillus thuringiensis kurstaki* BLB1 et LIP) actifs contre les ravageurs des agrumes (*Phyllocnistis citrella*, *Prays Citri*). Bt est un micro-organisme industriel important pour le marché mondial des biopesticides. Les outils de modélisation sont déterminants pour évaluer et comparer le potentiel de souches endémiques tunisienne (*Btk* BLB1) et libanaise (*Btk* LIP). L'optimisation de la bioproduction et l'obtention de bioproduits formulés valorisables constituent des défis scientifiques et technologiques à relever.

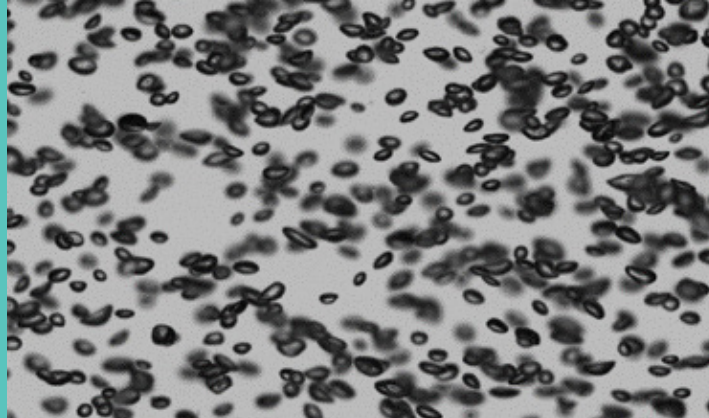
## Résultats

L'optimisation dynamique de la production de protéines (dont les endotoxines), des cellules et des spores lors des différentes phases de bioproduction nécessite l'utilisation de modèles robustes couplés à des stratégies de contrôle. Deux modèles ont été proposés pour décrire les productions des protéines et des spores par *Bacillus thuringiensis kurstaki* LIP. La calibration des modèles a permis de calculer les paramètres de la cinétique et a démontré un bon ajustement avec

l'ensemble des données expérimentales. Les résultats ont montré que l'optimisation basée sur une stratégie de contrôle du modèle (Model Control Strategy, MCS) permet de maximiser les productivités des protéines et des spores. Les simulations sont effectuées avec *Bacillus thuringiensis kurstaki* HD1, LIP et BLB1 dans différentes conditions expérimentales (milieu complexe) afin d'en prouver la robustesse. Une validation expérimentale de la loi de contrôle a été effectuée pour démontrer la précision des productivités de protéines et de spores.

## Perspectives

Grâce à la validation de l'efficacité des formulations obtenues par des tests en laboratoire et sur le terrain, le projet a ouvert la voie à une exploitation commerciale potentielle de ces nouveaux bio-pesticides. La montée en échelle, l'intégration d'une production industrielle et la formulation d'un produit rentable sont actuellement les défis les plus importants à relever. Les laboratoires MEDIS développent une unité de production (Nabeul, Tunisie) pour des formulations d'agents de contrôle biologique à base de *Btk* pour la protection des agrumes, sur la base des résultats et de l'expertise du consortium IPM-4-Citrus. Ils ciblent les marchés du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord (MOAN) à l'horizon 2023.



©Timo Larsson  
Champ de bulles au sein d'une  
colonne à bulles

# Vers une gestion raisonnée des procédés aérobies de traitement et de valorisation des eaux usées



## En savoir plus

Larsson T. *et al.*

Development and validation of a comprehensive 1-D model to simulate gas hold-up and gas-liquid transfer in deep air-water bubble columns

Chemical Engineering Science . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117210>

## Partenariat

- UR REVERSAAL
- UMR TBI
- SUEZ

## Contact

Yannick Fayolle

UR PROSE

[yannick.fayolle@inrae.fr](mailto:yannick.fayolle@inrae.fr)



## Contexte

La consommation énergétique des stations de traitement et de valorisation des eaux est fortement liée aux apports en oxygène nécessaires aux processus biologiques aérobies de traitement de la matière organique et de l'azote.

Aussi, l'optimisation énergétique de ces installations passe notamment par une meilleure gestion et connaissance des phénomènes de transfert de la phase gazeuse (généralement bulles d'air) vers la phase liquide. Cependant, les outils utilisés pour le dimensionnement des systèmes d'aération des ouvrages reposent pour la plupart sur l'empirisme et rendent ainsi leur exploitation difficile. Le développement de modèles simples, intégrant l'ensemble des phénomènes de transfert s'avère alors nécessaire.

## Résultats

En partenariat avec SUEZ et les unités REVERSAAL et TBI d'INRAE, des chercheurs de PROSE ont développé un modèle 1D simulant à la fois l'hydrodynamique et le transfert de matière en colonne à bulles.

Ce modèle intègre pour la première fois l'ensemble des effets liés à la hauteur d'eau (variation de pression hydrostatique, concentration en oxygène dans le gaz) et à la contamination des interfaces gaz-liquide. Il a été confronté à différentes

bases de données issues de travaux de la littérature sur les colonnes à bulles en eau claire afin d'étudier sa robustesse et sa pertinence aux différentes échelles.

L'intégration des effets de contamination des interfaces des bulles d'air permet de reproduire fidèlement les comportements hydrodynamiques et les mécanismes de transfert de d'oxygène observés expérimentalement.

De plus, les effets d'appauvrissement des bulles d'air s'avèrent particulièrement prononcés pour des hauteurs de liquide importantes et des débits de gaz réduits. Leur prise en compte est essentielle pour une modélisation pertinente des apports en oxygène.

## Perspectives

Les travaux de recherche se poursuivent pour disposer de bases de données. Elles seront issues d'expérimentations menées sur des fluides complexes représentatifs des matrices provenant des ouvrages des procédés de traitement et de valorisation des eaux usées.

La confrontation du modèle à ces bases de données permettra de renforcer sa robustesse et sa fiabilité afin de transférer, à terme, ces outils vers les opérateurs.





©Magali Nuixé- Vue de face d'un rhizotron contenant trois plants de *Dactylis glomerata* séparés du sol par la toile au moment de sa réalisation.

## Caractérisation *in-situ* de l'état hydrique des racines de plantes prairiales par un capteur RMN portable



### En savoir plus

Nuixé M. *et al.*

Circadian variation of root water status in three herbaceous species assessed by portable NMR

Plants . 2021

<https://doi.org/10.3390/plants10040782>

### Partenariat

- UR QuaPA
- UREP (département ECODIV)

### Contact

Magali Nuixé, Amidou Traoré et Catherine Picon-Cochard

UR QUAPA et UREP

[magali.nuixé@inrae.fr](mailto:magali.nuixé@inrae.fr)

[catherine.picon-cochard@inrae.fr](mailto:catherine.picon-cochard@inrae.fr)

[amidou.traore@inrae.fr](mailto:amidou.traore@inrae.fr)



### Contexte

Les racines sont au cœur de la dynamique de l'eau dans les plantes, mais l'étude de leur structure et de leur fonction nécessite des approches destructives ou indirectes.

La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) est une méthode non-invasive intéressante pour étudier l'état (quantité et mobilité) de l'eau dans les tissus biologiques, tels que les plantes.

La RMN bas champ rendue portable permettrait notamment de réaliser ces mesures *in situ* directement dans l'environnement naturel des plantes. Cependant, à notre connaissance aucune étude utilisant cette méthode n'a été menée sur les racines.

Notre objectif a donc été de démontrer la faisabilité de la RMN bas champ pour caractériser l'évolution de l'état hydrique des racines de plantes prairiales.

### Résultats

L'étude a été menée dans une chambre climatique sur trois espèces d'herbacées cultivées en rhizotron, boîte parallélépipédique fermée devant par une plaque transparente permettant d'observer le développement des racines et dans laquelle les racines et le sol sont séparés physiquement par une

toile. Des mesures écophysiologiques concomitantes ont été réalisées pour valider les mesures RMN. Les paramètres RMN mesurés sont le signal total des noyaux d'hydrogène, que l'on attribue à l'eau, provenant des racines et du sol et le temps de relaxation transversale ( $T_2$ ) mesuré dans les racines. Le  $T_2$  paramètre qui caractérise la mobilité locale de l'eau, est d'autant plus court que l'eau est liée aux tissus et/ou aux grosses molécules.

Pour la première fois une variation circadienne, selon un cycle jour/nuit, a été observée sur le signal RMN total et sur la valeur de la composante longue du  $T_2$ .

Ces résultats étaient cohérents avec l'évolution des paramètres écophysiologiques et notamment la variation des flux d'eau entre le jour et la nuit, mesurés au niveau des feuilles et du sol.

### Perspectives

Nous envisageons d'utiliser cet outil pour estimer les flux de sève dans les plantes ou encore pour caractériser l'état hydrique des racines selon différentes conditions environnementales (exemple d'un stress hydrique).



©Laurie Guilbert – Projet H2020  
GLOPACK

# Modélisation d'emballages biocomposites par intégration de données et de connaissances expertes



## En savoir plus

Münch M. *et al.*

A process reverse engineering approach using process and observation ontology and probabilistic relational models: Application to processing of bio-composites for food packaging

Research Conference on Metadata and Semantics Research . MTSR 2021

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-98876-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98876-0_1)

## Contacts

Patrice Buche, Hélène Angellier-Coussy et  
Mélanie Münch

UMR IATE et USC I2M

[patrice.buche@inrae.fr](mailto:patrice.buche@inrae.fr)

[helene.coussy@umontpellier.fr](mailto:helene.coussy@umontpellier.fr)

[melanie.munch@u-bordeaux.fr](mailto:melanie.munch@u-bordeaux.fr)



## Contexte

La quantité massive de plastiques utilisés chaque année entraîne une accumulation de déchets dans notre environnement. Face à l'épuisement des ressources fossiles et à l'augmentation des résidus organiques (e.g. agricoles, urbains, forestiers), le développement de nouvelles technologies pour la formulation de matériaux composites bio-sourcés et biodégradables permet d'apporter une solution de valorisation tout en produisant des substituts au plastique. Ainsi, un panel de matériaux biocomposites formés par la combinaison d'une matrice biopolymère (le PHBV) et de charges lignocellulosiques issues de différentes biomasses, sont développés pour diminuer le coût des matériaux et leur impact environnemental, tout en modulant leurs propriétés fonctionnelles. La conception «sur mesure» de matériaux biocomposites accroît le besoin de compréhension et de modélisation des relations entre la structure des matériaux et leur performance finale (e.g. perméabilité à la vapeur d'eau, caractéristiques thermiques et mécaniques).

## Résultats

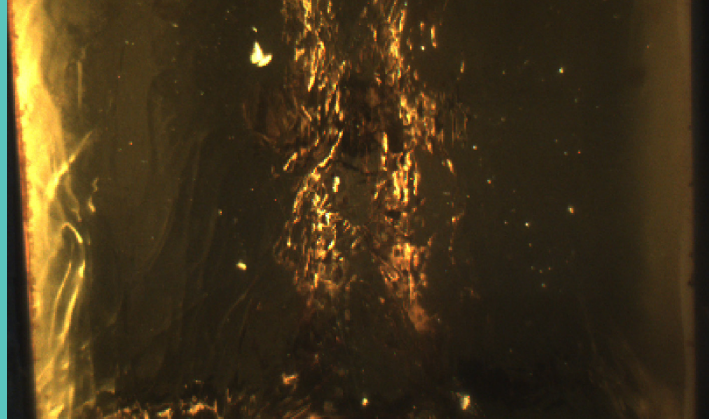
Nous avons conçu et réalisé un workflow numérique pour les procédés de transformation, POND (Process and observation ONtology Discovery), dédié au raisonnement en présence d'incertitude à partir de données expérimentales et de connaissances expertes. Ce workflow permet de faire des prédictions à partir d'un apprentissage sur une base de données.

POND repose sur deux modèles issus de l'intelligence artificielle: (1) PO<sup>2</sup> (Process and Observation Ontology) une ontologie dédiée à la représentation des procédés de transformation; et (2) les modèles relationnels probabilistes (PRMs). Leur combinaison dans POND permet un fonctionnement rétro-actif, où chaque modèle appris est soumis à l'expert qui peut affiner les connaissances intégrées ou en intégrer de nouvelles. Appliqué à un jeu de données constitué à partir de quatre projets différents, POND permet de formuler des biomasses optimales à partir des caractéristiques souhaitées pour le produit final. Ces résultats ont permis de découvrir une biomasse potentiellement intéressante et non testée dans les quatre projets (enveloppe de riz).

## Perspectives

L'approche POND sera étendue pour: i) vérifier la qualité des données existantes ou de futures entrées; ii) prendre en compte des indicateurs d'impacts environnementaux, économiques et sociétaux des procédés de transformations dans une démarche de conception durable.

L'approche POND sera valorisée dans le cadre de l'infrastructure nationale de recherche CALIS (Consommateur/Alimentation/Santé) regroupant des dispositifs collectifs labellisés de production et de traitement de données relatives aux comportements des consommateurs, à la construction de la qualité des aliments, et à la caractérisation de leurs propriétés nutritionnelles et de leurs impacts sur la santé chez l'Homme.



©Maxime Touffet

# La simulation des procédés alimentaires à toutes les échelles : cas de l'oxydation de l'huile en cours de friture



## En savoir plus

Touffet M. *et al.*

Coupling between oxidation kinetics and anisothermal oil flow during deep-fat frying

Physics of Fluids . 2021

<https://doi.org/10.1063/5.0055873>

## Valorisation

Des travaux similaires sont en cours avec le groupe Cargill (USA) sur la déconstruction des aliments avec la prise en compte des interactions aliment-mécanorécepteurs. Les calculs sont réalisés aujourd'hui dans le Cloud d'Amazon et au sein de l'Université Paris-Saclay.

## Partenariat

- Projet FUI Fryin'17 (Seb, Lesieur, Adventys, Ethern, Univ. Bourgogne)
- Groupe Cargill (cosignataire)

## Contact

Olivier Vitrac

UMR SAYFOOD

[olivier.vitrac@agroparistech.fr](mailto:olivier.vitrac@agroparistech.fr)



## Contexte

La friture est une technique de cuisson qui est utilisée de façon continue depuis la préhistoire. Malgré les innovations apportées, la friture domestique est toujours réalisée dans une cavité chauffée en position basse. Cette configuration crée une convection naturelle importante responsable de la dissolution de l'oxygène atmosphérique et provoque en cascade l'oxydation de l'huile. Cette chimie complexe culmine avec l'apparition de produits de scissions volatils odorants, la production de cires responsables de l'encrassement de l'équipement, et l'apparition de composés cycliques potentiellement toxiques. Pour la première fois, ces phénomènes couplés de transferts et réactions ont été simulés en trois dimensions (3D) à l'échelle des constituants dans une vraie friteuse à l'aide de supercalculateurs.

## Résultats

L'histoire du vieillissement de l'huile a été reconstituée. Contrairement à l'intuition, les composés volatils sont générés dans les régions les plus chaudes loin de la surface avant de se désorber au contact de l'air. Les polymères sont générés de manière plus homogène en anoxie avant de se condenser sur les parois froides. L'étude fine des structures turbulentes et des écoulements anisothermes met en évidence un effet de la distribution des éléments chauffants et de la forme

de la cuve. La simulation à « toutes » les échelles (de 100 nm à 0.3 m ; de 0.1  $\mu$ s à 10 h) requiert de nombreux développements mathématiques et une puissance de calcul considérable, aujourd'hui devenue disponible. Nous avons couplé une description Eulérienne de la turbulence très détaillée (Large Eddy Simulation) avec une description Lagrangienne des réactions chimiques. La composition fine (par acide gras) de l'huile est considérée via un modèle gros grain.

Les nouvelles simulations multiéchelle et multiphysique développées permettent d'explorer les opérations de transformation des aliments avec suffisamment de détails pour étudier virtuellement les mécanismes physiques et chimiques tout en permettant de réviser les éléments de design, de formulation (ici de l'huile) et de conduite en relation avec la salubrité des aliments et la maîtrise des déchets.

## Perspectives

Pour la transformation alimentaire, il s'agit d'un moment unique («Sputnik moment») qui ouvre un nouveau champ de recherche : l'étude directe par calcul en force brute de la transformation alimentaire. Cette étude met en valeur la création de notre jeune équipe "Modélisation et Ingénierie par le Calcul" dans l'UMR SayFood.



©Nicolas Auvinet, OPAALE - Unité de méthanisation agricole.

## Prédiction des flux de carbone et d'azote sur les filières de méthanisation



### En savoir plus

Bareha Y. *et al.*

A simple mass balance tool to predict carbon and nitrogen fluxes in anaerobic digestion systems

Waste Management . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.020>

### Valorisation

Sys-métha est déposé sur DataInrae sous Licence libre. Il vient également d'être intégré à la plateforme Maelia («Modélisation et évaluation intégrées des systèmes socio-agro-écologiques», portée par l'UMR LAE).

### Contact

Romain Girault

UR OPAALE

[romain.girault@inrae.fr](mailto:romain.girault@inrae.fr)



### Contexte

Les filières de méthanisation sont au cœur des transitions énergétiques et agro-écologiques. Ces filières entraînent des modifications des systèmes agricoles qui impactent les grands cycles biogéochimiques du carbone et des nutriments. Ces modifications génèrent des effets environnementaux qu'il est important d'évaluer précisément. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation de la filière de méthanisation pour produire les données d'entrée des modèles agronomiques (STICS pour le système de culture, Syst'N pour le lessivage de l'azote...).

### Résultats

Sys-Métha est un outil de simulation développé dans le cadre des projets MéthaPolSol et Proterr (Ademe). L'originalité du modèle Sys-Métha réside dans sa compatibilité avec les modèles agronomiques, ce qui permet de conduire des études à l'échelle de la filière dans son ensemble dans le cadre de nombreux applicatifs. Il intègre les étapes de digestion anaérobie, de séparation de phase et de stockage des digestats. En fonction des substrats méthanisés, de leurs flux, et des caractéristiques de l'unité de méthanisation, Sys-Métha prédit les flux de digestat produits

et leur caractéristiques, et les flux de carbone et d'azote associés. Couplé à des modèles agronomiques dans le cadre du programme MéthaPolSol, il a notamment permis d'analyser l'effet de différents scénarios de méthanisation sur les flux de carbone stockés dans les sols et de nitrates lessivés (qualité de l'eau).

### Perspectives

L'intégration des flux d'autres nutriments d'intérêt (P, K) est en cours. Développé au sein des équipes du département Transform, Sys-métha est utilisé dans le cadre de projets de recherche traitant des effets environnementaux de la méthanisation portés par des unités d'autres départements comme par exemple: l'évaluation de l'effet des cultures intermédiaires à vocation énergétique sur le stockage du carbone dans les sols (UMR ECOSYS), la comparaison de l'effet de la méthanisation *versus* le retour au sol direct des biomasses sur l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> (UMR ISPA), l'effet de scénarios de méthanisation sur le lessivage des nitrates (UMR SAS). Sys-Métha est donc à la fois un outil de collaboration entre Transform et les départements AgroEnv et AQUA, mais aussi un outil de transfert des connaissances développées par Transform sur ces filières vers ces départements.





©Éric Dumont IMT, Nantes -  
Biolaveur

# Modéliser le fonctionnement d'un biolaveur pour traiter l'ammoniac issu de l'air des bâtiments d'élevage



## En savoir plus

Dumont E. *et al.*

Biotrickling filters for the removal of gaseous ammonia emissions from livestock facilities. Theoretical prediction of removal efficiency and experimental validation

Chemical Engineering Journal . 2020

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126188>

## Valorisation

Travaux de thèse en cours, participation d'une PME nantaise (TC'Innov) dans le projet PROTEGE vers un transfert de technologie en cours de développement.

## Contact

Pascal Peu

UR OPAALE

[pascal.peu@inrae.fr](mailto:pascal.peu@inrae.fr)



## Contexte

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est un polluant gazeux produit par l'agriculture moderne. Il provient de l'uréolyse, c'est-à-dire, de la transformation des rejets d'urée des animaux par l'enzyme uréase et son transfert vers la phase gazeuse. Pour les élevages agricoles, depuis 2017, des Niveaux d'Émission Associés (NEA) aux Meilleures Techniques Disponibles (MTD) ont été mis en place afin de limiter l'émission de ce polluant. Les exploitants des installations existantes disposent de quatre ans après la publication des MTD pour adapter leurs élevages. Ces conclusions concernent 3 300 élevages en France dont plus de la moitié se trouve en Région Bretagne. Le traitement de l'air au sortir des bâtiments est aujourd'hui une nécessité voire une obligation. Le biolavage aérobique peut être une technologie intéressante, cependant son pilotage reste actuellement empirique.

## Résultats

L'efficacité d'élimination maximale d'un biolaveur biologique traitant les émissions d'ammoniac issues d'un bâtiment d'élevage est théoriquement prédite pour la première fois. Les travaux de modélisation et la validation expérimentale mettent en exergue que le traitement de l'ammoniac avec

des biolaveurs aérobiques peut être un bon choix, uniquement si la qualité de l'eau en termes de pH et de force ionique reste contrôlée. D'une part, le pH doit être proche de la neutralité pour favoriser à la fois le transfert d'ammoniac et le processus biologique de nitrification et d'autre part, la conductivité du liquide de lavage doit être contrôlée par une vidange et un remplacement régulier de l'eau. La prédiction de l'efficacité d'élimination maximale peut être obtenue en mesurant simplement les propriétés du liquide de lavage, en ligne ou à partir d'échantillons, et peuvent être utilisées comme outil de diagnostic pour identifier une éventuelle défaillance du système.

## Perspectives

L'association d'un biolaveur aérobique de traitement de l'ammoniac avec un biolaveur anaérobique de traitement de l'hydrogène sulfuré contenu dans le biogaz généré par la digestion anaérobique d'effluents d'élevage pourrait permettre l'élimination de deux polluants majeurs ( $\text{H}_2\text{S}$  et  $\text{NH}_3$ ) sans avoir recours à des intrants externes à la ferme. Des travaux de couplage sont en cours réalisation.



