



© Barbara Gouble - UMR SQPOV

INRAE



Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2026

Département aliments, produits biosourcés et déchets
TRANSFORM

MENTIONS LEGALES

Editeur : Johnny Beaugrand, Chef de département

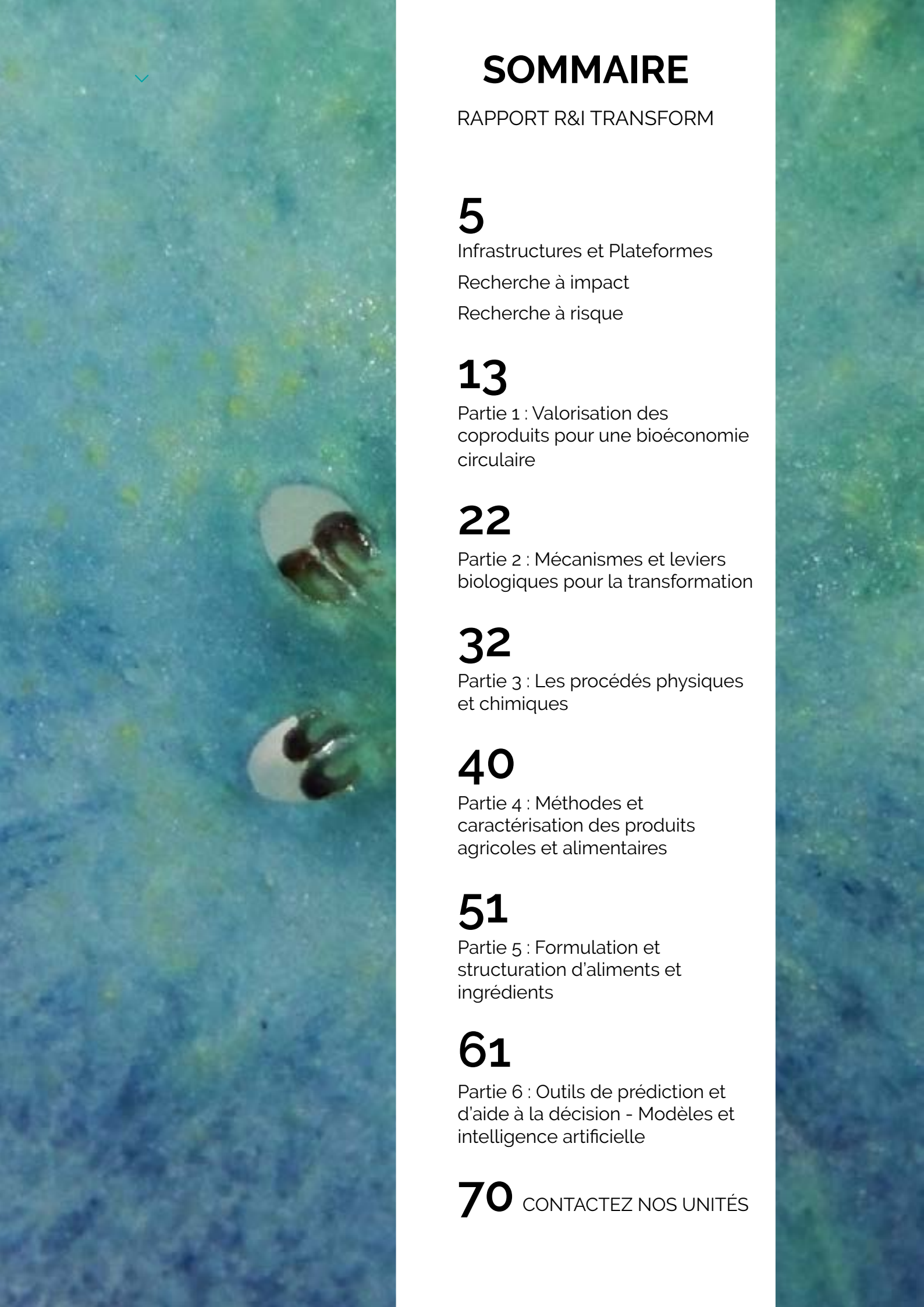
Comité éditorial : Carole Tournier, Olivier Tranquet, Catherine Garnier, Renaud Escudié, Mathieu Schwartz, Maïa Meurillon, Yassin Refahi, Carole Antoine-Assor, Rachel Boutrou, Laurence Fourmaison, Mélanie Delclos et Claire Bourlieu-Lacanal.

Design : Mélanie Delclos

*Beaugrand J., et al (2026). Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2026
Département Aliments, produits biosourcés et déchets. INRAE*

© INRAE - Photos : médiathèque INRAE, Adobe Stock, Pixabay,
photo de couverture : © Barbara Gouble, UMR SQPOV, Avignon





SOMMAIRE

RAPPORT R&I TRANSFORM

5

Infrastructures et Plateformes

Recherche à impact

Recherche à risque

13

Partie 1 : Valorisation des coproduits pour une bioéconomie circulaire

22

Partie 2 : Mécanismes et leviers biologiques pour la transformation

32

Partie 3 : Les procédés physiques et chimiques

40

Partie 4 : Méthodes et caractérisation des produits agricoles et alimentaires

51

Partie 5 : Formulation et structuration d'aliments et ingrédients

61

Partie 6 : Outils de prédiction et d'aide à la décision - Modèles et intelligence artificielle

70

CONTACTEZ NOS UNITÉS



Bienvenue dans ce nouveau rapport d'activité du département TRANSFORM !

Année après année, nos collectifs se renouvellent, nos outils se renforcent tandis que nos ambitions continuent de s'élargir : un équilibre perpétuel. Pour autant, notre cap demeure inchangé : comprendre, innover et transformer pour accompagner les transitions alimentaires, environnementales et économiques auxquelles nos sociétés sont confrontées.

Ce rapport 2026 illustre la diversité et la richesse des recherches menées dans nos unités. Il témoigne d'une science profondément ancrée dans les enjeux contemporains : valorisation des coproduits et des biomasses, développement d'une bioéconomie circulaire, maîtrise et adaptation des procédés de transformation, conception d'aliments plus durables et socialement acceptables, mobilisation des outils numériques et de l'intelligence artificielle au service de la connaissance et de la décision.

Au fil des pages, vous découvrirez des travaux qui explorent de nouvelles voies de valorisation des bioressources, repoussent les limites des biotechnologies et des procédés, et contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes biologiques, physiques et chimiques qui gouvernent la transformation des matières premières, tout au long des cycles. De l'échelle moléculaire à celle des systèmes industriels, nos recherches associent excellence scientifique et recherche de solutions concrètes pour les filières et, je l'espère, pour la société.

Vous le verrez, cette édition met en lumière deux dimensions complémentaires qui caractérisent aujourd'hui l'identité scientifique de TRANSFORM. La première est celle de la recherche à impact, capable de produire des outils, des méthodes et des solutions mobilisables par les acteurs socio-économiques pour accompagner les transitions. La seconde est celle de la recherche à risque et en rupture, indispensable pour ouvrir de nouveaux horizons scientifiques et préparer les innovations de demain. Les succès obtenus dans le cadre du programme EXPLOR'AE ou encore au niveau européen illustrent cette capacité à conjuguer créativité scientifique, audace et excellence.

Cette dynamique s'appuie sur des infrastructures et des plateformes de recherche de premier plan, fruits d'années de construction. Le renouvellement des infrastructures CALIS et IBISBA, la reconnaissance croissante d'IBISBA à l'échelle européenne et le développement continu de nos dispositifs collectifs renforcent notre capacité à conduire des recherches ambitieuses, à faire émerger l'innovation et à favoriser les collaborations nationales et internationales.

Plus que jamais, les défis auxquels nous faisons face nécessitent des choix. C'est dans cet esprit que les femmes et les hommes de TRANSFORM, avec tous nos partenaires dans, mais aussi au-delà de nos unités, poursuivent leur engagement quotidien : produire des connaissances, imaginer de nouvelles solutions et contribuer, par la science, à construire des systèmes agri-alimentaires et matériaux biosourcés plus durables. Je vous souhaite une excellente lecture et remercie l'ensemble des personnels, partenaires et soutiens qui contribuent à cette dynamique collective.

Johnny Beaugrand
Chef de Département TRANSFORM



Infrastructures et Plateformes de recherche

Les outils collectifs et infrastructures de recherche sont au cœur d'enjeux majeurs, leur mobilisation étant devenue, dans la plupart des disciplines, un facteur déterminant de compétitivité scientifique et de rayonnement international.

Au niveau de TRANSFORM, les dispositifs collectifs mobilisent 20 % de nos effectifs. Ces outils, répartis sur tout le territoire (cf cartographie page 6), sont de trois grands types :

- i) des plateformes analytiques,
- ii) des instruments et dispositifs expérimentaux en biotechnologies et (bio)procédés,
- iii) des collections de matériel (micro)biologique.

Le département pilote sept entités reconnues par INRAE comme des ISC¹ et émerge dans cinq infrastructures de la feuille de route du MESRE².

TRANSFORM est en particulier acteur majeur de deux infrastructures de recherche d'excellence dans les domaines de la biotechnologie et de l'alimentation : respectivement CALIS et IBISBA.

En outre, TRANSFORM est porteur d'une Unité expérimentale en viticulture-œnologie (Pech Rouge) et est fortement impliqué dans les démonstrateurs TWB et Ferment du Futur.

À ces infrastructures propres s'ajoute SOLEIL, grand instrument exploité par le CNRS et le CEA, qui permet d'accéder – notamment pour TRANSFORM – à plusieurs lignes synchrotron dédiées aux caractérisations structurales de la matière.

L'ensemble de ces dispositifs confère au département les moyens et expertises pour mener des études ambitieuses et aborder :

- (i) des analyses multi-échelles de nos systèmes d'étude,
- (ii) la réalisation de prototypes et la montée en TRL de nos concepts de procédés,
- (iii) la traduction des connaissances nouvelles en innovations, en les portant jusqu'au transfert vers la sphère socio-économique.

Actualités marquantes 2025 de TRANSFORM en matière d'infrastructures

- Le renouvellement d'inscription sur la feuille de route du Ministère des deux infrastructures CALIS et IBISBA-FR (déclinaison d'IBISBA à l'échelle nationale).
- L'élargissement de CALIS, intégrant plusieurs nouveaux dispositifs de TRANSFORM : la plateforme FROMEX (UMR PAM), le restaurant expérimental et la halle technologique de l'UMR SayFood, l'IRM fonctionnelle de la plateforme AgroScans (UR OPAAL).
- Le statut de « landmark », première étape vers la reconnaissance en tant qu'ESFRI, accordé à IBISBA-EU (déclinaison d'IBISBA à l'échelle européenne).
- Le renouvellement du statut d'ISC pour six plateformes TRANSFORM et la nouvelle labellisation de la PF Polyphénols (UMR SPO), portant à sept les ISC du département¹.
- L'amorce d'une structuration de trois dispositifs de transformation laitière et fromagère³ au sein « d'INFRAE ». L'objectif est d'accroître la visibilité, d'enrichir l'offre de services et de renforcer la dynamique de projets communs entre ces trois entités, avec une perspective de labellisation ISC d'INFRAE à moyen terme.

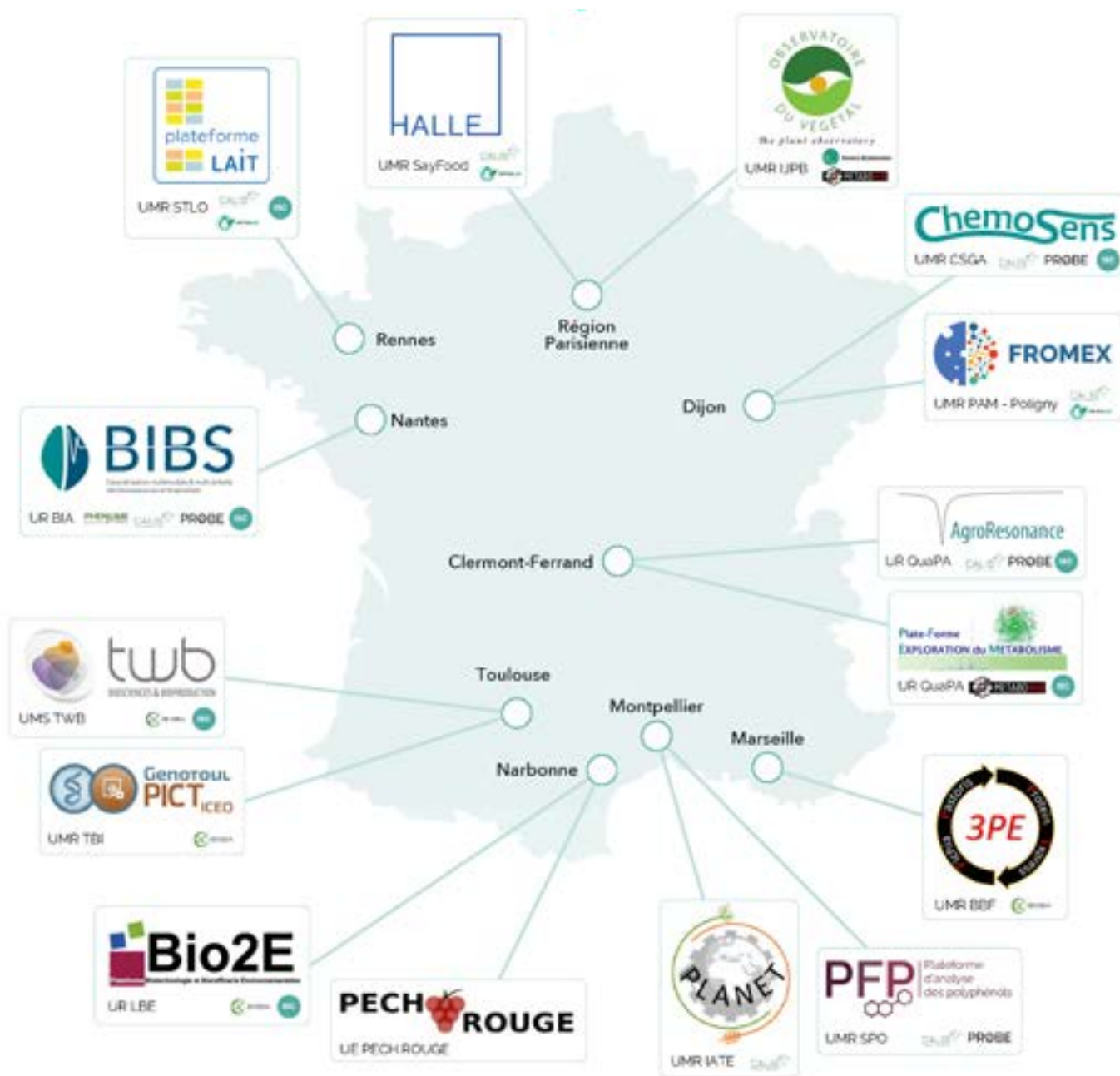
¹ TRANSFORM est acteur majeur de sept ISC : BIBS (UR BIA), AgroResonance et PFEM-cp (UR QuaPA), ChemoSens (UMR CSGA), PF Polyphénols (UMR SPO), PF Lait (UMR STLO), Bio2E (UR LBE)

² CALIS, IBISBA, France Life Imaging, MetaboHub, Phenome

³ PF Lait (UMR STLO), FROMEX (UMR PAM, Poligny) et halle de l'UMRF (Aurillac, département MICA)



Nos infrastructures et plateformes scientifiques



Infrastructures de recherche distribuées



Retrouvez toutes les informations sur nos infrastructures dans la cartographie interactive





Recherche à impact - Les fiches solutions

INRAE, par ses travaux de recherche fondamentale et appliquée, produit des connaissances scientifiques et technologiques qui sont à la base du développement d'innovations. INRAE a ainsi vocation à développer et expérimenter des solutions concrètes, en levant des verrous scientifiques et techniques identifiés avec les filières pour atteindre les objectifs de développement durable.

Pour le Département TRANSFORM, il s'agit plus spécifiquement d'innovations pour des procédés, aliments et matériaux soutenant des régimes plus sains et durables et le développement d'une bioéconomie circulaire.

Retrouvez, ci-dessous, une sélection de huit fiches qui donne un aperçu de certaines démarches matures intégrant des outils numériques et montre la diversité des travaux menés dans TRANSFORM.



SETIER

💧 **Instrumenter le traitement des eaux résiduaires avec des solutions low-tech accessibles** : c'est l'ambition de SETIER, qui facilite le suivi et le pilotage pour une gestion plus durable et maîtrisée.

🔍 **SETIER, c'est quoi ?** Des centrales d'acquisition pour mesurer des paramètres hydrauliques et physico-chimiques, conçues de manière ouverte afin que l'utilisateur puisse les assembler, les faire évoluer et les réparer grâce à une documentation complète.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** La solution est pensée pour être rapidement prise en main grâce à une documentation complète (guides de montage, schémas de câblage, tutoriels de configuration). Elle nécessite toutefois des connaissances de base en câblage électrique et en instrumentation.

👤 **Qui l'a développée ?** Les Unités REVERSAAL et PROSE et en collaboration avec l'IRD.



DOCaMEX

💧 **Pérenniser le savoir-faire fromager français** : c'est l'ambition de DOCaMEX, qui facilite le transfert des connaissances, acquises lors de retours d'expériences des filières, aux acteurs de la filière fromagère.

🔍 **DOCaMEX, c'est quoi ?** Un outil numérique innovant développé pour capitaliser les savoirs et savoir-faire fromagers, les transmettre, et pérenniser la qualité des fromages traditionnels français.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** La solution est pensée pour être rapidement accessible par un moteur de recherche, relié à un livre de connaissances et à un outil de raisonnement technologique (basé sur des fiches et des arbres de décision communs ou spécifiques aux différentes filières).

👤 **Qui l'a développée ?** Les Unités IATE et I2M d'INRAE et l'association DOCaMEX.



Recherche à impact - Les fiches solutions



MINIMEAU

💧 Accompagner les industries agro-alimentaires vers une gestion optimisée de l'eau. C'est l'ambition de MINIMEAU, qui permet d'optimiser la consommation d'eau pour une usine plus durable.

🔍 **MINIMEAU, c'est quoi ?** Une approche intégrée associant Empreinte-Eau et Pinch-Eau pour minimiser la consommation d'eau en industries agroalimentaires.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** La solution est destinée à un public technique, elle nécessite des données de site (périmètre atelier/usine, débits/volumes, seuils/indicateurs de pollution, temporalité, types de flux) et des analyses d'effluents pour proposer/évaluer des scénarios (Pinch-eau + traitement).

👤 **Qui l'a développée ?** L'UMR SayFood avec les partenaires du projet ANR MINIMEAU.



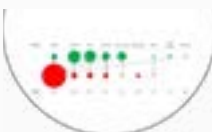
MESTRAL

💧 Former les cadres des industries agro-alimentaires et favoriser la transition numérique dans ce secteur, c'est l'ambition de MESTRAL, qui propose une base pédagogique pour concevoir des aliments aux propriétés ciblées.

🔍 **MESTRAL, c'est quoi ?** Un outil de formation en ligne innovant, représentant 150h d'apprentissage sur la mise en œuvre de 15 procédés d'élaboration des aliments. Il propose des supports pour comprendre les mécanismes régissant les transformations de produits alimentaires et la mise en œuvre du procédé.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** La solution est pensée pour les enseignants et les étudiants qui peuvent rapidement s'approprier les connaissances.

👤 **Qui l'a développée ?** INRAE, AgroParisTech, Oniris, Institut Agro Montpellier, Université de Montpellier.



MY CHOICE

💧 Appuyer la décision collective en analysant les atouts et les limites des options envisagées par les différents acteurs concernés, c'est l'ambition de MY CHOICE.

🔍 **MY CHOICE, c'est quoi ?** Un outil d'argumentation multi-acteur et multicritère permettant de structurer puis analyser sous différents angles les arguments favorables/défavorables de différentes parties prenantes concernant des scénarios envisagés.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** La solution est pensée pour des consortiums de projets, étudiants, bureaux d'étude, acteurs socio-économiques. Elle se présente sous la forme d'une application web user-friendly, accessible via une interface en ligne.

👤 **Qui l'a développée ?** L'UMR IATE.



Recherche à impact - Les fiches solutions



CUSTOZYME

💧 Accélérer, fiabiliser et étendre l'innovation en conception de protéines en explorant des espaces de séquences inaccessibles aux approches classiques, c'est l'ambition de CUSTOZYME qui conçoit et optimise des biomolécules.

🔍 **CUSTOZYME, c'est quoi ?** Une plateforme numérique intégrée combinant IA générative neuro-symbolique et modèles biophysiques pour concevoir et optimiser des protéines pour diverses applications biotechnologiques, industrielles et biomédicales.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** CUSTOZYME est conçue pour être mise en œuvre via des workflows guidés, offrant des prédictions lisibles, interprétables et directement actionnables.

👤 **Qui l'a développée ?** L'UMR TBI en collaboration avec l'UR MIAT (INRAE) et le LAAS (CNRS).



DeepOmics

💧 Faciliter la gestion, le partage et la réutilisation des données de bioprocédés environnementaux, c'est l'ambition de DeepOmics pour développer des outils opérationnels pour la gestion microbienne des processus.

🔍 **DeepOmics, c'est quoi ?** Une plateforme de données en ligne permettant de stocker, interroger et croiser des données opérationnelles et des données méta-omiques sur les communautés microbiennes des bioprocédés.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** DeepOmics s'adresse à des chercheurs et professionnels du secteur possédant des connaissances en bio procédés et en outils numériques.

👤 **Qui l'a développée ?** L'UR PROSE, en collaboration avec les UR LBE, UR OPAAL et l'UR MIAT.



MEMO

💧 Optimiser le recettage des méthaniseurs et garantir une production optimale de gaz, c'est l'ambition de MEMO pour aider les exploitants de méthaniseurs à superviser leur site.

🔍 **MEMO, c'est quoi ?** Une plateforme web qui permet à l'exploitant de superviser et optimiser son usine, grâce au traitement des données d'opération et des analyses de déchets et digestats sur une installation de méthanisation.

💡 **Est-elle facile à utiliser ?** MEMO est destinée à être utilisée en temps réel, sur une installation de méthanisation et en particulier, à chaque nouveau déchet arrivant sur un site industriel.

👤 **Qui l'a développée ?** INRAE et l'INRIA avec la startup BioEnTech (rachetée par SUEZ).



UNE SCIENCE QUI FAIT RÊVER

ENTRE RUPTURE ET EXCELLENCE

Le programme EXPLOR'AE de l'INRAE soutient la recherche dite à risque. EXPLOR'AE comprend trois piliers : acculturation, exploration, transformation. Depuis le lancement de ce programme, les chercheurs TRANSFORM ont été lauréats sur plusieurs projets, un projet de transformation « NanoBioCat » et trois projets d'exploration « CELEC », « PURPLEFIX » et « SENSOFOAM ». Nos chercheurs brillent aussi avec le projet « FOX » du Conseil Européen de la Recherche (ERC) qui finance la recherche exploratoire avec pour unique critère l'excellence scientifique.



ACCULTURATION

Actions de sensibilisation à la recherche dite "à risque et en rupture"



EXPLORATION

Projets agiles "bottom up" de 18 mois et 150 000€



TRANSFORMATION

Projets pluridisciplinaires plus "top down" favorisant l'exploration de grandes idées en rupture à potentiel applicatif fort

PROJET TRANSFORMATION

NANOBIOCAT

ET SI L'IA POUVAIT CONCEVOIR UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE PROTÉINES POUR LUTTER CONTRE LES PATHOGÈNES ?



Les protéines sont les piliers du vivant : elles défendent, réparent, transforment. Depuis longtemps, nous avons appris à les exploiter pour de nombreuses applications. Cependant, nous ne savons pas encore concevoir une protéine intégralement programmée pour atteindre une cible spécifique et la transformer avec une extrême précision. C'est le défi que le projet NanoBioCat vise à relever, en développant une intelligence artificielle capable de concevoir, de A à Z et à la carte, des nano-protéines d'un genre totalement nouveau. Ces néo-protéines, combinant détection et désactivation, permettront de neutraliser de manière irréversible des agents pathogènes. Conçues par IA, ces biomolécules, au mode d'action inédit, pourraient révolutionner la lutte contre les agents infectieux, tels que les virus et les bactéries résistantes. Au-delà de la santé humaine et animale, elles pourront aussi apporter des solutions pour la protection des cultures. Programmables comme des logiciels, ces protéines offriront des moyens sans précédent pour répondre rapidement et efficacement aux menaces sanitaires et environnementales.

Porteuse : Sophie BARBE, UMR TBI (CNRS, INRAE, INSA Toulouse)

Partenaires : UR MIAT (INRAE), LISM (CNRS), UR VIM (INRAE), UMR Virologie (ANSES, ENVA, INRAE)



OBJECTIF

Créer des nanoprotéines capables de détecter et désactiver de manière irréversible des agents pathogènes.



RUPTURE

Pour la première fois, l'IA pourrait concevoir des protéines intégralement programmées pour atteindre une cible spécifique et la transformer avec une extrême précision.



IMPACT

Révolutionner la lutte contre les agents infectieux, apporter des solutions pour la santé humaine/animale, pour la protection des cultures et répondre aux menaces sanitaires et environnementales.



PROJETS EXPLORATION

CELEC

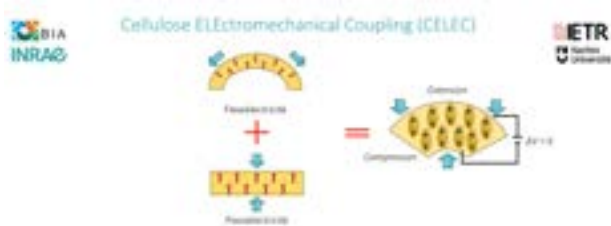
Couplage ELectromécanique au sein de la Cellulose

Périmètre thématique : Bioéconomie & biotechnologies

💡 **HYPOTHÈSE :** Etablir des connaissances mécanistiques peut permettre de maîtriser et d'optimiser la production de courant électrique par des matériaux à base de cellulose.

❖ **RUPTURE :** Les mécanismes de production d'électricité par stimulation mécanique de matériaux ne sont pas encore bien connus et ont par ailleurs un rendement faible. Ces connaissances permettraient d'amplifier la quantité d'électricité produite, dans un contexte de demande croissante d'énergie renouvelable.

⚠ **RISQUE :** La capacité de production d'énergie des matériaux cellulosiques pourrait être intrinsèquement limitée, si bien que les niveaux de puissance générée risqueraient d'être trop faibles.



👤 **Porteur :** Bernard CATHALA (UR BIA, INRAE)

👥 **Partenaire :** Université de Nantes

PURPLEFIX

Utilisation de bactéries pourpres pour la fixation de l'azote

Périmètre thématique : Biotechnologies



💡 **HYPOTHÈSE :** L'isolement de bactéries pourpres en fonction de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique représente une étape

clé dans une stratégie globale visant à remplacer les engrais azotés de synthèse. Le mode de croissance en photohétérotrophie est unique à ces bactéries. Il pourrait permettre une fixation de l'azote plus rapide que chez les photoautotrophes et plus efficace que chez les hétérotrophes aérobiques.

