



© INRAE LBE

INRAE



Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2024

Département aliments, produits biosourcés et déchets
TRANSFORM

SOMMAIRE

Page 5: Les Plateformes

p 9

Partie 1: Connaître, décider, mieux produire et innover grâce aux données et modèles

p 23

Partie 2: Assurer la qualité des aliments et leur appréciation par le consommateur, de la production à la digestion

p 36

Partie 3: Optimiser les fonctions de molécules naturelles

p 43

Partie 4: Considérer et maîtriser la texture, une propriété essentielle de la matière première et des produits

p 50

Partie 5: Eviter pathogènes, allergènes, contaminants et polluants

p 56

Partie 6: Intégrer l'impact environnemental et éco-concevoir

Page 66: Contactez nos unités

MENTIONS LEGALES

Editeur: Johnny Beaugrand, Chef de département

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

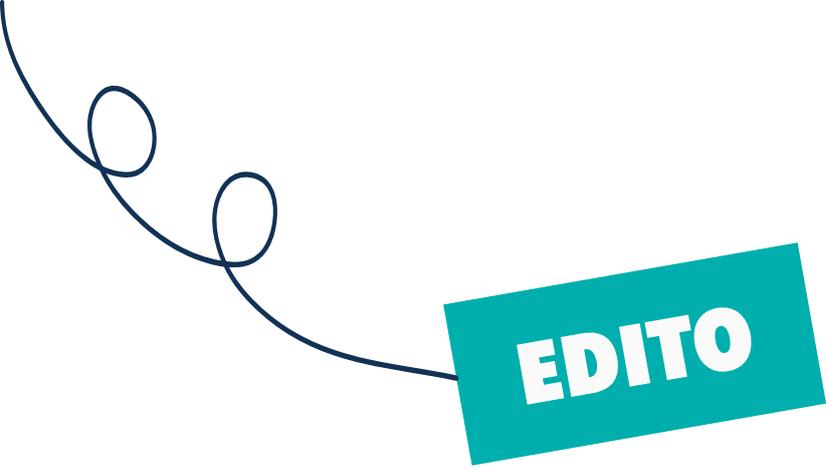
Design: Mélanie Delclos

Beaugrand J., et al (2024). Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2024
Département Aliments, produits biosourcés et déchets. INRAE.

<https://doi.org/10.15454/1.513784414798735E12>

© INRAE - Photos: médiathèque INRAE, Adobe Stock, Pixabay, photo de couverture: © INRAE LBE





EDITO

Ce rapport a pour vocation d'illustrer le chemin que les chercheurs de Transform parcourent sur les lignes de son plan stratégique 2021-2025 et de partager les expertises et moyens de notre département. C'est un état des lieux actualisé de notre production scientifique, mais aussi une illustration des méthodes et technologies que nous développons.

Le département Transform se distingue par la richesse et la diversité de ses travaux, couvrant un spectre d'initiatives allant des biotechnologies environnementales à l'alimentation saine et durable en passant par la réutilisation des eaux traitées en agriculture. Notre département innove et met en œuvre la valorisation des biomasses agricoles, contribuant à la réduction des déchets et à la création de nouveaux matériaux ou molécules biosourcés. Dans le domaine de l'alimentation, Transform, intègre des approches transdisciplinaires pour améliorer les systèmes alimentaires actuels, à la recherche de nouveaux ingrédients, comme les légumineuses, les insectes, de la viande et de l'amélioration de procédés. Transform s'attache également à accompagner les filières historiques de notre territoire, comme les filières viticoles en assurant la gestion d'une collection ampélographique unique au potentiel d'innovation à transformer en impacts pour la société.

Grâce à des projets de dimensions variés, allant de l'étude des chaînes de valeur jusqu'à l'impact environnemental, le département joue un rôle crucial dans la transition écologique. En somme, Transform se positionne comme un acteur poursuivant des recherches finalisées, et explorant des solutions novatrices pour répondre aux défis environnementaux et alimentaires de demain.

Je termine en vous souhaitant une excellente lecture et vous invite à suivre les activités de nos équipes en visitant notre page web INRAE : <https://www.inrae.fr/departements/transform>.

Johnny Beaugrand
Chef de Département TRANSFORM

Infrastructures de recherche inscrites sur la feuille de route nationale

Les infrastructures de recherche sont au cœur d'enjeux économiques et industriels majeurs, le recours à ces infrastructures étant devenu, dans la plupart des disciplines, un impératif en termes de compétitivité scientifique et de rayonnement international. Les stratégies nationales et européennes dans le domaine des infrastructures de recherche se déclinent à travers des "Feuilles de route", celle de la France ayant été renouvelée en 2021.