©Nicolas Bertrand INRAE

# Une solution basée sur l'ontologie FoodOn pour intégrer des données de composition nutritionnelles



## En savoir plus

Buche P. et al.

How to manage incompleteness of nutritional food sources? : A solution using FoodOn as pivot ontology

International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems . 2021

<http://doi.org/10.4018/IJAEIS.20211001.0a4>

## Contacts

Patrice Buche, Julien Cufi, Alrick Oudot

UMR IATE

Liliana Ibanescu, Stephane Dervaux

UMR MIA

Magalie Weber

UR BIA

[patrice.buche@inrae.fr](mailto:patrice.buche@inrae.fr)

[julien.cufi@inrae.fr](mailto:julien.cufi@inrae.fr)

[alrick.oudot@gmail.com](mailto:alrick.oudot@gmail.com)

[liliana.ibanescu@agroparistech.fr](mailto:liliana.ibanescu@agroparistech.fr)

[stephane.dervaux@inrae.fr](mailto:stephane.dervaux@inrae.fr)

[magalie.weber@inrae.fr](mailto:magalie.weber@inrae.fr)



## Contexte

Afin d'évaluer la qualité nutritionnelle d'un produit alimentaire, la première étape consiste à obtenir les valeurs des constituants nutritionnels. Les bases de données sur la composition des aliments (BDCA) gérées par pays fournissent ce type de valeurs. Malheureusement, les valeurs de certains constituants d'intérêt peuvent faire défaut dans la BDCA du pays dans lequel la qualité nutritionnelle est évaluée. Trouver des valeurs des constituants d'intérêt pour des aliments similaires dans d'autres BDCA est un moyen de traiter l'incomplétude. Un problème supplémentaire se pose car le vocabulaire utilisé pour désigner un aliment dans une BDCA est généralement différent de celui utilisé dans d'autres. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à LanguaL et FoodOn. LanguaL est un thésaurus multilingue, utilisé dans les principales bases de données nationales sur la composition des aliments pour définir un aliment par un ensemble de termes contrôlés. FoodOn est une ontologie qui vise à être le vocabulaire ouvert de référence pour la science alimentaire. Une originalité de ce travail est de réutiliser ces ressources afin de proposer un accès unifié aux BDCA nationales.

## Résultats

Une nouvelle méthode a été développée pour retrouver automatiquement des aliments

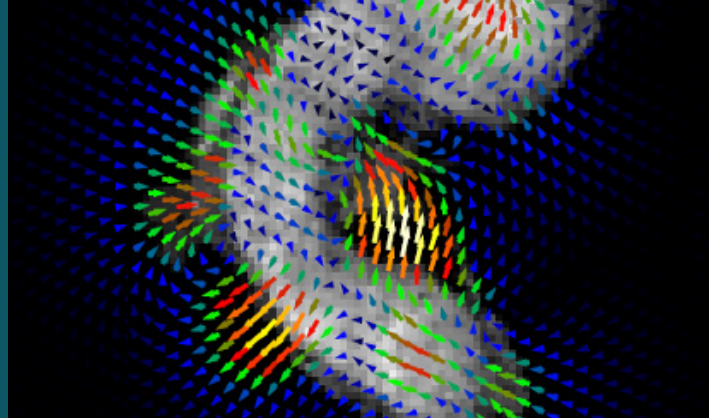
similaires référencés dans des BDCA différentes. La méthode calcule un degré de similarité entre aliments en utilisant à la fois l'ontologie FoodOn, la description en facettes LanguaL et le nom en anglais des aliments comparés. Cette approche a été mise en œuvre dans une application Web appelée MultiDB explorer qui intègre plusieurs BDCA. MultiDB explorer a permis de pallier le manque de valeurs dans la table de composition nutritionnelle des aliments (CiquaL) pour 3 constituants d'intérêt (Fer, Vit. C, Vit. B12) dans 76 aliments. Ainsi, 91 % des valeurs manquantes ont pu être déterminées et 96 % des valeurs connues ont pu être enrichies par des valeurs issues de USDA (US Department of Agriculture).

## Perspectives

Deux extensions de la méthode sont envisagées : (1) utiliser le référentiel européen FOODEX2 au lieu de LanguaL et (2) tirer parti des validations d'alignements réalisés par les experts dans un processus d'apprentissage itératif.

Ces travaux seront valorisés dans le cadre de l'infrastructure nationale de recherche Consommateur/Alimentation/Santé (CALIS) regroupant des dispositifs collectifs labellisés de production, de traitement et gestion de données relatives à la construction de la qualité des aliments, et à la caractérisation de leurs propriétés nutritionnelles et de leurs impacts sur la santé chez l'Homme.





©Florent Grélard - Illustration des déformations appliquées à une coupe de grain observée en MALDI pour la superposer à son homologue observé en IRM. La couleur des flèches traduit l'intensité du déplacement (faible en bleu, modérée en vert, importante en jaune et rouge).

# Le couplage de plusieurs méthodes d'imagerie améliore la caractérisation des produits agronomiques



## En savoir plus

Grélard F. *et al.*

Esmraldi: efficient methods for the fusion of mass spectrometry and magnetic resonance images

BMC Bioinformatics . 2021

<https://doi.org/10.1186/s12859-020-03954-z>

## Valorisation

L'ensemble des méthodes développées est distribué sous la forme d'une bibliothèque pour le langage Python, rendue accessible sur la plateforme de développement GitHub, et a été intégrée dans une « compute capsule » pour faciliter la reproductibilité de l'analyse.

## Contacts

David Legland, Loïc Foucat, Hélène Rogniaux, Mathieu Fanuel

UR BIA

[david.legland@inrae.fr](mailto:david.legland@inrae.fr)

[loic.foucat@inrae.fr](mailto:loic.foucat@inrae.fr)

[helene.rogniaux@inrae.fr](mailto:helene.rogniaux@inrae.fr)

[mathieu.fanuel@inrae.fr](mailto:mathieu.fanuel@inrae.fr)



## Contexte

L'eau et les polysaccharides des parois sont deux composantes qui impactent fortement les propriétés technologiques ou d'usage des produits agronomiques, notamment du grain. Différentes modalités d'imagerie sont à même de caractériser ces deux composantes : l'imagerie par spectrométrie de masse (MSI) peut cartographier la composition chimique des échantillons sans *a priori* sur les molécules à analyser, et l'imagerie par résonance magnétique (IRM), modalité non destructive, permet d'accéder à l'anatomie des organes et à l'état d'hydratation (teneur / mobilité). Obtenir une vision complète de l'échantillon nécessite de pouvoir comparer et fusionner les informations obtenues par ces deux modalités. Les difficultés concernent la différence de résolution des images, et les déformations induites par la MSI lors de la préparation des échantillons.

## Résultats

Nous avons développé une chaîne complète de traitement d'images pour fusionner les informations obtenues par les deux modalités d'imagerie. Elle comprend les étapes de pré-traitement spécifiques à chaque modalité, de recalage des images pour mettre en correspondance spatiale les informations, et de réduction de dimension pour simplifier les données. La superposition des informations spatialisées permet de mettre en correspondance la composition

chimique et la mobilité de l'eau et donc connaître, sans *a priori*, les molécules dont la localisation corrèle le mieux avec celle de l'eau.

Appliquée à des grains de blé à différents stades de développement, la méthode permet de relier la nature de l'hydratation à celle du degré de substitution et d'acétylation des polysaccharides non cellulotiques présents dans les parois du grain. En particulier, la co-colocalisation des xylanes les plus substitués et/ou fortement acétylés dans les régions les plus hydratées suggère une plus grande porosité des parois liée à la modification des xylanes. Ces deux éléments structuraux ont été décrits comme ayant un impact sur l'organisation des parois et les interactions des polysaccharides dans les parois. Cependant, il s'agit à notre connaissance de la première mise en évidence claire de cette corrélation à l'échelle de la plante.

## Perspectives

Après avoir validé la démarche sur des coupes 2D, nous étudions actuellement les variations conjointes de composition et de teneur / mobilité de l'eau à l'échelle de la graine en 3D, pour différents stades de développement. Nous explorons également les méthodes d'analyse de données multi-blocs afin de tirer parti de la multiplicité des informations.



©Plate-forme BIBS<sup>+</sup> - Le spectromètre  
SELECT SERIES Cyclic IMS

# Classification d'oligosaccharides au moyen de réseaux moléculaires basés sur la mobilité ionique



## En savoir plus

Ollivier S. *et al.*

Molecular networking of high-resolution tandem ion mobility spectra: A structurally relevant way of organizing data in glycomics?

Analytical Chemistry . 2021

<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c01244>

## Contacts

David Ropartz, Simon Ollivier, Hélène Rogniaux

UR BIA

[david.ropartz@inrae.fr](mailto:david.ropartz@inrae.fr)

[simon.ollivier@inrae.fr](mailto:simon.ollivier@inrae.fr)

[helene.rogniaux@inrae.fr](mailto:helene.rogniaux@inrae.fr)



## Contexte

Les glucides sont l'une des classes chimiques les plus importantes du Vivant. Ils trouvent également des applications dans des domaines variés, comme les bioénergies ou les industries alimentaire, pharmaceutique ou cosmétique. Des variations chimiques mineures peuvent cependant avoir un impact majeur sur leurs propriétés. Or il n'existe actuellement pas d'approche satisfaisante pour caractériser finement les polysaccharides, particulièrement dans des extraits complexes.

*A contrario*, la spectrométrie de masse (MS) s'est imposée comme un outil puissant pour l'analyse structurale d'autres types de biopolymères, notamment les protéines. Les méthodes ne sont cependant pas directement transposables aux glucides : ceux-ci comprennent en effet de nombreux éléments structuraux n'impactant pas leur masse (isoméries). La MS – détectant uniquement la masse – est donc par nature aveugle à ces isoméries. Aujourd'hui, des avancées technologiques permettent d'envisager la levée de ce verrou analytique. En particulier, le couplage de la mobilité ionique avec la MS (IM-MS), sépare les molécules selon leurs conformations 3D.

## Résultats

Nous avons développé une méthode exploitant les dernières avancées en IM-MS pour identifier des groupes structuraux d'oligosaccharides. Cette méthode s'inspire d'une stratégie

utilisée en métabolomique, appelée *réseau moléculaire*. Classiquement, la stratégie utilise des spectres MS/MS : la molécule d'intérêt est isolée selon sa masse, puis cassée pour générer un spectre de masse de fragments – assimilable à une signature structurale de la molécule. Une comparaison bioinformatique permet de relier les spectres similaires (et donc, les structures apparentées) dans le réseau. Malheureusement, cette approche est peu informative pour les oligosaccharides à cause des situations d'isomérisation susmentionnées.

Notre démarche permet de construire des réseaux moléculaires au sein desquels la masse des fragments est remplacée par leur mobilité ionique. Nous avons éprouvé cette approche sur plusieurs dizaines d'oligosaccharides, représentatifs des glucides retrouvés chez les plantes. Le réseau construit s'est avéré supérieur pour regrouper les oligosaccharides selon des caractéristiques structurales informatives, principalement liées à leur chaîne principale.

## Perspectives

Cette nouvelle méthode devrait simplifier l'analyse des glucides en milieu biologique, en groupant les espèces similaires et en décomplexifiant les données. De futurs travaux consisteront à améliorer l'approche en tirant parti au maximum des deux dimensions disponibles dans les données, à savoir la masse et la mobilité des fragments.



©INRAE FRISE

# Comment l'apprentissage automatique peut aider à détecter et évaluer l'impact des ruptures dans la chaîne du froid ?



## En savoir plus

Loisel J. *et al.*

Cold chain break detection and analysis: Can machine learning help?

Trends in Food Science & Technology . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.052>

## Partenariat

- UMR MIA (dpt NUM)
- Biotraq (TPE numérique)

## Contacts

Onrawee Laguerre et Steven Duret

UR FRISE

[onrawee.laguerre@inrae.fr](mailto:onrawee.laguerre@inrae.fr)

[steven.duret@inrae.fr](mailto:steven.duret@inrae.fr)



## Contexte

La température dans la chaîne du froid doit être maîtrisée dans chaque maillon afin d'assurer la qualité des produits alimentaires. Cependant, les études de terrain réalisées par FRISE avec des capteurs de température placés dans des produits ont montré des ruptures de température. Ces ruptures, même de courte durée, peuvent impacter la qualité des produits alimentaires. Elles peuvent se produire lorsque les produits restent sur un quai de chargement d'un magasin ou lors d'un dysfonctionnement d'une installation frigorifique. Le développement d'outils basés sur l'apprentissage automatique permettant de détecter et d'évaluer en temps réel les conditions dans lesquelles ces ruptures se produisent (température, durée...) et leur impact sur la qualité représente ainsi un enjeu important pour réduire les pertes et le gaspillage.

## Résultats

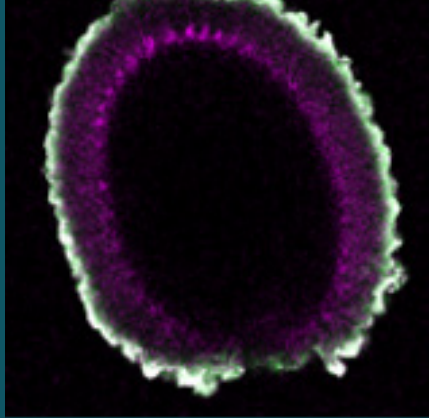
Ce travail a mis en évidence la variété des sources de données de températures disponibles dans le domaine de la chaîne du froid et nécessaires pour l'apprentissage automatique. En effet, il est possible d'utiliser des données expérimentales (terrain, laboratoire) mais aussi des données synthétiques générées à partir de modèles thermiques basés

sur les lois physiques. Des méthodes d'apprentissage automatique ont été utilisées pour prédire la température, mais ne sont pas utilisées pour détecter les ruptures de la chaîne du froid. Des méthodes de détection d'anomalies dans les séries temporelles sont déjà appliquées dans d'autres domaines. L'utilisation de ces méthodes appliquées à la chaîne du froid serait un pas en avant d'une part, pour mieux connaître les caractéristiques de ces ruptures, et d'autre part pour alerter les opérateurs au bon moment et ainsi réduire les pertes et le gaspillage.

## Perspectives

L'impact des différentes sources de données de température utilisées pour l'apprentissage (expérimentales ou synthétiques) sur les performances des modèles d'apprentissage sera étudié. En effet, les données expérimentales sont plus précises mais coûteuses à générer. Les données synthétiques sont quant à elles très rapides à générer mais possèdent une incertitude issue des hypothèses des modèles thermiques utilisés. L'objectif est d'évaluer et comparer les performances de modèles d'apprentissage entraînés soit à partir des données synthétiques soit à partir des données expérimentales. Enfin, une étude de cas d'utilisation des méthodes de détection d'anomalies appliquée à la chaîne du froid sera réalisée.





©Adeline Berger - Coupe optique confocale à travers une graine d'*Arabidopsis* montrant son halo de mucilage composé de rhamnogalacturonane (immunomarquage vert) et de cellulose (coloration au Direct Red 23 magenta)

# Propriétés et diversité du mucilage séminal des graines d'*Arabidopsis thaliana*



## En savoir plus

Cambert M. *et al.*

Datasets of seed mucilage traits for *Arabidopsis thaliana* natural accessions with atypical outer mucilage

Scientific Data . 2021

<https://doi.org/10.1038/s41597-021-00857-3>

## Valorisation

- dataset 1. Portail Data INRAE <https://doi.org/10.15454/1MZ1ZC> (2021).
- dataset 2. Portail Data INRAE <https://doi.org/10.15454/EYABB2> (2021).
- dataset 3. Portail Data INRAE <https://doi.org/10.15454/LBUN4X> (2021).

## Contacts

Corinne Rondeau-Mouro, Helen North et Marie-Christine Ralet

UR OPAAL, UMR IJPB, UR BIA

[corinne.rondeau@inrae.fr](mailto:corinne.rondeau@inrae.fr)

[helen.north@inrae.fr](mailto:helen.north@inrae.fr)

[marie.ralet@inrae.fr](mailto:marie.ralet@inrae.fr)



## Contexte

Les modèles prédictifs des effets du changement climatique sur les écosystèmes exigent des données sur la façon dont les caractères adaptatifs des plantes sont affectés. Pour accélérer la diffusion des connaissances et faciliter l'innovation dans ce domaine, la science ouverte constitue un outil stratégique. C'est dans cet objectif que 187490 données acquises sur 20 variants naturels de la plante modèle *Arabidopsis thaliana* ont été mises à disposition de la communauté scientifique et décrites dans un data paper résumant 4 années de travail dans le cadre du projet ANR CEMMU. Ce dernier avait pour objectif d'étudier l'effet des changements de température sur un caractère adaptatif des graines, la production de mucilage, (hydrogel de polysaccharides) qui se forme lors de l'imbibition dans l'eau des graines. Diverses hypothèses ont été proposées pour expliquer l'avantage adaptatif de la production de mucilage, notamment son rôle dans le maintien de la viabilité des semences. Chez *Arabidopsis*, le mucilage est formé de deux couches structurellement distinctes, une couche externe extractible par l'eau et une couche interne adhérente à la graine. Ces différences de structuration suggèrent que les deux couches remplissent des fonctions différentes dans la physiologie des graines.

## Résultats

Le projet CEMMU a utilisé

une approche transdisciplinaire pour générer 3 bases de données descriptives de la quantité, la composition, la structure du mucilage interne ainsi que des cinétiques d'hydratation de 20 variants naturels d'*Arabidopsis* provenant de divers lieux géographiques d'Europe et d'Asie centrale. Ces variants ont été choisis sur la base de caractéristiques macromoléculaires du mucilage externe atypiques. Les données, qui couvrent 33 traits mesurés sur 4 réplicats biologiques ont été décrites dans un data paper et sont désormais mises à disposition de la communauté scientifique sur le portail Data INRAE. Elles proviennent d'analyses histologiques, biochimiques et de relaxométrie par RMN. De par leur partage et leur réutilisation, elles doivent permettre d'explorer différentes pistes d'explication du rôle adaptatif du mucilage des graines et de l'impact de cette variabilité sur leur capacité à s'adapter à leur environnement naturel.

## Perspectives

Une première exploitation des données mises à disposition (RMN & chimométrie) a permis d'émettre de premières hypothèses sur l'impact de la variabilité naturelle du mucilage interne sur les vitesses d'hydratation des tissus internes des graines. Une analyse statistique des relations potentielles entre les différentes caractéristiques mesurées est en cours pour confirmer nos hypothèses.

## ✓ Intégrer les connaissances et établir des procédés durables



Pour accompagner les transitions climatiques et alimentaires, les chercheurs optimisent les procédés de production et de transformation pour qu'ils soient sobres, efficaces, flexibles et robustes. Savoir exploiter les biocatalyseurs naturels que sont les enzymes est un atout incontestable pour développer des procédés durables.

**Page 22:** Développer des procédés optimisés et durables

**Page 28:** La biocatalyse pour la transformation des ressources en produits



©Éric Beaumont, INRAE  
Évaporateur pilote de la plateforme  
Lait de l'UMR STLO, Rennes

# Un cadre méthodologique pour l'écoconception de procédés de produits alimentaires



## En savoir plus

Azzaro-Pantel C. *et al.*

Development of an eco-design framework for food manufacturing including process flowsheeting and multiple-criteria decision-making: application to milk evaporation

Food and bioproducts processing 2021

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.10.003>

## Partenariat

• Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse

## Contact

Geneviève Gesan-Guiziou

UMR STLO

[genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr](mailto:genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr)



## Contexte

L'industrie agroalimentaire doit intégrer aujourd'hui la dimension environnementale dans la conception de ses procédés. Des approches systémiques d'écoconception, développées pour les procédés chimiques et pétrochimiques, combinent modélisation et optimisation multiobjectif, ce qui permet d'obtenir des solutions de compromis où plusieurs critères sont considérés simultanément. L'application de ces approches aux procédés agroalimentaires est freinée d'une part par un manque de connaissances des impacts du procédé sur les caractéristiques du produit alimentaire (et vice-versa) et d'autre part par le manque de modélisation des procédés. En collaboration avec le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse, nous avons développé un cadre méthodologique pour l'écoconception multiobjectif de procédés alimentaires.

## Résultats

Le cadre combine la description des procédés (à l'aide d'un outil de simulation commercial) et l'optimisation multiobjectif avec des outils d'analyse du cycle de vie et d'évaluation des coûts, le tout intégré dans un outil d'aide à la décision multicritères. Le cadre développé est illustré par l'exemple de l'évaporation du lait, un des procédés les plus énergivores de l'industrie laitière, qui présente un énorme potentiel d'optimisation.

Le simulateur de procédé a d'abord

été adapté à la modélisation des évaporateurs de lait écrémé. Les critères économiques et environnementaux ont ensuite été calculés à partir des inventaires des phases de production et de nettoyage, puis nous avons appliqué l'optimisation multiobjectif (avec un algorithme génétique) et la prise de décision multicritère, indépendamment ou en combinaison.

L'ingénierie consistant à assembler plusieurs outils pour traiter un problème complexe est en soi un résultat de ce travail. Le potentiel du cadre a été démontré d'abord par l'analyse de trois solutions de conception d'évaporateurs, et ensuite comme support pour le choix stratégique d'un combustible dans le but de produire de l'énergie sur place. Différents combustibles (fioul, gaz, plaquettes de bois) ont été comparés et, sur la base des objectifs potentiellement contradictoires, des choix ont été effectués de manière rationnelle à l'aide des outils et méthodes mis en œuvre dans le cadre méthodologique.