❖ **RUPTURE :** Si les bactéries pourpres ont été largement étudiées, peu de travaux ont porté sur la fixation de l'azote atmosphérique. À ce jour, aucune souche n'a été isolée spécifiquement sur ce critère. Identifier et caractériser des bactéries spécialisées dans cette fonction pourrait conduire à des performances inédites et générer de nouvelles connaissances sur l'impact de la fixation de l'azote sur leur métabolisme central et leur rôle dans les écosystèmes.

⚠ **RISQUE :** Pour identifier les paramètres influençant la fixation de l'azote et modéliser le fonctionnement des bactéries pourpres, il est essentiel d'isoler et de cultiver des souches spécialisées, ce qui peut s'avérer complexe. Les raisons écologiques expliquant la fixation de l'azote chez ces bactéries restent mal comprises, rendant difficile la sélection d'environnements optimaux où des souches spécialisées pourraient se développer.

👤 **Porteur :** Gabriel CAPSON TOJO (UR LBE, INRAE)



PROJETS EXPLORATION

SENSOFOAM

Mise au point de capteurs intelligents basés sur le comportement des mousses

Périmètre thématique : Alimentation & santé

💡 **HYPOTHÈSE :** Le comportement des mousses varie selon la présence de contaminants dans l'environnement. Créer et utiliser des mousses biosourcées pourrait permettre la détection facile de contamination chimique ou bactérienne alimentaire.

✧ **RUPTURE :** Il n'existe pratiquement pas d'étude utilisant les mousses en tant que détecteurs. Il s'agit d'une rupture technologique dont les domaines d'application sont nombreux (industrie agro-alimentaire mais aussi milieu médical, etc.).

⚠️ **RISQUE :** La sensibilité de détection par les mousses d'une part, et de spécificité aux différents contaminants d'autre part, doivent être suffisamment importantes pour permettre une détection rapide et adaptée au contexte d'utilisation.

👤 **Porteur :** Anne-Laure FAMEAU, UMR UMET (INRAE, Université de Lille, CNRS)



PROJET ERC

Projet ERC FOX

Comprendre pourquoi les champignons filamenteux oxydent leurs glucides (Why Fungi Oxidize their own cell wall carbohydrates?)

💡 **HYPOTHÈSE :** Certaines enzymes, les oxydases, secrétées par les champignons ciblent non pas la matière exogène mais le champignon lui-même, oxydant les glucides de sa propre paroi cellulaire. Ces processus d'oxydation pourraient jouer un rôle clé dans la capacité des champignons à résister ou à s'adapter. Le projet FOX étudie ce phénomène d'oxydation dans la perspective d'en évaluer l'étendue, d'en expliquer les mécanismes et d'en dévoiler les fonctions.

✧ **OBJECTIF :** L'étude portera sur un champignon filamenteux pathogène modèle, *Ustilago maydis*, aussi connu sous le nom de charbon du maïs. Sur fond de multidisciplinarité, elle combinera plusieurs techniques (chimie, microscopie, chromatographie et spectroscopie de masse) pour mettre en évidence des glucides oxydés dans la paroi fongique et associera des approches in vitro (biochimie des protéines), in vivo (microbiologie fongique) et in silico (prédiction d'activités enzymatiques) pour comprendre le fonctionnement et le rôle de ces enzymes. FOX bénéficiera également des nombreux partenariats scientifiques noués par l'équipe, à l'échelle nationale et internationale.

<https://www.inrae.fr/actualites/bourse-erc-comprendre-pourquoi-champignons-oxydent-glucides-leur-paroi-cellulaire>

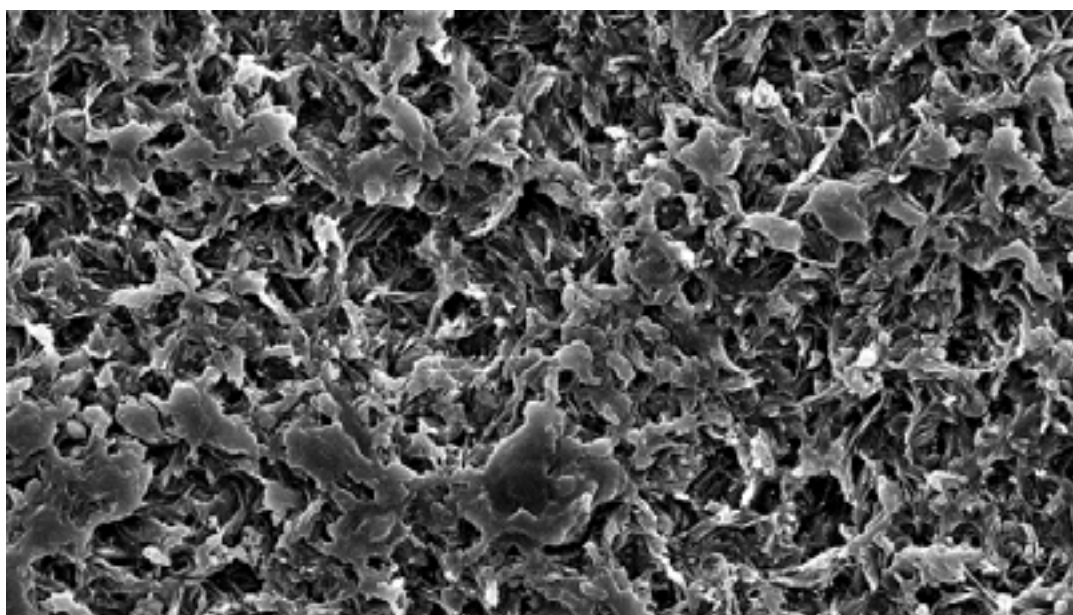
👤 **Porteur :** Bastien Bissaro UMR BBF (INRAE, Aix-Marseille Université) Lauréat (consolidator)

© Bastien Bissaro



Partie 1

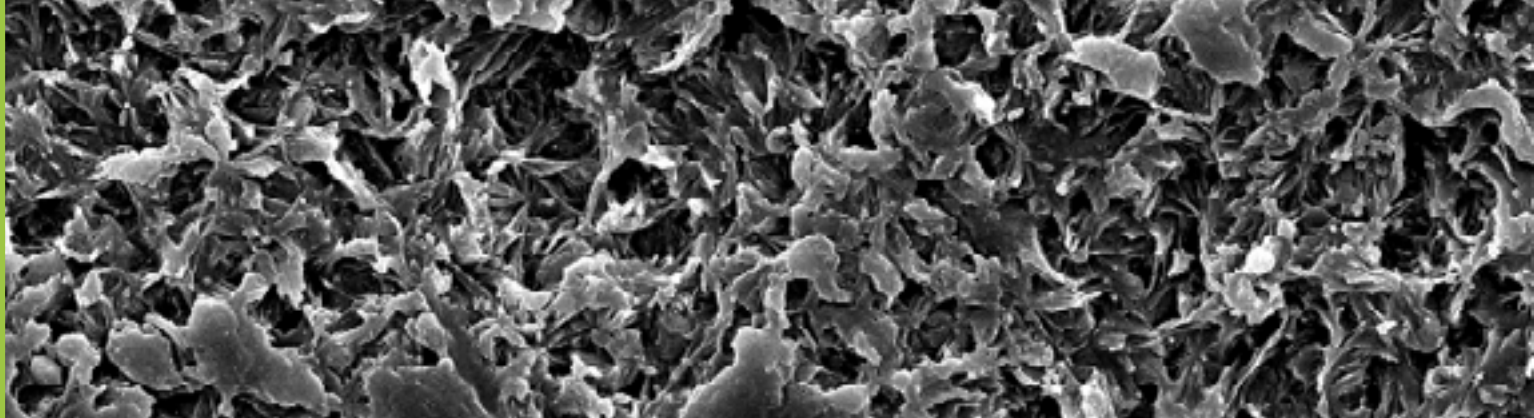
Valorisation des coproduits pour une bioéconomie circulaire



© Paul Derkenne et Francis Gouttefangeas

Le devenir des (bio)plastiques est toujours d'actualité, que ce soit leur fin de vie en méthanisation ou leur transmission dans la chaîne alimentaire via l'entomoconversion.

Nos chercheurs visent à comprendre et maîtriser la réactivité des coproduits pour les valoriser et innover. Ainsi, l'os bovin pour la plasturgie, la bagasse de canne à sucre pour des matériaux sans liant, la cire de son de riz pour une mousse aqueuse stable et sobre. Des coproduits permettent également de produire un substitut de l'hexane pétrosourcé, du bioéthanol, ou une molécule à l'odeur de rose.



© Paul Derkenne et Francis Gouttefangeas au CMEBA de l'Université de Rennes - Dégradation des films de PHBV après 30 jours de méthanisation à 38°C.

Méthode d'évaluation de la dégradation des plastiques biodégradables en méthanisation



En savoir plus

Derkenne P. *et al.*

Understanding the biodegradation of PHBV/Cellulose composites in mesophilic anaerobic digestion

Science of the Total Environment - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178224>

Partenariat

- UMR Géosciences, Université de Rennes

- Institut des Sciences Chimiques de Rennes, Université de Rennes

Projets supports :

- Métaprogramme BETTER

- Projet ANR BioCyPlast

Contacts

Patrick Dabert et Lucile Chatellard

UR OPAALE et UMR IATE

patrick.dabert@inrae.fr

lucile.chatellard@umontpellier.fr



Contexte

Les emballages alimentaires en plastique conventionnel ont une durée d'utilisation inférieure à un an pour une pollution supérieure à plusieurs siècles lorsqu'ils se retrouvent dans l'environnement. Le développement de matériaux totalement biodégradables, et pouvant être co-digérés avec les biodéchets, est une alternative intéressante qui : i) permet de faciliter la gestion des biodéchets, ii) ne requiert pas la mise en place de nouvelles filières de collecte-tri-recyclage, et iii) limite la pollution de l'environnement. Cependant, la plupart des sacs et emballages plastiques biodégradables commercialisés aujourd'hui ne se dégradent vraiment qu'en compostage industriel, i.e. à forte température et en présence d'oxygène. Leur présence dans les biodéchets engendre des problèmes techniques et une pollution des digestats lorsque ces biodéchets sont valorisés en méthanisation (dégradation anaérobie). L'enjeu du projet BioCyPlast était de fabriquer des plastiques biosourcés totalement biodégradables en conditions de méthanisation.

Résultats

À l'UMR IATE, nous avons produit des films en PHBV (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) contenant 0, 10, 20, 30 et 40 % de cellulose (en masse). Leur biodégradation a été testée à l'UR OPAALE par mesure de la production de méthane en conditions de digestion

anaérobie à 38 °C (condition la plus répandue en France).

La dégradation augmente avec la surface spécifique du matériau et sa teneur en cellulose. Elle est complète pour du PHBV en poudre de 1 mm de diamètre et supérieure à 90 % pour des films de 10×10 x 0,3 mm, après 57 jours de méthanisation à 38 °C. La biodégradation est jusqu'à 2 fois plus rapide lorsque la teneur en cellulose est élevée. Les analyses morphologiques, structurales et fonctionnelles réalisées sur les matériaux en cours de dégradation montrent que la biodégradation se produit principalement par une érosion de surface, avec une attaque préférentielle de la cellulose, puis une réduction du poids moléculaire et de la cristallinité des polymères, ainsi qu'une hydrolyse des groupes esters fonctionnels. L'analyse du biofilm colonisant les matériaux montre un enrichissement en bactéries cellulolytiques et fermentaires des genres *Ruminofilibacter*, *Clostridium*, *Hungateiclostridiaceae* et *Treponema*.

Perspectives

Les travaux à venir porteront sur : i) tester l'alimentarité des matériaux produits et rechercher des méthodes de recyclage potentiel dans le cadre du projet ANR SCIRDE porté par l'UMR IATE ; et ii) tenter d'isoler les consortia impliqués dans la dégradation des matériaux dans le cadre d'un projet de thèse.



© Christelle Planche
- Larves de mouches
soldat noires.

Risque sanitaire lié à la présence de plastiques lors de la transformation de nos déchets par les insectes



En savoir plus

Gold M. et al.

Micro-and nanoplastic size affects uptake and digestive tract region residence time in black soldier fly larvae during food waste bioconversion

Waste Management - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114933>

Partenariat

- KU Leuven, Belgium

- ETH Zürich, Switzerland

- Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Switzerland

Projet support :

Ces travaux ont été réalisés au cours de la mission longue durée de Christelle PLANCHE au sein de l'université KU Leuven.

Contact

Christelle Planche

UR QuaPA

christelle.planche@inrae.fr



Contexte

Parmi les modèles d'économie circulaire, le recyclage industriel des biodéchets alimentaires par les larves de mouches soldat noires (*Hermetia illucens*), ou entomoconversion, a fait l'objet d'un intérêt croissant depuis plusieurs années. Ce procédé permet de valoriser nos biodéchets en produisant des larves destinées à l'alimentation animale et des engrais à partir de leurs déjections (frass). Cependant, la présence de particules de plastique dans les déchets alimentaires, principalement issues des emballages, soulève des questions quant à leur devenir dans les larves et le frass et leur transmission dans la chaîne alimentaire. Afin d'évaluer l'impact sanitaire de ce procédé, nous nous sommes intéressés au devenir des micro- et nano-plastiques au cours du processus d'entomoconversion. Notre objectif était de déterminer dans quelle mesure la taille et la forme des particules de plastique contenues dans les déchets alimentaires influencent leur ingestion et leur élimination par les larves, tout en développant des modèles prédictifs permettant de limiter le recours aux expérimentations animales.

Résultats

Ces travaux ont montré que la taille des particules de plastique influence fortement leur devenir lors de l'entomoconversion et les risques qui en découlent. Tandis que les micro-plastiques de plus de 100 μm ne

peuvent pas être ingérés par les larves, les particules plus petites s'accumulent progressivement dans leur tube digestif, d'autant plus que leur taille est faible. Après 10 jours d'élevage sur des biodéchets modèles contaminés, jusqu'à 2 300 particules de plastique comprises entre 38 et 45 μm ont été finalement comptabilisées dans le tube digestif des larves. Ces résultats étaient similaires quelle que soit la forme des particules.

Ces travaux ont également révélé que le contenu du tube digestif des larves était entièrement éliminé lorsqu'elles étaient placées 18 heures à jeun. Ainsi, un jeûne des larves avant leur transformation pour une utilisation en alimentation animale permettrait d'éliminer plus de 90 % des particules de plastique accumulées dans leur organisme et de limiter le risque sanitaire.

Perspectives

Ces travaux se poursuivront dans le cadre du projet ANR JCJC VECTOR (2026-2030), qui vise à évaluer la vectorisation de contaminants chimiques par les micro-plastiques lors du recyclage des déchets alimentaires par entomoconversion. Au-delà des flux de microplastiques, il s'agira de comprendre, d'évaluer et de modéliser les flux de polluants environnementaux qui peuvent être véhiculés par les particules de plastique ainsi que les flux d'additifs intentionnellement introduits lors de la fabrication des plastiques.

Os bovin : quand la compréhension et la maîtrise de sa réactivité permettent d'innover et de mieux valoriser



En savoir plus

Thao Nguyen M. *et al.*

Advances in the recovery of native collagen type I and calcium phosphate from bovine bone by overcoming the limiting extraction steps in conventional processes. Kinetic and thermodynamic elucidation.

Separation and Purification Technology - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133929>

Partenariat

Projet support :

ANS 2BConnective (2018-2019)

Valorisation

Brevet WO2021180806A1 : Process for producing compounds of interest from at least one mineralized connective tissue, and compounds of interest derived from this production process. World Intellectual Property Organization reference

Contact

Vincenza Ferraro

UR QuaPA

vincenza.ferraro@inrae.fr



Contexte

L'os est un matériau composite constitué d'une phase minérale (60 % en poids), principalement du phosphate de calcium, et d'une phase organique (30 %), majoritairement du collagène, le reste étant de l'eau. Sa structure est très complexe, articulée sur 5 échelles, du niveau atomique à celui macroscopique, où chacun est responsable de propriétés biologiques, mécaniques et thermiques de l'os. Celles-ci sont recherchées dans plusieurs domaines, à savoir matériaux, médecine, agriculture, énergie, alimentation fonctionnelle, et industrie alimentaire/pharmaceutique. Toutefois, l'os est toujours sous-valorisé ou utilisé à faible valeur ajoutée. La raison est à rechercher dans l'absence de procédés performants, capables de considérer la complexité de l'os, de préserver les fonctionnalités de ses composés, de garantir des rendements significatifs à un coût raisonnable, et d'être conformes aux règlements en vigueur. Grâce à la compréhension de la réactivité de l'os aux échelles les plus petites, un procédé innovant a été mis au point.

Résultats

Ce procédé permet l'augmentation significative du rendement de collagène à l'état natif et la récupération de la quasi-totalité de la matière minérale. Les protéoglycanes, molécules d'intérêt en médecine, ont été récupérés également. Plusieurs paramètres ont été analysés : pH (acide à neutre), température (réfrigération, ambiante, physiologique), force ionique (absente, physiologique),

configuration (multicycle, monocycle) et fluidodynamique (statique, agité). Des solvants et des sels de grade alimentaire ont été employés. Parmi les paramètres, pH et température gouvernent l'extraction du collagène et des minéraux ; la force ionique celle des protéoglycanes. L'extraction à cycle unique en régime agité permet d'augmenter le rendement tout en réduisant la durée du procédé. Grâce à l'action antiseptique des acides utilisés, l'extrait ne contient aucun des microorganismes susceptibles de le contaminer.

Perspectives

Ce procédé pourrait permettre de mieux valoriser l'os. Les performances de l'extrait, testées en contexte industriel en tant qu'additif en plasturgie et comme source de phosphore à haute biodisponibilité, se sont avérées très prometteuses. En outre, l'utilisation comme supplément de calcium biodisponible pourrait être envisageable en cas de carence chez l'homme, l'animal, et les sols. L'extrait pourrait également être utilisé comme conservateur et additif, à l'instar du produit E341(iii) – phosphate tricalcique, pour le secteur alimentaire et pharmaceutique. Dans le domaine médical, plusieurs produits de comblement osseux commerciaux sont constitués d'un mélange de collagène et de phosphate de calcium. La montée en échelle du procédé développé permettra d'affiner les conditions opératoires et le coût de production.



Fractionnement de la bagasse de canne à sucre pour la production de matériaux autoliés



En savoir plus

Cavaillès J. *et al.*

Impact of thermomechanical pretreatment by twin-screw extrusion on the properties of bio-based materials from sugarcane bagasse obtained by thermocompression

Bioresource Technology - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131642>

Partenariat

- eRcane (centre de recherche de Terreos pour l'Océan Indien)

Projet support :

Thèse CIFRE

Contact

Pierre-Yves Pontalier

UMR LCA

pierreyves.pontalier@ensiacet.fr



Contexte

L'objectif de ces travaux est de développer des matériaux 100 % biosourcés à partir de la bagasse de canne à sucre, principal coproduit de la filière agricole de La Réunion. Cette démarche vise à proposer une alternative respectueuse de l'environnement, avec pour ambition, à long terme, de remplacer les barquettes alimentaires en plastique jetables utilisées sur l'île. Ces dernières posent, en effet, un problème environnemental majeur : en l'absence de filière de recyclage, les 80 000 barquettes utilisées quotidiennement sont actuellement enfouies.

Résultats

Les travaux, ont démontré que la production de nouveaux matériaux biosourcés, à partir de la bagasse de canne à sucre sans liant, était possible par thermocompression. Ils ont également prouvé que le prétraitement thermomécanique par extrusion bi-vis améliorait les propriétés mécaniques et leur résistance vis-à-vis de l'eau de ces matériaux. L'extrusion a facilité la déconstruction de la bagasse, entraînant le défibrage et la modification de la structure morphologique des fibres, ce qui a conduit à une diminution de leur densité. Il a également entraîné une réduction substantielle de la taille des particules et la formation d'agrégats dans les extrudats, contribuant à une plus grande densification du matériau par rapport à la bagasse non traitée. Une

comparaison des propriétés mécaniques et de la résistance à l'eau des matériaux a clairement démontré les propriétés supérieures de ceux issus des extrudats. Le choix du profil de vis et du ratio L/S pour la production des extrudats a un impact sur les propriétés mécaniques et la résistance à l'eau des matériaux finaux ; les meilleures conditions pour ce prétraitement étant fortement dépendantes des propriétés souhaitées du matériau. Les meilleures propriétés de flexion ont été obtenues pour les matériaux fabriqués à partir d'extrudats produits à un ratio L/S de 1,25 avec le profil de vis le plus cisailant, tandis que la meilleure résistance à l'eau a été mesurée avec les matériaux fabriqués à partir d'extrudats obtenus à un ratio L/S de 0,4 avec le même profil. Afin d'obtenir des matériaux ayant des propriétés mécaniques élevées, ainsi qu'une résistance à l'eau convenable, il est nécessaire de trouver un compromis afin de définir le ratio L/S du prétraitement.

Perspectives

Le travail de cette collaboration se poursuit avec l'optimisation des paramètres des procédés permettant la production de ces matériaux 100 % bagasse de canne à sucre à plus grande échelle, guidée par une analyse du cycle de vie.



© Adobestock

Le mEthyloxolane, une alternative biosourcée et sûre à l'hexane



En savoir plus

Cravotto C. *et al.*

Sustainable grape seed oil processing:
Green solvent extraction and byproduct
valorisation.

Food and Bioproducts Processing - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.12.006>

Partenariat

- Department of Drug Science and Technology, University of Turin, Italie
- Institute of Research, Development and Innovation in Biotechnology of Elche (IDiBE), Miguel Hernández (UMH) University Espagne
- Pennakem Europa (EcoXtract®), Dunkerque, France

Projet support :

Projet EcoXtract programme Horizon 2020 de l'Union Européenne

Contact

Anne-Sylvie Fabiano-Tixier

UMR SQPOV

anne-sylvie.fabiano@univ-avignon.fr



Contexte

L'hexane, solvant dérivé du pétrole, est couramment utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour extraire des huiles végétales ou arômes. Cependant, le n-hexane est reconnu comme neurotoxique, reprotoxique et possiblement perturbateur endocrinien. Des résidus sont souvent détectés dans les aliments, exposant les consommateurs à des risques sanitaires encore mal estimés. Dans le cadre de la stratégie européenne pour un environnement sans substance toxique, il devient crucial d'identifier des alternatives durables et sûres. Le 2-méthylloxolane (2-MeOx), solvant biosourcé issu de la biomasse lignocellulosique, a été autorisé en 2023 pour un usage alimentaire en Europe. L'objectif est d'évaluer ses performances en remplacement de l'hexane dans des filières à forte valeur ajoutée.

Résultats

Les extractions réalisées avec le 2-méthylloxolane (2-MeOx) à partir de pépins de raisin (GSO) et de grignons d'olive (OP) ont donné des rendements similaires ou supérieurs à ceux obtenus avec l'hexane, tant au laboratoire qu'à l'échelle pilote. La composition en acides gras des huiles reste inchangée, mais la polarité plus élevée du 2-MeOx permet la co-extraction de polyphénols, améliorant la stabilité oxydative des huiles. Dans le cas des pépins de raisin, 80 % des polyphénols sont récupérés dans les gommages issues du raffinage. Ces extraits montrent une activité

biologique intéressante sur les cellules de peau, avec un effet dépigmentant et une réduction du stress oxydatif induit par les UV, comparable à celui de l'acide kojique. Pour les grignons d'olive, le 2-MeTHF est utilisé dans un procédé intégré pour extraire le squalène et le convertir en squalane dans des conditions bien plus douces que les procédés industriels classiques. Ce procédé présente un intérêt économique et énergétique, renforçant la pertinence du 2-MeOx comme solvant multifonctionnel et durable.

Perspectives

Ces travaux confirment que le 2-MeOx/MeTHF est une alternative viable et performante à l'hexane pour la production d'huiles et d'ingrédients à l'échelle industrielle. L'approche intégrée, combinant l'extraction et la valorisation des coproduits, ouvre des voies économiques innovantes et s'inscrit dans une logique d'économie circulaire. Les coproduits riches en polyphénols des pépins de raisin pourraient être développés comme de nouveaux ingrédients cosmétiques. Le procédé de production de squalane à partir de grignons d'olive démontre le potentiel du 2-MeTHF comme solvant de procédé polyvalent. Les efforts futurs devront se concentrer sur l'optimisation de la purification des extraits pour surmonter des verrous technologiques, comme l'empoisonnement du catalyseur d'hydrogénation par les impuretés du squalène brut, et sur l'extension de cette approche à d'autres matières premières végétales.



Quand la cire de son de riz devient une ressource pour stabiliser les mousses



En savoir plus

Bouju C. *et al.*

Pickering Aqueous Foam Stabilized by Rice Bran Wax Byproduct: A Sustainable and Multiscale Approach

Langmuir - 2025

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c01747>

Contacts

Delphine Huc-Mathis, Cyprien Bouju et David Blumenthal

UMR SayFood

delphine.huc@agroparistech.fr

cyprien.bouju@agroparistech.fr

david.blumenthal@agroparistech.fr



Contexte

Le remplacement des cires pétrosourcées par des alternatives naturelles renouvelables constitue un levier stratégique pour concevoir des produits plus durables. Déjà utilisées en cosmétique, agroalimentaire et pharmacie, les cires comme la carnauba ou la cire d'abeille servent de structurant dans des systèmes complexes (oléogels, émulsions Pickering). Toutefois, leur mise en œuvre requiert généralement un chauffage et l'ajout d'agents fonctionnels, limitant l'efficacité et la sobriété des procédés. La cire de son de riz (RBW), coproduit abondant de l'huile de riz, représente une ressource particulièrement intéressante. Jusqu'ici, ses applications restaient contraintes par ces procédés énergivores, d'où l'enjeu de développer une approche simple, sans additif, ni étape thermique, pour créer de nouvelles architectures stables et durables.

Résultats

Ce travail a démontré pour la première fois le potentiel de la cire de son de riz (RBW) comme unique agent stabilisant de mousses aqueuses par effet Pickering. Elles ont été obtenues grâce à un procédé rapide, économe en énergie, transposable à l'échelle semi-industrielle, et ne mobilisant que deux ingrédients : la RBW et l'eau. La concentration en cire a été identifiée comme un facteur clé déterminant la quantité et la structure des mousses. L'analyse microscopique a mis en évidence la présence de couches

particulières denses au niveau des interfaces air/eau, confirmant le rôle du mécanisme Pickering, renforcé par des particules dispersées dans la phase continue (réseau 3D). Les mousses obtenues se distinguent par une remarquable stabilité, maintenue sur plusieurs mois, et par la possibilité de sécher, récupérer puis recycler la RBW pour de nouveaux cycles de formulation. Cette étude a démontré l'intérêt de la RBW comme ingrédient durable et multifonctionnel.

Perspectives

Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour l'optimisation et l'extension du concept établi dans l'article. À court terme, l'étude de paramètres tels que les conditions de foisonnement permettra de mieux contrôler le rendement et la microstructure des mousses. Par ailleurs, l'évaluation de l'impact des cycles successifs sur les propriétés de la RBW et des mousses (stabilité, texture, composition) apportera des données clés pour la compréhension plus fine des mécanismes sous-jacents. À plus long terme, l'exploration de cires végétales alternatives élargira le champ d'applications et permettra des comparaisons systématiques. En conjuguant sobriété de formulation, valorisation d'un coproduit abondant et performance fonctionnelle, cette approche ouvre la voie à de nouvelles générations de mousses bio-sourcées adaptées à des secteurs variés tels que l'agroalimentaire, la cosmétique ou les biomatériaux.