TRANSFORM est au centre de trois infrastructures de recherche, IBISBA-EU sur la [feuille de route européenne ESFRI](#) et IBISBA-FR et CALIS sur la [feuille de route nationale MESR](#), au service d'une recherche multidisciplinaire d'excellence dans les domaines de la biotechnologie et de l'alimentation, respectivement.

TRANSFORM au cœur d'IBISBA (Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Accelerator)

EU-IBISBA

Labellisée ESFRI 2018, IBISBA-EU est une infrastructure de recherche translationnelle qui entend accélérer le développement des biotechnologies industrielle et environnementale en Europe en tant que pivot de la bioéconomie circulaire. Fédérant les infrastructures de recherche de pointe de 10 pays européens et associant les dernières technologies numériques, IBISBA-EU propose aux communautés académique et industrielle un accès unique à des services R&D&I intégrés et innovants en biotechnologie, prenant le virage de l'ère de la « BioIndustry 4.0 ».

Début 2024, l'infrastructure IBISBA France, avec le soutien d'INRAE était fière et heureuse d'organiser le Mini-Summit Inspiring Biotech Solutions de l'infrastructure IBISBA-EU. Cet événement a été l'occasion d'annoncer la candidature de la France pour accueillir le siège légal d'IBISBA-ERIC (en 2026).

Contact : management@ibisba.eu



IBISBA-FR

Nœud français d'IBISBA-EU, IBISBA-FR est une infrastructure de recherche distribuée pour le développement des biotechnologies au service de la bioéconomie circulaire. Elle propose des modules de services et apporte son expertise scientifique et technologique à IBISBA-EU.

Les activités des plateformes d'IBISBA-FR portent sur les biotechnologies industrielles et environnementales, depuis la conception assistée par ordinateur de voies de synthèses construites par ingénierie métabolique pour la production de molécules d'intérêt via l'exploitation des données de -omics (géo-, transcripto-, métabol-, flux-), la découverte et l'amélioration des enzymes et des souches microbiennes adéquates, le développement et le scale-up de bioprocédés.

Contact : ibisba-fr@ibisba.eu

INRAE, au travers du département TRANSFORM, est pleinement investi dans la coordination d'IBISBA-EU et d'IBISBA-FR. L'offre de services proposée par l'institut est apportée par les plateformes du département : TWB, PICT-ICEO (UMR TBI), AlgoSolis (UMR GEPEA), Bio2E (UR LBE), GetBioPuces (UMR TBI) et 3PE (UMR BBF).

Plus d'informations : ibisba.eu - ibisba.fr / **Contacts :** ibisba-fr@ibisba.eu - network@ibisba.fr

TRANSFORM au cœur de CALIS (Consommateur-Aliment-Santé)

L'alimentation, source de forts enjeux économiques, sociaux, environnementaux et de santé, constitue une préoccupation majeure des politiques publiques. L'infrastructure CALIS (Consommateur, Aliment, Santé) propose des offres de service et de développement méthodologiques et technologiques performantes et innovantes qui s'appuient sur une organisation distribuée nationale de différentes entités telles que (i) des plateformes analytiques et technologiques de conception et de caractérisation des aliments, (ii) des dispositifs d'études cliniques et d'épidémiologie nutritionnelle, (iii) des plateformes de bases de données de consommation alimentaire, et (iv) des dispositifs d'expérimentation et d'étude des comportements alimentaires. Ces dispositifs, portés par différents partenaires, sont regroupés en trois pôles : Consommateur, Aliment et Santé.

TRANSFORM est particulièrement présent dans le pôle « Aliment » via ses plateformes technologiques « Lait » (STLO) et « PLANET » (IATE) et son infrastructure analytique labellisée par INRAE « PROBE ». PROBE propose une expertise multidisciplinaire sur la caractérisation multi-échelle de la structure et des propriétés de systèmes biosourcés, notamment à usage alimentaire. PROBE met en œuvre des technologies de pointe complémentaires : spectrométrie de masse, RMN, IRM, microscopie, chemotypage, analyses sensorielles et études du comportement alimentaire et s'appuie sur une expertise innovante en traitement des données. PROBE repose sur les compétences de quatre plateformes, dont trois labélisées par INRAE, présentant une forte complémentarité en termes de molécules étudiées et d'approches : BIBS (BIA), ChemoSens (CSGA), AgroResonance (QuaPA) et Polyphénols (SPO).