## Perspectives

Ces travaux ouvrent la voie au développement des approches d'écoconception des procédés agroalimentaires et à la construction d'une plateforme numérique pour répondre à de telles demandes. Les pistes de poursuite sont nombreuses : intégrer les opérations amont et aval pour définir le procédé de séchage dans sa globalité, intégrer le traitement des rejets et déchets, prendre en compte des critères de qualités des produits obtenus, etc.





© Eric Beaumont INRAE Rennes  
Membrane céramique de microfiltration pour la séparation des protéines du lait, protéines du lactosérum à gauche et micelles de caséines à droite.

# Intégration de connaissances expertes dans l'optimisation multiobjectif des procédés



## En savoir plus

Belna M. et al.

Formulating multiobjective optimization of 0.1  $\mu\text{m}$  microfiltration of skim milk

Food and bioproducts processing . 2020

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.002>

## Partenariat

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet OPTIMAL (2017-2020), soutenu par une subvention de la Région Bretagne (contrat n° 16006734, convention de financement INRAE 30001292) et du Fonds Européen de Développement Régional (contrat FEDER n° EU000171, convention de financement INRAE 30001293).

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre:

- Boccard
- USC I2M
- UMR STLO

## Contact

Geneviève Gesan-Guiziou

UMR STLO

[genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr](mailto:genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr)



## Contexte

L'optimisation des procédés alimentaires est une tâche complexe rendue difficile par i) les lacunes sur les connaissances des mécanismes limitant les performances des procédés ; ii) les nombreuses variables hétérogènes impliquées dans les modèles de prédiction et iii) la complexité inhérente aux produits alimentaires eux-mêmes. La microfiltration du lait écrémé (MF), qui utilise une membrane avec des pores de 0,1  $\mu\text{m}$  de diamètre, en est un exemple typique. La MF est couramment utilisée comme opération unitaire pour séparer les deux principaux groupes de protéines du lait en fractions utiles pour la fabrication du fromage et les formulations alimentaires. Pourtant, malgré son importance pour l'industrie laitière, ce procédé n'a jamais été optimisé sur la base des objectifs contradictoires des parties prenantes que sont la maximisation de la qualité des produits de sortie (rétentat et perméat) tout en minimisant les coûts d'entrée et en tenant compte des impacts environnementaux.

## Résultats

Pour pallier ces difficultés, l'approche originale de ce travail a été de coupler l'optimisation multiobjectif à l'intégration des connaissances. Les connaissances scientifiques et expertes ont été recueillies, rassemblées et structurées pour modéliser le problème multiobjectif de l'optimisation de microfiltration du lait écrémé.

L'optimisation de la microfiltration a considéré 5 objectifs contradictoires définis par les parties prenantes et a intégré, dans la formulation du problème multiobjectif, les connaissances des experts et des scientifiques relatives à la qualité des produits de sortie, aux rôles des variables opératoires, à la conception du procédé et aux coûts. Les relations d'influence entre les variables du procédé et les 5 objectifs contradictoires ont été définies, les fonctions mathématiques représentatives des objectifs ont été définies, et le système a été optimisé en utilisant une métaheuristique.

Plus d'un millier de solutions Pareto-optimales a été trouvé, y compris des solutions similaires aux pratiques industrielles actuelles mais aussi des solutions nouvelles et innovantes.

## Perspectives

Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour l'optimisation de la microfiltration et, plus généralement, des procédés alimentaires pour lesquels les manques de connaissances scientifiques et de données sont un frein à la modélisation des mécanismes impliqués. L'approche pourra s'étendre pour mieux prendre en compte les règles de dimensionnement, les impacts environnementaux (basés sur les résultats d'Analyses de Cycles de Vie) ou encore intégrer les opérations amont et aval de l'opération étudiée.



©Christelle Labruyère - pilote de méthanation biologique au sein de l'équipe SYMBIOSE de TBI

# Modélisation du couplage entre l'hydrodynamique, le transfert d'hydrogène et la bioréaction au sein d'une colonne de méthanation biologique



## En savoir plus

Rafrafi Y. *et al.*

Biological methanation of  $H_2$  and  $CO_2$  with mixed cultures: current advances, hurdles and challenges

Waste and Biomass Valorization . 2021

<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01283-z>

## Valorisation

Brevet METHABIO FR1903721

## Contacts

Claire Dumas et Arnaud Cockx

UMR TBI

[claire.dumas@inrae.fr](mailto:claire.dumas@inrae.fr)

[arnaud.cockx@insa-toulouse.fr](mailto:arnaud.cockx@insa-toulouse.fr)



## Contexte

Parmi les différentes méthodes de diminution des émissions de  $CO_2$ , la captation directe par des micro-organismes est une voie prometteuse. De nombreuses espèces de micro-organismes (bactéries, *archaea*) ont des capacités à se développer en transformant le dioxyde de carbone en molécules organiques nécessaires pour leur croissance ou pour leurs besoins énergétiques. Ces métabolismes microbiens ont permis la fixation du  $CO_2$  dans les premières périodes de la vie, et pourraient bien être réutilisés dans ce que l'on appelle aujourd'hui l'anthropocène.

L'un des premiers défis que les micro-organismes autotrophes peuvent nous aider à relever est le remplacement du méthane fossile (le gaz dit « naturel ») par un gaz produit à partir de ressources renouvelables. La méthanation du  $CO_2$  est donc une réaction prometteuse qui fait l'objet de diverses recherches.

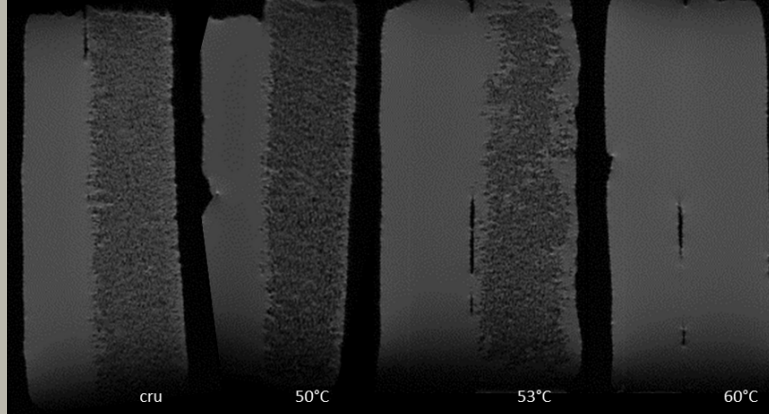
## Résultats

L'équipe SYMBIOSE travaille sur la réduction biologique du  $CO_2$  en  $CH_4$  grâce à l'apport d'hydrogène renouvelable. Un réacteur de méthanation *ex-situ* (une colonne à bulles de 20 L) a été développé et a permis de montrer que le biogaz pouvait être enrichi jusqu'à une teneur en  $CH_4$  de 97 %. Le développement d'un réacteur biologique innovant a permis de lever certaines limitations et

d'atteindre à la fois des pourcentages de  $CH_4$  élevés et des productivités intéressantes. Ce développement a fait l'objet d'un brevet commun INSA-ENOSIS. L'équipe SYMBIOSE et l'équipe TIM de TBI ont décrit à l'échelle microscopique les phénomènes de transfert gaz-liquide et liquide-phase biologique avec des outils de simulation multiphysique et formalisé les résultats sous forme d'efficacité comme en catalyse hétérogène. Un modèle réduit basé sur le flux décrivant les bioréactions spécifiques à la méthanation a été développé. La confrontation avec des données expérimentales a permis de valider le modèle et de calibrer les paramètres de la modélisation multi-échelle développée. Cet aller-retour entre échelles et modèle/expérience a permis d'utiliser ces modèles biologiques avec transferts multi espèces pour des applications de plus grandes échelles, par exemple pour optimiser le design de bioréacteur et la prédiction de performance de bioréacteur industriel.

## Perspectives

Ces avancées sont cruciales notamment dans le cadre du développement de la chaire INSA GRDF et de la plateforme SOLIDIA qui devrait accueillir des projets de développement de pilotes industriels de méthanation biologique et catalytique. Des contacts sont en cours avec des industriels sur la modélisation du changement d'échelle afin d'envisager de pouvoir développer des pilotes à l'échelle semi industrielle.



©Sylvie Clerjon - Images IRM haute résolution (0.1x0.1x0.5 mm<sup>3</sup>) de parenchyme de pomme golden crue, et cuite 10 minutes à 50 et 53°C et 14 minutes à 60°C

# Mieux comprendre les modifications structurales de la pomme pendant la cuisson



## En savoir plus

Leca A. *et al.*

Multiscale NMR analysis of the degradation of apple structure due to thermal treatment

Journal of Food Engineering . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110413>

## Partenariat

• UR QuaPA

## Contact

Alexandre Leca

UMR SQPOV

[alexandre.leca@inrae.fr](mailto:alexandre.leca@inrae.fr)



## Contexte

Le traitement thermique des fruits altère la texture perçue par le consommateur et la bio accessibilité des micronutriments. La pomme est le fruit le plus transformé au monde. Cette transformation est principalement une transformation thermique qui implique trois enjeux majeurs : (i) des modifications de texture perçues par le consommateur, (ii) des modifications de la bioaccessibilité des nutriments et (iii) une consommation importante d'énergie. Pour maîtriser les qualités organoleptiques et nutritionnelles finales de ce fruit et pour contenir la consommation énergétique associée à ce procédé, il est important de connaître précisément les mécanismes mis en jeu dans son parenchyme pendant sa cuisson.

La texturométrie, technique de référence pour déterminer les propriétés mécaniques des tissus du fruit en fonction du traitement thermique, nous informe à l'échelle tissulaire. La RMN est reconnue pour ses capacités à sonder les interactions entre l'eau et les macromolécules présentes dans les tissus. Ces interactions nous renseignent indirectement sur l'état de la structure à l'échelle cellulaire.

## Résultats

Les deux méthodes convergent vers la température pivot de 53 °C à laquelle le parenchyme de la pomme

perd sa structuration cellulaire et passe d'un état "cru" à un état "cuit". Ainsi, le mécanisme de perte de texture s'illustre simultanément à deux échelles : à celle du tissu, la fermeté du parenchyme décroît fortement à partir de 53 °C. A l'échelle moléculaire, la spectroscopie RMN montre une unification du signal T2 illustrant une homogénéisation des interactions entre les molécules d'eau vacuolaire et les macromolécules de la structure qui est expliquée par la dégradation thermique des membranes. Ceci est confirmé par l'imagerie RMN avec le remplissage des pores par du fluide vacuolaire dès 53 °C.

## Perspectives

L'objectif est d'utiliser ces données pour construire des modèles déterministes du procédé de transformation de la pomme et pour optimiser son traitement thermique afin de contrôler la texture du produit fini.

Pour atteindre plus de précision dans l'évolution structurale, un suivi longitudinal, avec cuisson dans le spectromètre RMN est prévu. Un même échantillon sera cuit et analysé par RMN tout au long du procédé.



Dircom Cnam ©Sandrine Villain  
- Détermination du coefficient  
de transfert d'oxygène dans un  
bioréacteur

# Nouvelle méthode économique et peu polluante de fabrication d'hydroperoxydes purs



## En savoir plus

Crouvisier Urien K. *et al.*

Optimization of pure linoleic acid 13-HPX production by enzymatic reaction pathway: Unravelling oxygen transfer role

Chemical Engineering Journal . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132978>

## Contacts

Wafa Guiga, Rebeca Garcia, Laure Bertrand et Kevin Crouvisier Urien

UMR SAYFOOD

[wafa.guiga@lecnam.net](mailto:wafa.guiga@lecnam.net)

[rebeca.garcia@lecnam.net](mailto:rebeca.garcia@lecnam.net)

[laure.bertrand@lecnam.net](mailto:laure.bertrand@lecnam.net)

[kevin.crouvisier-urien@lecnam.net](mailto:kevin.crouvisier-urien@lecnam.net)



## Contexte

Les hydroperoxydes d'acides gras polyinsaturés sont les premiers produits de la cascade de réactions de dégradation oxydative de ces acides gras. Ils sont donc fréquemment utilisés dans les études visant à comprendre les mécanismes et les cinétiques d'oxydation des lipides en général et dans les études sur la cyto-toxicité des produits d'oxydation des lipides. Leur production par synthèse chimique (procédé industriel actuel) ne permet pas d'obtenir des isomères purs et nécessite des étapes de purification ultérieures coûteuses. La production par voie enzymatique ne présente pas ces inconvénients du fait de la spécificité de l'enzyme. Elle nécessite cependant la maîtrise du transfert de l'oxygène, substrat indispensable à la réaction d'oxydation, de la phase gazeuse vers la phase liquide pendant toute l'étape de catalyse.

## Résultats

L'utilisation de la lipoxigénase-1 de soja permet d'orienter la réaction vers la production d'un isomère pur, le 13-hydroperoxyde d'acide linoléique (13-HPX). Une condition souvent négligée est celle de garantir un transfert d'oxygène gaz-liquide qui soit suffisant pour éviter que la réaction ne s'oriente vers une voie anaérobie aboutissant à la formation de produits secondaires. La prise en compte du transfert d'oxygène a donc permis d'ajuster la cinétique réactionnelle et la cinétique

de transfert entre elles et d'assurer ainsi un rendement de conversion de l'acide linoléique en 13-HPX, proche de 100%. En comparaison avec les isomères disponibles dans le commerce, ce procédé permet d'obtenir un produit de plus grande pureté, et donc plus stable au cours du stockage. De plus, la prise en compte du transfert d'oxygène permet de corriger les cinétiques réactionnelles et d'avoir ainsi une estimation plus précise des constantes cinétiques de l'enzyme.

L'obtention de cet hydroperoxyde pur a d'ores et déjà une retombée importante: il n'est plus nécessaire de se procurer dans le commerce les hydroperoxydes qui sont soit insuffisamment purs soit au coût très élevé, permettant ainsi d'alimenter aisément les études menées sur l'oxydation des lipides.

## Perspectives

Le transfert d'oxygène peut encore être augmenté par la conception de réacteurs microstructurés où l'aire interfaciale d'échange entre le gaz et le liquide peut être grandement améliorée, ce qui permettrait d'intensifier le procédé. L'utilisation d'autres acides gras polyinsaturés et/ou d'autres enzymes pourraient également élargir l'éventail des molécules d'intérêt à produire.





©Nada Chami - L'aspect d'un coulis d'hydrates mixtes de CP + CO<sub>2</sub>

# Caractérisation thermodynamique des coulis de cyclopentane pour la réfrigération secondaire



## En savoir plus

Chami N. *et al.*

Thermodynamic characterization of mixed gas hydrates in the presence of cyclopentane as guest molecule for an application in secondary refrigeration  
Chemical Engineering Science . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116790>

## Contacts

Laurence Fournaison et Anthony Delahaye

UR FRISE

[laurence.fournaison@inrae.fr](mailto:laurence.fournaison@inrae.fr)

[anthony.delahaye@inrae.fr](mailto:anthony.delahaye@inrae.fr)



## Contexte

Les systèmes de réfrigération de grande puissance mettent en œuvre des quantités importantes de fluides frigorigènes, considérés comme des gaz à effet de serre.

La réfrigération secondaire permet de limiter l'usage de ces fluides et de les confiner pour la production de froid. Elle consiste à utiliser des fluides « frigoporteurs » à faible impact environnemental, par exemple de l'eau, pour transporter le froid jusqu'aux lieux d'utilisation.

Pour augmenter l'efficacité de ces systèmes, il est possible d'employer des fluides frigoporteurs « diphasiques », appelés coulis, contenant des cristaux en suspension dans un liquide de transport, qui constituent des fluides à forte densité énergétique grâce à la chaleur latente des cristaux. Ces coulis sont ainsi capables de stocker et de transporter de grandes quantités de froid. Les coulis de glace sont déjà développés pour des applications nécessitant des températures inférieures à 5 °C.

Pour élargir le domaine d'application à des températures supérieures, un nouveau coulis est étudié, le coulis d'hydrate mixte de cyclopentane CP + CO<sub>2</sub>. Afin de le mettre en œuvre, il est nécessaire de caractériser et de maîtriser les propriétés thermodynamiques de cet hydrate mixte.

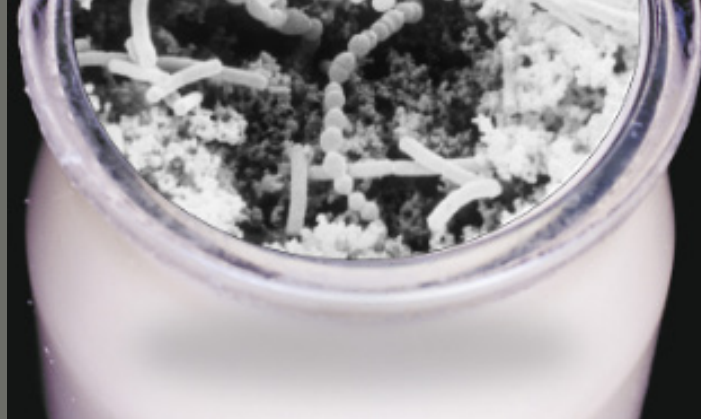
## Résultats

L'étude a permis de définir l'équilibre thermodynamique des hydrates mixtes de CP + CO<sub>2</sub>. Les points d'équilibre ont été mesurés par l'utilisation d'un dispositif calorimétrique la MicroDSC. Ils ont permis de mesurer l'enthalpie de dissociation des hydrates mixtes entre 0 et 4 MPa. L'enthalpie de l'hydrate mixte CP+CO<sub>2</sub> est supérieure à celle de l'eau, (ex,  $\Delta H = 462.5 \pm 1.5$  kJ. kg<sup>-1</sup> d'eau à une pression d'équilibre de 0.25 MPa). La capacité calorifique massique des hydrates mixtes CP + CO<sub>2</sub> a aussi été déterminée à partir des résultats obtenus par MicroDSC et d'un bilan thermique sur l'ensemble des composants qui constituent le système. La valeur obtenue dans la gamme de température de [277.9-281.2] K est de (CpH =  $1479.09 \pm 137.43$  J. K<sup>-1</sup>. kg<sup>-1</sup> d'hydrate à 0.25 MPa).

## Perspectives

Une caractérisation rhéologique a été initiée afin d'obtenir un modèle rhéologique des hydrates mixtes de CP + CO<sub>2</sub> et des hydrates simples de cyclopentane. Une caractérisation granulométrique des hydrates mixtes CP + CO<sub>2</sub> est également programmée à l'aide de deux types de granulomètres : la FBRM et la PVM.

Une caractérisation thermique sera menée à la fois du point de vue expérimental et numérique afin de prédire le comportement thermique du coulis en écoulement.



©INRAE / MAITRE Christophe et ROUSSEAU Micheline - Associations de bactéries lactiques pour fermenter des mixtes lait et lupin : favoriser des interactions positives comme levier pour concevoir des aliments aux goûts et aux textures plaisants, équilibrés nutritionnellement et soutenables sur le plan environnemental.

# Favoriser les interactions positives entre bactéries lactiques : vers de nouvelles applications alimentaires des mixtes lait-légumineuses



## En savoir plus

Canon F. *et al.*

Positive interactions between lactic acid bacteria promoted by nitrogen-based nutritional dependencies

Applied and Environmental Microbiology  
. 2021

<https://doi.org/10.1128/AEM.01055-21>

## Partenaires

• UMR CSGA

## Contacts

Valérie Gagnaire et Anne Thierry

UMR STLO

[valerie.gagnaire@inrae.fr](mailto:valerie.gagnaire@inrae.fr)

[anne.thierry@inrae.fr](mailto:anne.thierry@inrae.fr)



## Contexte

La transition vers plus de durabilité des systèmes alimentaires est un challenge aux niveaux sociétal, économique et technologique, qui implique de modifier nos habitudes alimentaires en diversifiant les ressources en protéines. Dans ce contexte, de nouveaux aliments mixtes ont leur place, comme des mixtes de lait et de légumineuses. Pour fonctionnaliser ces mixtes en termes de propriétés organoleptiques, nutritionnelles et de bénéfices-santé, la fermentation lactique offre des leviers d'action, moyennant l'utilisation d'associations raisonnées de bactéries lactiques (BL).

## Résultats

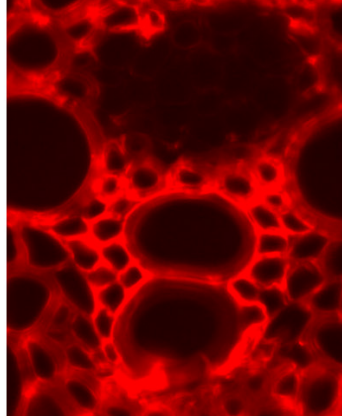
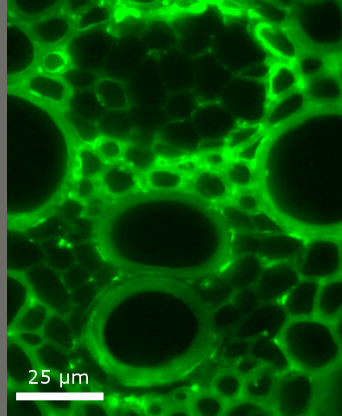
Nous avons développé une stratégie pour créer des associations de BL capables de fermenter des mixtes à base de lait et de lupin. Elle a consisté en trois étapes : (i) sélectionner *in silico* des espèces de BL *a priori* capables de dégrader les sucres ciblés ; (ii) parmi ces espèces, cribler *in vitro* 97 souches sur leur capacité à fermenter ces sucres et à hydrolyser les protéines du lait et du lupin, (iii) associer certaines de ces souches selon la complémentarité de leurs phénotypes. Cette stratégie s'est révélée gagnante en termes de consommation des sucres, d'hydrolyse des protéines et du profil de composés d'arôme. Elle a aussi montré l'existence

d'interactions positives entre souches. Ces interactions peuvent être favorisées par des dépendances nutritionnelles notamment liées au métabolisme azoté des BL. Nous avons exploité les complémentarités des souches de BL quant à leur nutrition azotée. Ainsi, nous avons associé des souches protéolytiques (prot<sup>+</sup>) susceptibles de fournir des peptides et des acides aminés libres à des souches non protéolytiques (prot<sup>-</sup>), en milieu chimiquement défini contenant des protéines de lait et de lupin. Il s'est avéré que les souches prot<sup>+</sup> stimulaient différemment les souches prot<sup>-</sup> selon la concentration et la nature des peptides et acides aminés produits, notamment à chaîne ramifiée, qui sont essentiels à la croissance des bactéries lactiques. Ainsi, des interactions fortes, moyennes ou nulles ont été observées, conduisant à des fonctionnalités améliorées dans le cas de fortes interactions.