© Fernanda Thimoteo Acevedo Jorge - Production microbienne de 2-phényléthanol par fermentation extractive en milieu modèle : couplage du bioréacteur à un contacteur membranaire permettant la récupération du 2-PE dans de l'alcool oléique (extraction liquide-liquide)

Valorisation de coproduits agro-industriels par la production microbienne de 2-phényléthanol



En savoir plus

Jorge F.T.A. *et al.*

Biotechnological production of 2-phenylethanol from agroindustrial byproducts: experimental evaluation, techno-economic analysis, and life cycle assessment.

Biofuels, Bioproducts and Biorefining - 2025

<https://doi.org/10.1002/bbb.2815>

Partenariat

Projet support :

Master européen BIOCEB (European Master in Biological and Chemical Engineering for a Sustainable Bioeconomy)

Contacts

Marwen Moussa, Claire Saulou-Bérion et Ana Karen Sánchez-Castañeda

UMR SayFood

marwen.moussa@inrae.fr

claire.saulou-berion@inrae.fr

ana-karen.sanchez-castaneda@inrae.fr



Contexte

La production biotechnologique du 2-phényléthanol (2-PE) représente une alternative durable aux méthodes chimiques ou traditionnelles qui génèrent des sous-produits toxiques et une empreinte carbone élevée. Bien que le 2-PE naturel, extrait des pétales de roses, soit autorisé dans les applications alimentaires et cosmétiques, son coût élevé (300 à 1 000 USD/kg) et sa faible disponibilité limitent son utilisation. La fermentation microbienne, notamment à partir de coproduits agro-industriels, offre une solution prometteuse pour une production plus économique et écologique. Cette étude évalue la faisabilité technique, économique et environnementale de la production de 2-PE par *Kluyveromyces marxianus* CBS600 à partir de L-phénylalanine, en utilisant le marc de pommes et le lactosérum. L'enjeu est de valoriser ces co-produits et d'évaluer la viabilité techno-économique et l'impact environnemental de l'alternative proposée en la comparant aux méthodes conventionnelles.

Résultats

Le lactosérum, supplémenté en extraits de levures et minéraux, a permis d'atteindre 2,64 g/L de 2-PE après 72h de culture en fioles, résultat le plus élevé parmi les substrats testés. Par ailleurs, la culture des levures sur marc de pommes a conduit à une productivité plus intéressante de 1,07 g/L en 24 h.

Ce milieu a ainsi été choisi pour une mise à l'échelle en bioréacteur de 1 L, produisant 1,60 g/L en 48 h. L'extraction avec de l'alcool oléique (choisi pour sa biocompatibilité), réalisée en couplant un contacteur membranaire au bioréacteur, a permis une récupération efficace du 2-PE sans affecter les levures. La viabilité économique de cette bioproduction a ensuite été évaluée sur la base de simulations à l'échelle industrielle (150 t/an) et d'une analyse technico-économique. Celle-ci estime le coût de production à 186 USD/kg pour le procédé à base de lactosérum, bien inférieur à celui du 2-PE extrait de roses. Le taux de rentabilité interne atteint 24,9 %, confirmant la viabilité économique du procédé. L'analyse du cycle de vie du 2-PE obtenu par voie microbienne révèle une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, estimées 1 500 fois moins importantes que celles liées à l'extraction à partir de roses.

Perspectives

Les résultats de l'analyse technico-économique poussent à optimiser la supplémentation du lactosérum pour réduire les coûts, explorer des sources alternatives de L-phénylalanine, utiliser des souches de levures génétiquement modifiées pour produire directement à partir de sucres. Enfin, la mise en œuvre du procédé en continu avec récupération in situ de la molécule se poursuivra en vue d'intensifier la production.

© Edwige Audibert- Bois d'épicéa non-prétraité (à gauche) et bois d'épicéa prétraité par explosion à la vapeur (à droite).

Bioéthanol 2G : optimiser le coût et l'efficacité du prétraitement



En savoir plus

Audibert E. *et al.*

Determination of trade-offs between 2G bioethanol production yields and pretreatment costs for industrially steam exploded woody biomass

Applied Energy - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125028>

Partenariat

- Européenne de Biomasse

Contacts

Edwige Audibert, Caroline Rémond et Gabriel Paës

UMR FARE

edwige.audibert@univ-ubs.fr

caroline.remond@univ-reims.fr

gabriel.paes@inrae.fr



Contexte

La biomasse lignocellulosique est une ressource renouvelable qui peut être une alternative pour remplacer progressivement les ressources fossiles grâce à différents procédés de transformation. Cependant, lors de la transformation de la biomasse lignocellulosique par voie biologique, il faut faire face à sa récalcitrance naturelle. Une étape de prétraitement permet de limiter cette récalcitrance qui réduit l'efficacité des enzymes d'hydrolyse de la cellulose et hémicelluloses (cellulases, hémicellulases) pour libérer les sucres fermentés cibles. Le prétraitement est cependant une étape coûteuse, représentant 30 à 50 % des coûts en équipements et 20 à 25 % des coûts opérationnels du procédé global. Il est donc primordial de l'optimiser. Parmi les prétraitements possibles, l'explosion à la vapeur présente plusieurs avantages : rapide, ajout d'acide ou de base non nécessaire, action conjointe mécanique et thermique. Ce travail propose donc d'étudier l'aspect économique et l'optimisation de l'explosion à la vapeur pour la production de bioéthanol à partir de différentes essences de bois en combinant des données expérimentales (rendements d'hydrolyse et de fermentation en éthanol) et des données techno-économiques acquises par la société Européenne de Biomasse.

Résultats

Les résultats obtenus ont mis en évidence que les rendements de

production en bioéthanol dépendent fortement de l'essence de bois. De plus, le prétraitement par explosion à la vapeur permet d'améliorer les rendements en bioéthanol seulement jusqu'à une sévérité intermédiaire. Ainsi, les sévérités de prétraitement les plus élevées ne sont pas nécessairement les plus pertinentes pour maximiser la production de bioéthanol. Les conditions optimales de prétraitement permettant les meilleurs compromis entre performance et coût du prétraitement ont alors été déterminées : 198 °C/15 min pour le chêne avec un rendement en bioéthanol de 129 mg/g (- 9 % par rapport à l'optimum) et 205 °C/10 min pour le peuplier avec un rendement de 111 mg/g (- 4 %). Ces compromis permettent de réduire significativement le coût du prétraitement de 25 à 50 %.

Perspectives

Cette étude a permis de démontrer la pertinence des études de désirabilité afin d'optimiser simultanément plusieurs critères. Elle a également mis en avant les différences de rendements en bioéthanol inter- et intra-espèces. Connaissant les conditions optimales pour chaque essence de bois, l'étude de leurs propriétés physico-chimiques va fournir une explication de leur différence de réactivité en les reliant à l'efficacité du procédé. Cela permettra à terme de prédire la réactivité du bois en fonction de sa composition et de la sévérité du prétraitement pour la production de bioéthanol de seconde génération.

Partie 2

Mécanismes et leviers biologiques pour la transformation



© CIRM-CF- *Fomitopsis pinicola*

La fermentation, procédé en vogue, sert à stocker l'énergie électrique, à sublimer les vins ou à valoriser des déchets alimentaires. Connaître les voies métaboliques impliquées ouvre de belles perspectives.

La germination est une piste prometteuse pour valoriser la qualité nutritionnelle des céréales ; exemples ici des graines de chia et du sorgho.

Des approches originales sont mises en œuvre pour comprendre l'adhésion des probiotiques dans le tractus intestinal, la synthèse de la lignocellulose chez les fougères ou les mécanismes de dégradation de la lignocellulose du bois mort par les champignons.



© Margot Mahieux - Montage expérimental des réacteurs discontinus (« batch ») pour l'étude de la biométhanation in situ

L'ajout d'hydrogène peut accélérer la dégradation du propionate lors de la biométhanation in situ



En savoir plus

Mahieux M. *et al.*

Hydrogen addition can accelerate propionate degradation kinetics during in situ biomethanation

Chemical Engineering Journal - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165151>

Partenariat

- ENGIE, Lab CRIGEN, Stains, France

Projet support:

- convention CIFRE N2021/1463

- Projet PIA ADEME Metha-HYn



Contacts

Gabriel Capson-Tojo, Renaud Escudie et Lucia Braga-Nan

UR LBE

gabriel.capson-tojo@inrae.fr

renaud.escudie@inrae.fr

lucia.braga-nan@inrae.fr



Contexte

La biométhanation in situ, qui consiste à injecter de l'hydrogène (H_2) dans des digesteurs anaérobies, est une voie prometteuse pour transformer le dioxyde de carbone (CO_2) en méthane renouvelable. Cette technologie permettrait d'intégrer les surplus d'électricité renouvelable au réseau gazier et de renforcer la transition énergétique. Toutefois, un frein important demeure : l'accumulation d'acides gras volatils (AGV), en particulier le propionate, dont la dégradation devient thermodynamiquement défavorable à forte concentration en H_2 dissous. Ces accumulations compromettent la stabilité des digesteurs et limitent l'efficacité du procédé. Comprendre comment les communautés microbiennes s'adaptent à l' H_2 et influencent les cinétiques de dégradation des AGV représente donc un enjeu clé pour lever ces verrous et développer des stratégies d'optimisation de la biométhanation in situ.

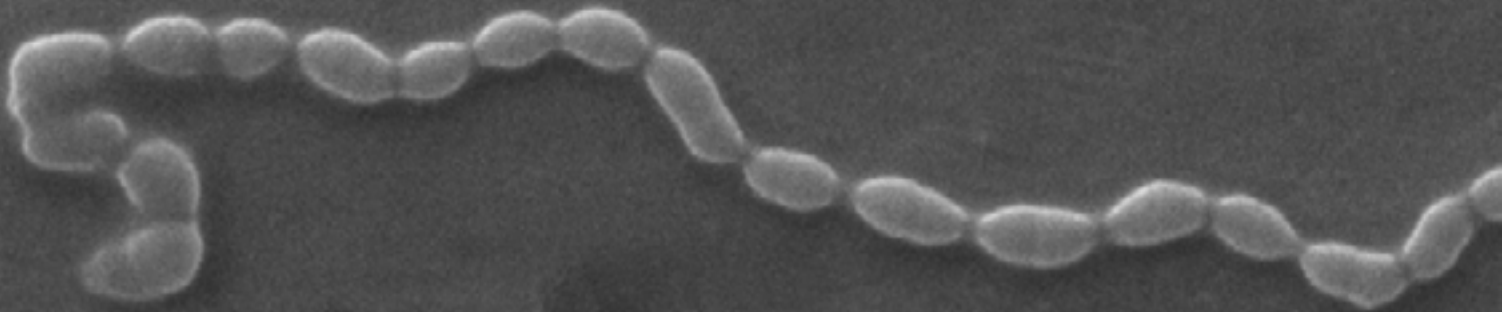
Résultats

Dans cette étude, des réacteurs en mode de fonctionnement discontinu ont été mis en place pour évaluer la dégradation du propionate et d'un mélange acétate/butyrate en présence ou non d' H_2 , à partir d'un inoculum préalablement adapté à l' H_2 . Les résultats montrent que, contrairement aux observations rapportées pour des inocula non adaptés, l'injection d' H_2 n'a pas inhibé la consommation des AGV. Dans le cas du mélange acétate/butyrate, seul un léger allongement du temps

nécessaire à la dégradation complète a été constaté (13 jours avec H_2 contre 9 sans). En revanche, un effet très marqué et inattendu a été observé pour le propionate : la vitesse de dégradation a été multipliée par cinq en présence d' H_2 (0,17 contre 0,03 g DCO- $L^{-1} \cdot j^{-1}$). L'analyse microbienne et la modélisation mécanistique indiquent que cette accélération repose sur la stimulation de méthanogènes hydrogénotrophes complémentaires. Certains consomment l' H_2 à forte concentration, d'autres à faible concentration, ce qui permet de réduire les contraintes thermodynamiques et de favoriser la dégradation du propionate.

Perspectives

Ces résultats montrent que l'adaptation microbienne à l' H_2 constitue un levier important pour améliorer la biométhanation in situ. Loin d'être un facteur limitant, l'injection d' H_2 peut, après acclimatation, accélérer la dégradation de composés réputés difficiles, comme le propionate. Cette avancée ouvre la voie à de nouvelles stratégies d'optimisation, combinant ajustement des conditions opératoires et gestion ciblée des communautés microbiennes. À terme, de telles approches pourraient renforcer la robustesse des digesteurs, faciliter l'intégration industrielle de la biométhanation in situ et contribuer à la valorisation du CO_2 dans une perspective d'économie circulaire et de transition énergétique.



© Magali Maitre - Chaînettes de cellules de *Oenococcus oeni* observées au microscope électronique

Survivre à l'acidité en ralentissant sa consommation de citrate !



En savoir plus

Eicher C. *et al.*

Investigating *Oenococcus oeni* citrate locus expression: Role of *citR* and impact on acid tolerance

International Journal of Food Microbiology - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111437>

Partenariat

- Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain, Facultat d'Enologia

- Institut Pasteur de Paris, équipe écologie et évolution de la résistance aux antibiotiques

- BioLaffort, Floirac, France

Projet support :

Thèse Camille EICHER cofinancée par l'Institut Agro Dijon et Biolaffort (Floirac,33)

Valorisation

Grand Prix « Sciences et Recherche » de l'Académie Amorim (décembre 2024)

Contact

Cosette Grandvalet

UMR PAM

cosette.grandvalet@institut-agro.fr



Contexte

Oenococcus oeni est une bactérie lactique qui assure la fermentation malolactique des vins. Cette fermentation fait suite à la fermentation alcoolique et contribue à la diminution de l'acidité des vins par la bioconversion du malate en lactate. *O. oeni* métabolise également d'autres acides organiques présents dans le vin tel que le citrate, contribuant ainsi à la complexité aromatique des vins. En effet, la consommation de citrate par les bactéries donne lieu à la production de diacétyle, une molécule à l'origine de l'arôme beurré recherché en très faible quantité dans les vins. Chez *O. oeni*, la consommation de citrate implique des protéines codées par différents gènes regroupés au niveau d'une même région génomique que l'on appelle opéron. L'opéron citrate est précédé d'un gène appelé *citR*. Pour l'ensemble des différentes souches de bactérie *O. oeni* étudiées, la séquence génétique du gène *citR* présente une certaine variabilité.

Résultats

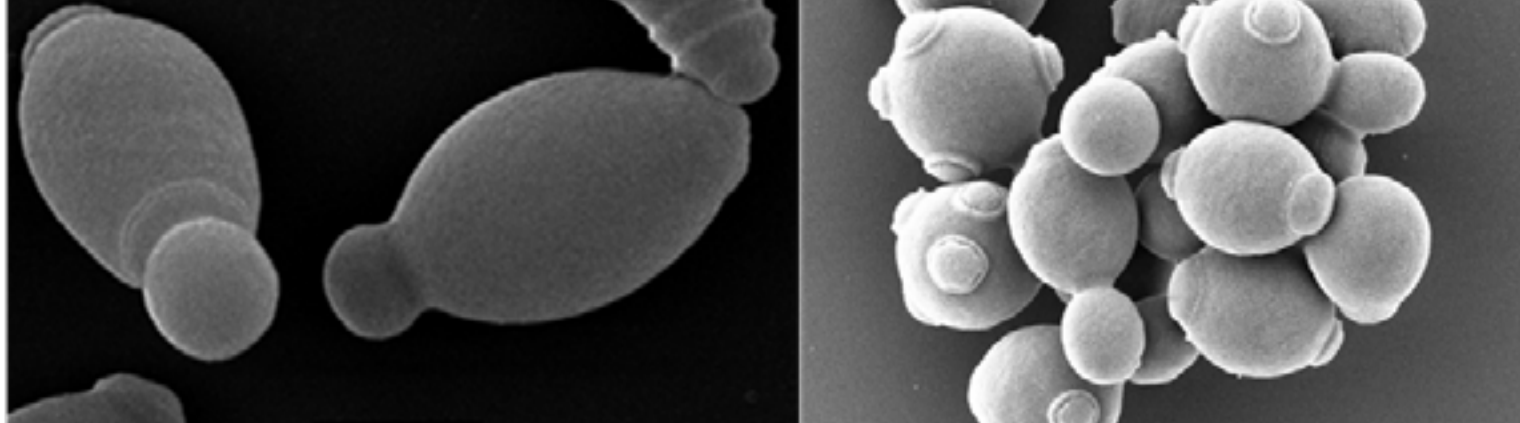
Les souches de *O. oeni* ne consomment pas tout le citrate à la même vitesse. Parmi elles, la souche ATCC BAA-1163 consomme très rapidement cet acide organique. Pourquoi ? Parce que cette souche porte une mutation dans le gène *citR* qui de ce fait ne fonctionne plus correctement. Normalement, le produit

de ce gène freine l'expression des gènes impliqués dans la consommation du citrate. Lorsque le gène *citR* est inactivé, le frein ne marche plus, la bactérie exprime fortement ces gènes du métabolisme du citrate ce qui entraîne une consommation rapide du citrate. En introduisant une copie fonctionnelle du gène *citR* dans la souche ATCC BAA-1163, la régulation de l'expression a pu être rétablie et un ralentissement ainsi de la consommation de citrate a été observé. Ce ralentissement a pour conséquence d'optimiser la croissance de la souche ATCC BAA-1163 en milieu acide soulignant le lien entre le métabolisme du citrate et la tolérance de *O. oeni* à l'acidité, un paramètre crucial en contexte oenologique.

Perspectives

Cette étude a permis de caractériser le rôle du gène *citR* dans la régulation génétique de l'opéron citrate et de mettre en lumière le lien entre la vitesse de consommation du citrate et la tolérance de *O. oeni* à l'acidité.

La compréhension de ce métabolisme permet ainsi de guider la sélection de souches plus aptes à mener la fermentation malolactique dans des vins particulièrement acides.



© Société Lallemand - Oenology 2019 -
Hanseniaspora Vineae / Torulaspora delbrueckii

Mannoprotéines de levure : des clés moléculaires pour sublimer les vins



En savoir plus

Assunção Bicca S. *et al.*

Exploring the dynamic between yeast mannoproteins structure and wine stability. Part 1: Polysaccharides part characteristics of *S. cerevisiae* and non-*Saccharomyces* mannoproteins

Carbohydrate Polymers - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123770>

Partenariat

- Société Lallemand
- Société Oenobrand

Contacts

Céline Poncet-Legrand et Thierry Doco

UMR SPO

celine.poncet-legrand@inrae.fr

thierry.doco@inrae.fr



Contexte

Les mannoprotéines (MPs) issues des levures de fermentation sont reconnues depuis longtemps pour leur rôle dans la stabilité et la qualité du vin. Toutefois, la majorité des études se sont concentrées sur la levure la plus couramment utilisée, *Saccharomyces cerevisiae*. L'objectif de notre étude est d'examiner les MPs produites par d'autres espèces non-*Saccharomyces*, en caractérisant précisément leur partie polysaccharidique, afin de comprendre la relation entre leur structure et leurs propriétés fonctionnelles. L'objectif final est d'ouvrir la voie à une utilisation plus ciblée des mannoprotéines de levures voire des levures sélectionnées pour influencer les qualités du vin.

Résultats

Les analyses ont révélé des différences structurales majeures. Les MPs issues de levures non-*Saccharomyces* présentent des caractéristiques macromoléculaires distinctes de celles produites par *S. cerevisiae*. Celles de la levure *Schizosaccharomyces japonicus* contiennent une quantité significative de galactose, un sucre rarement présent dans ces molécules. De plus, *S. japonicus*, et dans une moindre mesure *Hanseniaspora vineae*, se distinguent des autres par leur charge beaucoup plus négative au pH du vin.

Nous avons également observé une grande diversité de structures : molécules plus ou moins linéaires,

plus ou moins branchées. Les MPs de *Torulaspora delbrueckii* se différencient nettement, avec une chaîne polysaccharidique principale plus courte mais présentant des ramifications plus longues qui changent la conformation de la molécule.

Enfin, l'étude a montré que, même au sein de *S. cerevisiae*, les conditions de fermentation (aérobiose vs anaérobiose) influencent la structure des MPs, ce qui souligne l'importance des paramètres de production.

Perspectives

En identifiant l'impact de la souche de levure et des conditions de fermentation sur la structure des MPs, notre étude ouvre de nouvelles perspectives pour l'œnologie. Il reste à déterminer le comportement physico-chimique de chaque type de mannoprotéine face aux composés du vin (polyphénols, composés d'arôme, protéines, THK...), ainsi que leurs éventuelles différences en termes de propriétés technologiques. Les vignerons pourraient ainsi sélectionner des levures spécifiques non seulement pour la fermentation, mais aussi pour les propriétés stabilisatrices et organoleptiques des mannoprotéines qu'elles produisent. L'OIV (Organisation Internationale de la Vigne et du Vin) ayant récemment accepté l'utilisation des levures non-*Saccharomyces*, nous disposons d'un levier supplémentaire pour améliorer la qualité des vins.



© Mathilde Bourgeois - Réacteurs batchs de fermentation connectés à une MicroGC pour une analyse en ligne continue de la production de gaz

Impact des paramètres opératoires sur la production sélective d'acide propionique en fermentation



En savoir plus

Bourgeois M. *et al.*

Effect of operating conditions on food waste fermentation to enhance VFA production and propionic acid selectivity

Environmental Technology & Innovation - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104324>

Partenariat

Projet support :

Projet Européen BIOCTANE

Contacts

Éric Trably, Nicolas Bernet et Mathilde Bourgeois

UR LBE

eric.trably@inrae.fr

nicolas.bernet@inrae.fr

mathilde.bourgeois@inrae.fr



Contexte

La fermentation des déchets alimentaires offre une approche prometteuse pour la production d'acides gras volatils (AGV) valorisables en chimie verte. Cependant, le contrôle du profil des AGV, en particulier l'enrichissement en acide propionique, reste un défi en raison de la complexité des communautés microbiennes impliquées. Cette étude examine l'influence des paramètres opérationnels clés (pH initial, température et concentration du substrat) sur la production d'AGV et le développement des communautés microbiennes associées.

Résultats

Des fermentations en mode batch de déchets alimentaires reconstitués ont été réalisées en faisant varier le pH initial (7 à 9), la température (24 à 45 °C) et la concentration en substrat (7,8 à 100 g VS/L).

Les conditions les plus favorables à la production de propionate ont été un pH = 9, une température de 35 °C et une faible charge en substrat (7,8 g VS/L). La concentration de propionate a alors atteint 1,7 g/L, représentant jusqu'à 32 % des métabolites, alors que le propionate restait minoritaire pour les autres conditions opératoires testées. L'acétate demeurait toutefois majoritaire et la conversion globale des déchets atteignait 83 % de la matière biodégradable.

L'analyse des communautés microbiennes (séquençage 16S rDNA) a révélé une influence notable

des conditions opératoires. Une abondance accrue d'*Enterobacteriaceae*, *Lachnospiraceae* et d'*Exiguobacterium spp.* était positivement corrélée à la production de propionate dans les conditions optimales.

Ainsi, de fortes corrélations ont été mises en évidence entre les paramètres opératoires, la composition microbienne et les profils métaboliques, confirmant que l'ajustement des conditions de fermentation constitue un levier d'action pour orienter la sélectivité des métabolites.

Perspectives

Ces résultats ouvrent des perspectives pour une valorisation sélective et à haut rendement des déchets alimentaires. Les observations en batch constituent une base pour tester la stabilité du procédé en conditions (semi)-continues. Cependant, la sélectivité en propionate demeure faible comparée à celle de l'acétate. Un contrôle plus fin des voies métaboliques et de la communauté apparaît nécessaire. Parmi les pistes envisagées, une perspective intéressante repose sur une fermentation en deux étapes : une production de lactate par fermentation lactique (précurseur du propionate), suivie d'une bioaugmentation avec des bactéries propioniques afin d'accroître la sélectivité en propionate.

Ce travail fournit une première base pour orienter la fermentation de déchets alimentaires vers des molécules à haute valeur ajoutée comme le propionate, améliorant ainsi la rentabilité et l'intérêt de leur valorisation.



© Thierry Chardot, Christelle Louis Mondésir - De la graine de chia mature à la plantule: des stades aux morphologies et compositions en réserves différentes

Évolution des lipides et des protéines de réserve au cours de la germination des graines de chia



En savoir plus

Labat V. *et al.*

Modifications in lipids and storage proteins composition during germination of chia seeds (*Salvia hispanica* L.)

Food Chemistry - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144682>

Partenariat

-Université Grenoble Alpes, CNRS, CEA, IRIG, MEM, Grenoble, France

-PAPPSO, Génétique Quantitative et Evolution (GQE), Université Paris-Saclay, INRAE, CNRS, AgroParisTech, Gif-sur-Yvette, France

-UMR IATE, Université Montpellier, INRAE, Institut-Agro Montpellier, Montpellier, France

Projet support :

Intercarnot Qualiment - 3Bcar OBEINN

Contact

Thierry Chardot

UMR IJPB

thierry.chardot@inrae.fr



Contexte

Durant la transition de la graine mature à la plantule, de nombreux changements physiques et biochimiques se produisent : absorption d'eau, utilisation des réserves, reprise de la croissance et synthèse de nouvelles molécules. L'objectif était de mieux comprendre les transformations des réserves lors de la germination des graines de chia et d'en évaluer l'impact sur la valeur nutritionnelle et technologique des graines. Pour ce faire, plusieurs stades de la transition lors de la germination ont été définis visuellement et les transformations associées ont été étudiées par des approches de protéomiques et lipidomiques, en se focalisant sur les réserves protéiques et lipidiques, ainsi que les composés hydrosolubles.

Résultats

Les réserves de la chia sont stockées sous forme de protéines (globulines 11S) et d'huile, majoritairement composée de triacylglycérols (TAGs) riches en acide α -linoléique (ALA, ω 3). Nous avons mis en évidence un lipide original, l'acétyl-DAG, jamais observé auparavant dans cette espèce, ainsi que des lipides oxydés et hydroxylés susceptibles d'altérer la qualité alimentaire des graines. Ces formes sont moins nombreuses chez les gouttelettes lipidiques, ce qui est cohérent avec leur rôle protecteur contre l'oxydation.

Les protéines 11S sont mobilisées au cours des 24 premières heures

d'imbibition, tandis que l'huile est utilisée plus tard (entre 24 et 72 heures). La composition de l'huile évolue vers des lipides plus polaires liés aux membranes et à la photosynthèse (phospholipides, galactolipides), tandis que la composition des gouttelettes lipidiques reste remarquablement stable avec le temps. La germination favorise par ailleurs la libération de petits peptides et de composés phénoliques, susceptibles de jouer un rôle dans la biostimulation et la défense des plantes.

Ces résultats confirment les études antérieures montrant que la germination accroît la teneur en protéines solubles, polyphénols et composés antioxydants actifs contre les radicaux libres.

Perspectives

Riches en protéines et en acides gras bénéfiques pour la santé, la graine de chia voit sa valeur nutritionnelle renforcée par la germination, ouvrant la voie à des applications alimentaires innovantes (boissons enrichies en oméga-3, protéines et antioxydants). Les perspectives scientifiques consisteront à :

- Identifier et caractériser les molécules bioactives générées lors de la germination afin de mieux comprendre leurs rôles dans la physiologie de la graine et ultérieurement de les exploiter.

- Exploiter la germination comme levier pour améliorer la valeur nutritionnelle et les usages du chia et d'autres graines oléagineuses.