Contact : probe-ir@inrae.fr ; calis-ir@inrae.fr





Nos plateformes scientifiques



AGRORESONANCE - UR QuaPA

Thématique générale : L'ISC AgroResonance est spécialisée dans la caractérisation, par résonance magnétique nucléaire (RMN) et imagerie par résonance magnétique (IRM), des bioressources, de la matière première jusqu'à l'aliment, ainsi que dans les investigations in vivo en nutrition et santé.

Equipements phares : AgroResonance dispose de trois IRM à haut champ magnétique (4.7, 9.4 et 11.7 T) ainsi que d'une IRM transportable originale (0.3 T).

Offre de service : AgroResonance propose un large éventail de services, allant du développement de méthodes à la réalisation des acquisitions RMN/IRM, afin de répondre aux exigences spécifiques de ses partenaires. Ces services peuvent être étendus en amont, avec le développement d'instrumentation, la préparation des échantillons ou le gardiennage des animaux, et en aval avec le traitement et l'analyse des données. Toutes nos prestations s'inscrivent dans le respect de notre démarche qualité certifiée ISO 9001.

Contact: guillaume.pages@inrae.fr - <https://agroresonance.hub.inrae.fr/>



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

Thématique générale : BIBS s'intéresse à l'exploration des bioressources et des bioproduits, de la molécule à l'objet, pour l'alimentation, la santé et la bioéconomie. BIBS propose l'observation des macrostructures, la caractérisation des biopolymères (identification, modifications), leurs interactions, leur organisation et leur localisation dans des systèmes d'origine biologique (tissus ou organes végétaux, algues, milieux bactériens...) ou synthétique (aliments, matrices alimentaires, biofilms, matériaux composites...).

Equipements phares: i) Analyses structurales : équipements de spectrométrie de masse (MS, MSn) dont certains dits de « haute résolution »; équipements chromatographiques (LC, GC); RMN (haut et bas champs); automates de préparations/extractions .

ii) Modalités d'imagerie : microscopes photoniques (confocal, fluorescence); microscopes électroniques (à transmission ou balayage laser en mode environnemental); microscopes à force atomique, couplés RAMAN; imagerie par spectrométrie de masse; imagerie par RMN; automates de préparations (microtome, métalliseur,...).

Offre de service: Collaboration académique/privé dans le cadre de grands projets (ANR, PEPR, PIA...), prestation de recherche.

Contact: contacts-bibs@inrae.fr



CHEMOSENS- UMR CSGA

Thématique générale : Méthodes et des outils pour la caractérisation physico-chimique des aliments, des mécanismes de perception sensorielle et du comportement alimentaire.

Equipements phares: Spectrométrie de masse (lipides, composés d'arôme et sapide) : 2 GC-MS, 1 GC-2D-MS/O, PTR-TOF-MS, 2 LC-MS, 1 nanoLC, 1 SFC, 1 Orbitrap, 1 QqQ-MS

- Olfactométrie – gustométrie : 1 GC-O, 1 Olfactoscan®, 2 olfactomètres Burghart, 1 olfactomètre de seuil, 1 gustomètre Burghart, 2 gustomètres portables et 2 salles de mesures avec possibilité de couplage avec des mesures encéphalographie (EEG)

- Analyse sensorielle et consommateurs : 4 salles (16 cabines informatisées chacune), 4 cuisines et 1 salle de préparation, Panelsens® (> 5 000 volontaires)

- Sensorimétrie et chimiométrie : www.chemosenstools.com; GitHub Chemosens.

Offre de service : Caractérisation des mécanismes de perception sensorielle : de l'aliment à l'intégration des signaux au niveau cérébral

- Caractérisation de la composition lipidique de tissus neurosensoriels

- Caractérisation des préférences des comportements alimentaires des consommateurs.

Contact: carole.tournier@inrae.fr





PLATEFORME LAIT (PFL) - UMR STLO

Thématique générale : La plateforme Lait est une installation expérimentale de recherche dédiée au lait et à ses dérivés. Elle permet de réaliser à échelle réduite des opérations technologiques appliquées industriellement au lait. Adossée à l'UMR Science et Technologie du Lait et de l'Oeuf (UMR STLO - Rennes), elle bénéficie également de l'expertise scientifique des chercheurs et de l'accès au plateau analytique pour la caractérisation des matières premières et des produits fabriqués.

Equipements phares : équipements de séparation membranaire, traitement thermique, transformation laitière et fromagère, concentration par évaporation sous vide et séchage par atomisation.