## Perspectives

Ces travaux se poursuivent pour mieux comprendre les interactions entre BL en identifiant les peptides produits par les souches prot<sup>+</sup> et ceux utilisés par les souches prot<sup>-</sup> et pour déterminer si les mêmes interactions ont lieu dans des aliments de type yaourt. Cette étude ouvre la voie pour concevoir des aliments fermentés innovants.





©INRAE - Cédric Montanier  
Activité sur coupes de pailles de blé

# Modulation de la conformation spatiale de glycoside hydrolases multi-domaines et effet sur la catalyse



## En savoir plus

Badruna L. *et al.*

The Jo-In protein welding system is a relevant tool to create CBM-containing plant cell wall degrading enzymes

New Biotechnology . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2021.07.004>

## Contexte

Les microorganismes lignocellulolytiques ont développé tout un arsenal d'enzymes leur permettant de déconstruire la biomasse végétale et de métaboliser le carbone contenu dans les polysaccharides des parois cellulaires. Ces enzymes sont souvent organisées en plusieurs domaines, comprenant des domaines catalytiques et des domaines qui se lient spécifiquement au motif cible. Alors que les domaines individuels de ces enzymes sont en général bien caractérisés *in vitro* sur des substrats synthétiques solubles, ils le sont rarement dans leur environnement naturel, dense et complexe et encore moins dans leur intégralité. Ainsi, la conformation spatiale que ces différents domaines peuvent adopter au cours de la catalyse n'est pas pris en compte. Nous avons alors développé une approche nous permettant de le faire.

ce qui nous a permis de caractériser la position et la distance entre les deux domaines. Puis nous avons étudié l'activité biologique des différents domaines sur des substrats simples et solubles ou naturels et insolubles, comme la paille ou le son de blé. Les résultats montrent que nos enzymes multi-domaines présentent bien une géométrie spatiale dépendante de la manière dont les domaines sont assemblés. La rigidité de l'ensemble due au complexe Jo/In empêche toute interférence physique entre les domaines. De plus, en fonction de la position de Jo et de In, on peut jouer sur l'angle de torsion formé entre les deux domaines. Nous avons montré que cette différence de topologie entre xylanase et CBM avait un impact sur l'activité enzymatique dans des parois de cellules végétales.

## Perspectives

Le savoir-faire développé nous permet aujourd'hui de créer à façon des assemblages enzymatiques. Cet outil nous permet également d'adresser la question de l'impact de l'organisation et de la proximité spatiale de ces assemblages dans les processus biologiques. Nous aimerions mettre en œuvre ces systèmes dans des voies métaboliques et plus largement l'appliquer à la synthèse de molécules d'intérêt et au développement de nouveaux polymères.

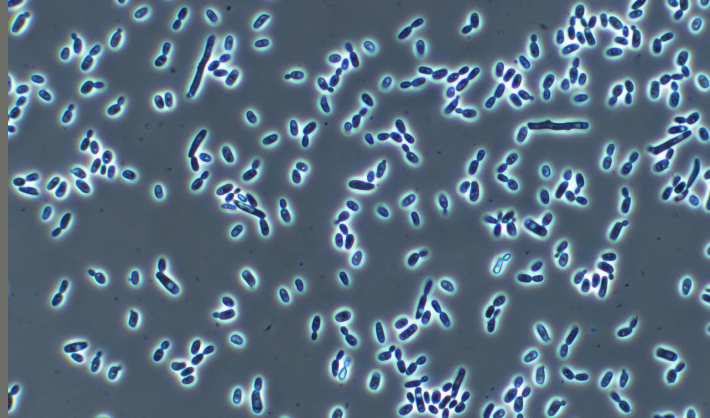
## Contact

Cédric Montanier

UMR TBI

[cedric.montanier@insa-toulouse.fr](mailto:cedric.montanier@insa-toulouse.fr)





©INSA - *Yarrowia lipolytica* Ovoides

# Contrôle de la filamentation de *Yarrowia lipolytica* par la maîtrise de la conduite de fermentation



## En savoir plus

Lesage J. *et al.*

Accelerostat study in conventional and microfluidic bioreactors to assess the key role of residual glucose in the dimorphic transition of *Yarrowia lipolytica* in response to environmental stimuli

New Biotechnology . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2021.05.004>

## Contexte

La levure *Yarrowia lipolytica* suscite un intérêt grandissant de par sa capacité à utiliser des sources de carbone diverses et à produire un large spectre de métabolites d'intérêt (lipides, protéines, acides organiques, arômes). Cependant, en réponse aux fluctuations environnementales, *Y. lipolytica* déclenche des transitions dimorphiques amenant des difficultés de mise en œuvre des bioprocédés (perte de rendement, limitation des transferts, impact sur la rhéologie des milieux). Jusqu'à présent le déclenchement de la filamentation était décrit comme induit par des conditions de stress et dépendant de la souche mise en œuvre. Nos travaux précédents ont montré que la réponse de *Y. lipolytica* à des conditions de stress (pH, oxygène dissous) était dépendante du mode de culture et ont permis d'émettre l'hypothèse d'une relation entre la concentration en sucre résiduel (i. e. excès pour le mode discontinu et limitant pour le mode continu) et l'induction de la filamentation en présence de ces stress. La possibilité de contrôler la filamentation par la maîtrise de la conduite du bioprocédé contribuerait au développement de procédés biotechnologiques avec la levure *Y. lipolytica*.

## Résultats

Des cultures de *Y. lipolytica* en bioréacteur ont été réalisées selon des conduites de culture spécifique (accélérostat) permettant de générer une augmentation progressive et contrôlée

de la concentration en glucose résiduel. Les résultats ont mis en évidence que *Y. lipolytica* même sous condition de stress conservait une morphologie ovoïde lorsque la concentration résiduelle de glucose restait inférieure à une valeur seuil d'environ 0,35 mg L<sup>-1</sup>. Une transition vers des formes plus allongées se déclenche à ce seuil, et s'intensifie progressivement avec l'augmentation de la concentration en sucre résiduel. Nous avons exploré le mécanisme de régulation de la transition dimorphique en lien avec la concentration en sucre résiduel et la concentration en AMP cyclique, molécule signal, impliquée dans les cascades de réponse au stress chez les levures. L'effet de l'AMPc sur la transition a été évalué par l'ajout d'AMPc et la quantification de ses niveaux intracellulaires au cours de l'augmentation progressive de la concentration en glucose résiduel. Nous avons confirmé que l'ajout exogène d'AMPc inhibait la morphologie mycélienne de *Y. lipolytica*, même à des concentrations de glucose dépassant le niveau seuil de 0,35 mg.L<sup>-1</sup>. Ces résultats suggèrent que les réponses dimorphiques chez *Y. lipolytica* sont régulées par les voies de signalisation du sucre, très probablement via la voie dépendante de l'AMPc-PKA, pour lequel l'AMPc a été décrit comme activateur.

## Perspectives

Des études transcriptomiques devraient nous permettre de mieux comprendre les mécanismes de régulation mis en jeu.

## Contact

Nathalie Gorret

UMR TBI

[ngorret@insa-toulouse.fr](mailto:ngorret@insa-toulouse.fr)





©INRAE - Loïc Foucat et Estelle Bonnin - Spectromètre RMN bas champ

# Comportement des enzymes de dégradation des pectines dans des milieux denses



## En savoir plus

LI F. *et al.*

Effect of solid loading on the behaviour of pectin-degrading enzymes

Biotechnology for Biofuels . 2021

<https://doi.org/10.1186/s13068-021-01957-3>

## Contact

Estelle Bonnin

UR BIA

[estelle.bonnin@inrae.fr](mailto:estelle.bonnin@inrae.fr)



## Contexte

Les pectines ont un impact sur la récalcitrance de la biomasse végétale en affectant l'accessibilité des autres composants de la paroi cellulaire à la dégradation enzymatique. Leur élimination a donc un effet positif sur la saccharification des biomasses riches en pectines. D'autre part, la mise au point de procédés écoresponsables nécessite de minimiser les consommations d'eau et donc de travailler à forte teneur en solide. Le but de ces travaux est d'étudier le comportement de différentes enzymes dégradant les pectines en présence d'une charge solide faible (5 %) à élevée (35 %) d'écorces d'agrumes. Deux conditions d'enzymes ont été étudiées : une pectine lyase a été comparée à un mélange endopolygalacturonase/pectine méthylestérase.

## Résultats

Une charge élevée en écorces d'agrumes affecte la solubilisation des pectines différemment selon l'enzyme utilisée. La pectine lyase entraîne une déstructuration plus importante du substrat solide et est moins sensible à une réduction de la teneur en eau que le mélange endopolygalacturonase/pectine méthylestérase, avec un mode d'action processif ou non. En parallèle de la dégradation enzymatique, des expériences de RMN bas champ ont

mis en évidence que la charge solide affecte clairement la mobilité de l'eau, et que ces changements de mobilité varient selon l'enzyme utilisée. En effet, la pectine lyase entraîne des changements moins prononcés que le mélange endopolygalacturonase/pectine méthylestérase.

À concentration de pectines similaire, les solutions de pectines entravent davantage la diffusion de la polygalacturonase que le substrat solide. Ceci peut être attribué à la viscosité élevée des solutions de pectines hautement concentrées alors que les pores présents dans le substrat solide offrent des chemins de diffusion continus.

## Perspectives

Bien que la structure des pectines varie selon les sources végétales, les résultats obtenus ici peuvent être extrapolés à d'autres co-produits car les motifs pectiques reconnus par les enzymes sont toujours présents. Ces nouvelles informations sont utiles pour la bioraffinerie des matières végétales riches en pectines lorsque des enzymes sont utilisées dans le traitement.



©Cyril Marchand

# Exploration de la diversité des enzymes fongiques dans les sols de mangrove



## En savoir plus

Ben Ayed A. *et al.*

Exploring the diversity of fungal DyPs in mangrove soils to produce and characterize novel biocatalysts

Journal of Fungi . 2021

<https://doi.org/10.3390/jof7050321>

## Partenariat

- ECosphère Continentale
- Côtère Microbienne
- Universités de Nouvelle Calédonie, Clermont Auvergne, Lyon, Aix-Marseille, Sfax (Tunisie), et Turin (Italie)
- IRD
- INRAE
- CIB (Espagne)

## Contact

Eric Record

UMR BBF

[eric.record@inrae.fr](mailto:eric.record@inrae.fr)



## Contexte

Les mangroves côtières sont des écosystèmes fascinants, composés principalement de plantes ligneuses qui poussent dans des conditions environnementales extrêmes telles qu'une forte salinité et des températures élevées. Elles sont considérées comme le plus grand réservoir de carbone des écosystèmes côtiers et les champignons des mangroves jouent un rôle clé dans le recyclage de la matière organique, notamment de la biomasse riche en lignocellulose. Très peu d'études portent sur la diversité fongique au niveau global, ainsi que sur les mécanismes enzymatiques employés par les champignons de mangrove pour décomposer la biomasse végétale et sur leur adaptation aux conditions marines, notamment aux fortes concentrations de sel.

## Résultats

Dans un projet pluripartenaires (ECosphère Continentale et Côtère Microbienne) nous avons criblé la diversité fonctionnelle (gènes exprimés codant pour des peroxydase DyPs fongiques) dans des sédiments, de surface et en profondeur, collectés sous les arbres *A. marina* ou *R. stylosa*, et ceci pendant la saison humide ou la saison sèche.

La plus forte diversité des Dye decolorizing peroxidase (DyP) a été observée pendant la saison humide dans les sédiments de surface sous la zone occupée par *Rhizophora stylosa* comparé à une zone implantée

en *Avicennia marina*. L'enzyme majoritairement identifiée dans ces sols (70 % des échantillons) a été produite par une technique de génie génétique et caractérisée biochimiquement afin de mieux comprendre son origine. Nous avons pu démontrer que cette enzyme (Dyp1) est fonctionnelle et qu'elle possède des propriétés comparables à des homologues d'origine terrestre. Elle possède également des caractéristiques très intéressantes de décoloration de colorants industriels avec une versabilité plus importante que deux homologues DyP d'origine terrestre. Malgré tout, son activité enzymatique en présence de sel marin correspond plus à celle d'une enzyme d'origine terrestre. Nous avons émis l'hypothèse que l'organisme qui a produit cette enzyme provient d'un environnement terrestre avoisinant la mangrove et est venu coloniser la mangrove, milieu tampon entre la mer et la terre.

## Perspectives

Nous voulons approfondir l'étude de la diversité taxonomique et fonctionnelle des mangroves en comparant des mangroves anthropisées ou non, en incluant les communautés bactériennes aux fongiques et en diversifiant les cibles enzymatiques (ligninases, hémicellulases par exemple). Plus largement, les résultats de notre étude contribueront à d'autres domaines de recherche tels que l'étude du recyclage du carbone dans l'environnement marin et la compréhension des communautés microbiennes au sens large.



## ✓ Raisonner l'élaboration et la perception de nos aliments



Concevoir de nouveaux aliments implique d'acquérir de nouvelles connaissances relatives aux déterminants de qualités nutritionnelle et sensorielle des matières premières et des aliments. Cette double approche est d'autant plus nécessaire pour concevoir des aliments à partir de matière végétale, et ainsi répondre à l'enjeu actuel des aliments durables. Les chercheurs étudient également comment ces nouveaux aliments sont perçus par le consommateur afin de maximiser leur acceptabilité.

**Page 34:** Vers une alimentation durable

**Page 37:** Construire la qualité nutritionnelle et sensorielle des aliments

**Page 43:** Perception et digestion des aliments



© INRAE/Guyomarc'h Fanny - Associations de protéines lactières et végétales : un potentiel pour des aliments au goût et aux textures plaisants, équilibrés nutritionnellement et soutenables sur le plan environnemental.

# Innover avec les assemblages de protéines animales et végétales



## En savoir plus

Hinderink E. *et al.*

Combining plant and dairy proteins in food colloid design

Current Opinion in Colloid & Interface Science . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101507>

Guyomarc'h F. *et al.*

Mixing milk, egg and plant resources to obtain safe and tasty foods with environmental and health benefits

Trends in Food Science & Technology . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.010>

## Partenariat

• Wageningen University & Research (WUR)

## Contacts

Claire Berton-Carabin, Adeline Boire, Valérie Gagnaire et Fanny Guyomarc'h

UR BIA et UMR STLO

[claire.ber-ton-carabin@inrae.fr](mailto:claire.ber-ton-carabin@inrae.fr)

[adeline.boire@inrae.fr](mailto:adeline.boire@inrae.fr)

[valerie.gagnaire@inrae.fr](mailto:valerie.gagnaire@inrae.fr)

[fanny.guyomarc-h@inrae.fr](mailto:fanny.guyomarc-h@inrae.fr)



## Contexte

La consommation croissante de protéines animales par les populations des pays développés exerce une pression insoutenable sur les ressources et accentue la prévalence des maladies métaboliques chroniques telles que les inflammations intestinales ou le cancer. L'enjeu de la substitution des protéines animales par des protéines végétales dans les régimes occidentaux est de réussir la transition vers une alimentation plus saine et plus durable. Pour de nombreux consommateurs, cette transition ne sera acceptable que s'il-elle dispose d'un choix de produits alimentaires sensoriellement plaisants, pratiques et accessibles économiquement. Une voie possible est de proposer des produits mixtes innovants, alliant protéines lactières, d'œuf et/ou végétales à destination des consommateurs peu attirés ou rejetant les produits végans.

## Résultats

Pour cela, les filières animales et végétales ont besoin de connaissances pour inspirer leurs activités de développement et d'innovation. Des travaux récents des équipes de TRANSFORM décrivent les mécanismes d'interactions entre protéines animales et végétales. Disperser les protéines sous la forme de coacervats ou d'agrégats thermo-induits offre ainsi une solution technologique décisive à la fréquente instabilité liée aux protéines végétales. Une maîtrise fine

des interactions permet également de diversifier la texture des gels, des mousses et des émulsions alimentaires pour intégrer les protéines végétales dans des aliments mieux acceptés par le public que les aliments purement végétaux. Ces aliments « mixtes » ou « hybrides » apportent les acides aminés essentiels et des vitamines parfois déficitaires dans les régimes végans. La fermentation, améliore encore ces performances en dégradant certains composés indigestes ou anti-nutritionnels apportés par la fraction végétale, et en produisant des arômes agréables. Des tests hédoniques ont montré que ces aliments mixtes constituent un levier pour améliorer l'acceptabilité des protéines végétales par les consommateurs et consommatrices occidentaux.

## Perspectives

Cette investigation globale des aliments mixtes innovants, de l'échelle moléculaire aux préférences des consommateurs via les fabrications et les propriétés fonctionnelles, vise à établir une évaluation multicritères sur les dimensions des performances sensorielles, économiques, de santé et environnementales. Une analyse bénéfices-risques serait également pertinente pour mieux cerner les effets des différents composants des fractions animales et végétales. Ces connaissances pourront ouvrir des pistes de complémentarité entre les filières végétales et animales, plutôt que de substitution.



© Siddharth Sharan

# La féverole : une légumineuse prometteuse à intégrer dans notre alimentation



## En savoir plus

Sharan S. *et al.*

Fava bean (*Vicia faba* L.) for food applications: From seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color

Comprehensive reviews in Food Science and food safety . 2020

<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12687>

## Contacts

Anne Saint-Eve et Marie-Noëlle Maillard  
UMR SayFood

[anne.saint-eve@agroparistech.fr](mailto:anne.saint-eve@agroparistech.fr)

[marie-noelle.maillard@agroparistech.fr](mailto:marie-noelle.maillard@agroparistech.fr)



## Contexte

La consommation d'aliments formulés à base de protéines végétales est en plein essor. Outre son intérêt pour la santé humaine, elle contribue à une alimentation plus durable. Parmi les légumineuses, les féveroles (*Vicia faba* L.) apparaissent comme une source de protéines très prometteuse. Par ailleurs, elles présentent des fonctionnalités intéressantes dans la formulation alimentaire, en particulier des propriétés moussantes, émulsifiantes et gélifiantes. Cependant, plusieurs freins limitent leur utilisation, en particulier la présence de facteurs antinutritionnels et l'existence de défauts sensoriels. La recherche d'itinéraires technologiques permettant de développer, à partir de cette légumineuse, des ingrédients (farines, concentrés ou isolats) est donc essentielle pour favoriser l'expression de leurs propriétés fonctionnelles et nutritionnelles, tout en maîtrisant leur odeur, leur goût, leur couleur et en réduisant la présence de facteurs antinutritionnels.

## Résultats

Des conditions réalistes de transformation (température, pH et durée de traitement) ont été mises en œuvre sur un concentré de féverole et leurs impacts sur les propriétés fonctionnelles et olfactives ont été évalués. Les résultats de ces travaux ont ainsi montré que les propriétés

moussantes et émulsifiantes sont principalement gouvernées par le pH de modification et d'utilisation de ces ingrédients et peuvent être expliquées par les propriétés des protéines. Par ailleurs, les perceptions olfactives peuvent fortement varier en fonction des conditions de transformation appliquées, allant de notes vertes, cuites à rance, et sont dues à la présence de combinaisons de composés volatils spécifiques. Enfin, les propriétés physico-chimiques et sensorielles des composés à l'origine du potentiel antioxydant, des saveurs (amertume et astringence), de la couleur et des effets antinutritionnels ont également été étudiés, confirmant le fort effet du pH sur ces ingrédients.

## Perspectives

Ce projet a ouvert la voie vers de nouvelles recherches sur les itinéraires technologiques à suivre pour proposer des ingrédients peu transformés, dans un contexte réaliste pour un développement industriel. Il s'agit de trouver, par une approche multi-dimensionnelle, un compromis satisfaisant entre les fonctionnalités intéressantes à exploiter, la limitation des facteurs antinutritionnels et la présence de notes olfactives ou de couleurs indésirables pour les consommateurs.





©Kossigan Bernard Dedey - Observation mésoscopique en continu d'un film de pâte pendant son gonflement sous forme de bulle dans une cellule conçue au laboratoire qui contrôle température et composition en gaz.

## Vers une fonctionnalisation maîtrisée des mélanges de farine ?



### En savoir plus

Grenier D. *et al.*

Gas cell opening in bread dough during baking

Trends in Food Science and Technology 2021

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.032>

### Partenariat

- UMR IATE (Montpellier) pour la réflexion accompagnant la revue bibliographique dans TIFS et pour la caractérisation mécanique du gluten en cours de cuisson (post-doc SAD d'Heliciane Clément 2021-2023)
- UR BIA et UMR PANTHER (Nantes) pour la caractérisation multi-échelle du ramollissement des grains d'amidon dans la pâte à pain (post doc Marie Curie de Nanci Castanha da Silva 2021-2023)
- Le projet européen PRIMA-FBM (2021-25) coordonné par l'INRAE (UR BIA Nantes).