© AdobeStock

Libérer le potentiel nutritionnel du sorgho, une céréale qui gagne à germer



En savoir plus

Thomaz dos Santos D'Almeida C. *et al.*

Enhancing the nutritional value of sorghum grains bred for northern Europe through processing: A perspective on phenolic bioaccessibility and protein digestibility

Food Chemistry - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142627>

Partenariat

- Laboratory of Bioactives, Food and Nutrition Graduate Program, Federal University of the State of Rio de Janeiro, UNIRIO, Brazil

- Center of Innovation in Mass Spectrometry, Laboratory of Protein Biochemistry, UNIRIO, Brazil

- Department of Food and Human Nutritional Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, Canada

- Department of Food Science and Nutrition, School of Food Engineering, University of Campinas, UNICAMP, Brazil

Projet support :

Thèse de Carolina D'Almeida en co-direction entre l'UMR IATE, l'Unirio et Unicampi (Brésil)

Contact

Hamza Mameri

UMR IATE

hamza.mameri@inrae.fr



Contexte

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L.) attire de plus en plus d'attention des consommateurs et transformateurs, car il est résistant aux conditions climatiques difficiles et contient des composés phénoliques bénéfiques pour la santé. Cependant, les fortes interactions entre les kafirines (les principales protéines du sorgho) et les composés phénoliques limitent la digestion des protéines et la disponibilité de ces composés dans l'organisme. Certaines techniques de transformation peuvent fragiliser ces liaisons et améliorer la valeur nutritionnelle du grain. Dans le cadre de ce travail, nous avons analysé ces interactions et avons évalué les effets de trois procédés : 1. La germination, qui consiste à faire tremper puis germer les grains pendant plusieurs heures. 2. Le décorticage, qui enlève une partie de l'enveloppe du grain. 3. La cuisson à l'eau, semblable à la préparation domestique du sorgho.

Résultats

Lors de cette étude des méthodes d'analyse moléculaire et bio-chimique pour mesurer la digestibilité des protéines et la disponibilité des composés phénoliques après digestion ont été utilisées. Nos résultats ont montré que 1. Le décorticage a entraîné la plus forte perte de composés phénoliques, notamment une diminution de 68 %

des flavonoïdes et une réduction importante des acides phénoliques. 2. La germination a eu des effets variables : elle a favorisé la libération de certains acides phénoliques mais a diminué la quantité de flavonoïdes disponibles. 3. La cuisson a peu modifié la teneur globale en composés phénoliques du grain entier, mais elle a facilité la libération de certaines molécules (comme les catéchines) à partir du son.

En résumé, les interactions entre protéines et composés phénoliques jouent un rôle clé dans la digestion et l'absorption des nutriments. Parmi les procédés étudiés, la germination semble offrir le meilleur équilibre : elle améliore la digestibilité des protéines tout en préservant une bonne part des composés bénéfiques.

Perspectives

Ces résultats ouvrent la voie à des stratégies de transformation ciblées pour exploiter au mieux le potentiel nutritionnel et fonctionnel du sorgho et élargir culture et sa consommation à travers le monde.



© Truc Phung, with the support of the Dimacell imaging platform - *B. infantis* à la surface des cryptes dans le tractus intestinal porcin.

Vers de nouvelles approches physicochimiques pour évaluer l'adhésion des probiotiques dans l'intestin



En savoir plus

Phùng T.T.T. *et al.*

Unlocking Probiotic Potential: Physicochemical Approaches to Evaluate Probiotic Bacterial Adhesion Potential to the Intestinal Tract

Molecular Nutrition and Food Research - 2025

<https://doi.org/10.1002/MNFR.202400705>

Partenariat

Projet support :

Financé par la bourse France Excellence de l'Ambassade de France au Vietnam (via Campus France) et l'ISITE Bourgogne-Franche-Comté

Contacts

Truc PHUNG, Sébastien DUPONT et Thomas KARBOWIAK

UMR PAM

truc.phung@agrosupdiijon.fr

sebastien.dupont@agrosupdiijon.fr

thomas.karbowiak@institut-agro.fr



Contexte

L'adhésion des bactéries probiotiques au tractus intestinal représente un critère essentiel pour évaluer l'efficacité d'une supplémentation probiotique lorsqu'une réimplantation des microorganismes est ciblée. Cette utilisation des probiotiques devient de plus en plus répandue, mais leur adhésion et leur réelle colonisation dans l'intestin demeurent toutefois discutables. Cette incertitude découle de la complexité de l'environnement gastro-intestinal, qui complique la compréhension globale des mécanismes d'adhésion bactérienne dans ce milieu dynamique.

Aussi, les mécanismes ont été évalués en considérant les phénomènes d'adhésion bactérienne intervenant successivement dans l'intestin selon quatre étapes distinctes : le transport de matière dans le flux liquide, l'adhésion réversible aux composants intestinaux, l'adhésion irréversible aux substrats intestinaux et la colonisation dans le tractus intestinal. Sur la base de cette approche, ce travail propose de nouvelles méthodes d'évaluation des premières interactions établies par les probiotiques dans le flux liquide puis lors de leur adhésion réversible au moyen d'analyses physicochimiques spécifiques.

Résultats

Cette étude a permis de mieux comprendre l'adhésion bactérienne dans le tractus gastro-intestinal et les moyens de pouvoir l'évaluer à différents stades en couplant différentes approches physicochimiques. Au cours de la phase de transport de matière, la morphologie

des probiotiques représente le principal facteur qui les rapproche du substrat intestinal. Dans la phase d'adhésion réversible, la détermination de la tension superficielle des bactéries et du mucus intestinal permet de calculer le travail d'adhésion. Contrairement à ce que suggéraient de précédentes études, le mucus intestinal présente un fort caractère hydrophile, qui favorise l'adhésion des bactéries hydrophiles. Enfin, une évaluation multicritère intégrant les différentes étapes, du transport de matière à la colonisation, a été proposée afin d'évaluer de la façon la plus exhaustive possible le potentiel d'adhésion des probiotiques dans le tractus intestinal.

Perspectives

Une meilleure compréhension du potentiel d'adhésion bactérienne à l'intestin permettra d'identifier les stratégies les plus prometteuses pour améliorer l'adhésion des probiotiques, et ainsi augmenter leur efficacité. Celles-ci pourraient impliquer le recours au génie génétique pour modifier l'expression des gènes codant pour les adhésines ou encore les protéines de surface qui favorisent la fixation aux cellules intestinales. Plus simplement, l'incorporation de polymères mucoadhésifs dans la formulation des matrices d'encapsulation pourrait également être envisagée. La combinaison des approches proposées offre ainsi de nouvelles voies d'étude prometteuses pour la conception de probiotiques de nouvelle génération mieux adaptés et plus efficaces pour améliorer la santé intestinale.

Ce que cachent les parois cellulaires de fougères



En savoir plus

Ali Z. et al.

Comparative transcriptomics in ferns reveals key innovations and divergent evolution of the secondary cell walls

Nature Plants - 2025

<https://doi.org/10.1038/s41477-025-01978-y>

Partenariat

- Nanyang Technological University, Singapore, Singapore

- Ghent University, Ghent, Belgium

- VIB Center for Plant Systems Biology, Ghent, Belgium

- University of Goettingen, Göttingen, Germany

- University of Lausanne, Lausanne, Switzerland

- University of Pretoria, Pretoria, South Africa

- Nanjing Agricultural University, Nanjing, China

- Singapore Botanic Gardens, Singapore, Republic of Singapore

- University of Kiel, Kiel, Germany

- University of Copenhagen, Frederiksberg, Denmark

Contact

Richard Sibout

UR BIA

richard.sibout@inrae.fr



Contexte

Les fougères, qui appartiennent au groupe des monilophytes, constituent une lignée ancienne de plantes vasculaires dont les génomes, souvent volumineux, restent encore largement méconnus. Leurs parois cellulaires présentent des particularités notables, notamment une forte proportion de mannanes, ce qui les classe parfois comme appartenant au « type III ». L'étude de ces parois est essentielle pour comprendre l'évolution, la diversité et le potentiel applicatif des biomasses de plantes terrestres. Elle permet également d'explorer des voies métaboliques originales et d'identifier des composés d'intérêt biotechnologique.

Résultats

Les résultats révèlent que les fougères possèdent une diversité d'unités de lignine comprenant des formes hydroxyphényles, coniféryles et, dans certains cas plus rares, syringyles. La présence d'unités syringyles (comparable en quantité à celles qu'on trouve dans la paille de blé par exemple) est particulièrement significative, car elle semble avoir émergé indépendamment de celle observée chez les plantes à graines. Cette convergence évolutive suggère l'existence de voies métaboliques parallèles ayant conduit à des solutions structurales similaires pour la rigidification des parois secondaires. Ainsi, la biosynthèse des polymères ligneux chez les fougères éclaire nos connaissances sur l'évolution des tissus conducteurs et de soutien chez les végétaux.

Une découverte majeure concerne

l'identification du 2-O-méthyl-glucose dans les parois de certaines fougères. Ce sucre méthylé n'avait encore jamais été décrit chez les plantes, ni même signalé dans la littérature scientifique relative au monde vivant à notre connaissance. Sa présence indique l'existence d'une voie de modification des polysaccharides jusqu'alors inconnue. Cette singularité chimique renforce l'idée que les fougères représentent un réservoir de diversité biochimique insoupçonnée, susceptible de renouveler notre compréhension de l'architecture et de la dynamique des parois végétales. Sur ce terrain, environ la moitié des familles de gènes identifiées par nos collaborateurs apparaît spécifique aux fougères, soulignant l'originalité de leur patrimoine génétique et l'existence de réseaux de régulation distincts de ceux décrits chez les plantes à graines. Ces données suggèrent une évolution autonome de certains mécanismes de biosynthèse pariétale.

Perspectives

Les perspectives de recherche visent principalement à caractériser plus finement le 2-O-méthyl-glucose, en déterminant sa structure *in planta*, ses liaisons dans la paroi, sa localisation exacte et son rôle fonctionnel, notamment dans la mécanique, la perméabilité et d'autres propriétés des parois. L'identification des enzymes responsables de sa synthèse et l'évaluation de son intérêt potentiel en biotechnologie constituent également des pistes prometteuses, tandis que des études comparatives permettront de préciser son origine évolutive et sa spécificité phylogénétique.



© CIRM-CF- *Fomitopsis pinicola*

Quand le bois se décompose... même sans oxygène !



En savoir plus

Röllig R. *et al.*

Wood decay under anoxia by the brown-rot fungus *Fomitopsis pinicola*

Nature Communications - 2025

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-62567-3>

Partenariat

- Department of Biochemistry, Univ. of Cambridge, UK
 - Department of Physics, Univ. of Warwick, Coventry, UK
 - Department of Geosciences and Natural Resource Management, Univ. of Copenhagen, Denmark
 - Department of Biology, Univ. of Copenhagen, Denmark
 - Department of Biotechnology and Biomedicine, Technical Univ. of Denmark
 - Architecture et Fonction des Macromolécules Biologiques, Aix-Marseille Univ., CNRS, INRAE
 - Univ. Paris-Saclay, CEA, INRAE, Département Médicaments et Technologies pour la Santé
- Projet support :
Projet européen OxyMiST financé par la fondation NovoNordisk

Contacts

Jean-Guy Berrin, Marie-Noëlle Rosso et Lionel Tarrago

UMR BBF

jean-guy.berrin@inrae.fr

marie-noelle.rosso@inrae.fr

lionel.tarrago@inrae.fr



Contexte

Les forêts représentent un important puits de carbone, stockant 45 % du carbone terrestre. Leur équilibre repose sur un microbiome diversifié dans lequel les champignons saprotrophes jouent un rôle clé dans la décomposition de la lignocellulose. Parmi eux, les champignons de la pourriture blanche utilisent un ensemble complet d'enzymes pour dégrader le bois, tandis que les champignons de la pourriture brune emploient une chimie de Fenton et un panel d'enzymes plus limité. Ces mécanismes ont été étudiés principalement en présence d'oxygène alors que les champignons peuvent être confrontés à des zones pauvres en oxygène. Leur capacité réelle à décomposer le bois sans oxygène reste donc méconnue.

Résultats

L'objectif du projet OxyMiST est d'étudier l'influence de l'oxygène dans les processus de dégradation du bois par les champignons filamenteux. Des échantillons de bois en décomposition ont été collectés à différentes profondeurs depuis la surface du bois dans une forêt de résineux au nord du Danemark. La métaprotéomique a été utilisée afin d'identifier les champignons décomposeurs du bois et leurs enzymes. Cette approche nous a permis de détecter plusieurs champignons actifs au cœur du bois, dans une zone dépourvue d'oxygène. En nous concentrant sur le champignon *Fomitopsis pinicola*, nous avons

découvert qu'il est capable de croître sur du bois dans des conditions totalement anaérobies. Ces résultats surprenants et inattendus ont été confirmés grâce à la RMN du solide, qui nous a permis de démontrer la dégradation des polysaccharides de la paroi cellulaire végétale ainsi que la croissance fongique en absence d'oxygène. Des analyses protéomiques complémentaires ont révélé que *F. pinicola* passe d'un processus de dégradation basé sur la chimie de Fenton en conditions aérobies à la sécrétion d'un panel d'enzymes ciblant les hémicelluloses en anoxie.

Perspectives

En conclusion, ces travaux approfondissent la compréhension des processus naturels de dégradation de la lignocellulose et soulignent le rôle essentiel de l'oxygène dans les mécanismes de décomposition du bois par les champignons. La démonstration d'une décomposition saprotrophe en milieu anoxique révèle une dimension inédite de l'adaptabilité fongique. L'ampleur de cette dépolymérisation anaérobie par les basidiomycètes doit être davantage étudiée afin de mieux comprendre et quantifier les dynamiques du carbone dans les forêts, notamment boréales. Dans un contexte de bioéconomie, cette découverte ouvre également la voie à des stratégies innovantes de décarbonation, inspirées des processus anaérobies naturels mis en œuvre par les champignons décomposeurs du bois.

Partie 3

Les procédés **physiques et chimiques**



© Régis Gougeon- L'art
d'apporter subtilement du
bois au vin

Découvrez ici les effets d'un traitement par micro-ondes sur la flore indigène du crottin de cheval ou sur des pommes, le superchilling pour prolonger la durée de conservation des aliments ou le trempage à haute température pour améliorer la qualité nutritionnelle des légumineuses.

Des procédés chimiques doux tels que la biofiltration offrent d'excellentes performances épuratoires des eaux usées. Des procédés invisibles façonnent le profil aromatique des vins ; ainsi l'élevage en fûts de chêne ou la perméabilité des bouchons.



© Kevin Bonnot - Pilote micro-ondes (2,45 GHz) utilisé lors des tests sur l'influence des effets thermiques et non-thermiques des micro-ondes sur la flore microbienne

Impact des micro-ondes sur les microorganismes du fumier de cheval : application en fermentation



En savoir plus

Pipereau K. *et al.*

Thermal and non-thermal effects of microwave pretreatment on horse dung microbial communities used as inoculum for acidogenic fermentation

Bioresource Technology - 2025

<https://doi.org/10.3390/foods12213927>

Partenariat

Projet support :

Projet Labex AGRO-2011-LABX-002, project 2201-39 (I-site Muse) coordonné par la fondation Agropolis et demie bourse de thèse TRANSFORM.

Contacts

Hélène Carrère, Éric Trably et Diana García-Bernet

UR LBE

helene.carrere@inrae.fr

eric.trably@inrae.fr

diana.garcia-bernet@inrae.fr



Contexte

Les acides gras volatils (AGV) sont des molécules utilisées dans de nombreux domaines d'application. Leur demande est en forte hausse mais leur production est majoritairement pétrosourcée. La production d'AGV en bioraffinerie est possible en utilisant des biomasses renouvelables et les déchets. Le fumier de cheval représente un déchet agricole abondant, riche en sucres complexes mais encore peu valorisé par les procédés de fermentation. Son fort contenu en microorganismes indigènes lui permet de réaliser la fermentation acidogène sans inoculum externe, simplifiant le procédé. En revanche, les substrats lignocellulosiques nécessitent un prétraitement pour augmenter l'accessibilité de la matière, mais ils peuvent s'avérer délétères pour les communautés microbiennes. C'est dans ce contexte que le prétraitement par micro-ondes est étudié comme alternative aux prétraitements thermiques conventionnels. L'originalité de cette étude repose sur l'évaluation de l'effet du prétraitement micro-onde sur la flore microbienne indigène.

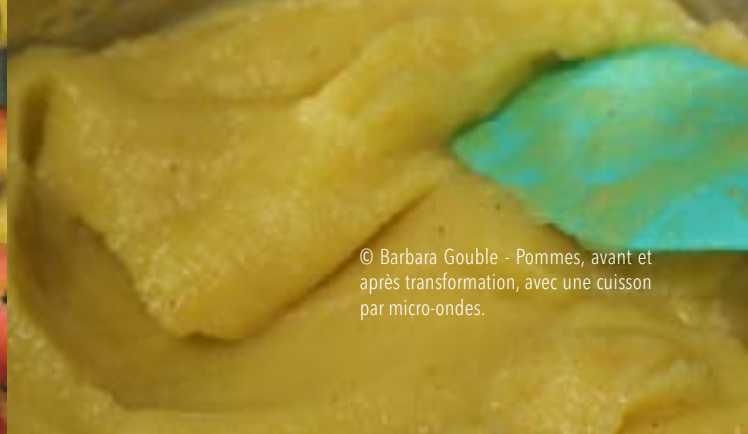
Résultats

Les effets thermiques et non-thermiques du prétraitement micro-ondes ont été découplés pour quantifier leur impact sur la flore du crottin de cheval, utilisé comme inoculum pour la fermentation acidogène de la paille de blé. Le prétraitement micro-ondes (200 W pendant 15 min) à 95 °C du crottin de cheval, utilisé comme inoculum, a

induit une augmentation significative du rendement de conversion lors de la fermentation de la paille de blé (+ 45 % par rapport au contrôle sans prétraitement). Les performances sur la flore microbienne indigène ont été similaires à celles du traitement thermique conventionnel (15 min à 95 °C). En revanche, le même prétraitement micro-ondes (200 W pendant 15 min) mais à 40 °C, impliquant uniquement des effets radiatifs, conduit à un rendement significativement plus bas et comparable au contrôle sans prétraitement. Ainsi, l'augmentation du rendement en fermentation acidogène est liée aux effets thermiques. Ces derniers entraînent une réduction partielle des populations sensibles à la chaleur tandis que les effets liés à l'irradiation augmentent la richesse microbienne. Ces résultats démontrent que la modulation ciblée de l'inoculum via un prétraitement permet d'orienter la fermentation et d'augmenter la productivité.

Perspectives

Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour la valorisation de biomasses complexes par fermentation acidogène avec notamment des procédés sans ajout d'inoculum externe, simplifiant ainsi le procédé et réduisant les coûts. À terme, l'optimisation de prétraitements par micro-ondes pourrait permettre de concevoir des inocula différents en fonction des conditions de prétraitements choisies, pouvant améliorer à la fois les rendements et la sélectivité des AGV.



© Barbara Gouble - Pommes, avant et après transformation, avec une cuisson par micro-ondes.

Cuisson par micro-ondes pour améliorer la qualité des purées de pomme



En savoir plus

Bureau S. *et al.*

Impact of conventional and innovative processing conditions on organoleptic and nutritional applesauce properties from organic and conventional production systems

Food Chemistry - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142346>

Partenariat

- Institute of Horticulture - National Research Institute, Poland

- Department of Functional and Organic Food, Institute of Human Nutrition Sciences, Warsaw University of Life Sciences, Poland

Projet support :

Projet ProOrg (Code of Practice for organic food processing), H2020 ERA-net project, CORE Organic Cofund and the cofund from the European Commission.

Contacts

Sylvie Bureau, Alexandre Leca et Carine Le Bourvellec

UMR SQPOV

sylvie.bureau@inrae.fr

alexandre.leca@inrae.fr

carine.le-bourvellec@inrae.fr



Contexte

Les pommes, riches en composés phénoliques et en fibres, sont associées à des bénéfices santé. La transformation thermique conventionnelle (découpe, cuisson à 90-98 °C, pasteurisation) altère les composés thermosensibles, affectant la qualité finale. Dans une recherche de maintien de la qualité, il était intéressant de comparer une cuisson conventionnelle à la cuisson utilisant les micro-ondes, permettant une inactivation enzymatique rapide et applicable aux fruits entiers.

Résultats

La viscosité de la purée change principalement avec les conditions de transformation et, plus faiblement, avec les variétés. Les purées micro-ondes, plus riches en matière sèche, sont plus visqueuses.

Les teneurs en sucres et acides organiques des pommes varient selon la variété, l'année de récolte et, dans une moindre mesure, le mode de production. La transformation en purée réduit significativement leur teneur, surtout par micro-ondes, en raison de leur dégradation thermique.

Les composés volatils (esters, aldéhydes, alcools, cétones, sesquiterpènes) varient selon la variété, l'année, mais aussi lors de la transformation. Les purées produites par micro-ondes en perdent davantage, en raison probablement des points chauds qui favorisent leur dégradation thermique, mais aussi limitent probablement leur libération avec leur viscosité plus élevée.

Les teneurs en composés phénoliques

sont globalement plus élevées dans les pommes issues de l'agriculture biologique, avec cependant un impact dominant de la variété. Leur teneur baisse fortement à la cuisson, surtout aux micro-ondes, en raison d'une diffusion moindre depuis la peau et les pépins et d'une dégradation thermique accrue. La cuisson conventionnelle préserve mieux les procyanidines et les anthocyanes, sensibles à la température.

Les teneurs en parois varient selon la variété, mais sont stables entre les systèmes de production ou les années. La transformation réduit les teneurs en parois via la dépolymérisation des pectines par un mécanisme d'hydrolyse acide et/ou de β -élimination. Le traitement par micro-ondes, malgré les temps courts, provoque une dégradation plus marquée (baisse du degré de méthylation des pectines, augmentation des teneurs en rhamnose, xylose, et glucose cellulosique) en raison de points chauds. La cuisson conventionnelle préserve mieux l'intégrité structurale des parois.

Perspectives

La transformation innovante par micro-ondes (cuisson rapide des fruits entiers, sans additifs) améliore la couleur et la viscosité des purées, mais réduit leur teneur en composés phénoliques. Son potentiel industriel nécessite une évaluation multicritère prenant en compte l'acceptabilité du consommateur, le coût, et l'impact environnemental via une analyse du cycle de vie (ACV) pour une adoption durable.



© Nariman El Abdi-
Tranches de morceaux de
poulet après congélation
partielle à 30 % de glace

Lien entre la microstructure et la qualité des aliments après un procédé de Superchilling



En savoir plus

El-Abdi N. *et al.*

Studying the effects of superchilling storage conditions on the microstructure and quality of chicken breast meat

Journal of Food Engineering - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112504>

Partenariat

Projet support :

ANR Supershield (<https://supershield.hub.inrae.fr/le-projet-supershield>)

Contacts

Fatou Toutie Ndoye et Graciela Alvarez

UR FRISE

fatou-toutie.ndoye@inrae.fr

graciela.alvarez@inrae.fr



Contexte

La préservation de la qualité des viandes constitue un défi majeur pour l'industrie alimentaire. Si la réfrigération offre une durée de vie limitée et la congélation entraîne des altérations irréversibles, le superchilling se positionne comme un compromis efficace. Ce procédé, reposant sur une congélation partielle (30 - 35 % d'eau transformée en glace) suivie d'un stockage à 1 - 2 °C en dessous du point de congélation, permet d'allonger la durée de conservation tout en préservant des caractéristiques proches du frais. Toutefois, la sensibilité du procédé aux fluctuations de température dans la chaîne du froid pose un enjeu clé : comprendre les effets de ces variations sur la microstructure et la qualité afin d'optimiser le procédé.

Résultats

L'étude a porté sur des filets de poulet partiellement pré-congelés (30 % de glace) puis stockés 21 jours sous trois conditions de superchilling : deux températures constantes (-1,6 °C et -2,0 °C) et une fluctuante (-1,3 ± 0,5 °C). L'imagerie 3D par microtomographie à rayons X couplée à une cellule froide a permis de visualiser l'évolution de la microstructure et de quantifier la fraction de glace dans les tissus, en parallèle du suivi des critères de qualité (perte en eau, couleur, pH), comparés à une conservation en réfrigération. Sous température

constante, les résultats montrent que la microstructure évolue rapidement après la congélation partielle et durant les premiers jours, puis tend à se stabiliser, limitant ainsi les altérations de la qualité. À l'inverse, les conditions fluctuantes impliquent des changements microstructuraux importants, notamment par recristallisation, entraînant une dégradation de la qualité plus rapide : perte en eau accrue (+64 % à 21 jours), décoloration marquée et hausse du pH. Une analyse multivariée a confirmé le lien étroit entre microstructure et qualité, soulignant que la durée de stockage influence fortement l'acceptabilité du produit (perte en eau, décoloration), tandis que la température conditionne davantage l'évolution microstructurale et le pH.

Perspectives

Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle rigoureux de la température pour exploiter pleinement le superchilling et garantir la qualité des produits. L'approche non destructive par imagerie 3D ouvre la voie à l'analyse de la taille et de la distribution des cristaux de glace pour une meilleure compréhension des mécanismes de recristallisation. Les perspectives incluent l'optimisation du procédé et son intégration dans la chaîne du froid, via des emballages et équipements limitant les fluctuations thermiques, tout en répondant aux enjeux de sécurité, de qualité et environnementaux.

Trempage à haute température des graines de légumineuses pour améliorer la valeur nutritionnelle



En savoir plus

Coffigniez F. *et al.*

Phytic acid decrease along hydrothermal treatment of bambara groundnuts: a deep assessment of the mechanisms involved

LWT - Food Science and Technology - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118133>

Partenariat

Projet support :

Projet Européen H2020 InnoFoodAfrica
(<http://www.innofoodafrica.eu/>)

Contacts

Fanny Coffigniez et Valérie Lullien-Pellerin
UMR IATE

fanny.coffigniez@umontpellier.fr

valerie.lullien-pellerin@inrae.fr



Contexte

Les graines de légumineuses sont riches en protéines, fibres et minéraux. Cependant, elles contiennent des facteurs antinutritionnels qui modifient la disponibilité des molécules ou provoquent des effets indésirables. Ainsi l'acide phytique joue un rôle dans la complexation des minéraux diminuant leur disponibilité, mais aussi possiblement l'accessibilité des protéines aux protéases digestives. Cet anti-nutriments peut être éliminé par trempage et/ou hydrolyse enzymatique si les conditions optimales sont réunies. Nous avons cherché à diminuer l'acide phytique dans des graines de la famille des Fabacées et du genre *Vigna*, niébé et bambara, qui sont résistantes à la sécheresse et qui partagent une structure similaire mais une taille de graine différente.

Résultats

Nous avons étudié les effets du trempage des graines à une température favorable aux activités des phytases endogènes au grain. Les mécanismes en jeu lors du trempage (diffusion et hydrolyse enzymatique) ont été modélisés pour être capable de comparer les résultats obtenus selon le type de graines, ainsi que l'effet de leur état structural (graine entière, décortiquée, broyée). Enfin, les répercussions de ce traitement hydro-thermique et de l'état de la matière végétale sur l'augmentation

de la biodisponibilité des minéraux a été évaluée. Le trempage à 55 °C pendant 24 heures s'est avéré efficace pour réduire de 40-60 % la teneur en acide phytique des deux types de Fabacées. Le modèle numérique de diffusion-réaction utilisé tient compte de la géométrie du matériel végétal et des lois physiques de diffusion et d'hydrolyse enzymatique. Il a permis d'attribuer la perte d'acide phytique soit à la diffusion, soit à l'hydrolyse par les phytases endogènes. Il a aussi permis de calculer les valeurs de diffusivité apparente et de constante réactionnelle des phytases pour les deux types de graines. Nous avons montré que le trempage à chaud est plus efficace sur les graines décortiquées car il permet d'augmenter les pertes d'acide phytique sans diminuer les teneurs en minéraux (Fe, Zn), au contraire des graines broyées.