Offre de service : Elle accompagne les acteurs de la filière laitière, académiques et industriels, dans leurs projets de recherche, d'innovation, de transfert et de formation, plus précisément pour la conception de matrices laitières modèles (fractions de lait, fromages, poudres...) et le développement de procédés innovants.

Contact : gaelle.tanguy@inrae.fr - <https://stlo.rennes.hub.inrae.fr/plateformes/plateforme-lait>



DISPOSITIF PLANET - UMR IATE

Thématique générale : PLANET est une plateforme de recherche technologique spécialisée dans la transformation et la valorisation des bio-ressources (céréales, légumineuses, pailles, bois, algues, ...)

Equipements phares :

- Fractionnement, séparation et tri de matière végétale par voie sèche : broyeurs instrumentés à couteaux, à palette, à boulets, à broches, à jet d'air, turbo-séparateur, trieur électrostatique, trieur optique, table densimétrique, moulins, décortiqueuses
- Structuration et traitements hydro-thermiques d'agro-composites : extrudeuses mono et bi-vis, presse chauffante, malaxeurs, pilote de traitement thermique des milieux granulaires, enceintes climatiques
- Caractérisations des milieux granulaires et continus : granulomètre laser, granulomorphomètre, colorimètres, texturomètre.

Offre de service : Réalisation de projets de recherche, de collaboration ou de prestations.

Contact : contact-planet@inrae.fr



TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (TWB)

Thématique générale : TWB couvre une large gamme d'activités allant de l'ingénierie biologique (biologie de synthèse, ingénieries enzymatique et métabolique) et de l'optimisation des conditions de fermentation à la mise au point de procédés produits à l'échelle du pilote préindustriel.

Equipements phares :

Ingénierie de souches : robots et équipements haut débit / Bioprocédés : bioréacteurs de 50mL à 300L instrumentés / Analytique : d'équipements chromatographiques couplés à des techniques de détection variées. La spectrométrie de masse.

Offre de service : Montage et conduite de projets collaboratifs de R&D; prestations de services; accompagnement et l'hébergement de start-up.

Contact : fayza.daboussi@inrae.fr



PLATEFORME BIO2E - UR LBE

Thématique générale : La plateforme Bio2E, Biotechnologie et Bioraffinerie Environnementales, développe des solutions pour le traitement et la valorisation de la biomasse et des résidus d'origine urbaine, agricole, agro-industrielle. La transformation de la matière et de l'énergie est assurée par des bioprocédés intégrés (méthanisation, bio-méthanation, bio-hydrogène, microalgues) et physico-chimiques (pré-, post-traitements) afin de minimiser les impacts des filières sur l'environnement.

Equipements phares : bioréacteurs (méthanisation, fermentation, compostage), procédés physicochimiques (pré, post-traitement), caractérisation de la matière organique, laboratoire L2, équipements mobiles sur sites, système d'information bioraffinerie environnementale.

Offre de service : Prestations de l'échelle laboratoire à l'installation industrielle: R&D collaborative, prestations de laboratoire, études de faisabilité, formations, expertise et hébergement.

Contact : audrey.battimelli@inrae.fr





PLATEFORME POLYPHENOLS (PFP) - UMR SPO

Thématique générale : Expertise dans la caractérisation des polyphénols simples et évolués (tanins, anthocyanes natives ou dérivées, flavanols, flavonols, acides phénols, stilbènes...) de fruits, boissons, produits fermentés (vin, thé, cacao...) graines, légumineuses, aliments, feuilles, bois, racines...



Equipements phares : HRMS Orbitrap Exploris 480 pour les comparaisons non-ciblées (type « métabolomique ») / IMS-HRMS (timsTOF) pour la caractérisation fine des tannins isomères / RMN 400MHz automatisé pour des empreintes moléculaires de vins (authentification).

Offre de service : Collaboration académique, prestation de recherche, formation, pour l'identification et la quantification des polyphénols simples et évolués, des tanins et comparaison d'échantillons végétaux bruts ou transformés (approche métabolomique sans a priori).

Lien : <https://plateforme-polyphenols.inrae.fr>



PLATEFORME ALGOSOLIS - UMR GEPEA

Thématique Générale : développement de nouvelles technologies de production et de bioraffinage des microalgues pour permettre l'exploitation contrôlée, intensifiée et durable de la ressource microalgale à grande échelle. Avec une vingtaine de lignes de production indépendantes, l'infrastructure permet le développement individuel d'unités pour en valider et optimiser les performances, ainsi que leur intégration dans un procédé global allant de la sélection de souches et à la production de biomasse jusqu'à sa valorisation en métabolites d'intérêt.