### Contacts

Tiphaine Lucas et David Grenier

UR OPAAL

[tiphaine.lucas@inrae.fr](mailto:tiphaine.lucas@inrae.fr)

[david.grenier@inrae.fr](mailto:david.grenier@inrae.fr)



### Contexte

Le pain constitue un aliment de base dans beaucoup de cultures. Sa structure alvéolaire, son moelleux et son croustillant sont autant de qualités que l'on apprécie (contribuent à 20 % de l'appréciation globale). Le contrôle de l'expansion en boulangerie s'est essentiellement appuyé sur le réseau de gluten aux propriétés viscoélastiques (8 à 12 % de la farine de blé panifiable) alors que la variabilité entre lots de farine est lissée avec des aides technologiques ou des additifs. L'approche est de mieux comprendre le rôle des constituants de la farine autres que le gluten, l'amidon entre autres, pour tenter une fonctionnalisation à l'aide de mélanges de farine pour atteindre l'expansion recherchée. L'étape de cuisson ne peut plus être négligée comme précédemment, car elle détermine des changements de propriétés de l'amidon fondamentaux pour cette stabilisation.

### Résultats

Un travail d'analyse a revisité les fonctions stabilisatrices/déstabilisatrices des parois de pâte par les différents ingrédients d'une farine, en particulier les grains d'amidon, en pousse et en cuisson. Deux mécanismes candidats à la stabilisation de la paroi de pâte par l'amidon ont été étudiés : le relargage de matériel dans la phase extragranulaire et le ramollissement des grains d'amidon. Aucun n'a fait l'objet d'études dans les conditions d'hydratation modérée de

la pâte à pain. L'approche développée pour cette exploration combine de la modélisation micromécanique, encore peu développée dans le domaine alimentaire, et des méthodes de mesure originales, qui permettent de suivre en dynamique la migration de matière à l'échelle des grains d'amidon (Résonance Magnétique Nucléaire RMN) ou d'observer sous microscope la déformation d'un film de pâte formant une bulle. Ceci a été réalisé dans l'inspiration de l'Alveolab® dont sont équipés de nombreux laboratoires en Boulangerie-Viennoiserie-Pâtisserie, mais cette fois-ci avec une ambiance recréant la montée en température et la composition gazeuse de la pâte (ces adaptations ont été apportées au laboratoire).

### Perspectives

Les chercheurs souhaitent jouer sur l'agencement successif des actions stabilisatrices des différents ingrédients de la pâte à terme (réseau gluténique, puis lamelle liquide, puis phase granulaire constituée d'amidon). L'objectif sera de trouver des combinaisons de mélanges de farines permettant d'obtenir cette succession d'actions pour une qualité de gluten donnée. Ceci pourrait permettre de travailler avec des farines de plus faibles teneurs en gluten que celles utilisées actuellement et de mieux piloter les procédés de cuisson y compris les procédés innovants fonctionnant sous vide partiel (Projet européen PRIMA FB-MINE).





©Pixabay - Wernerdetjen

## Des procédés innovants au secours de la qualité des viandes : une préoccupation internationale



### En savoir plus

Supaphon P. *et al.*

Structural changes in local Thai beef during sous-vide cooking

Meat Science . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108442>

### Partenariat

- King Mongkut Institute (Thaïlande), - Riddet Institute (Nouvelle Zélande), - DIL (Allemagne)
- les Universités de Melbourne et de Wagga wagga (Australie)

### Contact

Thierry Astruc

UR QUAPA

[thierry.astruc@inrae.fr](mailto:thierry.astruc@inrae.fr)



### Contexte

Actuellement, 30 % de la viande bovine consommée en Europe est issue de vaches de réforme. Sur d'autres continents, des races rustiques sont privilégiées pour leur résistance aux maladies et à des environnements hostiles (climat, parasites, ressources). Ces viandes à fort potentiel nutritionnel souffrent d'un cruel déficit de tendreté. Nous avons développé des collaborations pour appliquer à ces viandes fraîches des procédés technologiques innovants (ondes de choc hydrodynamiques, champs électriques pulsés, action protéolytique) susceptibles de réduire leur résistance mécanique tout en préservant leur potentiel nutritionnel. La cuisson sous vide, reconnue pour améliorer la texture, a été privilégiée et les évolutions structurales ont été caractérisées pour comprendre les mécanismes associés à l'attendrissement des viandes.

### Résultats

L'application, avant cuisson, d'ondes de chocs hydrodynamiques favorise la solubilisation du collagène intramusculaire alors que les champs électriques pulsés ne modifient pas significativement la structure mais favorisent la digestibilité *in vitro* de la viande cuite sous-vide. L'utilisation

d'extrait de gingembre, riche en protéase, attendrit significativement la viande. La viande est plus tendre et les pertes de jus sont moindres pour une cuisson sous-vide à 60 °C, (plutôt qu'à 70 et 80 °C). Il semble que les fibres musculaires à contraction lente se rétractent à la cuisson, entraînant l'ondulation des fibres adjacentes, probablement à contraction rapide. La texture appréciée des viandes cuites sous vide serait consécutive à une forte solubilisation du collagène et à la gélification de protéines myofibrillaires et sarcoplasmiques.

### Perspectives

L'objectif vise à mieux valoriser les viandes issues d'animaux de réformes ou rustiques et à proposer au consommateur des viandes pré-cuites de bonne qualité sensorielle, sanitaire et nutritionnelle. Dans ce cadre, nous cherchons à mieux comprendre la variabilité de comportement des fibres musculaires au chauffage et le rôle des processus dans l'attendrissement des viandes.



©Fotolia

## Un nouveau concept pour étudier la qualité nutritionnelle d'un aliment



### En savoir plus

Peyron M-A. *et al.*

Deciphering the protein digestion of meat products for the elderly by *in vitro* food oral processing and gastric dynamic digestion, peptidome analysis and modeling

Food & Function . 2021

<https://doi.org/10.1039/d1fo00969a>

### Contacts

Véronique Santé Lhoutellier et Marie Agnès Peyron

UR QUAPA

[veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr](mailto:veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr)

[marie-agnes.peyron@inrae.fr](mailto:marie-agnes.peyron@inrae.fr)



### Contexte

Bien nourrir les personnes âgées est un véritable défi. Le développement de nouveaux aliments, bons sur le plan nutritionnel et adaptés aux capacités de cette population spécifique, est particulièrement complexe. Relever ce défi nécessite des études plus mécanistiques incluant l'ensemble du processus digestif, dans des conditions bien contrôlées, rendues possibles par la conception de dispositifs *in vitro* comme le masticateur AM2 et le digesteur DIDGI. La nécessité de développer des produits alimentaires à la fois nutritifs et fonctionnels reste un objectif crucial. En effet, les personnes âgées ont besoin d'aliments avec des textures spécifiques adaptées à leurs capacités orales et digestives.

Pour répondre à cette question, nous avons considéré l'ensemble des données depuis la phase orale, la physiologie digestive des personnes âgées, et la modélisation du devenir des protéines dans l'estomac.

Objectiver la biodisponibilité des nutriments à toutes les étapes de la digestion et identifier les profils protéiques permettra de concevoir à terme les aliments adaptés aux besoins nutritionnels.

### Résultats

Un modèle de saucisses de porc soumis à une mastication normale et déficiente pour reproduire les déficiences orales fréquemment observées chez les personnes âgées,

puis une digestion gastrique *in vitro*, mimant le tractus digestif d'aliments d'adultes et de personnes âgées a été développé. Des bolus alimentaires ont été caractérisés pour leurs propriétés granulométriques et rhéologiques. La cinétique de libération des nutriments et l'analyse peptidomique dans le digesta ont été étudiées afin d'établir un indice de bioaccessibilité des nutriments pour aider à évaluer les effets de la malnutrition sur l'état de santé des personnes âgées. Après une mastication déficiente, le bol alimentaire était plus dur avec plus de grosses particules, une libération de fer libre plus faible et une oxydation plus importante des protéines. La quantité de peptides libérés dans l'estomac a progressivement augmenté, mais dans une moindre mesure pour les conditions digestives des personnes âgées. La quantité globale moyenne de protéines dans le compartiment de l'estomac après digestion complète était significativement plus basse en cas de mastication déficiente, tant chez les adultes que chez les personnes âgées, ce qui est un résultat inédit.

Deux modèles de cinétique de l'hydrolyse des protéines ont été proposés pour les digestions adultes et âgées avec des paramètres spécifiques.

### Perspectives

Notre travail élargit le concept de FOP (Food oral processing) en étendant l'activité orale à la digestion dans un contexte nutritionnel. Ce nouveau concept est nommé Food Oral and Digestive Processing, FODP.



©INRAE

# La supplémentation en prébiotiques pendant la grossesse modifie le microbiote intestinal et l'immunologie foeto-maternelle



## En savoir plus

Brosseau C. *et al.*

Prebiotic supplementation during pregnancy modifies the gut microbiota and increases metabolites in amniotic fluid, driving a tolerogenic environment *in utero*

Frontiers in Immunology . 2019

<https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.712614>

## Contact

Carole Brosseau

UR BIA

[carole.brosseau@inrae.fr](mailto:carole.brosseau@inrae.fr)



## Contexte

Pendant la grossesse, l'alimentation maternelle modifie le microbiote intestinal. Elle peut ainsi impacter le système immunitaire du fœtus *in utero* en modifiant les transferts de facteurs immuns, microbiens et de métabolites bactériens médiés par le cordon ombilical, le placenta et le liquide amniotique.

Les prébiotiques sont des fibres qui agissent comme substrat fermentescible pour certaines bactéries spécifiques conduisant à la libération de métabolites, ou en exerçant des effets directs sur les cellules immunitaires. Nous avons émis l'hypothèse que la supplémentation en prébiotique pendant la grossesse pourrait modifier le microbiote maternel vers une production plus élevée de métabolites et favorisant une empreinte immunitaire saine chez le fœtus.

## Résultats

Nous avons démontré chez la souris, que la supplémentation en prébiotiques (galacto-oligosaccharides/inuline) pendant la gestation modifie le microbiote intestinal avec une augmentation de l'abondance des Bacteroidetes et une diminution des Firmicutes associée à une augmentation de la production de métabolites.

Parmi ces métabolites, la concentration de l'acétate est augmentée dans les selles ainsi que dans le liquide amniotique. La supplémentation en prébiotiques augmente également la fréquence de cellules immuno-régulatrices lymphocytaires B et T dans les tissus gestationnels (utérus et placenta) et chez le fœtus (dans la moelle et l'intestin). Ces cellules régulatrices sont retrouvées ensuite chez le souriceau à 6 semaines de vie. Nous avons ainsi mis en évidence que la supplémentation en prébiotiques pendant la grossesse permet la transmission de facteurs microbiens et immuns spécifiques de la mère à l'enfant, permettant l'établissement d'une empreinte immunitaire tolérrogène chez le fœtus, qui pourrait protéger l'enfant de la survenue de maladies futures comme l'allergie alimentaire.

## Perspectives

Nous souhaitons déterminer chez la souris, si l'environnement tolérrogène induit *in utero* par la supplémentation en prébiotique pendant la grossesse pourrait prévenir de la survenue de l'allergie alimentaire chez la descendance. Cette stratégie nutritionnelle est en cours d'investigation dans notre cohorte de mères enceintes et allergiques PREGALL.

PROBE



©SQPOV - Purées utilisées durant cette étude

# De la pomme à l'assiette : compréhension et contrôle des mécanismes de texturation



## En savoir plus

Buergy A. *et al.*

Pectin degradation explains tissue fragmentation of fruits during thermomechanical processes for puree production

Food Hydrocolloids . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106885>

## Contacts

Agnès Rolland-Sabaté, Alexandre Leca et Catherine Renard

UMR SQPOV

[agnes.rolland-sabate@inrae.fr](mailto:agnes.rolland-sabate@inrae.fr)

[alexandre.leca@inrae.fr](mailto:alexandre.leca@inrae.fr)

[catherine.renard@inrae.fr](mailto:catherine.renard@inrae.fr)



## Contexte

La texture des purées de fruits est un attribut de qualité majeur qui doit être maîtrisé pour garantir le réachat de ces produits. Elle est déterminée par certains facteurs structuraux, comprenant la proportion et la taille des particules ainsi que la viscosité de la phase liquide. Ces facteurs dépendent étroitement de la structure tissulaire et des propriétés des parois cellulaires du fruit frais ainsi que du procédé appliqué. Les pectines, polysaccharides pariétaux sensibles aux traitements thermiques, semblent ainsi jouer un rôle clé puisqu'elles assurent l'adhésion cellulaire. Cependant, les relations entre ces facteurs structuraux et les procédés ne sont pas encore compris. Comment obtenir des purées de pommes à la texture constante et contrôlée, sans additifs, face à l'hétérogénéité et à la variabilité des matières premières encore accrues par les perturbations liées au changement climatique ? Répondre à cette question implique une meilleure compréhension des mécanismes complexes affectant les propriétés rhéologiques des purées, en particulier les interactions entre la microstructure et les procédés.

## Résultats

Des purées aux structures et textures contrastées ont été produites en modulant les conditions du procédé (température de 50 à 95 °C et broyage

de 100 à 3000 tr/min), à partir de pommes dont la structure a été modulée par le choix variétal, les pratiques culturales et la maturation post-récolte. Ces purées ont ensuite été caractérisées de l'échelle macroscopique à l'échelle moléculaire. Les mesures rhéologiques et l'analyse sensorielle ont révélé que la taille des particules était le déterminant majeur de la texture des purées de pomme. Le facteur principal affectant la fragmentation tissulaire pendant le procédé était le broyage. Cette fragmentation a été en outre facilitée par la maturation des pommes et le traitement thermique. Ceci a été corrélé à une solubilisation et une dégradation des pectines, en particulier l'hydrolyse des chaînes latérales, entraînant une réduction de l'adhésion cellulaire. Un procédé à 95 °C, ou une maturation de 6 mois, et un faible cisaillement donnent ainsi des purées plus visqueuses. Ces résultats ont permis d'approfondir la compréhension de la fragmentation tissulaire et des changements de texture au cours du procédé.

## Perspectives

Au-delà de la fourniture de directives à l'industrie pour mieux gérer la diversité et l'hétérogénéité des fruits via la modulation du procédé, cette recherche facilitera la conceptualisation de produits alimentaires innovants sans additifs et la mise en place d'une transformation plus durable.





©istockphoto

# Comprendre les interactions dans les mélanges d'arômes



## En savoir plus

Ma Y. *et al.*

Perceptual interactions among food odors : Major influences on odor intensity evidenced with a set of 222 binary mixtures of key odorants

Food Chemistry . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129483>

## Partenariat

- Université de Jiangnan (Chine)

## Contact

Thierry Thomas-Danguin

UMR CSGA

[thierry.thomas-danguin@inrae.fr](mailto:thierry.thomas-danguin@inrae.fr)



## Contexte

L'identité et la typicité perceptive des aliments est portée à 80 % par la composante olfactive. Celle-ci résulte de la détection et de l'intégration par le système olfactif de mélanges chimiquement complexes de composés volatils. L'odorat opère un codage très efficace de cette complexité chimique qui nous permet de reconnaître et différencier très rapidement l'odeur des différents aliments que nous consommons. Ce codage repose en partie sur des interactions qui peuvent se produire à différents étages du traitement de l'information olfactive et qui entraîne des effets de mélanges tels que le masquage ou la synergie, dont on ne connaît aujourd'hui toujours pas les mécanismes et les déterminants. C'est dans le but de mieux comprendre ces phénomènes perceptifs que l'équipe FFOPP du CSGA a mis en place, dans le cadre d'une collaboration internationale avec l'Université de Jiangnan (Chine), une étude très systématique de mélange de composés odorants retrouvés très souvent dans les aliments.

## Résultats

Nous avons choisi d'étudier les mélanges les plus simples, c'est-à-dire contenant uniquement 2 composés. Au total 222 mélanges binaires ont été évalués par un panel de 30 personnes afin de mesurer l'intensité de l'odeur du mélange, sa qualité et

son caractère plaisant ou déplaisant. Les données brutes de cette étude ont été rendues accessibles sous la forme d'un datapaper associé à un dataset en open access. Les résultats ont montré que dans la plupart des cas, l'odeur des composants était perçue au sein du mélange et leur intensité restait la même qu'en situation non mélangée. Le masquage est le deuxième effet le plus fréquent (44,8 %) alors que la synergie est très peu souvent observée (moins de 1 % des cas).

## Perspectives

Dans l'ensemble, ce travail très systématique et unique fournit des règles générales sur le résultat à attendre lors du mélange des composants clés des arômes alimentaires. Les données obtenues sont une source importante pour permettre l'amorçage de recherches sur la modélisation prédictive des effets de mélange d'odeurs. De plus, cette étude a permis de repérer certaines associations clés qui pourront être explorées plus en détails afin d'identifier les mécanismes physiologiques et neurobiologiques qui sous-tendent les effets de mélanges (masquage, synergie, accord).



©Francis Canon

# Effet des tanins sur la flaveur d'un vin rouge avant et après oxydation



## En savoir plus

Pittari E. *et al.*

Effects of oenological tannins on aroma release and perception of oxidized and non-oxidized red wine: A dynamic real-time *in-vivo* study coupling sensory evaluation and analytical chemistry

Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131229>

## Contact

Francis Canon

UMR CSGA

[francis.canon@inrae.fr](mailto:francis.canon@inrae.fr)



## Contexte

L'oxydation est l'un des principaux mécanismes chimiques modifiant les propriétés organoleptiques des vins au cours de leur vieillissement. En modifiant la structure des molécules du vin, l'oxydation modifie sa flaveur. Ainsi, le caractère fruité des vins rouges tend à diminuer au cours du temps, alors que des arômes de madérisation ou de pruneaux font leur apparition. De par leurs propriétés antioxydantes, les tanins œnologiques sont décrits pour avoir un effet protecteur de la flaveur des vins contre les effets de l'oxydation. L'ajout de ces tanins modifierait également la persistance aromatique. Cependant, ces effets restent à l'heure actuelle sujet à controverse, il est donc important de mieux les comprendre.

Par ailleurs, la perception de la flaveur est un processus dynamique, influencée par différents facteurs dont la cinétique de libération des composés de la flaveur. L'étude réalisée a couplé une méthode d'analyse sensorielle dynamique développée par la plateforme ChemoSens, la dominance temporelle des sensations, à la mesure de la composition en molécules volatiles de la cavité nasale des juges. Cette méthode a permis de suivre à la fois la dominance des sensations au cours du temps mais également les composés d'arômes libérés lors de la dégustation d'un pinot noir avant et après oxydation et ajout de tanins œnologiques de type proanthocyanidine et ellagitanin.

## Résultats

Les résultats obtenus montrent que la présence d'ellagitanins peut préserver de l'oxydation le caractère fruité des vins rouges. Ainsi, les résultats de cette étude suggèrent que l'élevage des vins en fût de chêne a un impact positif sur la préservation des arômes fruités au cours du vieillissement des vins en apportant des ellagitanins. Cet effet peut être dû à une plus forte libération de l'éthyl decanoate dans les premières secondes de dégustation par rapport au vin oxydé sans tanin. L'absence d'effet suite à l'ajout de proanthocyanidines peut être due à leur concentration déjà importante dans le vin étudié. La préservation des arômes fruités par les ellagitanins pourrait aider à contrebalancer les arômes extraits du bois et masquer l'apparition de notes d'oxydation avec un effet positif sur la durée de conservation des vins.

## Perspectives

Des études complémentaires permettront de mieux comprendre l'origine de la préservation du caractère fruité et de l'augmentation de la rémanence aromatique en présence d'ellagitanins. Par ailleurs, ces travaux ont bénéficié des compétences des plateformes ChemoSens et Polyphenols, deux composantes de l'infrastructure PROBE, illustrant ainsi la plus-value de cette dernière.

ChemoSens

Qualiment



©Pixabay - Shutterbug75

## Survie des *E. coli* dans le tractus digestif : étude à l'échelle du repas



### En savoir plus

de La Pomelie D. *et al.*

Investigation of *Escherichia coli* O157:H7 survival and interaction with meal components during gastrointestinal digestion

Foods . 2021

<https://doi.org/10.3390/foods10102415>

### Contact

Véronique Santé-Lhoutellier

UMR QUAPA

[veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr](mailto:veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr)



### Contexte

Les *Escherichia coli* producteurs de shigatoxines (STEC) sont des agents zoonotiques qui occupent le troisième rang des agents pathogènes d'origine alimentaire en termes d'incidence et de dangerosité dans l'Union Européenne. Ils sont responsables d'intoxications alimentaires graves dont le syndrome hémolytique et urémique. Ce sont les produits alimentaires d'origine animale et surtout la viande hachée, les légumes et les boissons qui se retrouvent contaminés. La survie des STEC après l'ingestion de viande contaminée dans le tube digestif humain dépend de nombreux facteurs et n'est pas encore totalement comprise. Cette étude s'intéresse à la survie des STEC dans un environnement physicochimique complexe allant de l'estomac à l'intestin et en ciblant à l'échelle du repas la réactivité chimique des nitrites, agent antibactérien.

### Résultats

À la fin de la digestion gastrique, 5 % de la population bactérienne initiale d'*E. coli* O157:H7 CM454 inoculée dans la viande hachée a survécu malgré un pH acide. Cette capacité à résister à un environnement acide est attribuée à la présence chez *E. coli* O157:H7 de cinq systèmes de résistance aux acides. L'ajout combiné de nitrite et d'ascorbate, imitant ici la contribution des légumes dans le milieu

de digestion, a entraîné une réduction drastique de la population d'*E. coli* O157:H7 CM454 à la fois à la fin de la digestion gastrique (0,30 % de la population initiale) et de la digestion intestinale (0,04 % de la population initiale).