Perspectives

Ce traitement simple peut être mis en œuvre pour augmenter la biodisponibilité minérale à partir de graines décortiquées qui peuvent être utilisées telles quelles ou après introduction dans un aliment pour des personnes en carence ou plus fragiles telles les femmes enceintes et enfants. Le modèle pourrait par ailleurs être généralisable à d'autres légumineuses que celles étudiées.

Spatialisation du transfert d'oxygène en biofiltration : apports de l'expérimentation et de la modélisation à grande échelle



En savoir plus

Archila P.R. *et al.*

Spatial distribution of gas-liquid mass transfer in a co-current upflow biological aerated filter

Chemical Engineering Science - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122186>

Partenariat

- SIAAP-DI

Projets supports :

- Action du programme de recherche Mocopée
- CPER Biovaldec 2015-2020

Contacts

Ahlem Filali, Yannick Fayolle, Sylvie Gillot et Mathieu Sperandio

UR PROSE, UR REVERSAAL et UMR TBI

ahlem.filali@inrae.fr

yannick.fayolle@inrae.fr

sylvie.gillot@inrae.fr

sperandi@insa-toulouse.fr



Contexte

La directive européenne sur les eaux résiduaires urbaines (DERU 2024/3019) place la neutralité énergétique des stations d'épuration au cœur des enjeux, posant de nouveaux défis pour les procédés de traitement. Parmi eux, les biofiltres, procédés à biofilm reposant sur la filtration à travers un milieu granulaire colonisé par des micro-organismes, sont largement déployés en France. Ils offrent d'excellentes performances épuratoires mais restent énergivores, notamment en raison des besoins en aération.

Le transfert gaz-liquide de l'oxygène joue un rôle central dans leur performance énergétique et environnementale. Si ce mécanisme est bien documenté pour les procédés à biomasse libre, tels que les boues activées, il reste encore insuffisamment étudié pour les procédés à biofilm. Dans ces systèmes, sa description repose le plus souvent sur des études menées à l'échelle du laboratoire, sur des lits propres (sans biofilm) et alimentés en eau claire (sans particules), des conditions qui ne reflètent pas le fonctionnement réel des stations d'épuration.

Résultats

Pour évaluer le transfert d'oxygène dans des conditions représentatives, un pilote de biofiltration (environ 6 m de hauteur pour un volume d'environ

1 m³) a été installé et exploité sur une station d'épuration pendant deux ans, d'abord avec de l'eau claire puis avec de l'eau usée prélevée sur site.

Les essais en eau claire ont servi de référence et ont montré une spatialisation du transfert entre les zones diphasiques et triphasiques (lit filtrant) du réacteur, tandis qu'il restait homogène au sein du lit filtrant.

En conditions réelles, la colonisation biologique et la filtration des matières en suspension contenues dans l'eau usée ont conduit à la formation d'un gradient de porosité, modifiant la dispersion des bulles de gaz et influençant directement le transfert d'oxygène au sein du lit filtrant.

Ces résultats soulignent l'importance de considérer la distribution spatiale du transfert et les propriétés physiques du lit filtrant pour décrire avec précision les mécanismes de transfert gaz-liquide en biofiltration.

Perspectives

Ces travaux ont permis d'établir des corrélations reliant la rétention gazeuse (rapport du volume de gaz au volume du lit filtrant) en fonction du degré d'encrassement du lit, utilisé comme indicateur de sa porosité. Ces corrélations seront prochainement intégrées aux modèles de biofiltration et évaluées à partir de données acquises sur des procédés de traitement à l'échelle industrielle.



© Régis Gougeon- L'art d'apporter subtilement du bois au vin

Le potentiel tannique des fûts de chêne contribue à la stabilité oxydative des vins blancs



En savoir plus

Billet K. *et al.*

White wines aged in barrels with controlled tannin potential exhibit correlated long-term oxidative stability in bottle

Food Chemistry: X - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101907>

Partenariat

- Université de Bordeaux, Bordeaux INP, INRAE, UMR 1366 OENO, ISVV, Villenave d'Ornon, France

- OEnologie By MLM, Villenave d'Ornon, France

- Tonnellerie Vicard generation 7

Projet support :

Conseil Régional de Bourgogne Franche Comté, projet METABOLOM (PO FEDER -FSE Bourgogne 2014/2020)

Contacts

Régis Gougeon, Maria Nikolantonaki et Cécile Thibon

UMR PAM et UMR OENO

regis.gougeon@ube.fr

maria.nikolantonaki@ube.fr

cecile.thibon@u-bordeaux.fr



Contexte

Maitriser la stabilité oxydative des vins blancs, c'est-à-dire leur capacité intrinsèque à conserver leurs qualités visuelles, olfactives et gustatives au cours de l'élevage et du vieillissement en bouteilles, repose sur la compréhension des mécanismes de résistance à l'oxydation. Au moment de sa mise en bouteille, le vin possède un capital moléculaire antioxydant, mais aussi prooxydant. Or, c'est le capital antioxydant qui est déterminant pour le vieillissement, car ce capital s'épuise au fur et à mesure que les composés antioxydants sont consommés. L'élevage en fût, pratique traditionnelle associée à l'élaboration des vins de qualité, contribue à la stabilisation oxydative du vin, que ce soit grâce à l'action des lies de levure et/ou grâce à l'action du bois de chêne de tonnellerie.

Dans cette étude, nous avons évalué l'impact du potentiel tannique des fûts utilisés pour l'élevage de vins blancs de Chardonnay et de Sauvignon blanc (millésime 2016), sur la capacité antioxydante des vins après deux et quatre ans de vieillissement en bouteille.

Résultats

Nos résultats montrent que les vins vieillissent en fût de chêne avec potentiel tannique bas (PTB : 2000-4000 µg d'ellagitannins par g de bois sec) ou moyen (PTM : 4001-6000 µg.g⁻¹ d'ellagitannins) se distinguent par leur capacité à résister à l'oxydation.

Indépendamment de la matrice vin, les fûts PTM permettent une capacité antioxydante significativement supérieure à celle des fûts PTB. Des analyses moléculaires non ciblées par spectrométrie de masse à haute résolution ont révélé de fortes teneurs en acides aminés ou en dipeptides dans les vins PTM, tandis que les fûts PTB sont apparus riches en tri/tétrapeptides. De plus, si la signature moléculaire non-volatile du Sauvignon blanc est fortement affectée par le potentiel tannique (PT) après quatre ans de conservation, la matrice Chardonnay garde ses caractéristiques moléculaires natives. L'analyse des profils volatils révèle une concentration plus élevée en E- et Z-whiskylactones chez les vins élevés en fûts PTM. Ainsi, le vieillissement en fûts PTM semble contribuer plus efficacement à la stabilité oxydative des vins blancs et à leur complexité aromatique.

Perspectives

Ces travaux viennent confirmer les résultats obtenus précédemment, qui montraient que les vins élevés en fûts de potentiel tannique moyen (PTM) étaient plus riches en ellagitannins et présentaient une meilleure stabilité oxydative en fin d'élevage, que les vins élevés en fûts de potentiel tannique bas (PTB). Ils ouvrent la voie au développement d'une véritable œnologie personnalisée au service d'une profession en quête de stratégies éco-environnementales d'élaboration des vins, avec réduction d'intrants.



© Somaya Sachot- Modifiée par IA - Pièges à arômes placés sur les bouteilles contenant le vin modèle, enrichi en sulfure de diméthyle, avant le vieillissement accéléré.

Le diméthylsulfure révèle la perméation des arômes du vin à travers l'obturateur



En savoir plus

De La Burgade R. *et al.*

Dimethyl sulfide transfers through closure during accelerated model wine ageing: proof-of-concept & prospects

Current Research in Food Science - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101089>

Valorisation

- DIRV CAPTURE - DI-RV-25-0106

Partenariat

- DIAM Bouchage (financier)

Projet support :

Thèse de Rémi de la Burgade financée par la société Diam Bouchage

Contact

Aurélie Roland

UMR SPO

aurelie.roland@institut-agro.fr



Contexte

Le profil aromatique constitue un déterminant majeur de la qualité des vins. Au cours du vieillissement, l'évolution aromatique résulte principalement de mécanismes physico-chimiques, parmi lesquels les phénomènes d'oxydation induits par la migration d'oxygène à travers l'obturateur jouent un rôle essentiel. Ces processus catalysent de nombreuses réactions modifiant profondément le bouquet du vin. Historiquement, la recherche s'est concentrée presque exclusivement sur ces mécanismes oxydatifs, négligeant d'autres voies potentielles d'évolution. Dans cette optique, le présent travail explore pour la première fois le mécanisme de perméation au travers de l'obturateur, en prenant pour modèle le diméthylsulfure (DMS) – un composé clé du vieillissement, connu pour ses notes de truffe et son rôle d'exhausteur du fruité dans les vins blancs et rouges.

Résultats

En utilisant un vin modèle enrichi en DMS et soumis à des conditions de vieillissement accéléré, nous avons démontré expérimentalement la capacité du DMS à migrer de l'intérieur vers l'extérieur de la bouteille. Un système de piégeage aromatique placé sur le goulot a permis de quantifier le DMS volatilisé, apportant une preuve de concept claire de la perméation de ce composé à travers l'obturateur. Ce transfert a été estimé à environ 12 % de la teneur initiale en DMS dans les conditions testées,

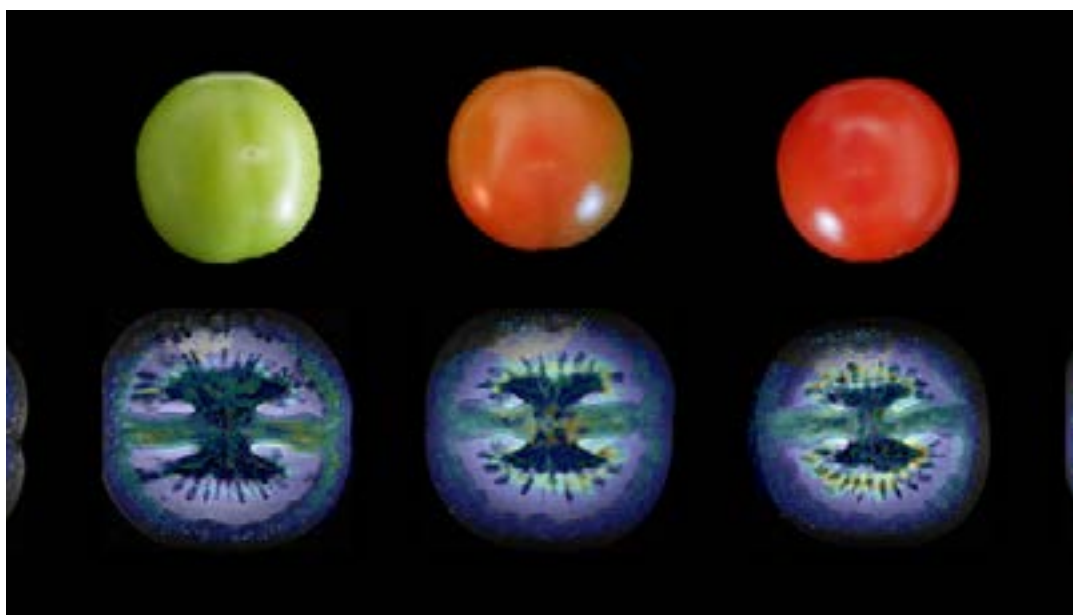
soulignant l'importance potentielle de ce phénomène sur le profil aromatique des vins vieillissants. Ces résultats ont été confirmés sur des vins de Syrah conservés en conditions œnologiques réelles : les vins bouchés avec des obturateurs à plus faible perméabilité présentaient des concentrations en DMS plus élevées que ceux scellés avec des bouchons plus perméables. Ces observations confirment que la nature physique et la perméabilité intrinsèque des obturateurs influencent non seulement les échanges d'oxygène, mais également la rétention des composés aromatiques volatils.

Perspectives

Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension de l'évolution aromatique des vins. La perméation des composés volatils apparaît désormais comme une source de variabilité jusqu'ici sous-estimée et devra être intégrée aux modèles de vieillissement œnologique. Les recherches futures viseront à (i) caractériser les paramètres physico-chimiques gouvernant la migration des composés aromatiques (volatilité, polarité, affinité avec les matériaux), (ii) étudier l'impact des conditions réelles de conservation des vins (température, durée, humidité) et (iii) évaluer les conséquences sensorielles de ces pertes. À terme, ces connaissances permettront de concevoir des obturateurs optimisés, conciliant maîtrise de la micro-oxygénation et rétention des arômes essentiels, pour garantir la stabilité et la typicité aromatique des vins vieillissants.

Partie 4

Méthodes et caractérisation des produits agricoles et alimentaires



© C. Deborde, G. Pagés et A. Moing

Nos chercheurs développent des méthodes de caractérisation toujours plus fines. Pour le bien-être et la santé, un modèle de digestion simulant les conditions stomacales pour expliquer les effets secondaires de médicaments, une méthodologie d'identification et quantification des oligosaccharides du lait maternel dont un qui prévient les allergies. Côté alimentaire, l'imagerie par résonance magnétique pour cartographier les principaux métabolites impliqués dans le goût de la tomate, une analyse multi-omique appliquée aux glucosinolates des graines de cameline et la volatolomique microbienne pour caractériser en détail les composés toxiques lors de la cuisson de viandes bovines. Côté nature, une combinaison de méthodes pour reproduire les mécanismes d'évapotranspiration des arbres et une chaîne de traitement d'images 4D pour étudier l'hydrolyse enzymatique des parois végétales.



© IA generated - Les pépins et les pellicules des raisins sont riches en tanins

Tanins du raisin : une nouvelle approche pour caractériser finement leurs évolutions



En savoir plus

Razafindrabenja L.E. *et al.*

Combining AcquireX™ data acquisition and Feature-Based Molecular Networking approach to deeply explore oxidation markers of condensed tannins after depolymerization

Food chemistry - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144207>

Partenariat

- DIAM Bouchage, Céret, France



Projet support :

Projet BoTOx (Institut Agro Montpellier, DIAM Bouchage)

Contacts

Lantomalala Elsa Razafindrabenja, Laetitia Mouls et Nicolas Sommerer

UMR SPO

lantomalala.razafindrabenja@supagro.fr

laetitia.mouls@supagro.fr

nicolas.sommerer@inrae.fr



Contexte

Les tanins sont des composés clés de la qualité et de la stabilité sensorielle des vins. Dans un contexte marqué par le changement climatique et la réduction des intrants à la vigne, la teneur en tanins augmente globalement. Face aux attentes des consommateurs et aux enjeux de la conservation, les vignerons sont confrontés à de nouveaux défis pour garantir la qualité et la compétitivité de leurs vins. Comprendre les mécanismes d'évolution des tanins et identifier leurs marqueurs d'évolution est ainsi essentiel pour accompagner l'innovation et répondre aux exigences du marché.

Les tanins sont des molécules complexes, réactives et leur hétérogénéité chimique les rend difficiles à caractériser avec les techniques classiques de spectrométrie de masse (LC-MS). La co-élution en chromatographie et la difficulté à ioniser des échantillons de haut poids moléculaires sont les principaux freins.

Notre collaboration avec l'entreprise DIAM Bouchage, productrice de bouchons en liège microagglomérés, vise à étudier l'impact des bouchons sur l'évolution des tanins et la qualité des vins.

Cette nouvelle approche analytique des tanins de pépins est le prélude méthodologique d'une étude en cours des tanins de vins vieillissants en bouteille.

Résultats

Nous avons identifié 104 différents

marqueurs d'oxydation des tanins. 49 sont des nouveaux marqueurs, jamais caractérisés auparavant, qui se distinguent par des degrés d'oxydation très élevés allant jusqu'à 8, alors que les précédentes études n'avaient pas identifié de marqueurs au-delà de 3 niveaux d'oxydation. La cartographie par réseaux de similarité spectrale, employée pour la première fois pour des tanins, a également permis de différencier clairement des isomères, répartis dans différents groupes distincts, sur la base de différences dans les spectres de fragmentation et a révélé la grande diversité structurale des produits d'oxydation. Cette complexité des transformations chimiques subies par les tanins in planta, qui vont jusqu'à la formation de multiples liaisons stables, sont les bases de structures chimiques qui évolueront vers encore plus de complexité lors de la vinification et du vieillissement des vins.

Perspectives

Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une étude sur une collection de vins de garde issus du même cépage, d'un même vignoble, vinifiés et mis en bouteille la même année et stockés dans la même cave. Le seul paramètre variant étant le bouchon, cette étude permettra de comprendre comment les bouchons de différentes perméabilités à l'oxygène et à la tenue dans le temps variable, influencent l'évolution de ces tanins et la qualité organoleptique des vins pendant le vieillissement prolongé en cave.

La digestion in vitro pour élucider les effets secondaires nutritionnels des médicaments anti-acidité gastrique



En savoir plus

Deng R. *et al.*

First assessments of nutrient bioaccessibility with an INFOGEST semi-dynamic gastric digestion in vitro protocol adapted to model proton pump inhibitor use

Food Research International - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115833>

Contact

Steven Le Feunteun

UMR STLO

steven.le-feunteun@inrae.fr



Contexte

Près de 25 % des adultes des pays occidentaux prennent des inhibiteurs de la pompe à protons (IPP), des médicaments qui induisent une réduction prolongée des sécrétions d'acide gastrique pour réduire divers troubles liés à l'acidité de l'estomac. S'ils sont considérés comme sûrs à court terme, les données récentes suggèrent que les IPP peuvent induire des effets indésirables sur le moyen/long terme : malabsorption de minéraux et de la vitamine B12, risque accru de fractures osseuses, perte musculaire, etc. Or, l'environnement acide de l'estomac est essentiel à la digestion car l'activité des enzymes digestives dépend fortement du pH. Un environnement très acide est aussi particulièrement important pour une bonne bioaccessibilité des minéraux. En augmentant le pH gastrique, l'utilisation des IPP est donc susceptible de moduler l'absorption de certains nutriments.

Résultats

Un protocole in vitro permettant de reproduire l'effet des IPP sur la digestion gastrique a d'abord été développé. Ce protocole est une extension du protocole semi-dynamique du réseau international INFOGEST pour imiter la digestion d'un adulte sain, avec deux modifications basées sur les effets cliniques rapportés des IPP : (i) un pH gastrique final de 4,2 au lieu de pH 2 et (ii) une réduction de

50 % du volume de fluide gastrique. Les modèles de digestion 'IPP' et 'adulte sain' ont ensuite été utilisés pour évaluer la digestion d'un repas test composé de fromage, de pain et de tomate. Les résultats ont montré que l'hydrolyse des protéines ainsi que la libération de certains sucres (fructose et arabinose) et minéraux (Ca, P et Mg) étaient réduites pendant la digestion gastrique en condition 'IPP'. Ils s'expliquent tous par l'hypo-acidité gastrique simulant l'effet des IPP, facteur qui tend à diminuer l'activité de la pepsine, la protéase gastrique, et à réduire la solubilisation de certains minéraux et sucres. Ces observations sont cohérentes avec certains effets secondaires connus ou présumés des IPP, notamment l'hypomagnésémie, les fractures osseuses, la perte musculaire et la carence en vitamine B12. La question d'un lien direct de cause à effet est donc soulevée.

Perspectives

Les recherches futures pourront s'appuyer sur ce nouveau protocole de digestion in vitro pour valider ces premiers résultats, tenter d'élucider les mécanismes sous-jacents aux effets secondaires des IPP, et élaborer des stratégies pour les atténuer. Elles devront également étendre l'approche proposée à la phase intestinale de la digestion afin d'évaluer la bioaccessibilité et la biodisponibilité des nutriments dans l'ensemble du tractus gastro-intestinal.



© Photo générée
par IA Lovart

Une supplémentation nutritionnelle en 2'-fucosyllactose pendant la grossesse : efficace pour prévenir des allergies alimentaires



En savoir plus

Rousseaux A. *et al.*

A Gestational Supplementation With 2'-Fucosyllactose Is an Effective Strategy to Prevent Food Allergy

Allergy - 2025

<https://doi.org/10.1111/all.16396>

Contacts

Marie Bodinier et Carole Brosseau

UR BIA

marie.bodinier@inrae.fr

carole.brosseau@inrae.fr



Contexte

À ce jour, aucune stratégie efficace ne permet de prévenir les allergies alimentaires (AA), qui peuvent apparaître dès les premiers mois de vie. Elles résultent d'un dysfonctionnement du système immunitaire, du microbiote et des barrières épithéliales, empêchant l'établissement de la tolérance. L'alimentation maternelle pendant la grossesse et l'allaitement influencent la maturation de ces 3 systèmes et peut moduler ainsi le risque d'allergie. Les oligosaccharides du lait humain (HMO) constituent une piste nutritionnelle intéressante car ils modulent favorablement le développement de ces trois systèmes. Le principal HMO, le 2'-fucosyllactose (2'-FL), est détecté dans le lait, le sang, l'urine et le liquide amniotique des femmes enceintes. Nous avons émis l'hypothèse qu'une supplémentation maternelle en 2'-FL durant la gestation pourrait induire une empreinte microbienne et immunitaire protectrice contre les AA.

Résultats

Dans un modèle murin d'allergie au blé, l'exposition maternelle au 2'-FL pendant la gestation a totalement supprimé les symptômes allergiques chez la descendance : absence de chute de température, score clinique nul et réduction des biomarqueurs sériques de la réaction allergique.

Le 2'-FL a modifié le microbiote intestinal des mères pendant la gestation en terme de richesse et de composition de communautés microbiennes. Pendant la lactation, seule la composition restait différente.

Chez les petits de 3 semaines exposés par leur mère au 2'-FL, nous avons observé une modification de la composition. Après induction d'une allergie au blé à 6 semaines, le microbiote restait modifié par le 2'-FL avec des différences persistantes en richesse et composition. Ainsi, la protection conférée par le 2'-FL pendant la gestation est associée à une empreinte microbienne spécifique, transmise de la mère à la descendance.

En parallèle, la supplémentation gestationnelle a renforcé la barrière intestinale des souriceaux, démontré par une diminution de la perméabilité intestinale et une augmentation des cryptes à mucus, deux facteurs physiologiques protecteurs.

Nous démontrons pour la première fois qu'une supplémentation en 2'-FL pendant la grossesse induit une protection totale contre le développement des AA chez la descendance, associée à une empreinte microbienne et au renforcement de la barrière intestinale.

Perspectives

Ce travail souligne l'importance de l'alimentation maternelle pendant la grossesse sur la santé future de l'enfant. Il démontre l'intérêt de stratégies nutritionnelles maternelles ciblées pour orienter le développement des systèmes biologiques clés et réduire le risque d'allergie. Il serait désormais pertinent d'évaluer chez l'homme l'efficacité du 2'-FL, tel qu'il a déjà été testé avec les prébiotiques GOS/inuline dans notre essai clinique PREGALL (NCT03183440).



© Loric Thoulouze - Système Chromatographique UPLC couplée à un détecteur fluorescent et un spectromètre de masse simple quadrupole

Nouvelle méthode quantitative pour explorer le rôle des oligosaccharides du lait maternel



En savoir plus

Le Gall S. *et al.*

Exploring Animals and Human Milk Oligosaccharides: A Comprehensive Analysis using Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography Coupled with Fluorescent and Mass Spectrometry Detectors

Journal of Food Composition and Analysis - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108074>

Partenariat

- Institut NuMeCan (INRAE, INSERM, Université Rennes)

- SODIAAL international (coopérative laitière)

Projets supports :

- ANSSD AlimH-CEPIA-MICA (IB 2019) LaiMaMaN (24 mois)

- Contrat de recherche Allaitement (VALOREX-INRAE) (2023-24 mois)

- Metaprogramme SYALSA Projet BestDairy (UMR Herbivores) (2021-2023)

Contacts

Sophie le Gall et Loric Thoulouze

UR BIA

sophie.le-gall@inrae.fr
loric.thoulouze@inrae.fr



Contexte

Les oligosaccharides du lait sont connus pour leur rôle majeur dans la mise en place du microbiote intestinal. Leur composition et leur concentration varient en fonction du stade de lactation, mais aussi de facteurs génétiques et environnementaux. En raison de cette forte variabilité, les études impliquent souvent la collecte d'échantillons importants, ce qui rend l'analyse difficile et longue. Ces études nécessitent donc des méthodes rapides et sensibles pour extraire et quantifier les Milk Oligosaccharides (MO) à partir de grandes collections d'échantillons de lait humain ou animal.

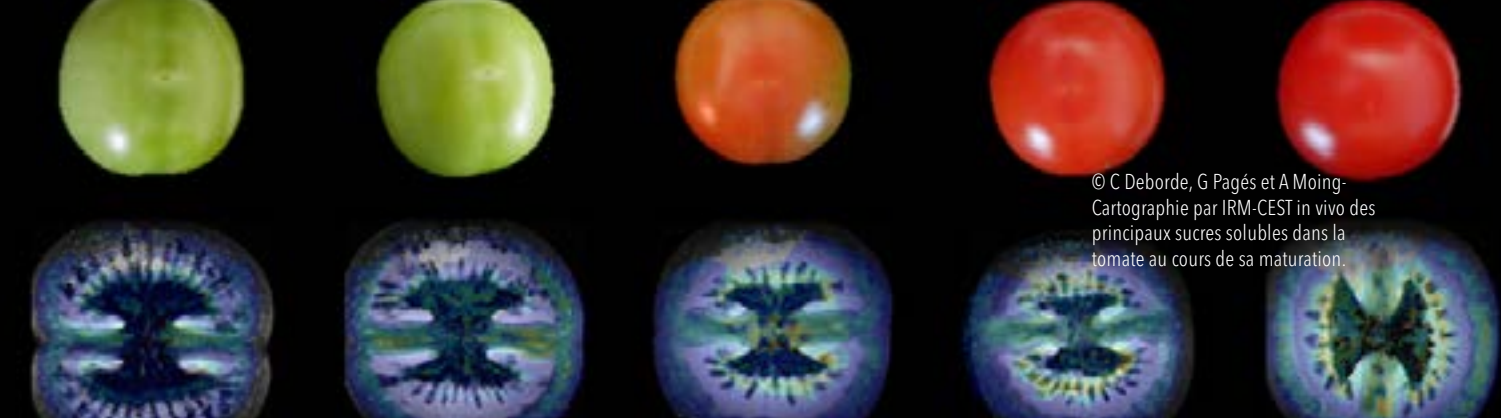
Résultats

Notre approche permet d'extraire les oligosaccharides du lait à partir de petits volumes (50 µL), puis de les marquer à l'aide d'un composé fluorescent. Ces oligosaccharides marqués sont ensuite analysés à l'aide d'une chromatographie liquide à interaction hydrophile couplée à une spectrométrie de masse et un détecteur de fluorescence, ce qui permet à la fois leur identification et leur quantification. Notre méthode a permis de détecter avec succès 99 oligosaccharides distincts dans quatre matrices : le lait humain, le colostrum et le lait porcin et le lait bovin, mettant en lumière leur prévalence et leur importance. Notamment, 80 oligosaccharides distincts ont été identifiés et quantifiés dans le lait humain, contre 21 dans les

laits animaux (20 dans le lait porcin et 10 dans le lait bovin). De plus, nos résultats ont révélé un sous-ensemble commun de six oligosaccharides partagés entre le lait humain et le lait animal (porcin et bovin), notamment le 3-FL, le 3'-SL et le LNnT, soulignant leurs similitudes fonctionnelles potentielles.