Equipements phares : technologies de criblage de souches, photobioréacteurs (PBRs) toriques pour optimisation de production et études métaboliques, raceways clos de 10 à 100m², PBRs intensifiés nouvelle génération de type AlgoFilm, PBRs tubulaires, biofaçade de production algale, systèmes de pré-concentration, concentration, déconstruction et d'extraction de la biomasse, procédés de filtration et de séparations membranaires.

Offre de service : sélection et optimisation de souches, développement et optimisation de procédés (culture, récolte et bioraffinage), production à façon.

Contact : jordan.prieto@univ-nantes.fr - www.algosolis.com



GeT BioPuces - UMR TBI

Thématique générale : Expertise dans le domaine de la génomique et de la transcriptomique et métagénomique. La plateforme possède les outils adéquats pour le séquençage de microorganismes en courts et longs fragments jusqu'à l'analyse des données bio-informatiques et statistiques. Nous développons également des méthodologies permettant la mesure de l'hétérogénéité au sein d'une population microbienne avec en perspective notamment la mesure de l'expression en cellule unique.



Equipement phares : Séquenceurs MiSeq (Illumina), S5 (ThermoFisher), MinION (Oxford Nanopore), digital PCR, qPCR

Offre de service : prestations de services et/ou collaboration (R&D) sur le séquençage de microorganismes, métagénomique, étude de l'expression de gènes par dPCR ou qPCR, analyses bio-informatiques et statistiques.

Contact : teste@insa-toulouse.fr



PLATEFORME 3PE - UMR BBF

Thématique générale : Production de protéines recombinantes chez la levure à différentes échelles (TRL1 à TRL4) qui est particulièrement adaptée aux protéines sécrétées par les organismes eucaryotes. Outre la production de protéines, la plateforme participe au développement de nouvelles méthodes pour leur caractérisation fonctionnelle, en particulier pour les enzymes de type oxydases, estérases, lyases et hydrolases.



Equipements phares : ROBOT : Tecan Freedom-EVO 200, HPAEC-PAD: DIONEX ICS-3000, DIONEX ICS-6000, FPLC/ Akta Xpress, Akta Purifier, Akta pure, Bioréacteur: New-Brunswick Bio-Flo 120

Offre de service : Prestations de recherche et/ou de services, auprès d'équipes de recherche académiques ou d'entreprises privées.