En présence d'*E. coli*, plus de fer libre est libéré lors de la digestion de la viande (x 2.6) et des repas (x 4). Cette libération de fer libre est connue lors de la digestion de la viande, riche en fer. Or le fer est un micronutriment essentiel pour les bactéries et pour maintenir l'homéostasie du fer. *E. coli* a développé plusieurs mécanismes impliquant des molécules sidérophores comme le citrate, les thiols de faible poids moléculaire, ferritines.... Le relargage de fer s'expliquerait par la lyse cellulaire. Enfin la présence d'*E. coli* a modifié le potentiel redox de l'estomac vers un milieu plus réducteur, peut-être en raison de la consommation d'oxygène par les bactéries mais aussi grâce à l'ascorbate comme donneur d'électrons.

### Perspectives

Nos travaux soulignent l'importance de prendre en compte la complexité des repas. Une analyse transcriptomique sera réalisée à l'aide du séquençage de l'ARN afin de mieux comprendre la modulation des gènes dans l'environnement digestif.



©Florence Gibouin

# Évaluation des interactions aliments/salive par les propriétés rhéologiques de bols artificiels



## En savoir plus

Gibouin F. *et al.*

Rheological properties of artificial boluses of cereal foods enriched with legume proteins

Food Hydrocolloids . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107096>

## Partenariat

- Projet RFI Food for Tomorrow (Région Pays de Loire)

## Contact

Guy Della-Valle

UR BIA

[guy.della-valle@inrae.fr](mailto:guy.della-valle@inrae.fr)



## Contexte

La déconstruction des aliments au cours de la mastication gouverne leurs propriétés sensorielles et nutritionnelles, et par la salivation, elle forme un bol alimentaire, ensuite dégluti. Pour les aliments céréaliers, des modèles mécanistiques ont montré que les interactions avec la salive gouvernent la variation de viscosité du bol. Ces interactions sont essentielles pour l'acceptation des produits alimentaires enrichis en protéines végétales.

Ce travail a donc pour objectif de déterminer un coefficient d'interaction entre salive et aliments céréaliers, de différentes structures et compositions. Quatre aliments, enrichis ou non en farine de pois, appartenant à deux familles de produits céréaliers, une génoise (moelleux) et un pain plat extrudé (croustillant) ont été étudiés. Pour s'affranchir de la variabilité interindividuelle, des bols artificiels ont été obtenus après hydratation et broyage.

## Résultats

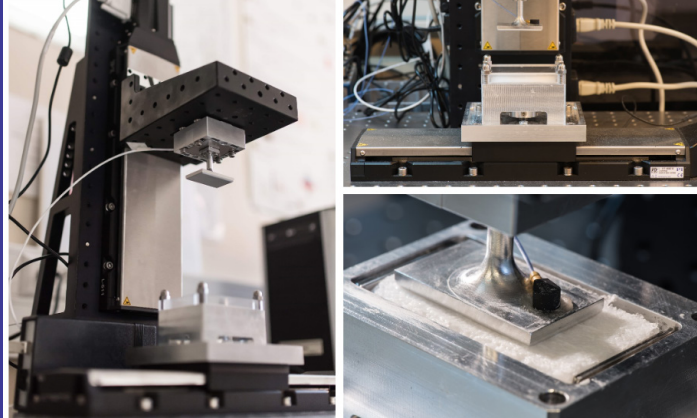
Les propriétés rhéologiques des bolus en fonction de leur teneur en eau ( $X$ , dans l'intervalle d'hydratation par la salive), ont été déterminées par deux types de rhéométrie, dynamique oscillatoire et capillaire. Les résultats ont montré qu'à faible déformation,

les bolus se comportent comme un gel et à déformation élevée comme un fluide à seuil d'écoulement. Les bolus peuvent ainsi être caractérisés par deux propriétés rhéologiques essentielles : la contrainte de transition vers l'écoulement et la consistance d'écoulement. La diminution de ces propriétés avec l'augmentation de teneur en eau, ajustée par une fonction exponentielle, permet de définir un coefficient d'interaction de l'aliment avec l'eau  $\alpha$  ( $5 \leq \alpha \leq 30$ ). Ces valeurs  $\alpha$ , ainsi calculées, sont plus élevées pour les extrudés à base de pois ( $\alpha \geq 15$ ), que pour la génoise ( $\alpha \leq 15$ ). Leurs comparaisons avec celles rencontrées pour des bolus réels suggèrent que  $\alpha$  permet de caractériser l'interaction de l'aliment avec la salive.

## Perspectives

Ces méthodes rhéologiques peuvent donc être appliquées à d'autres aliments et ainsi, par la détermination de  $\alpha$ , prendre en compte leur interaction avec la salive, afin de favoriser la conception de régimes spécifiques.





© Vincent Mathieu - Différentes vues du système biomimétique pour l'étude des interactions biomécaniques entre l'aliment, la langue et le palais

# Un outil biomimétique pour appréhender les perceptions tactiles entre la langue et le palais



## En savoir plus

Srivastava R. *et al.*

A new biomimetic set-up to understand the role of the kinematic, mechanical, and surface characteristics of the tongue in food oral tribological studies

Food Hydrocolloids . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106602>

## Contact

Vincent Mathieu

UMR SayFood

[vincent.mathieu@inrae.fr](mailto:vincent.mathieu@inrae.fr)



## Contexte

Comme en témoigne la récente attribution du prix Nobel de Médecine 2021, la compréhension des mécanismes à l'origine des perceptions tactiles constitue un défi scientifique majeur. Au cours du séjour en bouche de l'aliment, ces perceptions participent au plaisir sensoriel, en même temps qu'elles permettent de déterminer à quel moment ce dernier peut être dégluti, dans des conditions qui se doivent d'être à la fois confortables et sûres. La compréhension des mécanismes de perceptions tactiles requiert d'intégrer non seulement les propriétés des aliments, mais également les caractéristiques physiologiques complexes des organes de la cavité orale, dont on sait qu'elles peuvent varier de façon importante d'un individu à l'autre.

## Résultats

Un outil biomimétique a été conçu afin de simuler, en laboratoire, différents facteurs impliqués dans la manipulation de l'aliment entre la langue et le palais. Le système repose ainsi tout d'abord sur la conception de langues artificielles dont la rigidité, la rugosité et la lubrification sont contrôlées. Ces langues sont ensuite mises en œuvre sur un outil qui permet de programmer à façon des séquences de mouvements pour étudier la compression et le cisaillement entre la langue et une

surface plane et rigide, mimant le palais dur. L'outil est équipé de différentes modalités de mesures physiques afin d'étudier les forces appliquées, les déformations endurées par la langue et les aliments, ainsi que les vibrations générées lors de cette phase orale simulée. Une preuve de concept, focalisée sur les phénomènes de friction lors du cisaillement entre langue et palais, a ainsi permis de valider le potentiel de l'outil, tout en montrant l'impact majeur de la rigidité et de la rugosité de la langue, jusqu'alors peu considérées, sur les forces de frottement en jeu.

## Perspectives

La conception de l'outil a été raisonnée pour permettre de le faire évoluer avec une grande souplesse. Il est maintenant possible de mimer des propriétés qui peuvent varier drastiquement d'un individu à l'autre (âge, pathologies, etc.), pour étudier et comprendre dans quelle mesure ces propriétés peuvent altérer l'expérience sensorielle. Cet outil pourra être utilisé pour développer des approches physiques innovantes (à l'image des méthodes ultrasonores) pour caractériser et comprendre les interactions biomécaniques. Il pourra également être mis en œuvre pour aller vers une alimentation personnalisée et adapter les propriétés de structure des aliments en fonction de l'état physiologique spécifique des individus.



©Teensy-Weensy Pouchou on Foter.com

# Boire très chaud pourrait diminuer notre capacité à bien percevoir les saveurs



## En savoir plus

Martin C. *et al.*

Impact of very hot drink consumption habits, age, and sex, on taste sensitivity  
Foods . 2021

<https://doi.org/10.3390/foods10051139>

## Contacts

Christophe Martin et Éric Neyraud

UMR CSGA

[christophe.martin@inrae.fr](mailto:christophe.martin@inrae.fr)

[eric.neyraud@inrae.fr](mailto:eric.neyraud@inrae.fr)



## Contexte

Certains aliments sont parfois servis et consommés à des températures très élevées. C'est particulièrement le cas des boissons chaudes telles que le thé ou le café. Au contact de ces boissons, les tissus de la cavité orale (et notamment la langue) subissent une élévation de température très importante pouvant provoquer des dommages cellulaires. Cependant, les conséquences d'une exposition régulière à des températures élevées sur le fonctionnement des bourgeons gustatifs ainsi que les répercussions sur la capacité à percevoir les saveurs sont encore mal connues.

L'étude que nous avons menée était une première approche destinée à évaluer l'impact d'une consommation régulière de boissons très chaudes sur la sensibilité aux saveurs.

## Résultats

Nous avons fait appel à 82 consommateurs réguliers de boissons chaudes. Tous ont rempli un questionnaire concernant leurs habitudes de consommation et effectué à trois reprises un test destiné à évaluer leur sensibilité pour les cinq saveurs (sucrée, salée, acide, amère, umami). Nous avons ensuite

comparé les niveaux de sensibilité des consommateurs ayant déclaré boire leur boisson favorite « très chaude » ( $n=36$ ) versus « moyennement chaude » ( $n=46$ ). L'âge et le sexe des participants ont été pris en compte dans toutes les analyses car ce sont deux facteurs connus pour influencer la sensibilité aux saveurs. Nos résultats ont montré que les consommateurs habitués à boire « très chaud » présentaient une moins bonne sensibilité pour les saveurs sucrée et salée. La même tendance a été observée pour la saveur acide. Les résultats ont aussi confirmé le déclin de la sensibilité aux saveurs avec l'âge (dès 50 ans) et montré que les femmes étaient plus sensibles pour certaines saveurs (acide, amère et umami).

## Perspectives

Ces premiers résultats montrent que les habitudes de consommation peuvent avoir des conséquences non négligeables sur notre système sensoriel et par conséquent la perception des aliments. Cependant, l'ensemble des mécanismes impliqués ne sont pas encore connus et nécessiteront d'être investigués.



© Freemages.com - Tubes à essais

# Comprendre le métabolisme et la perception des arômes en bouche par l'exploration des protéomes oraux et salivaires



## En savoir plus

Schwartz M. *et al.*

Oral enzymatic detoxification system: insights obtained from proteome analysis to understand its potential impact on aroma metabolism

Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety . 2021

<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12857>

## Contact

Mathieu Schwartz

UMR CSGA

[mathieu.schwartz@inrae.fr](mailto:mathieu.schwartz@inrae.fr)



## Contexte

La perception de la flaveur d'un aliment en bouche correspond à l'intégration du goût, des arômes et des sensations trigéminales. L'arôme est apporté par des molécules odorantes, qui sont libérées en bouche lors de la mastication. Des études récentes ont montré que ces molécules odorantes peuvent être métabolisées dans la cavité orale. Les métabolites formés possèdent des propriétés sensorielles différentes des molécules odorantes de départ. Ainsi, ce métabolisme oral modifierait la perception aromatique d'un individu à un autre selon ces études. Les enzymes responsables de ces réactions sont inconnues, bien que de nombreuses preuves suggèrent l'implication des EMX (enzymes métabolisant les xénobiotiques). En utilisant une approche d'exploration systématique des données protéomiques orales et salivaires existantes, nous avons mené un inventaire exhaustif des EMX orales potentiellement impliquées dans la métabolisation de molécules d'arômes.

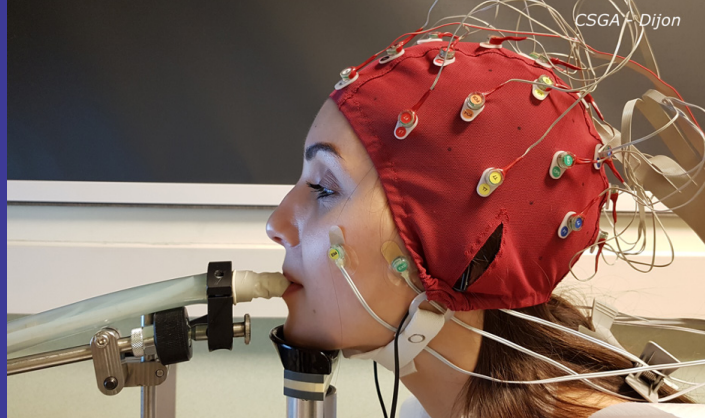
## Résultats

L'exploration de quatre protéomes salivaires et un protéome d'épithélium oral a permis d'identifier plus de 90 EMX présentes dans la sphère orale. Ces EMX constituent près de 2 % du total des différentes protéines

présentes dans la salive. Les EMX identifiées peuvent être séparées en trois groupes selon leur mécanisme réactionnel : les oxydoréductases, les transférases et les hydrolases. La plus grande diversité a été retrouvée dans le groupe des oxydoréductases, avec 8 familles d'enzymes regroupant 48 membres. Toutes ces familles d'enzymes présentent des réactions similaires à celles observées précédemment lors d'études *ex vivo* sur salive et d'études *in vivo* de métabolisation de molécules d'arômes en bouche.

## Perspectives

Il faut à présent comprendre les réactions mises en jeu. Ainsi, il est prévu d'approfondir la caractérisation des mécanismes moléculaires impliqués en étudiant plus en détail les enzymes du métabolisme oral. Des EMX de la famille des aldéhydes déshydrogénases ont été sélectionnées sur la base de cette étude et sont actuellement en cours d'exploration. Par ailleurs, la compréhension des mécanismes moléculaires devra également tenir compte de la complexité de la sphère orale et impliquer des études *in vivo* de métabolisation en temps réel. Ce travail est une première étape vers la compréhension du métabolisme des arômes en bouche et de leur impact sur la perception de la flaveur.



©Charlotte Sinding - Stimulation des participants par des soupes salées et/ou aromatisées lors de l'enregistrement des potentiels évoqués olfacto-gustatifs par une technique d'électroencéphalographie (projet EATERS, CSGA)

## Notre cerveau, cet illusionniste qui donne du goût aux odeurs !



### En savoir plus

Sinding C. *et al.*

Odor-induced saltiness enhancement: insight into the brain chronometry of flavor

Neuroscience . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.10.029>

### Contact

Charlotte Sinding

UMR CSGA

[charlotte.sinding@inrae.fr](mailto:charlotte.sinding@inrae.fr)



### Contexte

Nous confondons volontiers le goût et l'odeur, puisque que l'on parle du «goût» d'un aliment quand on évoque en fait son odeur, encore appelée «arôme». Cette confusion courante a une raison biologique, nichée dans notre cerveau. Pour mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés au traitement du goût et des odeurs, des participants volontaires ont été équipés d'un casque d'électroencéphalographie, permettant de mesurer l'activité électrique du cerveau pendant qu'ils dégustaient trois soupes de petit pois dans un ordre aléatoire. Les soupes contenaient soit une teneur normale en sel ; soit une teneur réduite en sel (-25%) ; soit une teneur réduite en sel et un arôme de bouillon de bœuf.

### Résultats

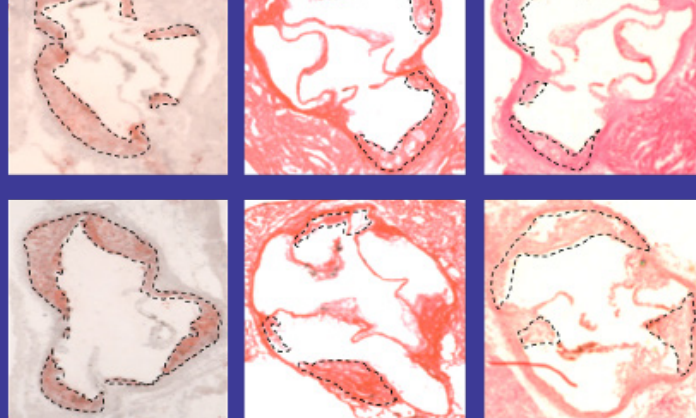
Ces soupes ont toutes donné lieu à une activation cérébrale précoce à 150 ms, liée au traitement de la concentration de sel dans l'aliment, puis à une activation tardive (640 ms) liée au traitement conscient de l'intensité salée. Alors que les deux soupes sans arôme ont produit un pic d'activation tardif équivalent (à 640 ms), la soupe aromatisée a produit un signal plus tardif à 660 ms. Ces 20 ms ne sont pas anodines pour notre cerveau, dont les neurones répondent en quelques millisecondes : elles reflètent un cheminement plus long dans le traitement de l'information,

probablement lié au traitement de l'odeur en tant que signal gustatif. Cette découverte montre que la théorie qui situe les interactions entre odeurs et goût à un niveau très précoce (au niveau des cortex primaires olfactif et gustatif) est peu probable. Ces interactions ont plutôt lieu dans des aires cérébrales de haut niveau, liées aux traitements cognitifs et mnésiques.

### Perspectives

L'information olfactive « bouillon de bœuf », ou tout autre odeur associée au salé, réactiverait un souvenir associant cette odeur au goût salé, ce qui stimulerait les zones du cerveau impliquées dans le traitement du goût salé, bien que l'odeur n'ait pas activé nos récepteurs gustatifs. Ainsi, consommer un aliment présentant une odeur associée au salé nous donnerait « l'illusion » d'un goût plus salé qu'il n'est en réalité. Nous pouvons donc réduire les quantités de sel et de sucre en utilisant des ingrédients particulièrement odorants comme des aromates, des épices ou de la vanille. Sur un plan fondamental, il reste à associer ces mesures temporelles aux zones cérébrales en jeu lors de la perception d'un aliment. Une perspective est aussi de comprendre comment ces mécanismes sont modifiés par le poids et la diète des individus, mais aussi par leur culture culinaire qui est à la base des associations odeur-goût.





© Gaëtan Boléa

# L'oxydation des lipides omega-6 au cours de la digestion, un facteur de risque dans la santé vasculaire, limitée par la consommation de pomme



## En savoir plus

Boléa G. *et al.*

Digestive n-6 lipid oxidation, a key trigger of vascular dysfunction and atherosclerosis in the Western diet: protective effects of apple polyphenols

Molecular Nutrition & Food Research . 2021

<https://doi.org/10.1002/mnfr.202000487>

## Partenariat

- LAPEC de l'Université d'Avignon

## Contact

Claire Dufour

UMR SQPOV

[claire.dufour@inrae.fr](mailto:claire.dufour@inrae.fr)



## Contexte

L'alimentation occidentale, caractérisée par une consommation élevée de lipides polyinsaturés  $\omega$ -6, est mise en cause dans le développement des maladies cardiovasculaires, premières causes de mortalité dans nos sociétés. Par ailleurs, diverses études épidémiologiques ont clairement montré que les fruits et légumes (F&L), mais aussi certaines classes de polyphénols, protégeaient des maladies coronariennes. Si les sites et mécanismes d'oxydation des lipides sont encore mal connus dans la genèse de l'athérosclérose, la protection des lipides alimentaires par des polyphénols antioxydants lors de la digestion a été validée dans nos travaux précédents chez le miniporc. L'oxydation lipidique est amorcée dès la digestion gastrique par une forme de fer héminique prépondérante dans la viande rouge, la myoglobine. Toutefois, le lien entre l'oxydation des lipides lors de la digestion et une dysfonction endothéliale restait à établir, tout comme l'aptitude des polyphénols à limiter la formation de produits d'oxydation lipidique athérogènes.

## Résultats

En partenariat avec le LAPEC de l'Université d'Avignon, nous avons conduit une étude sur 12 semaines avec des souris transgéniques ApoE-/- qui présentent une sensibilité accrue au développement de l'athérosclérose. L'ajout d'huile de tournesol ( $\omega$ -6)

à un régime occidental à base de lipides saturés et de viande rouge conduit à la formation dans l'intestin d'un aldéhyde cyto- et génotoxique, le 4-hydroxynonénal. Le 4-HNE augmente également dans le plasma, tout comme le niveau d'oxydation des LDL plasmatiques. Néanmoins, la co-ingestion de purée de pommes Reinette de Flandre ou de l'extrait phénolique correspondant a permis la restauration des différents marqueurs (4-HNE, pression artérielle, LDLox, vasorelaxation aortique *ex vivo*, plaque d'athérome) au niveau observé en absence de lipides  $\omega$ -6, voire à un niveau correspondant à une diète normolipidique.

Même si la protection par les polyphénols pourrait aussi impliquer une action cellulaire des métabolites coliques, ces résultats étayent les données épidémiologiques et sont d'utilité pour conforter les politiques publiques d'incitation à consommer 5 portions de F&L par jour.

## Perspectives

Un modèle *in vitro* de digestion gastrique a été développé et validé sur la pomme et divers polyphénols. Il permettra d'étudier la capacité d'autres fruits et légumes à inhiber l'oxydation lipidique amorcée par le fer héminique lors de la digestion d'un repas occidental, tout comme la bioaccessibilité des composés phénoliques dans un environnement digestif.

## ✓ Concevoir des produits et matériaux bio-sourcés

---



---

La biomasse végétale est une matière première abondante mais récalcitrante. Proposer des outils et des itinéraires technologiques avancés pour transformer cette bioressource en produits fonctionnels sont des défis des chercheurs du département.

**Page 51 :** Étudier les mécanismes de biodégradation des matières récalcitrantes

**Page 57 :** Focus sur des biomatériaux étudiés à TRANSFORM

---



©INRAE - Marie berger

# Une approche multiéchelle pour comprendre la récalcitrance de la biomasse lignocellulosique



## En savoir plus

Leroy A. *et al.*

Evaluating polymer interplay after hot water pretreatment to investigate maize stem internode recalcitrance

Biotechnology for Biofuels . 2021

<https://doi.org/10.1186/s13068-021-02015-8>

## Contacts

Gabriel Paës et Fabienne Guillon

UMR FARE et UR BIA

[gabriel.paes@inrae.fr](mailto:gabriel.paes@inrae.fr)

[fabienne.guillon@inrae.fr](mailto:fabienne.guillon@inrae.fr)



## Contexte

La récalcitrance de la biomasse est une problématique centrale pour favoriser le développement de bioraffineries économiques et durables. En effet, la récalcitrance qui est conférée par la structure et la composition complexe de la lignocellulose, limite la conversion par voie biochimique (prétraitement et saccharification) de nombreuses ressources lignocellulosiques telles que les co-produits de la culture du maïs (tige, feuille). L'application de technologies de prétraitement est l'une des stratégies les plus utilisées pour surmonter la récalcitrance de la biomasse. L'optimisation des technologies de prétraitement nécessite la compréhension de la façon dont la structure de ces polymères pariétaux et leur organisation influencent la récalcitrance et la nature des changements induits par les prétraitements.