Perspectives

L'application de cette méthode à d'autres laits animaux présente un intérêt considérable pour explorer et comprendre la composition spécifique des oligosaccharides dans les laits d'autres espèces animales, d'étudier l'impact de l'environnement et de l'alimentation sur la composition de ces laits ainsi que leurs effets sur la nutrition humaine ; Cette méthodologie peut également permettre de faire progresser notre compréhension de l'évolution des oligosaccharides de lait et leur implication pour la santé et la nutrition humaine. Par ailleurs, l'application de cette méthode à d'autres biofluides, comme le liquide amniotique ou le serum, devrait permettre de comprendre les mécanismes de transfert de ces molécules entre la mère et le fœtus. D'un point de vue méthodologique, notre approche a permis de détecter de nouveaux isomères d'oligosaccharides qui ne sont actuellement pas décrits dans la littérature. Des études de caractérisation structurale plus poussées sont envisagées pour identifier ces structures.



© C Deborde, G Pagés et A Moing-
Cartographie par IRM-CEST in vivo des
principaux sucres solubles dans la
tomate au cours de sa maturation.

Cartographie de métabolites de la tomate par IRM au cours de sa maturation



En savoir plus

Deborde C. *et al.*

Chemical exchange saturation transfer
magnetic resonance imaging for
metabolic mapping of ripening tomato
fruit: Quite a challenge!

Food Chemistry - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145630>

Données disponibles dans dépôt de
données recherche.data.gouv.fr.

Partenariat

- ISC AGRORESONANCE
- ISC BIBS
- IR PROBE
- IR QUALIS
- ISC MetaboHUB-Bordeaux

Projets supports :

Projet GelSeed du département INRAE
BAP et MetaboHUB (ANR-11-INBS-0010)

Contacts

Guilhem Pagés, Catherine Deborde et
Martine Lemaire-Chamley

UR QuaPA, UR BIA et UMR BFP

guilhem.pages@inrae.fr

catherine.deborde@inrae.fr

martine.lemaire@inrae.fr



Contexte

Pour un organe ou un tissu donné, la connaissance de la distribution des métabolites est souvent cruciale pour comprendre sa physiologie et son métabolisme. Que ce soit pour le cerveau humain ou les graines, ces connaissances sont fournies à l'aide de l'imagerie in vivo. L'imagerie par résonance magnétique à transfert de saturation par échange chimique (IRM-CEST) est une modalité bien établie pour visualiser indirectement les métabolites possédant des protons échangeables (^1H), et ce avec une bonne résolution spatiale. Cette approche repose sur la saturation, de manière sélective, de protons labiles des métabolites qui sont en échange chimique avec ceux de l'eau. Comme les protons échangeables observables par CEST sont principalement ceux des groupes hydroxyle et amine, l'IRM-CEST peut être utilisée pour obtenir des images des principaux sucres solubles et acides aminés. La validation des différences de composition observées in vivo avec l'IRM-CEST par une autre approche analytique ex vivo est indispensable mais reste rare.

Résultats

Pour caractériser les effets CEST des principaux sucres solubles et acides aminés libres de la tomate, des expériences ont été menées sur des échantillons fantômes. Ces échantillons, sous forme de tubes contenant des solutions connues, ont

été analysés par IRM à des pH acides variant entre 3,7 et 4,7, correspondant aux valeurs rencontrées dans le fruit au cours de son développement.

Les images des fruits pour les groupes hydroxyle ou amine présentent un bon contraste pour tous les stades de maturation, montrant des gradients au sein des tissus et entre eux. Les signaux CEST hydroxyle sont corrélés aux concentrations de sucres solubles des tissus disséqués déterminées ex vivo par profilage métabolomique par RMN. Ce n'est toutefois pas le cas pour les signaux CEST amine in vivo et les concentrations des acides aminés ex vivo. L'IRM-CEST des tomates au cours du mûrissement fournit un contraste informatif pour les sucres et acides aminés majeurs, mais semble plus appropriée pour analyser les gradients de composition au sein d'un tissu donné qu'entre les tissus. Cette étude pionnière a permis de préconiser des bonnes pratiques pour l'IRM-CEST d'organes végétaux.

Perspectives

Appliquer l'IRM-CEST est un véritable défi à mettre en œuvre dans un organe composé de tissus hétérogènes en termes de pH et de métabolites principaux, comme les fruits ou d'autres organes végétaux. Cependant, cette approche non destructive est un outil de laboratoire puissant permettant d'étudier in vivo les changements spatiaux et temporels des métabolites pour mieux comprendre le métabolisme végétal.



© Léa Barreda - plantes de *Camelina sativa*

Des graines aux molécules : diversité et distribution spatiale des métabolites spécialisés chez les Brassicacées



En savoir plus

Barreda L. *et al.*

Multi-omic analyses unveil contrasting composition and spatial distribution of specialized metabolites in seeds of *Camelina sativa* and other Brassicaceae
Plant Journal- 2025

<https://doi.org/10.1111/tpj.17231>

Partenariat

- Université de Caen (plateforme PROTEOGEN)

Projets supports :

- AgroParisTech "Appel à projets scientifiques 2020"

- INRAE, BAP « Appel à projets scientifiques 2020 »

- Projet "Seed MetSpe" du Labex Saclay Plant Sciences-SPS (ANR-10- LABX-0040-SPS)

- Projet « BrassiMet » de l'Institut Carnot Plant2Pro

Contact

Massimiliano Corso

UMR IJPB

massimiliano.corso@inrae.fr



Contexte

Les graines de cameline (*Camelina sativa*), oléagineuse de la famille des Brassicacées, constituent une ressource majeure pour l'alimentation humaine et animale ainsi que pour diverses applications industrielles, de la production de biocarburants à la chimie verte. Riches en acides gras d'intérêt, elles accumulent également une grande diversité de métabolites spécialisés (MS), dont certains, comme les glucosinolates (GSL), possèdent des propriétés bénéfiques ou antinutritionnelles. Ces composés interviennent dans la qualité nutritionnelle des graines mais aussi dans la défense des plantes contre les pathogènes et l'adaptation aux stress. Si la distribution des MS a été étudiée dans les feuilles et racines de Brassicacées, leur organisation spatio-temporelle dans les graines restait mal connue. Comprendre comment ces molécules s'accumulent et se répartissent dans les différents tissus est essentiel pour orienter la sélection variétale et exploiter pleinement leur potentiel.

Résultats

Des équipes de l'IJPB et de l'Université de Caen ont utilisé une approche multi-omique, combinant métabolomique non ciblée, protéomique et transcriptomique, pour analyser les trois principaux tissus de la graine (tégument, endosperme, embryon) à six stades de développement et deux stades de germination, qui ont permis de caractériser le profil temporel d'accumulation des MS. Les résultats ont révélé des profils contrastés de MS, notamment des GSL qui s'accumulent au cours de

la maturation de la graine, dont la répartition variait selon la structure chimique et le tissu. Une comparaison de la composition en GSL chez la cameline, l'espèce modèle *Arabidopsis thaliana* et l'espèce cultivée *Brassica napus* (colza) a permis de déterminer que la distribution de ces composés dans les divers tissus (tégument, albumen et embryon) est fortement impactée par leur structure moléculaire. En particulier, les GSL à longues chaînes (C8-C11) s'accumulaient dans le tégument et l'endosperme, tandis que les GSL à chaînes moyennes ou courtes (C3-C7) étaient concentrés dans l'embryon. Les données transcriptomiques et protéomiques ont suggéré l'existence de mécanismes de transport spécifiques expliquant ces distributions différenciées. Ces observations soulignent le rôle clé de la structure et du transport dans l'accumulation des GSL.

Perspectives

Cette étude améliore significativement la compréhension des dynamiques métaboliques dans les graines de Brassicacées et fournit des bases solides pour l'amélioration variétale. Elle ouvre la voie à des cultures optimisées, avec une répartition maîtrisée des métabolites afin de réduire les composés antinutritionnels et de renforcer les molécules à haute valeur ajoutée, intéressantes pour la valorisation industrielle. À terme, l'exploitation raisonnée de la diversité chimique des MS contribuera à accroître la valeur nutritionnelle et industrielle des graines, tout en répondant aux enjeux de durabilité et de compétitivité des filières agricoles.

Caractérisation des propriétés capillaires d'un assemblage de fibres naturelles pour des applications évaporatives



En savoir plus

Lacour S.O.L. *et al.*

Capillary properties of natural fibre assembly for evaporative purposes

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137145>

Valorisation

Brevet WO2026/008943 A1a

Partenariat

- University of Reims Champagne-Ardennes, INRAE UMR FARE, Reims

- Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin

Projet support :

AIC Coolskin 2022-2023

Contacts

Stéphanie Lacour et Véronique Aguié

UR FRISE et UMR FARE

stephanie.lacour@inrae.fr

veronique.aguie@inrae.fr



Contexte

Le changement climatique accroît les besoins en refroidissement des procédés industriels et l'évaporation d'eau, dissipant des flux thermiques importants, facilite le rejet de chaleur dans une ambiance chaude. L'emploi d'un milieu poreux permet le contrôle des films d'eau par un transfert similaire à l'évapotranspiration des plantes. L'évaporation se produit à l'interface air/eau, tandis que la succion capillaire dépend de l'interface liquide/solide. Des mèches poreuses sont conçues pour maintenir une circulation interne d'eau compensant le séchage en surface. Ces concepts inspirés des arbres, visent à augmenter la surface d'évaporation, paramètre clé de l'efficacité thermique. Cette étude propose un cadre intégré pour comprendre et optimiser le transport de l'eau à travers des assemblages textiles à entraînement capillaire.

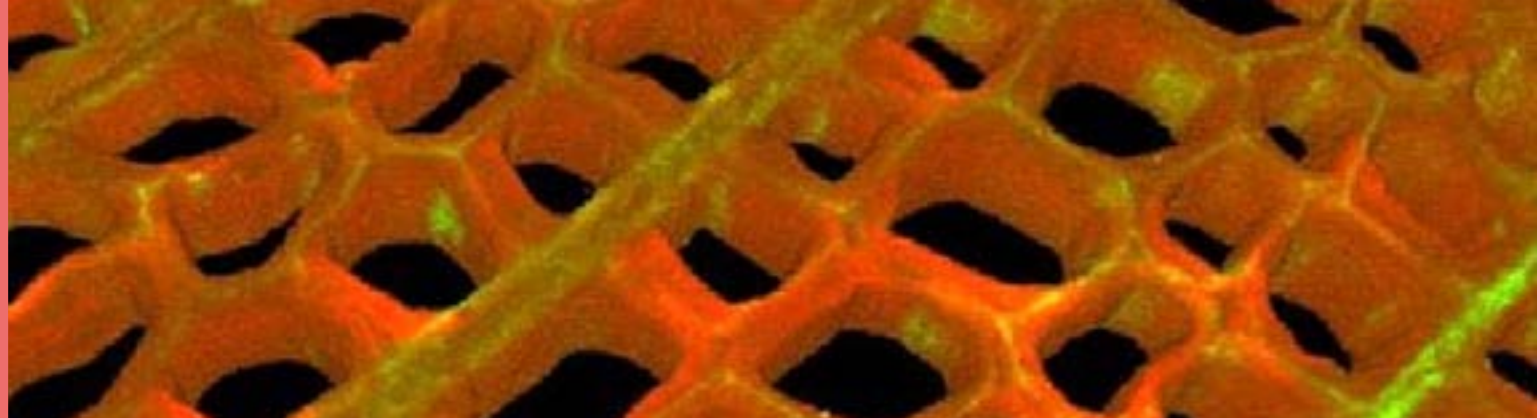
Résultats

Cette étude combine les propriétés de rétention d'eau, pour les propriétés de surface, et des analyses tomographiques pour l'analyse topographiques, afin d'expliquer les hauteurs observées de montée d'eau dans les échantillons. Le travail caractérise les interactions entre porosité, gonflement des fibres et réponse mécanique à différentes échelles. Deux niveaux de porosité inter-fil et intra-fibre (lumen) sont documentés. Les propriétés de rétention d'eau varient de moins de 10 % à plus de 20 % de la masse sèche, reflétant des différences

marquées de mouillabilité. Cependant, la hauteur finale de la montée d'eau dépend principalement de la structure du fil. Les tomographies répétées montrent que l'eau s'élève d'abord dans les zones à forte densité de fibres. La compétition entre forces capillaires et forces de tension provoque des déplacements, redistribuant localement la densité des fibres. Chez la laine, non gonflante, l'imbibition provoque la contraction du fil par adhésion des fibres périphériques. Les fibres s'agglutinent autour d'un pore central qui modifie les chemins d'écoulement. Dans les fibres végétales, le gonflement, ouvrant les lumens, amplifie les déplacements et les propage le long de l'axe de la mèche. L'eau comble les lumens et réduit par gonflement la porosité externe. L'étude montre qu'un grand nombre de fils à porosité intermédiaire, capables d'accommoder le gonflement, favorise la montée capillaire.

Perspectives

Cette étude ouvre des perspectives pour la conception de fils aux propriétés capillaires ajustées, en contrôlant la nature des fibres, la capacité de gonflement, la torsion et la tension, avec des applications potentielles dans les échangeurs de chaleur, les dispositifs de refroidissement passif et les systèmes biomimétiques. Les approches de modélisation devront être davantage développées afin de prendre en compte le mouvement des fibres perméables.



© Solmaz Hossein Khani, Gabriel Paës, Yassin Refahi - Carte 3D de la déconstruction enzymatique de la paroi végétale

La fluorescence naturelle révèle l'action des enzymes sur les parois végétales



En savoir plus

Hossein Khani S. *et al.*

A Distinct Autofluorescence Distribution Pattern Marks Enzymatic Deconstruction of Plant Cell Wall

New Biotechnology - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2025.04.001>

Valorisation

Le code de logiciel HydroTrack est en accès libre:

<https://gitlab.com/farelab/teamyr/publications/HydroTrack/>

Partenariat

- Équipe Morpheme, INRIA, Sophia-Antipolis

Projets supports :

- Projet « BIOMOD » (ANR-19-CE43-0010 (ANR JCJC)).

- Projet « FillingGaps » (ANR-23-PEBB-0006), dans le cadre du plan d'investissement France 2030.

Contacts

Yassin Refahi et Gabriel Paës

UMR FARE

yassin.refahi@inrae.fr

gabriel.paes@inrae.fr



Contexte

La bioconversion de la biomasse lignocellulosique reste freinée par sa récalcitrance et par le coût de l'hydrolyse enzymatique ; atteindre la viabilité économique impose une compréhension approfondie des mécanismes de déconstruction à différentes échelles. L'étude de l'hydrolyse enzymatique à l'échelle micrométrique nécessite des données spatio-temporelles, mais leur analyse se heurte à plusieurs obstacles majeurs : déplacements de l'échantillon au cours de l'hydrolyse, déformations induites par la réaction et diminution progressive de l'autofluorescence au cours du temps. Dans ce contexte, l'enjeu est de développer une méthodologie robuste capable de surmonter ces limitations afin de mieux comprendre et d'évaluer la dynamique de l'hydrolyse enzymatique aux échelles cellulaire et tissulaire. Une telle approche ouvre la voie à l'optimisation des cocktails enzymatiques et des prétraitements, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité et la durabilité de la bioconversion.

Résultats

Une chaîne de traitement d'images 4D, baptisée HydroTrack, dédiée à la déconstruction enzymatique de la paroi végétale, a été développée afin de lever les nombreux défis méthodologiques de l'analyse 4D et d'assurer un suivi robuste à l'échelle cellulaire. HydroTrack a ensuite été appliquée à des images de bois d'épicéa acquises pendant l'hydrolyse enzymatique à l'aide d'un microscope confocal de fluorescence, permettant l'identification de la région constamment imagée pour garantir la

comparabilité des mesures, ainsi que l'identification des parois cellulaires individuelles. Cela a permis d'établir, avec une précision élevée, des profils spatio-temporels de la déconstruction. Ces profils ont révélé un motif caractéristique de distribution de l'autofluorescence pariétale, marqueur distinctif de l'action enzymatique, ainsi qu'un effet asynchrone sur la structure des cellules. En effet, la diminution du volume pariétal précède la réduction de la surface accessible aux enzymes, ce qui indique une cinétique différée des réorganisations morphologiques par rapport aux pertes de la structure pariétale.

Perspectives

En répondant de manière exhaustive aux défis liés à l'analyse quantitative de l'hydrolyse enzymatique des parois végétales à l'échelle microscopique, HydroTrack offre un spectre d'applications étendu à différentes espèces de biomasse et à divers types de prétraitements. Cette approche contribue non seulement à approfondir la compréhension fondamentale des mécanismes de déconstruction, mais apporte également des avancées méthodologiques susceptibles d'avoir des implications majeures. Elle pourra être mobilisée pour évaluer et optimiser l'efficacité de la déconstruction, ainsi que pour concevoir des cocktails enzymatiques et des stratégies de prétraitement adaptés. Ce travail ouvre donc une voie entre recherche fondamentale et application industrielle, pour une conversion plus efficace de la paroi végétale en bioproducts.



© Adeline Laleuw- Différentes pièces de viandes bovines préparées selon les modes de préparation et de cuisson usuels en France .

Les pratiques françaises de cuisson des viandes passées à la loupe



En savoir plus

Angénieux M. *et al.*

Quantification of process-induced toxicants in bovine meats cooked according to the usual preparation and cooking practices in France

Food Control - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111374>

Partenariat

- ADIV (Association pour le Développement de l'Institut de la Viande), Clermont-Ferrand

- UMR1331 Toxalim, INRAE, plateforme Metatoul-Axiom, Toulouse

Projet support :

Projet financé par Interbev, section Santé & Nutrition (projet NUTRI-18-08)

Contact

Maïa Meurillon

UR QuaPA

maia.meurillon@inrae.fr



Contexte

Plusieurs rapports internationaux ont conclu à une relation probable entre la consommation excessive de viande rouge et l'augmentation du risque de cancer colorectal tout en soulignant l'importance d'autres facteurs individuels, d'hygiène de vie et d'autres composantes du régime alimentaire (fibres, etc.). Les composés néoformés (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), amines aromatiques hétérocycliques (AAHs)) générés lors de la cuisson de la viande rouge non transformée ont été identifiés comme possibles facteurs promoteurs de ces cancers.

Résultats

Cette étude vise à quantifier les composés néoformés toxiques dans différentes préparations de viandes (pièces de viande, steaks hachés et viandes marinées) lors de cuisson ménagère, en restauration commerciale ou collective. Le plan d'échantillonnage de 10 types de viandes cuites de bœuf (chacune représentée par 6 échantillons) s'est composé de morceaux dont les préparations et/ou les modes de cuisson étaient représentatifs des pratiques usuelles en France.

Les composés néoformés ont été extraits des différents échantillons de viandes cuites et quantifiés afin de consolider une base de données analytique représentative des pratiques françaises (avec 960 teneurs en AAHs et 240 valeurs en HAPs sur les viandes cuites). Sur les

16 molécules d'AAHs recherchées, 9 étaient indétectables ou inférieures aux limites de quantification. Les 7 autres (DMIP, IQx, harman, MeIQ, MeIQx, PhIP et norharman) ont été retrouvées à des niveaux similaires à ceux décrits dans la littérature, leur présence dépendant principalement des conditions de cuisson. Quant aux 4 HAPs réglementés par la Commission Européenne, les niveaux retrouvés dans les échantillons analysés étaient inférieurs à la limite de détection. Le risque sanitaire lié aux HAPs peut donc a priori être écarté pour la population générale.

Perspectives

Les résultats de cette étude seront appliqués à l'évaluation de l'exposition alimentaire des consommateurs français à ces composés néoformés délétères à la santé humaine.

À ce jour, la teneur en AAHs dans les viandes cuites n'est pas réglementée. Leur formation dépendant de la teneur en matière grasse et du couple temps/température de cuisson, des recherches complémentaires sont nécessaires pour déterminer les paramètres optimaux afin de limiter ces composés néoformés. Concernant les HAPs, la viande grillée constituant la principale source d'exposition, il serait pertinent d'approfondir l'étude de la cuisson au grill, notamment en tenant compte de la variabilité des équipements et des préférences de cuisson en France. L'effet du type de matière grasse ajoutée mériterait également d'être étudié.



© AdobeStock

Profilier les composés volatils des pathogènes pour détecter des contaminations alimentaires



En savoir plus

Fakih A. *et al.*

How to sample *Listeria monocytogenes* culture for volatolomics by headspace extraction-gas chromatography-Q Exactive-Orbitrap mass spectrometry?

Food Research Internationaly - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116043>

Partenariat

- Université de Turin, Department of Agricultural, Forest and Food Sciences, Turin (Italie)

- INRAE, Université Clermont Auvergne, UMR454 MEDiS, Clermont-Ferrand (France)

Projet support :

Thèse d'Aya Fakih (2022-2025) dans le cadre du projet H2020 SAFI (SAFe Food for Infants in the EU and China, 2020-2024)

Contacts

Jérémy Ratel et Erwan Engel

UR QuaPA

jeremy.ratel@inrae.fr

erwan.engel@inrae.fr



Contexte

La récurrence des crises sanitaires alimentaires d'origine bactérienne souligne le besoin de nouvelles approches pour mieux contrôler les risques microbiologiques, en particulier dans le cas d'aliments destinés à des populations vulnérables telles que les enfants de moins de 3 ans. Il s'agit de concevoir des méthodes permettant de détecter les pathogènes là où les méthodes conventionnelles échouent à le faire. La volatolomique microbienne, qui consiste à analyser les composés organiques volatils (COV) émis par les bactéries, est prometteuse pour détecter ces pathogènes. Pour exploiter tout son potentiel, il est nécessaire de connaître de manière exhaustive les profils en COV des bactéries. Cette étude vise à déterminer les méthodes d'échantillonnage des cultures microbiennes permettant d'obtenir les volatolomes les plus informatifs et à confirmer la pertinence des systèmes de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (GC-HRMS) pour caractériser les COV microbiens.

Résultats

Trois modes d'échantillonnage de cultures de *Listeria monocytogenes* ont été comparés afin de déterminer la fraction offrant l'information la plus riche et la plus discriminante pour les études volatolomiques : (i) la culture entière ; (ii) le culot recueilli après centrifugation de la culture entière, qui concentre les cellules bactériennes ; (iii) le surnageant associé, qui contient

ce que les bactéries libèrent dans le milieu. L'analyse des 3 fractions par GC-HRMS montre qu'elles apportent des informations différentes. La culture entière et le culot étaient les plus riches en COV émis par *L. monocytogenes*, avec une forte complémentarité informative des 2 fractions. L'analyse de la culture entière est particulièrement intéressante car elle permet une manipulation minimale de l'échantillon, préservant l'intégrité du volatolome et limitant l'exposition du manipulateur au pathogène. Ces résultats soulignent l'impact de l'échantillonnage sur le contenu informatif du volatolome et pourront contribuer à établir des recommandations pour une analyse volatolomique microbienne standardisée. En plus de confirmer l'émission par le pathogène de certains COV déjà décrits dans la littérature, ces travaux mettent aussi en évidence de nouveaux composés et proposent dans certains cas des mécanismes pour expliquer leur sur- ou sous-expression.

Perspectives

Pour pouvoir prétendre phénotyper le comportement d'un pathogène sur milieu de culture, il faudra étudier l'impact sur son volatolome de phénomènes susceptibles d'affecter sa physiologie, qu'il s'agisse de sa croissance ou de stress induits par ses conditions de culture. Afin d'exploiter la volatolomique bactérienne pour surveiller la sécurité microbiologique alimentaire, il faudra également évaluer son potentiel dans des matrices alimentaires complexes.

Partie 5

Formulation et structuration **d'aliments et d'ingrédients**



© Magdalena Kristiawan

Concernant les produits carnés, l'incorporation d'arôme permet de réduire l'apport en sel. Des extraits végétaux diminueraient les besoins en nitrates pour stabiliser les charcuteries.

Les légumineuses ont le vent en poupe. Des ingrédients issus de légumineuses stabilisent des émulsions alimentaires à base de protéines végétales, ou encore présentent un profil idéal pour formuler des produits carnés et des analogues de produits laitiers à base d'ingrédients végétaux. Des analogues de yaourt ont été produits avec des pois chiche fermentés. Des farines infantiles destinées aux pays du Sud sont formulées à partir d'associations céréales/légumineuses locales.



© AdobeStock

Cuisiner avec moins de sel : l'arôme qui évoque le salé comme allié santé



En savoir plus

Monod R. *et al.*

Exploring Culinary Methods to Reduce Sodium Intake : The Impact of Flavorings and Salt Addition Timing in Boiled Chicken
International Journal of Food Science - 2025

<https://doi.org/10.1155/ijfo/3703692>

Partenariat

- Département de Food Science de l'Université de Pretoria (Afrique du Sud)

Projet support :

ANR-19-CE21-0009 Sal&Mieux

Contact

Thierry Thomas-Danguin

UMR CSGA

thierry.thomas-danguin@inrae.fr



Contexte

La réduction de la consommation de sel représente un enjeu majeur de santé publique, au cœur des recommandations nutritionnelles nationales et internationales. Au-delà des stratégies industrielles, l'exploration de pratiques/procédés culinaires simples et accessibles constitue un levier concret pour agir sur les habitudes domestiques. Dans ce contexte, notre étude a évalué l'impact d'arômes alimentaires et du moment d'ajout du sel sur la perception du goût salé, dans des conditions comparables à celles du quotidien. L'objectif était d'identifier des solutions transposables, permettant de réduire l'apport en sodium sans altérer le plaisir gustatif. Cette recherche a été conduite en Afrique du Sud, au Département de Food Science de l'Université de Pretoria, dans le cadre du séjour doctoral de Raphaël MONOD (CSGA, QuaPA, ANR Sal&Mieux).

Résultats

L'étude portait sur la cuisson de blancs de poulet dans un bouillon préparé selon des pratiques domestiques. Deux paramètres ont été testés : le moment d'ajout du sel (dans le bouillon ou à l'assiette) et l'ajout d'arômes (romarin, bacon fumé, ail fumé). Un panel de 158 consommateurs a évalué l'intensité des saveurs et l'adéquation du niveau de salé via une échelle JAR (just-about-Right).

Les résultats montrent que le moment d'ajout du sel n'a pas influencé

significativement la perception du salé. En revanche, certains arômes ont modifié l'intensité salée perçue : le bacon fumé a renforcé l'impression salée lorsqu'il était associé à un salage à l'assiette. L'ail fumé s'est révélé particulièrement efficace, permettant une réduction d'environ 30 % du sel tout en maintenant une perception jugée "juste" par les dégustateurs. Le romarin n'a pas montré d'effet significatif.

Ces résultats confirment le rôle des arômes dans le renforcement de la perception du salé déjà observé par notre équipe au CSGA pour la saveur salée mais aussi sucrée. Ils soulignent le potentiel des arômes comme solution culinaire simple permettant de limiter l'apport en sodium sans altérer le plaisir gustatif.