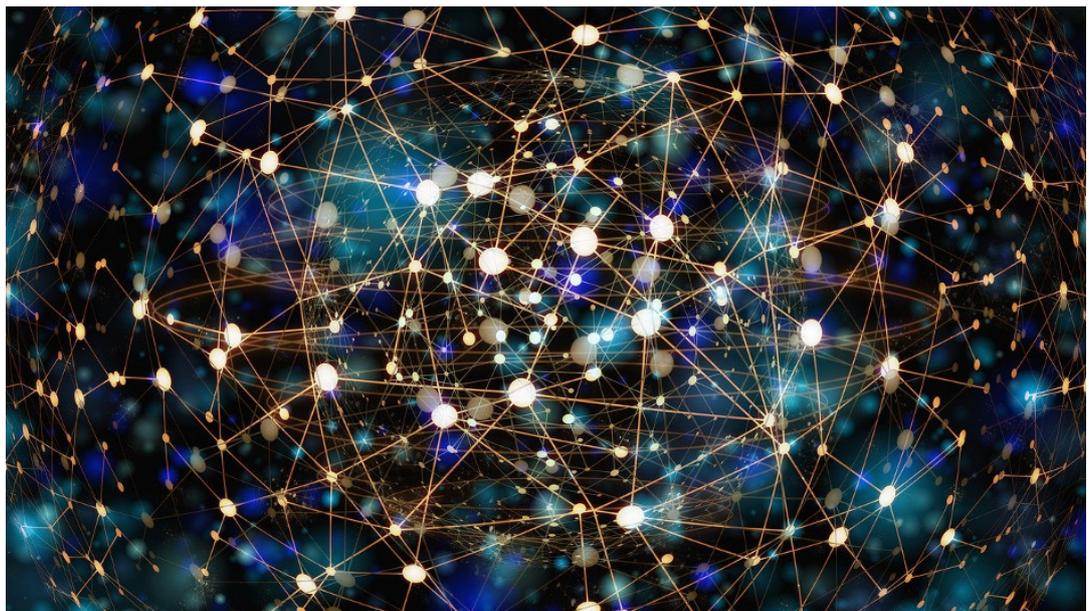
Contact : 3PE-platform@inrae.fr



Partie 1

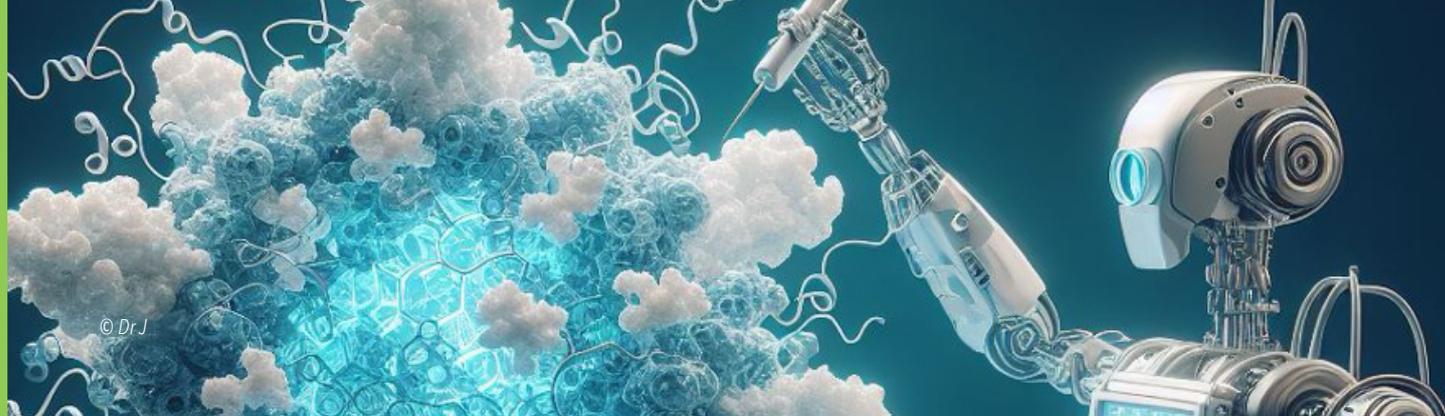
Connaître, décider, mieux produire

et innover grâce aux données et modèles



© Pixabay

En analysant conjointement les informations collectées par les capteurs et celles obtenues par différentes méthodes d'analyse, nos chercheurs développent des modèles et de nouveaux outils de simulation, de la molécule au procédé. Il en résulte un accroissement des connaissances des dynamiques des mécanismes clés des procédés, avancées qui nous permettent de raisonner le choix des procédés dans le contexte des systèmes bioéconomiques durables et de développer des procédés innovants, voire de rupture et de capitaliser sur les bases de données et ontologies opérationnelles pour développer une politique de science ouverte.



L'intelligence artificielle pour le design d'enzymes



En savoir plus

Mallinson S.J.B. *et al.*

Computer-Aided Engineering of a Non-Phosphorylating Glyceraldehyde-3-Phosphate Dehydrogenase to Enable Cell-Free Biocatalysis.

ACS Catalysis . 2023

<https://dx.doi.org/10.1021/acscatal.3c01452>

Defresne M. *et al.*

Scalable Coupling of Deep Learning with Logical Reasoning. Thirty-second International International Joint Conference on Artificial Intelligence. IJCAI . 2023

<https://dx.doi.org/10.24963/ijcai.2023/402>

Partenariat

- MIAT - Unité de Mathématiques et Informatique Appliquées , INRAE, Toulouse

- National Renewable Energy Laboratory, NREL, Colorado, USA

Contact

Sophie Barbe

UMR TBI

sophie.barbe@insa-toulouse.fr



Contexte

Face aux enjeux sociétaux et sanitaires, la nécessité de concevoir des enzymes sur mesure, dotées de fonctions améliorées ou nouvelles, devient de plus en plus pressante pour des solutions biotechnologiques innovantes dans une multitude de secteurs (environnement, alimentation, santé, ...). Le Design Computationnel de Protéines (CPD) offre un potentiel considérable pour répondre à ce besoin. Il vise à prédire la séquence d'acides aminés qui se replie dans une structure 3D donnée et présente la fonction cible, en explorant de vastes espaces combinatoires de séquences, bien au-delà de ceux explorés par l'évolution naturelle ou par les approches expérimentales traditionnelles en ingénierie des protéines.