Dans ce but, une caractérisation de la mobilité de l'eau à l'échelle de la structure des polymères a été réalisée sur des échantillons de tiges de maïs natifs et prétraitées hydrothermiquement. Pour cela, des techniques complémentaires ont été mises en œuvre, comprenant des analyses compositionnelles, spectrales et RMN.

## Résultats

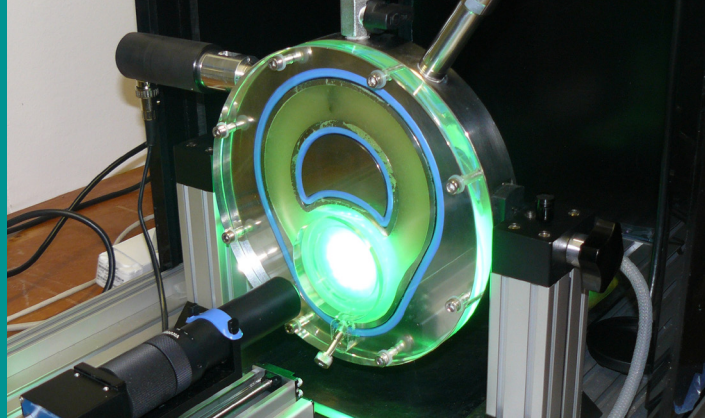
Outre l'élimination des

hémicelluloses (effet attendu), le prétraitement induit une perte en cellulose amorphe et des modifications structurales des lignines. Nos résultats montrent également que l'environnement et l'organisation de la lignine sont des paramètres importants à considérer au même titre que sa teneur pour expliquer la capacité de récalcitrance. Ces changements à l'échelle moléculaire induisent des modifications au sein de l'organisation de la paroi cellulaire, à travers l'augmentation de la porosité et de l'accessibilité à la cellulose. Cela entraîne une redistribution de l'eau ce qui favorise la circulation et l'efficacité des enzymes hydrolytiques. La combinaison de techniques d'analyses de RMN a montré un intérêt certain pour l'étude de l'environnement de la cellulose afin d'expliquer son accessibilité.

## Perspectives

L'élucidation des interactions entre les polymères est la clé pour comprendre la récalcitrance des ressources lignocellulosiques. C'est pourquoi l'utilisation de la même approche multiéchelle sur d'autres biomasses lignocellulosiques permettra d'optimiser les processus de prétraitement et de saccharification et, à moyen terme, de contribuer au développement de nouvelles bioraffineries économiques et durables.





© Marie-Francoise Devaux - Réacteur torique

# Cinétique des changements de l'état physique accompagnant la dégradation chimique de la biomasse lignocellulosique



## En savoir plus

Barron C. *et al.*

Enzymatic degradation of maize shoots: monitoring of chemical and physical changes reveals different saccharification behaviors

Biotechnology for Biofuels . 2021

<https://doi.org/10.1186/s13068-020-01854-1>

## Contacts

Marie-Francoise Devaux, Fabienne Guillon, Loïc Foucat et Cécile Barron

UR BIA et UMR IATE

[marie-francoise.devaux@inrae.fr](mailto:marie-francoise.devaux@inrae.fr)

[fabienne.guillon@inrae.fr](mailto:fabienne.guillon@inrae.fr)

[loic.foucat@inrae.fr](mailto:loic.foucat@inrae.fr)

[cecile.barron@inrae.fr](mailto:cecile.barron@inrae.fr)



## Contexte

La levée de la récalcitrance de la biomasse à la déconstruction enzymatique est un enjeu central pour favoriser le développement des bioraffineries. Les facteurs impliqués dans le phénomène de récalcitrance font encore débat. La prise en compte de l'hétérogénéité de la biomasse en s'intéressant à l'évolution de l'état physique qui accompagne la saccharification, pourrait apporter un éclairage nouveau sur le processus de dégradation.

## Résultats

Un fractionnement voie sèche a été mis en œuvre pour séparer des pailles de maïs, en cinq fractions sur la base de la taille et des propriétés électrostatiques des particules : une fraction «Grossière», deux fractions «Moyennes», et deux fractions «Fines», composée respectivement de particules de diamètre médian autour de 300  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , et inférieure à 100  $\mu\text{m}$ . L'évolution physique (taille et nombre des particules) et la saccharification ont été suivies grâce à un réacteur torique permettant le prélèvement d'hydrolysats et l'acquisition d'images de particules au cours de la dégradation par un cocktail enzymatique commercial.

La saccharification et la diminution du nombre et de la taille des particules sont importantes et rapides dans les deux fractions Fines. A l'opposé, dans la fraction Grossière, le taux

de saccharification est faible et l'état physique évolue peu. Les deux fractions Moyennes présentent des taux de saccharification comparables mais une évolution de l'état physique différente. Pour l'une des fractions moyenne, la réduction du nombre total de particules est similaire à celle obtenue pour les fractions Fines tout en étant moins rapide. Pour la seconde fraction moyenne, la réduction du nombre de particules est plus faible, proche de la fraction Grossière et plus progressive. La faible diminution de la taille des particules pour un taux d'hydrolyse relativement élevé pour les fractions Fines et Moyennes suggère que les enzymes diffusent et agissent au sein des particules. La mise en relation avec les caractéristiques physicochimiques des fractions montre que la saccharification est contrôlée par le volume de pores accessible aux enzymes au sein des particules alors que la teneur en lignine contribue à la préservation de la structure macroscopique des particules.

## Perspectives

L'étape suivante consistera à examiner à l'échelle de la particule le processus de dégradation. L'ajout d'une étape de fractionnement par voie sèche dans un procédé de bioraffinerie pourrait permettre de mieux valoriser la biomasse en diversifiant les utilisations selon la réactivité des fractions.



## Observation à l'échelle de la cellule végétale et tissulaire de l'impact des prétraitements alcalins de la biomasse lignocellulosique



### En savoir plus

Thomas H.L. *et al.*

Alkaline pretreatments for sorghum and miscanthus anaerobic digestion: impacts at cell wall and tissue scales

Bioenergy Research . 2021

<https://doi.org/10.1007/s12155-021-10342-9>

### Partenariat

Projet investissement d'avenir Biomass For the Future (BFF) en collaboration avec l'UMR AGAP-PHIV

### Contact

Hélène Carrère

UR LBE

[helene.carrere@inrae.fr](mailto:helene.carrere@inrae.fr)



### Contexte

Face au fort développement de la méthanisation agricole, de nouveaux substrats tels que les résidus lignocellulosiques, les cultures intermédiaires multi-service (e.g. le sorgho) ou les biomasses pouvant être cultivées sur les terres marginales (e.g. le miscanthus) sont considérés pour la production de biogaz. Or la présence de lignine rend difficile la bioconversion de ces biomasses et des prétraitements sont appliqués pour améliorer les rendements en méthane. Les prétraitements alcalins ont montré leur efficacité, une hypothèse étant leur action sur la lignine.

L'objectif de cette étude réalisée dans le cadre du projet investissement d'avenir Biomass For the Future (BFF) en collaboration avec l'UMR AGAP, était de comprendre les impacts des prétraitements alcalins à l'échelle du tissu et de la cellule végétale.

### Résultats

Nous avons développé un protocole de prétraitement des entrenœuds de sorgho et miscanthus. Les prétraitements sont appliqués sur des coupes d'environ 100 µm d'épaisseur. Ces dernières ont ensuite été colorées avant leur observation par microscope. Les colorations au rouge Congo, spécifique de la cellulose et au phloroglucinol, spécifique de la lignine, ont permis de valider que la coloration au Fasga permet de différencier la lignine et les holocelluloses sur une

même lame. Nous avons ainsi montré que les prétraitements à la soude ou la chaux permettent de dégrader la lignine en fonction de la localisation des tissus. En particulier, ils affectent le parenchyme et, à un moindre degré, le sclérenchyme des deux biomasses. En revanche, l'épiderme n'est pas dégradé. Les prétraitements alcalins ont conduit au démasquage de la cellulose qui devient alors plus accessible pour la dégradation anaérobie et au relâchement des cellules de parenchyme. Ceci permet d'expliquer l'augmentation de la constante cinétique du premier ordre de méthanisation de 162 % pour le sorgho et 546 % pour le miscanthus. En effet, une analyse en composantes principales a montré la corrélation entre cette constante cinétique et le pourcentage de surface des composés holocellulosiques du parenchyme dans la zone interne.

### Perspectives

Outre la progression dans la connaissance des mécanismes des prétraitements alcalins des composés lignocellulosiques pour améliorer les performances de méthanisation ou pour les procédés de bioraffinerie, ces travaux ouvrent des perspectives dans l'étude et le développement de nouveaux prétraitements. En effet, il conviendra de diriger l'action de ces prétraitements vers l'épiderme qui n'est pas dégradé par les traitements alcalins et est récalcitrant à la méthanisation.



© Bastien Bissaro

# Explorer et exploiter la biodiversité fongique pour dégrader les polymères récalcitrants



## En savoir plus

Navarro D. *et al.*

Large scale phenotyping of 1,000 fungal strains for the degradation of non-natural, industrial compounds

Communications Biology . 2021

<https://doi.org/10.1038/s42003-021-02401-w>

## Contacts

Bastien Bissaro et David Navarro

UMR BBF

[bastien.bissaro@inrae.fr](mailto:bastien.bissaro@inrae.fr)

[david.navarro@inrae.fr](mailto:david.navarro@inrae.fr)



## Contexte

Le règne fongique contient une diversité estimée entre 2,2 et 3,8 millions d'espèces. La diversité des modes de vie des champignons, ainsi que les diverses propriétés de leurs hôtes sont les principaux moteurs de l'évolution de leur extraordinaire potentiel biocatalytique. En particulier, les champignons filamenteux décomposeurs de plantes ont la capacité unique de dégrader efficacement la lignocellulose, un biopolymère notoirement récalcitrant. Les stratégies biochimiques sous-jacentes ont inspiré de nombreux processus industriels de valorisation de la biomasse en sucres fermentescibles et autres biomolécules pour les biocarburants de deuxième génération, les bioproduits et les biomatériaux. Compte tenu de l'analogie des défis de bioconversion (ex., cristallinité ou toxicité) communs à ces biopolymères et à certains composés de conception humaine (ex., plastiques ou colorants), les champignons et leurs enzymes représentent un réservoir encore sous-exploré d'outils biologiques à découvrir et exploiter.

## Résultats

Nous présentons la première étude de phénotypage à grande échelle visant à évaluer le potentiel de dégradation de la collection de champignons du CIRM-CF (Centre International de Ressources Microbiennes – Champignons Filamenteux ; [www.cirm-fungi.fr](http://www.cirm-fungi.fr)) sur cinq composés non naturels : deux colorants de l'industrie textile (Reactive Blue 5 et Basic Blue 21), des lignosulfonates de l'industrie de la pâte et du papier, un polyuréthane soluble issu de l'industrie

plastique et la cellulose microcristalline utilisée dans les industries alimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Nous décrivons le phénotypage fonctionnel (croissance et dégradation) de >1000 souches appartenant à 26 ordres, 78 familles et 231 genres différents. Notre étude a permis de (i) cartographier le potentiel biotechnologique des champignons filamenteux, (ii) démontrer que la diversité fonctionnelle peut être observée jusqu'au niveau intra-spécifique (i.e. entre des souches d'une même espèce), et (iii) fournir des lignes directrices pour la sélection de familles/espèces fongiques pour des applications sélectionnées.

## Perspectives

Nous avons mis en évidence que la recherche de nouveaux biocatalyseurs fongiques pour de nouvelles applications biotechnologiques nécessite un criblage sans *a priori* couvrant une grande diversité, tant à différents rangs taxonomiques qu'entre souches d'une même espèce. Dans les années à venir, nous allons continuer la campagne de phénotypage de la collection du CIRM-CF qui ne cesse de croître (aujourd'hui > 3000 souches). Nous pensons que l'exploration de la biodiversité phénotypique préservée par les Centres de Ressources Biologiques afin d'identifier les catalyseurs naturels les plus pertinents, alliée à l'ingénierie moléculaire de ces outils déjà naturellement évolués, est une des clés qui permettra de relever les différents défis de la bioéconomie circulaire du 21ème siècle.



© Jean Weber, INRAE

## Valorisation des déchets agricoles pour obtenir des molécules d'intérêt



### En savoir plus

Vojvodić Cebin A. *et al.*

Valorisation of walnut shell and pea pods as novel sources for the production of xylooligosaccharides

Carbohydrate Polymers . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117932>

### Contact

Estelle Bonnin

UR BIA

[estelle.bonnin@inrae.fr](mailto:estelle.bonnin@inrae.fr)



### Contexte

La valorisation des déchets agricoles est un élément essentiel d'une production végétale et alimentaire durable. Elle vise à réduire l'impact écologique négatif des déchets et à dégager des avantages économiques par la production de produits à valeur ajoutée. Les parties non-consommables des plantes telles que pelures, peaux, coques, enveloppes, gousses, noyaux, tiges, feuilles, marc... représentent des matières premières secondaires facilement disponibles pour la production d'énergie, de matériaux et de produits chimiques, ou comme sources nouvelles et non conventionnelles d'ingrédients fonctionnels.

L'objectif de ce travail était d'évaluer les coques de noix et les gousses de petits pois en tant que sources pour la production de xylooligosaccharides (XOS). Les XOS sont reconnus comme ayant une activité prébiotique. Ce sont en effet des oligosaccharides non digestibles qui sont sélectivement métabolisés par une partie du microbiote humain, dont les bénéfices pour la santé découlent de la production d'acides gras à chaîne courte et de la stimulation de souches probiotiques, telles que les bifidobactéries.

### Résultats

Les hémicelluloses de coques de

noix et de gousses de pois ont été obtenues en combinant différents paramètres de délignification et d'extraction alcaline. Dans les conditions optimales, les fractions solubles contenaient jusqu'à 45 % de xylose, et les insolubles, plus de 75 %. L'analyse des structures de ces polysaccharides montre un xylane très peu ramifié par quelques résidus acides glucuroniques dans les fractions insolubles et des structures plus complexes dans les fractions solubles. Différentes conditions de dégradation par la xylanase GH11 de *Neocallimastix patriciarum* ont été appliquées et ont permis d'atteindre un taux de conversion maximum du xylane de 70 % sur les coques de noix et 90 % sur les gousses de pois. L'analyse des produits d'hydrolyse met en évidence la présence de xylobiose et xylotriose avec une faible concentration d'enzyme, et de xylose et xylobiose avec une concentration d'enzyme plus élevée.

### Perspectives

Considérant que les activités prébiotiques des XOS nécessitent des recherches supplémentaires, le choix des conditions optimales d'hydrolyse dépendra de la contribution de chaque XOS à l'effet prébiotique, de leurs effets synergiques potentiels et du rapport coût-efficacité de l'hydrolyse en lien avec le temps, la quantité de xylanase ajoutée et le taux de conversion du xylane.





© David Pot - Trois idéotypes de sorgho fourrager potentiellement utilisables dans le cadre de la production de biogaz

# Définition d'un idéotype de sorgho pour la production de biométhane



## En savoir plus

Thomas H.L. et al.

Mobilizing sorghum genetic diversity: Biochemical and histological-assisted design of a stem ideotype for biomethane production

GCB-Bioenergy . 2021

<https://doi.org/10.1111/gcbb.12886>

## Partenariat

Projet investissement d'avenir Biomass for the future (BFF) et en collaboration avec les UMR AGAP et SELMET ainsi que des semenciers.

## Contact

Hélène Carrère

UR LBE

[helene.carrere@inrae.fr](mailto:helene.carrere@inrae.fr)



## Contexte

Le sorgho a été identifié comme ressource adaptée à la production d'énergie, notamment le biogaz ou biométhane. Il présente une grande diversité génétique quant à la composition de la biomasse, ce qui constitue un vecteur d'adaptation à diverses chaînes de valeur. Alors que les génotypes commerciaux proposés pour la production de biogaz visent de forts rendements de biomasse à l'hectare, une meilleure compréhension des impacts de la composition et de la structure de la tige sur le potentiel méthane pourrait guider vers la définition d'un idéotype qui maximiserait le rendement en biométhane.

Dans le cadre du projet investissement d'avenir Biomass for the future (BFF) et en collaboration avec les UMR AGAP et Selmec ainsi que des semenciers, un panel de 57 génotypes représentant une grande partie de variabilité de composition disponible chez *Sorghum bicolor ssp bicolor* a été caractérisé sur cinq sites de culture. Le développement d'un phénotypage histologique de la tige a permis de décrire la diversité génétique de l'anatomie de l'entre-nœud et la répartition des composés clés de la paroi cellulaire.

## Résultats

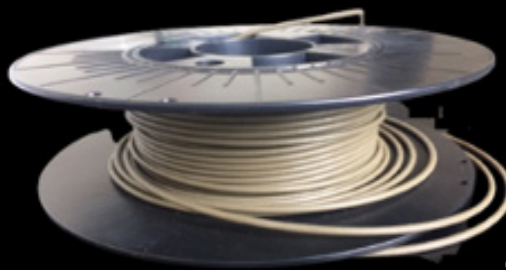
Une héritabilité modérée à élevée a été observée pour la composition

biochimique des tiges ainsi qu'une forte héritabilité associée à une variabilité génétique modérée pour le potentiel biométhane. Ces résultats ouvrent la voie à des gains génétiques significatifs pour le futur. Les analyses des corrélations génétiques et de regroupements hiérarchiques ont permis d'identifier la teneur en sucres solubles comme premier moteur de la variabilité génétique du potentiel biométhane. Les programmes de sélection devront donc viser de fortes teneurs en sucres solubles mais devront également considérer les composants de la paroi cellulaire et leur localisation. En particulier, de faibles teneurs en lignine et de fortes teneurs en cellulose devront être ciblées tout en conservant une bonne résistance à la verse.

## Perspectives

Cette définition d'idéotype devrait conduire à des gains génétiques à moyen et long terme quant au potentiel biométhane du sorgho. Ces futures améliorations, associées aux atouts du sorgho en termes d'adaptation au stress environnemental, laissent supposer une utilisation accrue dans les systèmes de méthanisation agricole. En outre, cette espèce jouera probablement un rôle clé pour optimiser la durabilité économique et environnementale des agrosystèmes qui sont actuellement confrontés aux effets du changement climatique.





©Claire Mayer - Poudre d'anas de lin fluorescent / filament renforcé avec les anas de lin fluorescents / objet (libellule) imprimée en 3D

## Matériaux intelligents aux propriétés fluorescentes conçus par impression 3D



### En savoir plus

Mayer-Laigle C. *et al.*

Flax shives-PBAT processing into 3D printed fluorescent materials with potential sensor functionalities

Industrial Crops and Products . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113482>

### Contacts

Gabriel Paës et Claire Mayer

UMR FARE et UMR IATE

[gabriel.paes@inrae.fr](mailto:gabriel.paes@inrae.fr)

[claire.mayer@inrae.fr](mailto:claire.mayer@inrae.fr)



### Contexte

L'utilisation rationnelle des ressources naturelles, la réduction des pertes post-récolte et la diminution de la quantité de matières plastiques sont des leviers pour diminuer l'impact environnemental des activités humaines et favoriser la transition vers une bioéconomie soutenable. La fabrication additive de matériaux biosourcés tels que des composites renforcés en fibres végétales présente une alternative pertinente aux procédés de mise en forme classiques. Ces techniques permettent de concevoir de nouveaux designs fonctionnels (tel des capteurs) difficiles à réaliser par des approches traditionnelles (par moulage ou soustractives) et contribuent fortement à la réduction des déchets plastiques. Ces approches étant encore récentes, de nombreux défis technologiques restent à relever pour contrôler les fonctionnalités et la durabilité des produits obtenus à partir de matériaux biosourcés.

### Résultats

Les anas de lin sont des fragments de paille récupérés après le teillage et sont encore peu valorisés. Après broyage, ces anas ont été greffés avec un fluorophore sensible au pH selon une réaction chimique simple et peu onéreuse. Les anas greffés ont ensuite été formulés avec une matrice de poly-(butylène téréphtalate) puis extrudés pour former un filament utilisé pour réaliser des impressions

3D. Une caractérisation microstructurale approfondie a démontré que les particules étaient distribuées de manière homogène dans le matériau imprimé en 3D. Malgré la teneur relativement faible en anas de lin fluorescents dans le matériau final (1% en masse) et les étapes successives de chauffage (pendant l'extrusion et l'impression 3D), une forte émission de fluorescence a pu être mesurée. Le matériau plongé dans des tampons de pH variable a montré une sensibilité de la fluorescence au pH avec toutefois des variations d'intensité relativement faibles, très probablement en lien avec les propriétés hydrophobes de la matrice polymérique et une faible porosité ouverte ; la faible porosité ouverte du matériau contenant les anas de lin fluorescents pouvant limiter la pénétration des liquides par imbibition.

### Perspectives

Les molécules fluorescentes peuvent répondre à de nombreux stimuli (mécanique, thermiques, chimiques) et l'impression 3D permet l'incorporation de tels capteurs dans des matériaux aux formes complexes. Le design de la pièce, le processus d'impression et le choix du polymère sont des éléments clés pour accroître la réactivité des matériaux. Ces travaux se poursuivent dans le cadre du projet SMARTPOP (EU- MSCA- Grant number 893040) en collaboration avec l'institut SCION en Nouvelle-Zélande.