Perspectives

Cette étude ouvre plusieurs pistes pour de futures recherches. En particulier, les différences liées au moment de salage méritent d'être explorées dans d'autres matrices alimentaires (légumes, féculents), où la diffusion du sel pourrait être favorisée pendant la cuisson. Il serait également pertinent d'identifier les composés odorants responsables de l'effet amplificateur observé avec l'ail fumé. Enfin, élargir ces approches à une diversité d'aliments et de contextes culinaires contribuera à formuler des recommandations, adaptées aux usages domestiques, afin de soutenir les politiques publiques de réduction du sel.



© AdobeStock



Des extraits végétaux riches en polyphénols pour limiter les nitrites dans les charcuteries



En savoir plus

Sirvins C. *et al.*

Deciphering key structural elements in the ability of phenolic compounds and plant extracts to alleviate secondary amine N-nitrosation and lipid oxidation in a cured meat model

Food Research International - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117387>

Partenariat

- IFIP, Institut Français du Porc, Le Rheu

Projet support :

Projet ADDUITS (2018-2025) financé par 24 industriels de la charcuterie, INRAE, l'IFIP, l'ADIV et la FICT

Thèse CIFRE de Charlène Sirvins (IFIP, ANRT)

Contacts

Claire Dufour et Pascale Goupy

UMR SQPOV

claire.dufour@inrae.fr

pascale.goupy@inrae.fr



Contexte

Le nitrite est utilisé dans les produits de charcuterie comme additif multifonctionnel car il assure la sécurité microbiologique, la protection contre le rancissement et des propriétés organoleptiques comme la couleur rose des jambons. Néanmoins, l'ion nitrite peut réagir avec les amines secondaires, dont celles issues des protéines, conduisant à la formation de N-nitrosamines dont certaines sont mutagènes. Par ailleurs, dès 2015, le CIRC a classé les charcuteries, comme cancérigènes avérés pour l'homme. Un des objectifs du projet Adduits, financé par 24 industriels, a été de proposer des solutions naturelles pour réduire ou remplacer le nitrite dans les produits de charcuterie. Les polyphénols, qui sont naturellement abondants dans les produits végétaux, sont apparus comme des candidats prometteurs en lien avec leurs propriétés antioxydante et antimicrobienne déjà démontrées.

Résultats

Un test a été développé pour évaluer la capacité antinitrosante d'extraits végétaux et de composés phénoliques dans un modèle d'aliment simulant le jambon. Ce test repose sur la nitrosation d'une amine secondaire cible, le N-acétyltryptophane, dans une émulsion huile-dans-eau contenant également diverses formes de fer. Les conditions correspondant à la fabrication d'un produit charcutier et à sa digestion gastrique ont été simulées

par deux pH d'étude, pH 5 et pH 2,5. Un screening de 11 extraits déjà utilisés dans le domaine alimentaire a ainsi montré la supériorité du thé vert, de l'olive et d'un mix de fruits. Ces extraits sont également capables d'inhiber l'oxydation lipidique lors du retrait du nitrite. Une analyse fine de la composition phénolique des extraits a ensuite permis de tester ces diverses molécules et de montrer que les flavan-3-ols (épicatechine, épigallocatechine gallate...) étaient la classe la plus active. Enfin, un travail mécanistique a révélé des éléments de structure moléculaire qui devraient être utiles pour la sélection de nouveaux extraits antinitrosants et antioxydants.

Perspectives

Des jambons blancs, avec et sans nitrite, ont été formulés aux échelles pilote et industrielle avec trois des extraits antinitrosants et antioxydants (thé vert, mix olive et pépin de raisin, mix fruits). De manière intéressante, le niveau d'oxydation lipidique était aussi faible pour les jambons sans nitrite additionnés de composés phénoliques que pour les jambons nitrités. Ces jambons sont actuellement évalués dans la cancérogénèse colorectale chez le rat. Enfin, cette approche a été appliquée au saucisson, un produit charcutier fermenté.

© Élena Keuleyan - Observation en microscopie confocale de fluorescence d'une émulsion huile-dans-eau stabilisée par un concentré de protéines de pois. Les lipides sont marqués en rouge, les protéines en vert. INRAE (observation réalisée sur la plateforme BIBS, INRAE).

Des ingrédients protéiques de légumineuses pour stabiliser les émulsions alimentaires



En savoir plus

Keuleyan E. *et al.*

The competition between endogenous phospholipids and proteins from pea protein isolate rules their interfacial properties

Food Hydrocolloids - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111475>

Partenariat

- Institut de Physique de Rennes, Univ. Rennes, CNRS, IPR-UMR 6251, Rennes, France.

Projet support:

Projet Connect Talent VESTA, région Pays de la Loire.

Contacts

Claire Berton-Carabin Alain Riaublanc et Anne Meynier

UR BIA

claire.berton-carabin@inrae.fr

alain.riablanc@inrae.fr

anne.meynier@inrae.fr



Contexte

L'amélioration de la durabilité de notre alimentation conduit, entre autres, à substituer les protéines d'origine animale par des alternatives issues du végétal. Parmi elles, les isolats et concentrés protéiques de légumineuses – notamment ceux issus du pois et du lupin – sont des candidats prometteurs pour la formulation d'émulsions alimentaires. Au-delà de leur teneur en protéines, ces ingrédients se caractérisent par une composition complexe qui, bien que peu étudiée, recèle une diversité de constituants non-protéiques endogènes (notamment des phospholipides et des polysaccharides) dont l'influence sur les propriétés fonctionnelles des ingrédients reste largement méconnue. Comprendre comment ces composés interagissent dans des systèmes multiphasiques tels que des émulsions, de la formulation jusqu'à la digestion, est essentiel pour exploiter pleinement le potentiel de ces protéines végétales.

Résultats

Une première étude a mis en évidence des teneurs remarquables en phospholipides dans un isolat de protéines de pois, et leur rôle déterminant dans la structuration des interfaces huile-eau. Des mesures de rhéologie interfaciale et des observations en microscopie à force atomique ont révélé la formation de films mixtes où lipides polaires et protéines coexistent, les premiers dominant le comportement viscoélastique de l'interface. Ces résultats montrent que la compétition

entre protéines et phospholipides peut largement impacter la structure et la stabilité des émulsions.

Dans une seconde étude, l'effet de cette complexité des interfaces sur la digestibilité in vitro d'émulsions a été exploré. Les émulsions préparées avec différents ingrédients protéiques de pois et de lupin présentaient des niveaux et cinétiques de lipolyse similaires, mais la bioaccessibilité des lipides s'est révélée nettement plus élevée pour celles à base d'ingrédients issus de graines de pois : jusqu'à 85 %, contre 50-60 % pour le lupin, ce qui souligne l'importance de la composition de ces ingrédients sur le devenir des nutriments en conditions digestives.

Perspectives

Ces travaux apportent un éclairage nouveau quant à l'effet des composés non-protéiques sur les fonctionnalités des ingrédients protéiques de légumineuses et leur impact nutritionnel potentiel. La caractérisation fine de la complexité de ces ingrédients devient un enjeu majeur dans ce domaine, et cette connaissance permettra de mieux orienter les procédés de fractionnement et les stratégies de formulation afin d'optimiser la stabilité et la digestibilité des émulsions à base de protéines végétales. Ce travail contribue ainsi à une conception rationnelle et durable des aliments, où tous les constituants des ingrédients jouent un rôle clé dans la performance globale du produit.



© Magdalena Kristiawan

Extrusion de la féverole à basse énergie : concilier qualités fonctionnelles et nutritionnelles



En savoir plus

Jebalia I. *et al.*

Functional and nutritional properties of fava bean ingredients processed by extrusion

Food Research International - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116804>

Valorisation

Transfert de savoir-faire technologique sur les paramètres optimaux du procédé d'extrusion vers le partenaire industriel VALOREX, en vue du développement d'une nouvelle ligne de production et de nouveaux ingrédients commercialisables.

Partenariat

- VALOREX SAS (porteur du projet)

- EUREDEN

Projet support :

Projet LEGALIM, financé par la Région Bretagne.

Contacts

Magdalena Kristiawan, Véronique Santé-Lhoutellier et Didier Dupont

UR BIA, UR QuaPA et UMR STLO

magdalena.kristiawan@inrae.fr

veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr

didier.dupont@inrae.fr



Contexte

La transition alimentaire vers les protéines végétales est un enjeu sociétal majeur. Les légumineuses locales, comme la féverole, sont une ressource stratégique, mais leur valorisation est freinée par quelques défauts : présence de facteurs antinutritionnels (FAN), digestibilité perçue comme faible et notes aromatiques indésirables. Le principal défi du projet LEGALIM est de développer un procédé de transformation contrôlé, économe en énergie et respectueux de la matrice biologique, capable d'atténuer ces défauts tout en préservant, voire en améliorant, les atouts nutritionnels et fonctionnels de la féverole. Son objectif est de produire des ingrédients "clean-label" attractifs pour l'industrie agroalimentaire, en alternative aux ressources importées.

Résultats

Cette étude a évalué l'impact de l'intensité du procédé d'extrusion bi-vis, quantifiée par l'Énergie Mécanique Spécifique (SME), sur des ingrédients de féverole. Le résultat principal est la mise en évidence d'un optimum de traitement à basse énergie (SME < 500 kJ/kg). Ce traitement modéré permet de dissocier les effets bénéfiques du procédé de ses effets négatifs. D'une part, l'extrusion réduit l'activité des inhibiteurs de trypsine d'environ 80 %, de 4,5–5 mg/g à près de 1 mg/g, supprimant ainsi un frein nutritionnel important. D'autre part, ce traitement préserve

un degré d'hydrolyse enzymatique lors d'une digestion in vitro modéré à élevé des protéines (66–84 %), en limitant l'agrégation protéique. Enfin, ce procédé à basse énergie maintient les propriétés fonctionnelles essentielles des ingrédients (viscosité, émulsification), qui sont dégradées à des SME élevées. Nous avons ainsi défini les conditions optimales pour élaborer un ingrédient à la fois sain sur le plan nutritionnel et performant sur le plan fonctionnel.

Perspectives

La pertinence de ces ingrédients a été démontrée par leur incorporation dans des matrices alimentaires complexes. Une étude complémentaire a montré que la substitution de 10 % de la viande par le concentré protéique de féverole extrudé dans des burgers améliorait significativement leur profil nutritionnel, en augmentant la bioaccessibilité des acides aminés essentiels, sans altérer la saveur ni la tendreté. Parallèlement, des essais concluants ont validé la faisabilité de substituts laitiers 100 % végétaux – crèmes dessert, yaourts et fromages frais – présentant une bonne aptitude de fermentation et appréciation sensorielle positive. Ces travaux confirment le potentiel de ces ingrédients pour formuler une large gamme de produits (carnés hybrides, laitiers, BVP, sauces) plus sains et durables. Les prochaines étapes, menées avec VALOREX et EUREDEN, visent leur passage à l'échelle industrielle et le co-développement de produits adaptés au marché.



© Andrea Hickisch (Institut Fraunhofer) et Charles Silande (INRAE)

Des analogues de yaourt probiotiques produits à partir d'analogue laitier d'amande et de pois chiche



En savoir plus

Silande C. *et al.*

Mixing and fermenting chickpea and almond milk analogues to produce probiotic yoghurt analogues

Food Research International - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117576>

Partenariat

- Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV, Freising, Allemagne

- Institute of Agrifood Research and Technology (IRTA), Postharvest, Fruitcentre, Catalonia, Lleida, Espagne

Projet support:

Projet européen LOCALNUTLEG, n°2033 (2021-2024). Projet financé par PRIMA.

Contacts

Valérie Gagnaire et Gwénaél Jan

UMR STLO

valerie.gagnaire@inrae.fr

gwénael.jan@inrae.fr



Contexte

Nous assistons à une demande croissante pour les substituts végétaux au lait pour des raisons liées au changement de mode de vie, à la santé, à l'alimentation et à la durabilité. Ces nouveaux produits doivent présenter des propriétés nutritionnelles et bénéfiques pour une santé améliorée, des goûts et arômes acceptables par les consommateurs et limiter les composants antinutritionnels. Si les légumineuses offrent des propriétés fonctionnelles prometteuses, leurs propriétés sensorielles laissent cependant à désirer. A l'inverse, les fruits à coques, souvent décrits comme plus neutres et plaisants en bouche, ont des fonctionnalités plus limitées. Nous avons choisi de mélanger un analogue laitier de légumineuse et un lait de fruit à coque et d'utiliser la fermentation pour pallier ces défauts de goût et de techno-fonctionnalité.

Résultats

Nous avons préparé des analogues de lait d'amandes et de pois chiche (MA) avec une teneur en protéines proche de celle du lait de vache (~3 %). Nous avons ensuite mélangé ces deux types d'analogues avec différents ratios amande/pois chiche. L'objectif était d'évaluer si le mélange de végétaux et leur fermentation par deux souches de bactéries lactiques, permettait d'obtenir les propriétés sensorielles, texturales, nutritionnelles et immunomodulatrices souhaitées dans des analogues de yaourt (YA).

Nous avons observé que les souches *Streptococcus thermophilus* CIRM-BIA772 et *Lactobacillus helveticus* CIRM-BIA100, avaient des croissances très variables selon les ratios utilisés. Une croissance des deux souches était plus importante dans les YA amande/pois chiche, se traduisant par des métabolites d'intérêt produits en plus grande quantité (acides organiques, peptides et acides aminés et GABA). Les textures étaient variables avec une plus grande fermeté pour les mixtes enrichis en pois chiche. L'arôme végétal, même s'il était présent dans tous les YA, était aussi accompagné de l'attribut « semblable au yaourt », plus à même de favoriser leur acceptation par les consommateurs. Enfin, les YA avaient un potentiel immunomodulateur accru dans les YA à forte teneur en pois chiche. Dès lors, selon les caractéristiques recherchées des produits fermentés, il est possible de moduler la composition en amande et pois chiche pour modifier les propriétés de fermentation des souches bactériennes.

Perspectives

Ces prototypes innovants réalisés dans le cadre d'un projet européen, LOCALNUTLEG, ont été testés auprès d'un grand panel de consommateurs en Espagne. Nos travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de produits fonctionnels à base de mélanges de végétaux destinés à des populations cibles, dans un contexte où l'incidence des affections liées à l'inflammation intestinale est en augmentation.

Renforcer la qualité nutritionnelle de farines infantiles céréales-légumineuses enrichies en antioxydants naturels



En savoir plus

Cancalon M. *et al.*

Oxidative stability of polyunsaturated fatty acid-enriched infant flours based on teff and cowpea: Impact of natural antioxidants from amaranth leaves and black rice bran

Food Research International - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117080>

Partenariat

- CIRAD, UMR QUALISUD

- IRD, UMR QUALISUD

Projet support :

Thèse TRANSFORM (INRAE)-PERSYST (CIRAD).

Contacts

Claire Bourlieu-Lacanal, Pierre Villeneuve et Youna Hemery

UMR IATE

claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr

pierre.villeneuve@cirad.fr

youna.hemery@ird.fr



Contexte

À partir de 4/6 mois, la diversification alimentaire débute afin de supporter les besoins nutritionnels élevés dus à la croissance et au développement important de l'enfant. Des aliments de compléments, tels que les farines infantiles, sont progressivement introduits. Dans de nombreux pays du Sud, les farines infantiles représentent une part importante de l'alimentation des jeunes enfants en raison de leur accessibilité, leur facilité d'utilisation et de conservation. Cependant, une analyse d'un ensemble de 96 formulations commerciales réunies dans un dataset a mis en évidence un profil nutritionnel souvent inadapté avec des déséquilibres marqués en acides gras (excès d'oméga-6 et carence en oméga-3) ainsi que des surdosages en vitamine A. Dans les pays du Sud, où environ 149 millions d'enfants de moins de cinq ans souffrent de malnutrition chronique, garantir une qualité nutritionnelle adéquate et une bonne stabilité des aliments de complément est un enjeu majeur de santé publique. L'objectif de ce projet était de mieux comprendre les phénomènes d'oxydation des lipides dans des farines infantiles ayant une composition nutritionnelle optimisée, formulées à partir d'associations céréales/légumineuses locales (teff et niébé) et enrichies en lipides essentiels, notamment en acides gras à longue chaîne oméga-3 (DHA).

Résultats

Cinq farines infantiles ont été développées, dont certaines incluaient

des extraits antioxydants naturels issus de feuilles d'amarante ou de sons de riz noir. Les résultats ont montré que l'association teff/niébé permettait d'obtenir un profil lipidique équilibré, avec un rapport oméga-6/oméga-3 proche de 5, conforme aux recommandations pour les jeunes enfants. L'oxydation des lipides était principalement initiée lors du broyage des matières premières et se poursuivait lentement durant le stockage. Malgré une stabilité globale satisfaisante des farines après six mois de stockage à 25 °C, une réduction de près de 50 % de la vitamine A a été observée après seulement deux semaines. L'ajout de fractions antioxydantes naturelles a significativement ralenti cette dégradation, grâce à la présence de caroténoïdes et de composés phénoliques. Cependant, la propagation de l'oxydation a été accélérée en présence de composés photosensibles (chlorophylles des feuilles d'amarante).

Perspectives

Ces travaux ont permis une meilleure compréhension des mécanismes d'oxydation dans ces matrices sèches qui permettra d'adapter les procédés de fabrication et de conditionnement afin de limiter les pertes en nutriments sensibles, sans recourir systématiquement à des additifs chimiques. Ces travaux ouvrent la voie à la formulation de farines infantiles locales plus équilibrées sur le plan nutritionnel et plus stables au stockage, en valorisant des ressources agricoles régionales et des extraits antioxydants naturels.

Organisation multi-échelle et rhéologie des hydrogels mixtes de caséine et de protéines de pois



En savoir plus

da Silva R. R. *et al.*

Multi-scale organization and rheology of casein and pea protein mixed hydrogels formed by acidification: Effects of ratio and temperature

Food Research International - 2025

<https://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116242>

Partenariat

- Université Federale de Visoça, Brésil

Projet support:

Laboratoire International associé LIA
SAMBA

Contact

Paulo Peixoto

UMR PIHM / UMET

paulo.peres-de-sa-peixoto-junior@inrae.fr



Contexte

Les hydrogels biocompatibles ont pris une importance considérable dans l'industrie moderne. Les protéines végétales suscitent un intérêt croissant pour des raisons écologiques et économiques. Cependant, les propriétés technofonctionnelles de protéines végétales sont nettement moins bonnes que celles de protéines animales. Une stratégie intéressante est la combinaison de protéines végétales avec les protéines du lait pour conserver les propriétés technofonctionnelles positives des protéines animales et incorporer davantage de protéines végétales dans le produit dans une logique de transition alimentaire. Le défi à relever consiste à maîtriser les propriétés techno-fonctionnelles dérivant des structures nano- à micro-échelle du mélange. Ces propriétés vont varier de facteurs importants selon conditions utilisées. Ainsi, il est nécessaire de faire une étude poussée, à la nano-échelle, pour comprendre les mécanismes et d'identifier précisément les conditions optimales.

Résultats

L'utilisation de la RMN pour l'étude de gels mixtes, après gélification, a montré que l'impact des conditions physico-chimiques, comme le changement de température, n'affecte pas les protéines de pois de la même façon que les caséines ce qui est un

indicateur fort de la co-existence de deux réseaux protéiques indépendants (un constitué de protéines de pois et l'autre de caséines) au sein du gel. La RMN a aussi montré que la variation du ratio relatif protéine de pois/caséine affecte de façon complexe, non monotone, la nano-structuration du gel ; la présence de seulement 20 % de caséines au sein d'un gel riche en protéine de pois contribue à la présence de cavités d'eau au sein du gel. Cela a aussi été observé en SAXS ; les gels riches en protéines de pois avec seulement 20 % de caséines présentent de larges inhomogénéités (140 nm de diamètre) en contraste aux inhomogénéités de gels de protéines de pois purs (60 nm). Ces modifications ont des conséquences rhéologiques notables ; l'incorporation de 20 % de protéine de pois dans les gels de caséine entraîne une forte réduction de la rigidité par rapport aux gels de caséine purs. Ces résultats indiquent que l'organisation structurale à grande échelle est le facteur dominant qui régit les propriétés clés des gels, telles que la rhéologie et la mobilité de l'eau.

Perspectives

Par la suite, nous modéliserons quantitativement le lien entre structure et réponses rhéologiques. À long terme, nous établirons un diagramme de corrélation entre conditions physico-chimiques/formulation et propriétés des hydrogels.



© Ali Assifaoui - Exemple d'hydrogel de calcium-polyGalA

Ajuster la structure d'hydrogels de pectines par méthylation pour mieux encapsuler



En savoir plus

Börjesson M. *et al.*

Impact of methyl-esterification on the microstructure of calcium-induced polygalacturonic acid gels

Carbohydrate Polymers - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124301>

Partenariat

- Laboratoire Léon Brillouin (CEA-Saclay)

- Université de technologie Chalmers (Göteborg, Suède)

Projet support :

Projet soutenu par le Nordic Neutron Science Programme (NNSP) et financé par FORMAS (Suède).

Contacts

Ali Assifaoui et Adrien Lerbret

UMR PAM

ali.assifaoui@ube.fr

adrien.lerbret@institut-agro.fr



Contexte

Les hydrogels à base de pectines, formés par gélification ionotropique externe, sont utilisés dans les domaines pharmaceutique et agroalimentaire pour encapsuler des substances actives (SA). Leur efficacité d'encapsulation dépend de leur structure interne en termes de taille de pores et d'homogénéité, et ainsi de leur rigidité. Cette étude explore comment la méthylation partielle des chaînes de polygalacturonate (polyGalA), le principal constituant des pectines, influence la structure des gels réticulés par des ions calcium. L'objectif est de comprendre comment cette modification chimique permet de moduler la porosité, la rigidité et la diffusion des SA dans le gel.

Résultats

Les gels à base de polyGalA non méthylé (degré de méthylation DM = 0 %) sont transparents, homogènes et rigides. L'une des extrémités des hydrogels montre une porosité proche de 7 nm, tandis que l'autre extrémité est plus lâche. Cette hétérogénéité provient d'un gradient de concentration en polyGalA induit par la diffusion des ions calcium et la réorganisation des chaînes du polymère lors du procédé de gélification. Lorsque DM augmente, les gels deviennent plus turbides et moins rigides, la taille des pores de la première extrémité augmente

(jusqu'à 14 nm pour DM = 34 %), et des hétérogénéités mésoscopiques apparaissent. Cette étude a également montré que la réaction chimique employée pour la méthylation du polyGalA induit une diminution de la masse molaire et de la viscosité des chaînes, et une augmentation de leur rigidité (longueur de persistance). Les simulations moléculaires montrent que la méthylation favorise une conformation des chaînes moins favorable à leur association avec le calcium et rend moins favorable l'association des chaînes entre elles, ce qui expliquerait la fragilité des gels partiellement méthylés.

Perspectives

La méthylation partielle du polyGalA semble être une approche prometteuse pour ajuster la structure des hydrogels selon les besoins : diffusion contrôlée, rigidité adaptée, encapsulation ciblée. Des études futures pourraient explorer l'effet de la distribution des groupes méthyles et l'influence de la méthylation sur des chaînes plus longues.

Une approche bioinspirée pour renforcer des hydrogels covalents d'arabinoxylanes féruloylés



En savoir plus

Assor Antoine C. *et al.*

Doping feruloylated arabinoxylan covalent hydrogels with cellulose nanocrystals

Food Hydrocolloids - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111769>

Partenariat

- L2C, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France-Equipe Nano, UR BIA, INARE, Nantes

- UR1268 Biopolymères Interactions Assemblages (Nantes),

-JRU Biotechnologie des Champignons Filamenteux (Marseille).

Projet support:

Projet ANS Interphydre (INRAE, Transform, 2024)

Contact

Carole Antoine Assor

UMR IATE

carole.assor@inrae.fr



Contexte

La transformation des céréales génère d'importants volumes de sons, sous-produits peu valorisés mais riches en molécules bioactives (antioxydants, prébiotiques) et en polysaccharides aux propriétés fonctionnelles intéressantes. Parmi ces polysaccharides, les arabinoxylanes féruloylés (AXf) se distinguent par leur capacité à former des gels covalents thermo-irréversibles sous l'action d'agents oxydants enzymatiques ou physiques. Ces gels, biocompatibles et résistants aux variations de pH et d'électrolytes dans des conditions biologiques, présentent une structure macroporeuse (40–400 nm), propice à l'encapsulation de divers composés, y compris des molécules thérapeutiques. En tant que fibres alimentaires non digestibles dans la partie haute du tractus gastro-intestinal, les AXf offrent un fort potentiel pour une libération ciblée de principes actifs au niveau du côlon. Toutefois, la principale limitation de ces hydrogels réside dans leur faible résistance mécanique ($G' < 100$ Pa), restreignant leur utilisation face à d'autres biopolymères. La cellulose qui interagit fortement avec les xylanes *in planta*, est envisagée comme un agent de renforcement de ces hydrogels sous forme de nanocristaux (Cellulose Nano Crystals).

Résultats

Cette étude montre que l'incorporation de CNC (0,5 à 1,5 % w/v) lors de la réticulation enzymatique

des AXf améliore significativement la rigidité des gels, avec un module élastique (G') passant de 60 à 400 Pa. La rigidité varie proportionnellement au cube de la concentration en CNC, traduisant une maîtrise fine des propriétés mécaniques. Ce renforcement résulte de deux mécanismes : (i) une augmentation de la densité de réticulation covalente, avec un doublement des ponts féruliques (di- et tri-acides) et (ii) la création de liaisons physiques irréversibles entre AXf et CNC, générant un réseau hybride. Malgré ce renforcement, les hydrogels conservent une capacité de gonflement élevée (120 g H₂O/g), essentielle pour les systèmes de libération contrôlée.

Perspectives

Ces hydrogels 100 % biosourcés représentent une voie innovante de valorisation des coproduits céréaliers, actuellement majoritairement destinés à l'alimentation animale. Ils ouvrent des perspectives prometteuses dans la libération ciblée de médicaments au niveau du côlon, un axe de recherche poursuivi en collaboration avec le L2C de Montpellier. Ce travail aidera au développement d'emballages alimentaires hydrophiles et actifs, barrières aux gaz, offrant ainsi des alternatives durables aux polymères synthétiques dans des secteurs à forte valeur ajoutée.

Partie 6

Outils de prédiction et d'aide à la décision

Modèles et intelligence artificielle



Nos chercheurs développent divers outils : quelques exemples sont présentés ici pour aider les industriels à choisir leur emballage alimentaire ou encore pour améliorer la performance de la production d'Emmental.

Découvrez Cheese eK-Book, une plateforme alliant patrimoine artisanal et technologies modernes pour préserver le savoir-faire. Et AgriCode, outil qui automatise le codage qualitatif des entretiens, étape chronophage de la recherche qualitative.

Des approches hybrides permettent d'optimiser le système frigorifique des supermarchés et de maîtriser la température tout au long de la chaîne du froid. Un modèle phénoménologique décrit la dynamique d'homogénéisation du lait et un modèle de « marche aléatoire auto-évitante » explore les principes de la motilité active.