Résultats

En associant algorithmes de raisonnement automatique et simulations moléculaires, nous avons développé une nouvelle méthodologie permettant de relever des défis liés à la complexité du design d'enzymes. La catalyse enzymatique implique divers états moléculaires liés à la formation d'intermédiaires réactionnels et à des changements de conformations. Notre approche permet de prendre en compte simultanément ces différents états pour prédire des séquences optimales qui altèrent ou confèrent de nouvelles fonctions à l'enzyme. Son efficacité a été démontrée par la conception d'enzymes capables d'utiliser un cofacteur stable et économique pour des procédés de biocatalyse acellulaire performants et

compétitifs.

Pour améliorer encore davantage nos technologies de CPD, nous avons injecté des caractéristiques des protéines apprises à partir de la masse de données croissante de structures. Cette méthode combine apprentissage profond et raisonnement automatique : une telle hybridation constitue l'un des défis majeurs de l'IA aujourd'hui. Pour ce faire, nous avons d'abord travaillé sur un problème simple, l'apprentissage des règles du Sudoku, pour lequel nous avons surpassé les méthodes existantes. Ce jeu présente des similitudes remarquables avec le design des protéines. Dans les deux cas, il s'agit de compléter une structure donnée : la grille de Sudoku ou le squelette de la protéine. Basée sur un modèle appris, cette approche s'est révélée bien plus performante pour le design de protéines que les approches traditionnelles, fondées sur des modèles statistiques et des approximations physiques.

Perspectives

L'intégration de l'intelligence artificielle et son association avec la modélisation moléculaire a permis de lever des verrous inhérents à la complexité des réactions catalytiques, pour des avancées majeures en design d'enzymes. L'IA hybride, combinant apprentissage profond et raisonnement, a le potentiel d'accélérer encore ces progrès et d'offrir de nouvelles perspectives biotechnologiques durables et compétitives dans de nombreux secteurs, notamment l'industrie, l'agriculture et la santé.

Une ontologie pour considérer les multiples dimensions des systèmes agri-alimentaires



En savoir plus

Weber M. *et al.*

PO2/TransformON, an ontology for data integration on food, feed, bioproducts and biowaste engineering

NPJ Science of Food . 2023

<https://doi.org/10.1038/s41538-023-00221-2>

Partenariat

- UMR MIA Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, Palaiseau

- UMR CSGA, CNRS, INRAE, Institut Agro, Université de Bourgogne-Franche Comté, Dijon

- Plateforme PLASTIC, Département TRANSFORM Palaiseau

PROBE Platform for profiling products of food and bio-based products

Contacts

Magalie Weber, Patrice Buche et Caroline Penicaud

UR BIA, UMR IATE et UMR SayFood

magalie.weber@inrae.fr

patrice.buche@inrae.fr

caroline.penicaud@inrae.fr



Contexte

Pour relever le défi de reconnecter l'agriculture, l'environnement, l'alimentation et la santé, il est indispensable d'exploiter des données provenant de sources et de formats hétérogènes. Or, cela constitue un défi de taille ! Toutefois, les ontologies offrent une solution, car elles fournissent une structure formelle pour décrire et mieux interpréter les données. En tant que branche de l'intelligence artificielle, les ontologies rendent possible la représentation de la connaissance générée à partir de données expérimentales provenant de différentes disciplines. Concrètement, une ontologie permet de représenter les relations entre les données sous la forme de graphes interprétables par les humains et la machine. Elle permet également à la machine de réaliser des raisonnements automatiques à l'aide de règles logiques. En s'appuyant sur un vocabulaire consensuel et partagé par les experts pour représenter les différents concepts, elle facilite le dialogue entre communautés scientifiques. Grâce à l'assemblage des données acquises dans différents projets et à l'explicitation de leurs conditions d'obtention, les ontologies contribuent au partage et à la réutilisation des données de la recherche dans le contexte d'ouverture de la science.

Résultats

Nous présentons une nouvelle ontologie, PO2/TransformON, spécifique à l'ingénierie des aliments, des bioproducts et des biodéchets qui n'a

pas à ce jour d'équivalent à l'échelle internationale. Cette ontologie permet de décrire sous forme de concepts et de relations l'ensemble des processus de transformation de la biomasse, depuis les matières premières jusqu'aux produits finis, aliments ou bioproducts, en intégrant le recyclage des co-produits ou résidus et l'analyse de cycle de vie. Elle permet aussi de structurer les données obtenues lors de la caractérisation des produits entrants ou sortants des étapes de transformation et d'enregistrer l'ensemble des paramètres de contrôle du procédé à chaque étape du processus, sous la forme d'observations reliées aux matériels et aux méthodes utilisés.