© Jessica Vanier, FARE - Réaction de glycosylation enzymatique à partir de son de blé

## Valorisation du son en molécules tensioactives



### En savoir plus

Jocquel C. *et al.*

An integrated enzymatic approach to produce pentyl xylosides and glucose/xylose laurate esters from wheat bran

Frontiers in Bioengineering and Biotechnology . 2021

<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.647442>

### Partenariat

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet Interreg Fr-W-FI ValBran porté par FARE:

- FARE-chaire AFERE
- Institut de Chimie Moléculaire de Reims
- Université de Picardie Jules Verne
- Université de Liège
- VITO
- VALBIOM
- INAGRO
- IAR
- GREENWIN
- CATALISTI

### Contact

Caroline Rémond

UMR FARE

[caroline.remond@univ-reims.fr](mailto:caroline.remond@univ-reims.fr)



### Contexte

Les molécules tensio-actives biosourcées suscitent un fort engouement puisqu'elles sont biodégradables, ne sont ni toxiques pour l'homme ni pour l'environnement et sont produites à partir de carbone renouvelable. Les alkyl glycosides et les esters de sucre sont des tensioactifs biosourcés non ioniques d'intérêt pour l'agroalimentaire et les cosmétiques. Actuellement, ces tensio-actifs sont produits industriellement par synthèse chimique consommatrice d'énergie et pouvant générer la production de molécules indésirables. Dans ce contexte, la chaire AFERE et l'UMR FARE ont développé un procédé biocatalytique innovant pour valoriser le son de blé en alkyl glycosides et esters de sucres.

### Résultats

Une approche intégrée combinant des réactions biocatalytiques a été développée à l'aide d'enzymes commerciales (cellulase, xylanase, lipase) pour fractionner les polysaccharides du son de blé et produire à la fois des pentyl xylosides et des esters de laurate de D-glucose et de D-xylose. Dans les conditions optimales, la production totale des deux familles de tensio-actifs a été estimée à 150 kg par tonne de son de blé. Le procédé de synthèse de ces tensioactifs présente

plusieurs niveaux d'innovation. La première innovation a été de valoriser conjointement les xylanes et la cellulose d'un même lot de son de blé n'ayant subi aucun prétraitement pour produire les divers tensio-actifs. Le deuxième niveau d'innovation repose sur le développement d'un procédé biocatalytique mené dans des conditions réactionnelles douces en comparaison aux procédés de synthèse chimiques classiquement déployés pour la synthèse industrielle de ces tensio-actifs.

Le procédé a été validé à l'échelle TRL 3-4 démontrant la faisabilité technologique pour la conversion de plusieurs kilos de son en tensio-actifs biosourcés.

### Perspectives

Les perspectives de cette étude visent l'optimisation du procédé développé avec notamment le recyclage des enzymes et des solvants afin de limiter l'impact environnemental et limiter le coût du procédé. Un changement d'échelle est également nécessaire pour tester la viabilité techno-économique du procédé biocatalytique de production des tensio-actifs ciblés.





© Philippe Evon - UCAI

# Inventaire du cycle de vie d'un textile technique en fibres de lin



## En savoir plus

Gomez-Campos A. *et al.*

Flax fiber for technical textile: A life cycle inventory

Journal of Cleaner Production . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125177>

## Partenariat

Projet ADEME « BOPA », en partenariat avec:

- PME VESO Concept®
- Institut Clément Ader
- CIRIMAT.

## Contact

Caroline Sablayrolles

UMR CAI

[caroline.sablayrolles@toulouse-inp.fr](mailto:caroline.sablayrolles@toulouse-inp.fr)



## Contexte

La fibre de lin apparaît comme une matière première intéressante pour déployer une bioéconomie durable. La performance environnementale des composites renforcés de fibres de lin a été évaluée dans des études d'analyse de cycle de vie précédentes. Cependant, ces études ne se concentrent pas sur la production du textile technique en fibre de lin lui-même et, par conséquent, manquent d'informations détaillées sur l'inventaire du cycle de vie. De plus, les co-produits sont traités en utilisant des techniques d'allocation économique et leur devenir est peu discuté ou précisé.

Le présent travail vise à combler ces lacunes et à fournir des données pour les ACV futures sur la production et la transformation de la fibre de lin. L'étude se concentre sur les impacts de la production d'un matériau de renfort biosourcé (textile technique) dans une perspective d'expansion du système.

## Résultats

Un inventaire détaillé du cycle de vie de la production et de la transformation de la fibre de lin a été établi, et la performance environnementale d'un textile technique de lin a été évaluée par une ACV du berceau à la porte. Le devenir des co-produits a été documenté et il a été démontré que définir correctement les co-produits et leur devenir devient un facteur aussi crucial que de disposer

d'un inventaire complet et précis du cycle de vie.

Ce travail a permis d'améliorer les ACV existantes sur la production de fibres de lin par l'inclusion des émissions issues du processus de *rouissage*, la valorisation des co-produits par expansion du système, et l'analyse d'un plus grand nombre de catégories d'impact.

Les résultats montrent que les activités agricoles et la production d'électricité (provenant de la *culture du lin* et des processus de *filature* et de *tissage*) sont les principaux responsables de la performance environnementale négative d'un textile technique en lin ; la contribution de l'impact généré par le changement d'affectation des sols est faible en comparaison. De manière très spécifique à ce cas d'étude, l'analyse de sensibilité a prouvé qu'une production entièrement française était préférable d'un point de vue environnemental.

## Perspectives

Dans le but de favoriser l'incorporation de matériaux biosourcés pour la mise en œuvre d'une bioéconomie, les travaux futurs devraient se concentrer sur l'optimisation des processus de production de matériaux biosourcés pour augmenter leur compétitivité sur le marché.





© UR BIA-INRAE

## De l'étude de la peau des fruits à la genèse de nouveaux matériaux élastomères ...



### En savoir plus

Marc M. *et al.*

Bioinspired co-polyesters of hydroxy-fatty acids extracted from tomato peel agro-wastes and glycerol with tunable mechanical, thermal and barrier properties

Industrial Crops and Products . 2021

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113718>

### Partenariat

- INRAE (TRANSFORM BIA, IATE, UCAI),
- GEPEA, ITQB Lisbonne

### Valorisation

Brevet

Bakan, B., Marc, M., Lourdin, D., Leroy, E., C Lopez, Valentin, R., Moulounghi, Z., Marion, D. Procédé de préparation d'un élastomère à partir d'un acide gras hydroxylé et élastomères obtenus à partir d'un tel procédé. Réf. 1906915

### Contacts

Bénédicte Bakan et Denis Lourdin

UR BIA

[benedicte.bakan@inrae.fr](mailto:benedicte.bakan@inrae.fr)

[denis.lourdin@inrae.fr](mailto:denis.lourdin@inrae.fr)



### Contexte

La cuticule recouvre la surface de tous les végétaux et remplit des fonctions biologiques cruciales pour la plante (résistance à la déshydratation, adaptation aux stress climatiques et biologiques). Cette cuticule est également une source de molécules originales pour l'instant sous-valorisées et nous avons développé un procédé de bioraffinerie à cet effet.

Par ailleurs, le glycérol est un autre co-produit de l'agro-industrie, issu de la production d'huiles ou de biodiesel. L'étude de la structure fine du polyester de cutine dans des cuticules végétales résistantes à la craquelure, nous a conduit à mimer ce polyester par un procédé de polycondensation sans solvant et sans catalyseur.

En s'inspirant du polymère naturel de la cuticule des plantes, nous cherchons à produire des élastomères hydrophobes à partir de synthons extraits de déchets de l'agro-industrie (i.e les monomères de cuticule et glycérol).

### Résultats

En modifiant le ratio de ces deux synthons, il est possible de moduler le degré de réticulation des polyesters et leurs propriétés fonctionnelles telles que leurs propriétés thermomécaniques et leur propriétés barrière (perméabilité à l'oxygène, ou

adhésion de bactéries pathogènes). Dans les co-polyesters formés, l'augmentation de la quantité de glycérol estérifié (jusqu'à 6 %) a induit une diminution du taux de réticulation des polyesters et la formation de domaines cristallins. Ces modifications structurales sont directement corrélées à i) une augmentation de l'élasticité caoutchoutique (à plus de 200 % d'extensibilité), ii) une réduction de la perméabilité à l'oxygène et iii) une réduction de l'adhésion des bactéries.

### Perspectives

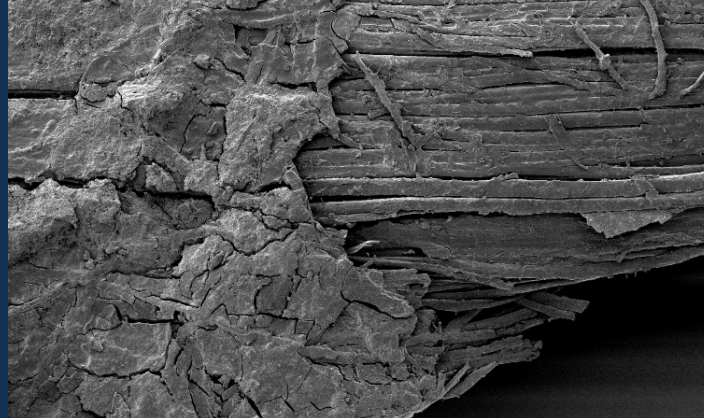
Ces travaux ouvrent des perspectives à l'interface de plusieurs champs thématiques tels

i) la définition de procédés de bioraffinerie pour la valorisation de co-produits de l'agro-industrie (valorisation de la biomasse, bioéconomie)

ii) le design de nouveaux matériaux biosourcés et bio-inspirés

iii) de nouvelles hypothèses d'adaptation des plantes aux modifications de leur environnement.





©Anthony MAGUERESSE et Alessia MELELLI  
- Fibres de lin de tableau recouvertes des couches de différents matériaux (colle, plâtre, peinture...) vues au microscope électronique à balayage

# Des fibres anciennes d'objets d'art nous aident à concevoir les écomatériaux du futur, focus sur la durabilité



## En savoir plus

Melelli A. *et al.*

Lessons on textile history and fibre durability from a 4,000-year-old Egyptian flax yarn

Nature Plants . 2021

<https://doi.org/10.1038/s41477-021-00998-8>

## Partenariat

- Institut de recherche Henri Dupuy de Lôme (IRDL, CNRS/ENSTA Bretagne/ Université Bretagne Occidentale/ Université Bretagne-Sud)
- École de science et technologie (SST) de l'université de Camerino (Italie)
- Laboratoire de résonance magnétique « Capitani-Segre » du CNR (Italie)
- Laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC, CNRS/Université de Montpellier)
- Synchrotron SOLEIL
- UR BIA

## Contact

Johnny Beaugrand

UR BIA

[johnny.beaugrand@inrae.fr](mailto:johnny.beaugrand@inrae.fr)



## Contexte

Un matériel organique comme les fibres de lin, composé de carbone biogénique renouvelable, est souvent considéré de faible longévité, mais peut perdurer pendant des siècles ou des millénaires en s'adaptant d'évolutions de structure et biochimiques. Le lin peut être durable, à la fois au sens environnemental et au sens service d'un matériau. Pour mieux comprendre les secrets de sa durabilité et de ses limites, une étude a été conduite sur des fils de lin extraits de quatre tableaux datés entre le XVII<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle. Nous avons complété l'étude de ces échantillons multicentenaires par l'apport de fibres de linge mortuaire d'Égypte, datées de 4000 ans. Ces deux études complémentaires identifient comment l'environnement crée des défauts dans les structures, en complément du processus d'extraction des fibres naturelles, et joue un rôle essentiel sur leur conservation et leurs performances. Ces fouilles ont mis à jour des pistes pour créer les écomatériaux qui répondront aux enjeux du présent, les plus durables possibles.

## Résultats

Nos résultats montrent en premier lieu, et de façon contre intuitive, que les fibres extraites des tableaux datées de quelques centaines d'années ont subi une modification plus marquée que les fibres millénaires d'Égypte. Un raidissement général a été mis en évidence dans presque toutes les fibres anciennes par rapport à un fil

de lin moderne de référence, mais les fils des tableaux ont aussi montré des modifications structurales à la fois sur les défauts structuraux déjà identifiés comme points faibles par l'étude du fil Égyptien, mais également dues à d'autres problématiques. L'oxydation et l'hydrolyse fragmentent les fibres en petits morceaux, ou l'attaque des champignons qui plus encore que les autres facteurs contribuent à la dégradation, à travers la formation de 'tunnels' et de fractures dans les fibres.

Malgré les effets du vieillissement, la microscopie biphoton a mis en évidence une bonne stabilité de l'organisation de la cellulose, une molécule dont le lin est composé à 80 % ; la RMN en état solide et la spectroscopie à l'infrarouge ont permis d'avoir des informations complémentaires sur l'évolution de la biochimie et structure des fibres.

L'équipe interdisciplinaire a identifié le rôle majeur de l'eau qui pénètre dans ces matériaux et les endommage par le biais des défauts structuraux qu'ils contiennent.

## Perspectives

Ces informations offrent des pistes pour mieux comprendre le vieillissement des fibres de lin modernes, prisées par exemple pour concevoir des matériaux composites pour les industries automobiles, nautiques et aéronautiques. Les travaux ne s'arrêtent pas aujourd'hui, puisque fort de ces résultats aux interfaces de plusieurs disciplines, un nouveau projet 'ANUBIS' démarre, financé par l'ANR.

# Contactez nos unités



## Auvergne - Rhône-Alpes

CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (USC CROC)  
UNIV CLERMONT AUVERGNE - FACULTE CHIRURGIE DENTAIRE  
2 rue de Braga Faculté de Chirurgie Dentaire  
63100 CLERMONT-FERRAND  
martine.hennequin@uca.fr

### QUALITE DES PRODUITS ANIMAUX (UR QUAPA)

INRAE Site de Theix  
63122 SAINT-GENÈS-CHAMPANELLE  
+33 (0)4 73 62 41 90  
quapa-ara@inrae.fr

### REDUIRE, VALORISER, REUTILISER LES RESSOURCES DES EAUX RESIDUAIRES (UR REVERSAAL) &

INRAE Site VILLEURBANNE - LA DOUA  
5 rue de la Doua CS 20244  
69625 VILLEURBANNE Cedex  
+33 (0)4 72 20 89 04  
jean-marc.choubert@inrae.fr

## Bourgogne - Franche Comté

### CENTRE DES SCIENCES DU GOUT ET DE L'ALIMENTATION (UMR CSGA) \*

AgroSup Dijon-CNRS-INRAE-Université de Bourgogne  
21065 DIJON Cedex  
+33 (0)3 80 68 16 23  
dir.csga@inrae.fr

### TECHNOLOGIE ET ANALYSES LAITIÈRES (UR TAL)

INRAE - 39801 POLIGNY Cedex 1  
+33 (0)3 63 57 20 00  
solange.buchin@inrae.fr

## Bretagne - Normandie

OPTIMISATION DES PROCÉDES EN AGRICULTURE, AGROALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT (UR OPAALE)  
INRAE RENNES - BEAUREGARD  
17 avenue de Cucillé CS 64427 35044 RENNES cedex  
+33 (0)2 23 48 21 55  
anne.tremier@inrae.fr

### SCIENCE ET TECHNOLOGIE DU LAIT ET DE L'ŒUF (UMR STLO) \*

INRAE - AgroCampus Ouest  
35042 RENNES Cedex  
+33 (0)2 23 48 53 22  
yves.Le-Loir@inrae.fr

## Grand-Est

FRACTIONNEMENT DES AGRO-RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT (UMR FARE) #

INRAE - Université de Reims Champagne Ardenne - Centre de

recherche en environnement et agronomie  
51686 REIMS CEDEX 2  
33 (0)3 26 77 35 92  
gabriel.paes@inrae.fr

## Hauts-De-France

### UNITE MATERIAUX ET TRANSFORMATIONS (UMR UMET)

CNRS - Université de Lille 1 - Ecole nationale supérieure de Chimie - INRAE  
59651 VILLENEUVE-D'ASCQ Cedex  
33 (0)3 20 43 54 00  
patrice.woisel@ensc-lille.fr

## Ile-de-France

### INSTITUT JEAN-PIERRE BOURGIN (UMR IJPB) #

INRAE - AgroParisTech  
78026 VERSAILLES Cedex  
+33 (0)1 30 83 30 00  
ijpb@inrae.fr

### FOOD AND BIOPRODUCT ENGINEERING (UMR SAYFOOD)

AgroParisTech - INRAE  
91744 MASSY Cedex  
+33 (0)1 69 93 50 26  
catherine.Bonazzi@agroparistech.fr

### GENIE DES PROCÉDES FRIGORIFIQUES POUR LA SECURITE ALIMENTAIRE ET L'ENVIRONNEMENT (UR FRISE)

INRAE Site ANTONY  
1 rue Pierre Gilles de Gennes CS 10030 92761 ANTONY cedex  
+33(0)1 40 96 60 21  
anthony.delahaye@inrae.fr

### PROCÉDES BIOTECHNOLOGIQUES AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT (UR PROSE)

INRAE Site ANTONY  
1 rue Pierre Gilles de Gennes CS 10030 92761 ANTONY cedex  
+33(0)1 40 96 60 40  
theodore.bouchez@inrae.fr

## Nouvelle Aquitaine

### ŒNOLOGIE (UMR Œ)

INRAE - ISVV  
Faculté d'Œnologie  
33882 Villenave d'Ornon  
+33 (0)5 57 57 58 58  
patrick.lucas@u-bordeaux.fr



# Contactez nos unités



## INSTITUT DE MECANIQUE ET INGENIERIE DE BORDEAUX (USC I2M)

INRAE – CNRS – Université Bordeaux  
Campus Talence, 33405 Talence  
+33 (0)5 40 00 28 47  
thierry.palin-luc@ensam.eu

## Occitanie Pyrénées-Méditerranée

### INGENIERIE DES AGROPOLYMERES ET TECHNOLOGIES EMERGENTES (UMR IATE) #

INRAE – Montpellier SupAgro – CIRAD – Université Montpellier  
34060 MONTPELLIER Cedex 1  
+33 (0)4 99 61 35 43  
christian.sanchez@inrae.fr

### SCIENCES POUR L'AGROLOGIE (UMR SPO)

INRAE – Montpellier SupAgro – Université Montpellier  
34060 MONTPELLIER Cedex 1  
+33 (0)4 99 61 22 41  
fabienne.remize@inrae.fr

### LABORATOIRE DE BIOTECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT (UR LBE) #

INRAE  
avenue des Étangs 11100 NARBONNE  
+33 (0)4 68 42 51 51  
nicolas.bernet@inrae.fr

### PECH ROUGE UNITE EXPERIMENTALE (UE PR)

INRAE – 11430 GRUISSAN  
+33 (0)4 68 49 44 00  
nicolas.saurin@inrae.fr

### CHIMIE AGRO-INDUSTRIELLE (UMR CAI)

INRAE – INPT – ENSIACET  
31030 TOULOUSE Cedex 04  
+33 (0)5 34 32 35 00  
direction.lca@ensiacet.fr

### TOULOUSE BIOTECHNOLOGY INSTITUTE (UMR TBI) #

INRAE – INSA – CNRS  
31077 TOULOUSE CEDEX 4  
+33 (0)5 61 55 94 01  
direction\_tbi@insa-toulouse.fr

### TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (UMS TWB) #

31520 RAMONVILLE SAINT-AGNE  
+33 (0)5 61 28 57 80  
twb@inrae.fr

## Pays de la Loire

### BIOPOLYMERES, INTERACTIONS ET ASSEMBLAGES (UR BIA)

INRAE – 44316 NANTES Cedex 03  
+33 (0)2 40 67 50 31

### Equipe PRP : INRAE – 35653 LE RHEU Cedex

+33 (0)2 23 48 52 16  
biadir-nantes@inrae.fr

### STATISTIQUES, SENSOMETRIE ET CHIMIOMETRIE (USC StatSC)

INRAE – Oniris  
44322 NANTES Cedex 3  
+33 (0)2 51 78 54 50  
evelyne.Vigneau@oniris-nantes.fr

### GENIE DES PROCÉDÉS ENVIRONNEMENT – AGROALIMENTAIRE (USC GEPEA)

INRAE – Oniris – Université de Nantes  
44322 NANTES Cedex 3  
+33 (0)2 51 78 54 27  
jeremy.pruvost@univ-nantes.fr

## Provence - Alpes - Côte d'Azur

### BIODIVERSITE ET BIOTECHNOLOGIE FONGIQUES (UMR BBF) #

INRAE – Aix-Marseille Université – Faculté des Sciences  
13288 MARSEILLE Cedex 09  
+33 (0)4 91 82 86 00  
marie-noelle.rosso@univ-amu.fr

### SECURITE ET QUALITE DES PRODUITS D'ORIGINE VEGETALE (UMR SQPOV) \*

INRAE – Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse – Domaine Saint-Paul  
84914 AVIGNON Cedex 9  
+33 (0)4 32 72 25 00  
frederic.carlin@inrae.fr

### ARCHITECTURE ET FONCTION DES MACROMOLECULES BIOLOGIQUES (USC AFMB)

INRAE – CNRS – Aix-Marseille Université  
13288 MARSEILLE Cedex 09  
+33 (0)4 91 82 55 60  
secretariat@afmb.univ-mrs.fr





INRAE - Département TRANSFORM  
3 impasse Yvette Cauchois  
CS 71627  
44316 Nantes Cedex 03  
Tél. : +33 1 (0)2 40 67 51 45

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/en/divisions/transform>

**Institut national de recherche pour  
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