© Isabelle Buche - Exemples de matériaux d'emballage biodégradables et biosourcés produits lors du projet européen Glopac

Vers un emballage alimentaire juste nécessaire et durable



En savoir plus

Pigneres E. *et al.*

A requirement-driven approach to design food packaging: A new decision support system relying on structured database

Innovative Food Science and Emerging Technologies - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104096>

Partenariat

- CTCPA, Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles, Bourg-en-Bresse, France

Contacts

Valérie Guillard et Patrice Buche

UMR IATE

valerie.guillard@umontpellier.fr

patrice.buche@inrae.fr



Contexte

La sélection d'un emballage alimentaire adapté au produit est un processus complexe, impliquant de multiples critères liés à la nature du produit à conditionner, aux conditions de stockage, à la durée de conservation souhaitée et aux propriétés des matériaux. Or, les connaissances nécessaires sont souvent dispersées ou réservées aux experts. Dans un contexte de réduction des pertes alimentaires et de transition vers des emballages plus durables, il est crucial de concevoir des outils accessibles permettant de choisir les matériaux d'emballage « justes nécessaires », répondant aux besoins de conservation tout en minimisant l'impact environnemental du couple emballage/produit.

Résultats

Les auteurs ont développé un système d'aide à la décision (DSS) innovant, basé sur des bases de données structurées. Ces dernières intègrent les sensibilités des aliments, en termes de facteurs d'altération prépondérants, leurs exigences de conservation et les propriétés des matériaux d'emballage permettant de répondre à l'ensemble de ces exigences. Ce DSS fonctionne dans les deux sens : il permet de recommander un emballage optimal pour un aliment donné, ou d'identifier les aliments compatibles avec un nouveau matériau dont on ne connaît pas encore les applications potentielles. Le DSS a été

validé sur deux aliments (fraises et fromage frais à tartiner) et un matériau d'emballage innovant, un carton enduit de polymère. Il a démontré sa capacité à proposer des solutions optimales ou proches de l'optimal, en tenant compte de critères comme la température de stockage, la durée de conservation de l'aliment, les contraintes thermiques rencontrées lors du conditionnement (e.g., remplissage à chaud) ou lors de l'utilisation (e.g. passage au micro-ondes) et les propriétés de perméabilité des matériaux.

Perspectives

Ce DSS constitue une avancée majeure vers une sélection raisonnée et durable d'emballages alimentaires au « juste nécessaire ». Il est conçu pour fonctionner avec l'ensemble des catégories d'aliments répertoriées dans la nomenclature européenne FoodEx2 afin de faciliter son interopérabilité avec les bases de données des agences européennes et d'enrichir sa propre base de données. Par ailleurs, l'outil va évoluer pour prendre en compte les variations des conditions environnementales de la chaîne logistique, et intégrer des modules complémentaires (recyclabilité, coût, préférences des parties prenantes). À terme, le DSS pourrait devenir un outil multicritère complet, accessible à tous les professionnels de la chaîne alimentaire, pour guider les choix d'emballages en conciliant performance de conservation et responsabilité environnementale.

Machine Learning pour prédire la performance des industries agroalimentaires : exemple en fromagerie



En savoir plus

Perrignon M. *et al.*

Machine learning for predicting industrial performance : Examples of the dry matter content of emmental-type cheese

International Dairy Journal - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106143>

Partenariat

- CNRS, IRMAR (Institut de Recherche Mathématique de Rennes)

- L'Institut Agro Rennes-Angers

Contacts

Thomas Croguennec, Mélanie Munch et Romain Jeantet

UMR STLO

thomas.croguennec@institut-agro.fr

melanie.munch@inrae.fr

romain.jeantet@institut-agro.fr



Contexte

La production fromagère, bien que standardisée, reste soumise à de nombreuses sources de variabilité. Celles-ci trouvent leurs origines dans plusieurs facteurs : la variabilité naturelle des matières premières, la perception humaine et l'intervention humaine dans le processus de fabrication, ainsi que les performances et l'état des équipements de transformation. Ces sources de variabilité entraînent des écarts par rapport aux spécifications cibles des fromages, notamment en ce qui concerne l'extrait sec, et affectent directement la compétitivité des entreprises fromagères, évoluant dans un environnement fortement concurrentiel. Jusqu'alors, l'ajustement des paramètres de production pour atteindre les cibles fixées étaient laissées à l'appréciation des experts fromagers. L'avènement des méthodes de machine Learning permettant l'exploitation de la grande quantité de données enregistrées tout au long du processus de production du fromage, offre une nouvelle perspective pour un meilleur contrôle de sa fabrication.

Résultats

Parmi les différentes méthodes d'apprentissage automatique mises en œuvre pour modéliser et identifier les variables d'influence sur l'extrait sec de l'emmental, la méthode des forêts aléatoires s'est montrée la plus efficace. La modélisation intègre l'ensemble des paramètres de fabrication, de la collecte

du lait au saumurage (y compris la composition des matières premières et les paramètres de processus). Le lot de lait standardisé, la rotation des ferments d'acidification, la teneur en matière grasse du lait de collecte, la position des fromages dans la saumure ont été identifiés comme les variables qui influencent le plus l'extrait sec de l'emmental. En combinant cette méthode à l'analyse SHAP, qui évalue l'impact (positif ou négatif) de chaque variable sur l'écart par rapport à la cible, il devient possible de définir une trajectoire optimale du processus de transformation, pour optimiser l'extrait sec de l'emmental.

Perspectives

Bien que cette étude se soit concentrée sur l'extrait sec de l'emmental, la méthodologie développée ici présente l'avantage de pouvoir être adaptée à la prédiction de nombreux autres indicateurs. Cela offre des perspectives prometteuses pour améliorer les performances économiques des fromageries (taux de rendement synthétique, rendement en fromage, récupération des matières grasses dans les fromages, etc.), améliorer la compréhension des déterminants de la qualité du fromage (texture, aptitude à la fonte, etc.) et identifier des voies de transformation plus durables (consommation d'énergie ou d'eau, etc.).



© Christophe Fernandez
- Affinage traditionnel
d'un AOP Cantal - Salers
(2019)

Cheese eK-Book : une plateforme web innovante pour capitaliser et transmettre le savoir fromager



En savoir plus

Baudrit C. et al.

Cheese eK-Book: a new web-based medium for capitalising on, structuring and transferring cheesemaking knowledge and know-how

Journal of Documentation - 2025

<https://doi.org/10.1108/JD-07-2024-0182>

Valorisation

- Transfert sous Licence : contrat de licence de Logiciel libre CeCILL-B pour utilisateur commercial entre INRAE Transfer, INRAE, Université de Bordeaux et l'association DOCAMEX

- Création de l'association DOCAMEX (Numéro RNA : W751271332)

Partenariat

- CNAOL, Conseil National des Appellations d'Origine Laitières

- ACTALIA, Annecy, France

- CTFC, Poligny, France

- DOCAMEX, Bordeaux, France

- ENIL, Réseau des Écoles Nationales d'Industries Laitières

Contacts

Cedric Baudrit, Christophe Fernandez et Patrice Buche

USC I2M et UMR IATE

cedric.baudrit@inrae.fr

christophe.fernandez@inrae.fr

patrice.buche@inrae.fr



Contexte

La FAO alerte sur la perte des savoirs traditionnels liés à l'alimentation, menacés par la mondialisation, l'urbanisation et l'évolution des modes de consommation. Dans l'industrie laitière européenne, le nombre de fermes a chuté de 81 % entre 1983 et 2013, et les ateliers peinent à recruter et fidéliser une main-d'œuvre qualifiée. Ces difficultés se traduisent par un risque de disparition des savoir-faire, aggravé par le vieillissement des artisans, l'absence de relève et la dépopulation des zones de montagne. La fabrication du fromage repose sur une combinaison complexe de connaissances scientifiques et empiriques, souvent transmises par observation, mais difficiles à formaliser. Face à ces enjeux, des outils numériques apparaissent essentiels pour préserver, structurer et diffuser ces savoirs, tout en soutenant la formation continue et l'innovation durable.

Résultats

La plateforme web 2.0 « cheese eK-Book » propose une base de connaissances interactive dotée d'une sémantique, accessible sur smartphones et tablettes. Elle traduit et agrège de la connaissance déclarative sous forme de cartes conceptuelles et de la connaissance procédurale sous forme de fiches de connaissances hypermédias. Son architecture permet une lecture non linéaire facilitant la navigation et l'apprentissage. Cheese eK-Book est couplée à un moteur de

raisonnement, basé sur les arbres de décision, qui vise à apporter une aide à la recommandation d'actions technologiques permettant de corriger un défaut ou de maintenir une qualité fromage dans son procédé de fabrication. Les évaluations montrent une amélioration significative des connaissances des utilisateurs après utilisation. Les mesures de charge cognitive et de désorientation restent faibles, confirmant une ergonomie adaptée aussi bien aux novices qu'aux experts. Déjà adopté dans 19 AOP fromagères françaises représentant plus de 70 % du tonnage annuel national, la plateforme cheese eK-Book favorise la formation continue, le transfert intergénérationnel et le rapprochement entre producteurs, écoles et centres de recherche.

Perspectives

Cheese eK-Book pourrait être enrichi par l'intégration de nouvelles technologies issues de l'intelligence artificielle telles que les modèles de langage à grande échelle pour y intégrer un chatbot ou assistant virtuel afin de personnaliser l'apprentissage et anticiper les besoins de formation. L'extension à la filière laitière permettrait de généraliser la préservation des savoir-faire sur l'ensemble de la chaîne de la production du lait au fromage. La plateforme web 2.0 « cheese eK-Book » étant basée sur un moteur générique, elle est en cours d'évaluation dans la filière cidricole et la filière biomatériaux.



Outil innovant pour automatiser le codage qualitatif des entretiens



En savoir plus

Koptelov M. *et al.*

AgriCode: Automated coding for qualitative research and its application to the valorization of agricultural residues

SoftwareX - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102258>

Partenariat

- ECOZEPT, Freising, Allemagne
- CIRAD, UMR TETIS, Montpellier

Projet support:

Horizon Europe research and innovation program AgriLoop (project ID 101081776).

Contacts

Pierre Bisquert et Patrice Buche

UMR IATE

pierre.bisquert@inrae.fr

patrice.buche@inrae.fr



Contexte

La recherche qualitative est largement utilisée pour analyser les significations, expériences et représentations des individus à travers des données textuelles, notamment des entretiens. Une étape clé de cette analyse est le codage, qui consiste à catégoriser les segments de texte (phrases, paragraphes ou des mots) selon une grille hiérarchisée. Cette opération, souvent réalisée manuellement, est coûteuse en temps et en ressources humaines. Dans le cadre du projet Agriloop, centré sur la valorisation des résidus agricoles dans l'industrie agroalimentaire, un outil appelé AgriCode a été développé pour automatiser le codage et répondre au double enjeu de la productivité et de la fiabilité des analyses qualitatives.

Résultats

AgriCode repose sur des modèles d'apprentissage automatique, entraînés à partir d'un premier jeu de données annotées manuellement. Pour surmonter la rareté des données et les déséquilibres entre catégories, nous utilisons l'augmentation de données via la méthode Retrieval-Augmented Generation (RAG), qui combine l'usage de grands modèles de langage avec une base de connaissances externe pertinente. Cette approche améliore la couverture lexicale et la capacité du modèle à reconnaître des catégories variées, tout en limitant les coûts liés à l'annotation manuelle. L'outil est capable de coder automatiquement des

segments de texte selon une hiérarchie de codes prédéfinie, d'assister l'analyste dans la validation des résultats et de réduire les erreurs humaines. Les premières expérimentations montrent une nette amélioration de la performance après augmentation de données, en particulier pour les catégories minoritaires.

Perspectives

Initialement développé pour l'analyse des préférences des acteurs des filières de valorisation des résidus agricoles, AgriCode propose une méthodologie généralisable à d'autres contextes où l'analyse qualitative souffre de rareté de données. À court terme, nous visons à intégrer les données des futures vagues d'entretiens du projet Agriloop afin d'étendre la couverture à davantage de niveaux de catégories issues de la grille hiérarchisée d'Agriloop (l'approche actuelle ne prédit que jusqu'à deux niveaux de la grille). Par la suite, nous prévoyons d'explorer une approche hybride basée sur les grands modèles de langage et des techniques d'apprentissage utilisant peu de données comme le « few-shot learning » pour coder des textes à partir de n'importe quelle grille hiérarchisée, avec seulement quelques exemples par catégorie. À plus long terme, AgriCode pourrait constituer une solution générique d'assistance au codage qualitatif, contribuant à réduire la charge de travail des chercheurs tout en améliorant la robustesse des analyses.



© P Priyadarshi Gaurav- Meuble frigorifique de vente

Modèles d'intelligence artificielle pour l'évaluation des performances d'un meuble frigorifique de vente



En savoir plus

Priyadarshi G. *et al.*

Application of artificial intelligence models for assessing the performance of closed vertical refrigerated display cabinet - A comparative study of different operating scenarios

Engineering Applications of Artificial Intelligence - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110332>

Partenariat

- Sustainable Thermal Energy Systems Laboratory (STESL), Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India

Contact

Hong-Minh Hoang

UR FRISE

hong-minh.hoang@inrae.fr



Contexte

Le développement d'énergies propres et durables constitue aujourd'hui un objectif majeur des politiques énergétiques, visant à soutenir la croissance économique tout en protégeant l'environnement. Parmi les priorités figurent la baisse des émissions de carbone et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les systèmes de réfrigération, largement utilisés dans les supermarchés, représentent près de 50 % de la consommation électrique. Un contrôle précis de la température des produits est également essentiel pour garantir leur qualité et leur sécurité. Une meilleure gestion énergétique de ces équipements permettrait de réduire le coût énergétique pour le magasin. Cette étude propose une approche multidisciplinaire intégrant des connaissances physiques d'un système de réfrigération et des approches de modélisation d'intelligence artificielle.

Résultats

Des expériences ont été menées pour analyser la température des produits et la puissance consommée dans différentes conditions de fonctionnement d'un Meuble Frigorifique de Vente (MFV). Une expérimentation a été menée sur un MFV selon trois scénarios de fonctionnement (températures de consigne de référence, plus chaude et plus froide) et des portes fermées ou ouvertes. Les données expérimentales ont servi à l'entraînement et au test des modèles d'IA. Les résultats ont montré que la régulation des températures de

l'air de reprise et de soufflage du MFV peut aider au contrôle en temps réel de la consommation énergétique et de la gestion thermique. Cela réduit les coûts énergétiques et améliore la stabilité de la température des produits. Le modèle de réseau de neurones artificiels (ANN) et le modèle de système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) offrent de bonnes performances. L'ANN montre une précision supérieure pour la modélisation prédictive des MFV grâce à sa capacité à reproduire les comportements transitoires. Les paramètres optimisés du modèle ANN obtenus pour le scénario plus froid peuvent être directement appliqués aux conditions de référence et plus chaude, réduisant ainsi de manière significative le temps de calcul et les ressources nécessaires à la ré-optimisation du modèle.

Perspectives

Les perspectives portent sur le développement de systèmes de contrôle en temps réel pour les meubles frigorifiques de vente (MFV) basés sur des modèles ANN ou ANFIS afin d'optimiser l'efficacité énergétique et la qualité des produits. Il est également proposé de simuler des conditions réelles de fonctionnement en supermarché, telles que des ouvertures de porte prolongées et des variations de la température ambiante. Par ailleurs, la réalisation d'une analyse du cycle de vie permettrait d'évaluer l'impact environnemental des opérations.

Nouvelle approche hybride de modélisation de la température dans une palette de produits dégageants de la chaleur



En savoir plus

Aguenihani D. *et al.*

A hybrid numerical approach for characterising airflow and temperature distribution in a ventilated pallet of heat-generating products: Application to cheese

Journal of Food Engineering - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112323>

Partenariat

- Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL)

Projet support:

- EMARIS

Contacts

Dihia Aguenihani et Jean Moureh

UR FRISE

dihia.aguenihani@inrae.fr

jean.moureh@inrae.fr



Contexte

Après fabrication, les fromages à pâte molle ont une activité respiratoire qui induit un dégagement de chaleur le long de la chaîne du froid. Ce phénomène, pouvant mener à un emballage thermique, constitue un défi majeur pour les professionnels pour maintenir la température des produits dans la chaîne du froid, préserver leurs qualités et éviter les pertes alimentaires.

Pour mieux comprendre et maîtriser ces phénomènes thermiques, des approches de modélisation en dynamique des fluides numérique (CFD) sont utilisées pour prédire la température des produits au sein des palettes. Toutefois, ces approches présentent certaines limites : la CFD directe, bien que précise, exige des ressources de calcul importantes et se limite à de petits domaines (un niveau de palette), tandis que la simplification sous forme de milieu poreux, est moins coûteuse, mais peu représentative. Pour répondre à ces limites, une nouvelle approche de modélisation CFD 3D hybride, a été développée sous ANSYS-Fluent.

Résultats

L'approche développée combine la CFD directe (pour les caisses de produits, incluant la position et les dimensions des orifices), au milieu poreux (pour l'intérieur des caisses). Cette approche hybride a été appliquée sur un niveau de palette de fromages

avec différentes vitesses d'air et de flux de chaleur dégagés. Les résultats des profils de vitesse d'air et de température des produits ont été comparés aux données expérimentales obtenues sur un dispositif à échelle réelle, ainsi qu'aux résultats numériques de la CFD directe. L'étude a montré que la modélisation hybride permet, avec précision, de caractériser les écoulements d'air et les hétérogénéités de température des produits au sein d'un niveau de palette, notamment avec la modélisation des positions et formes des orifices. Cette approche permet notamment de réduire le temps de calcul d'un facteur 12 par rapport à la CFD directe.

Perspectives

L'approche hybride a été utilisée en régime permanent. Grâce à son faible temps de calcul et à la précision des résultats, elle pourrait être étendue à des études en régime instationnaire, afin de suivre l'évolution des températures le long de la chaîne du froid, notamment pour les produits qui dégagent de la chaleur. Par ailleurs, la modélisation des orifices des caisses permet de généraliser la méthode pour étudier l'effet des palettes voisines sur les écoulements d'air et la distribution de la température à l'intérieur des palettes.

Modélisation des phénomènes de colonisation des protéines sériques à l'interface de matière grasse laitière



En savoir plus

Haas M. *et al.*

Adsorption and reorganisation of whey proteins onto a molten milk fat droplet interface through experimental and modelling assessment

Food Hydrocolloids - 2025

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110809>

Partenariat

- SayFood INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay

- Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL)

Contacts

Véronique Bosc, Delphine Huc-Mathis, Denis Flick

UMR SayFood

veronique.bosc@agroparistech.fr

delphine.huc@agroparistech.fr

denis.flick@agroparistech.fr



Contexte

L'homogénéisation du lait génère de nouvelles interfaces matière grasse/eau rapidement colonisées par des macromolécules tensioactives telles que les protéines et les phospholipides. Les cinétiques et mécanismes de cette colonisation déterminent la taille des globules gras, la stabilité des émulsions et la texture finale des produits laitiers. Toutefois, la dynamique d'adsorption des protéines sériques sur des interfaces de matière grasse laitière reste mal caractérisée dans des conditions proches des procédés industriels. Le défi consiste à concevoir une approche expérimentale et de modélisation permettant d'estimer des paramètres cinétiques et structuraux pertinents dans un cadre contrôlé mais réaliste.

Résultats

L'étude s'est appuyée sur des mesures expérimentales de tension interfaciale sur une goutte unique de matière grasse laitière à 50 °C et des analyses de rhéologie de dilatation interfaciale. Par ailleurs, la construction d'un modèle décrivant successivement la diffusion, la saturation progressive de la surface et la réorganisation des protéines a été développé. L'ajustement du modèle aux données expérimentales sur une large gamme de concentrations en protéines a permis d'identifier cinq paramètres clés caractérisant l'adsorption. Il est

ainsi montré que la réorganisation interfaciale des protéines est importante à partir d'une charge de surface représentant 72 % de la charge maximale. Cette dernière a été estimée à $1.3 \times 10^{-7} \text{ mol.m}^{-2}$, conduisant à une pression de surface maximale de 15 mN.m, et le temps caractéristique de réorganisation des protéines à 110 s. Les mesures de rhéologie interfaciale et les observations macroscopiques ont validé les hypothèses de réorganisation et mis en évidence trois régimes distincts d'organisation interfaciale, allant de la diffusion initiale à la formation d'un réseau protéique cohésif.

Perspectives

Ces travaux fournissent une base quantitative solide pour modéliser les phénomènes interfaciaux au cours de l'homogénéisation haute pression. Les prochaines étapes viseront à étendre cette approche aux systèmes multicomposants, afin de décrire la compétition d'adsorption entre protéines sériques, caséines et phospholipides. À terme, ces modèles contribueront à la prédiction et au contrôle de la stabilité et de la microstructure des émulsions laitières.



© Adrien Izzet - 5 trajectoires de marches aléatoires auto-évitantes : de gauche à droite, les 4 premières sont des trajectoires de gouttes nageuses et la 5ème est une trajectoire simulée par le modèle développé dans la publication.

Gouttes nageuses et mémoire dans les émulsions



En savoir plus

Chen W. *et al.*

Evolving Motility of Active Droplets Is Captured by a Self-Repelling Random Walk Model

Physical Review Letters - 2025

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.018301>

Contexte

La matière active regroupe des systèmes composés d'unités capables de se déplacer par elles-mêmes en convertissant de l'énergie de leur environnement en mouvement. On en rencontre partout, des bactéries et micro-algues jusqu'au trafic ou des foules : dans tous les cas, un même défi se pose, celui de comprendre comment des comportements individuels simples peuvent produire des trajectoires complexes, puis des dynamiques collectives et des formes d'auto-organisation à grande échelle.

Les enjeux scientifiques consistent à établir des lois simples reliant propulsion, transformation chimique du milieu et trajectoires, afin de mieux comprendre l'émergence de comportements "intelligents" sans cerveau ni contrôle externe.

Résultats

Nos expériences avec des gouttes motiles de Diethyl phtalate dans une solution aqueuse de Sodium Dodecylsulfate révèlent une évolution de la motilité tout au long de la « vie » de la goutte, pendant qu'elle se dissout lentement dans le milieu : diffusion aux temps courts, puis une propulsion balistique, puis enfin une marche super-diffusive liée à l'évitement des trajectoires passées. Pour modéliser ces marches aléatoires, les modèles classiques de mouvement brownien ou les théories d'enchevêtrement des polymères, ne suffisent pas. Un nouveau modèle de marche aléatoire auto-évitante a été développé. Il intègre, non

seulement le rétrécissement des gouttes au cours de leur dissolution, mais aussi la diffusion chimique et la mémoire des trajectoires. De ce modèle émergent ainsi deux paramètres essentiels : une température effective –quantifiant le bruit hydrodynamique– et une force de couplage reliant propulsions et gradient chimique. Le modèle reproduit ainsi quantitativement les données expérimentales et ouvre ainsi à la prédiction de comportements collectifs.

Perspectives

Ces résultats montrent qu'il est possible d'utiliser cette activité chimique et ce mécanisme de locomotion pour créer des micro-machines permettant de tracter des gouttes inertes, de faire des micro-rotors, ou même de modifier la structure d'émulsions (actives ou passives). Ces effets collectifs sont autant de phénomènes qui peuvent se retrouver dans des procédés de fermentation, de crémage ou de sédimentation dans les suspensions, dans lesquels l'activité chimique induit des interactions multiples entre les particules. Ces effets peuvent donner naissance à des structures variées de l'ensemble du système : induire une forme particulière des agrégats, créer une structure ordonnée (« cristal ») ou désordonnée (« amorphe »). La variabilité de ces structures a des effets macroscopiques, tant du point de vue de la rhéologie et de la physique de l'écoulement du système qui contrôlent les processus de fabrication, que de sa perception sensorielle, en bouche notamment.

Contact

Adrien Izzet

UMR SayFood

adrien.izzet@inrae.fr



Contactez nos unités



Auvergne - Rhône-Alpes

CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (UMR tutelle associée CROC)
UNIV CLERMONT AUVERGNE - FACULTE CHIRURGIE DENTAIRE
2 rue de Braga Faculté de Chirurgie Dentaire
63100 CLERMONT-FERRAND
+33 (0)4 73 17 73 81
emmanuel.nicolas@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
pascal.molle@inrae.fr



Bourgogne - Franche Comté

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

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



PROCÉDÉS ALIMENTAIRES ET MICROBIOLOGIQUES (UMR PAM)

INRAE - Institut Agro Dijon - Université de Bourgogne Europe
1 ESPLANADE Erasme Epicure
21000 DIJON
+33 (0)3 83 77 40 23
direction-umrpam@agrosupdijon.fr



Bretagne - Normandie

OPTIMISATION DES PROCÉDES EN AGRICULTURE, AGROALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT (UR OPALE)

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 - Institut Agro Rennes Angers
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
51686 REIMS CEDEX 2
+33 (0)3 26 77 35 92
gabriel.paes@inrae.fr



Hauts-de-France

UNITE MATERIAUX ET TRANSFORMATIONS (UMR UMET)

INRAE - CNRS - Université de Lille - Centrale Lille Institut
59651 VILLENEUVE-D'ASCQ Cedex
+33 (0)3 20 43 54 00
guillaume.delaplace@inrae.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)

INRAE - AgroParisTech - CNAM
Campus Agro Paris-Saclay, bâtiment E, 22 place de l'agronomie
91120 PALAISEAU
+33 (0)1 89 10 11 32
violaine.athes-dutour@inrae.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

PROCEDES 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 ŒNO)

INRAE - Univ. Bordeaux - BSA - Bordeaux INP - ISVV
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 (UMR tutelle associée I2M)
INRAE - CNRS - Univ. Bordeaux - Bordeaux INP - Arts et Métiers
Campus Talence, 33405 Talence
+33 (0)5 40 00 28 47
thierry.palin-luc@u-bordeaux.fr

Occitanie Pyrénées-Méditerranée

INGENIERIE DES AGROPOLYMERES ET TECHNOLOGIES EMERGENTES (UMR IATE)

INRAE - Institut Agro Montpellier - Université Montpellier
34060 MONTPELLIER Cedex 2
+33 (0)4 99 61 35 43
jean-yves.delenne@inrae.fr



SCIENCES POUR L'ŒNOLOGIE (UMR SPO)

INRAE - Institut Agro Montpellier - 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
eric.trably@inrae.fr



PECH ROUGE UNITE EXPERIMENTALE (UE PR)

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

LABORATOIRE DE CHIMIE AGRO-INDUSTRIELLE (UMR LCA)

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



VASSAL (UE VASSAL)

INRAE - Domaine de Vassal
Route de Sète
34340 MARSEILLAN
anne.mocoeur@inrae.fr

TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (UMS TWB)

INRAE - INSA - CNRS
Campus de l'INSA, Bâtiment 50 - 135, avenue de Rangueil
31077 TOULOUSE Cedex 4
+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
bernard.cathala@inrae.fr

STATISTIQUES, SENSOMETRIE ET CHIMIOMETRIE (UMR tutelle associée StatSC)

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

GENIE DES PROCÉDÉS ENVIRONNEMENT - AGROALIMENTAIRE (UMR tutelle associée GEPEA)

INRAE - Oniris - Nantes Université - CNRS - IMT Atlantique
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@inrae.fr



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

INRAE - Avignon Université
Domaine Saint-Paul
84914 AVIGNON Cedex 9
+33 (0)4 32 72 25 00
isabelle.souchon@inrae.fr



ARCHITECTURE ET FONCTION DES MACROMOLECULES BIOLOGIQUES (UMR tutelle associée 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
transform@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/departements/transform>

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