Perspectives

Les données structurées à l'aide de l'ontologie peuvent être exploitées par des approches statistiques ou probabilistes, d'optimisation ou d'aide à la décision multicritère, pour des objectifs variés, comme par exemple : i) évaluation du cycle de vie des systèmes agro-alimentaires et optimisation des procédés, ii) réduction des pertes alimentaires et valorisation des déchets agroalimentaires, iii) fabrication de bioproducts et de composites biosourcés avec des fonctionnalités ciblées, iv) évaluation et amélioration de la qualité nutritionnelle et sanitaire des aliments en relation avec la perception et les préférences des consommateurs. De nouveaux développements sont en cours pour intégrer les bioprocédés et pour faire des liens avec d'autres ressources pour intégrer davantage de données.

Un outil numérique d'aide à la recommandation multi-critères basé sur les savoirs et savoir-faire de la filière fromagère



En savoir plus

Buche P. *et al.*

Integrating collective know-how for multicriteria decision support in agrifood chains-application to cheesemaking.

Frontiers in Artificial Intelligence . 2023

<https://doi.org/10.3389/frai.2023.1145007>

Valorisation

- L'outil logiciel Docamex est utilisé par l'ensemble des ENIL et 15 filières représentant 64% du tonnage annuel produit par l'ensemble des filières fromagères AOP/IGP.

Projet support:

- CASDAR DOCAMEX - AAP ITN3

Partenariat

- UMR I2M, Bordeaux

Contact

Patrice Buche

UMR IATE

patrice.buche@inrae.fr



Contexte

Les filières fromagères bénéficiant d'une indication géographique (AOP/IGP) fondent leur stratégie de différenciation du produit mis en marché sur la valorisation des ressources locales en lien avec leur terroir et sur l'expression des savoir-faire d'expérience tant au niveau de la production que de la transformation. Des évolutions internes aux appellations, en particulier en termes de renouvellement et de formation des opérateurs, fragilisent fortement la préservation et la transmission de ces savoir-faire. Le développement des méthodes numériques permettant l'exploitation de bases de connaissances ouvre de nouvelles perspectives de valorisation de l'expérience collective au sein d'une filière.

Résultats

Basée sur les retours d'expérience, une méthode originale de capitalisation des connaissances et d'aide à la recommandation d'actions technologiques a été développée. Une méthodologie complète ainsi qu'un outil logiciel associé ont été proposés : ils permettent (i) la collecte de connaissances formelles et informelles des opérateurs de ligne et des experts du procédé concerné, (ii) la validation collective de cette connaissance, et (iii) son encodage dans un langage de représentation de connaissances fondé

sur une ontologie générique permettant une aide à la recommandation semi-automatisée. Les recommandations sont basées sur la représentation des relations causales existant entre les défauts et/ou les qualités d'un produit et les actions technologiques en s'appuyant sur des mécanismes explicatifs. L'outil permet de déterminer, dans une approche multicritère, les recommandations d'actions technologiques les plus adaptées à une situation donnée. Il se base sur des indicateurs d'efficacité technologique produits à partir de retours d'expérience. L'outil renseigne aussi sur les impacts possibles d'une action technologique recommandée sur d'autres défauts et qualités et peut être également utilisé pour la formation. Grâce à une interface conviviale, cet outil a vocation à être utilisé au quotidien et permet de prendre en compte les retours d'expérience afin d'enrichir et de faire évoluer la base de connaissances.

Perspectives

À la demande des filières utilisatrices, la prochaine étape sera d'étendre l'approche à la production laitière. Par ailleurs, la généricité de l'ontologie utilisée pour structurer les connaissances permet de l'appliquer à n'importe quelle filière et à tous les procédés de transformation.



© M. Dufour
- Pétrissage
de la pâte et
aptitude à son
étirement.



Vers un outil d'aide à la décision pour la boulangerie industrielle



En savoir plus

Dufour M. *et al.*

Water mobility and microstructure of gluten network during dough mixing using TD NMR

Food Chemistry . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135329>

Partenariat

- Entreprise La Boulangère & Co

Projet support:

Convention Cifre ANRT n° 2020/0687

Contacts

Kamal Kansou, Luc Saulnier et Guy Della-Valle

UR BIA

kamal.kansou@inrae.fr

luc.saulnier@inrae.fr

guy.della-valle@inrae.fr



Contexte

La variabilité de la qualité des lots de blé a des impacts défavorables sur le processus de transformation de la farine en boulangerie, du stockage à la qualité des produits finis, en passant par le comportement de la pâte sur la ligne de production où les réglages des procédés doivent être constamment ajustés pour assurer un passage optimal de la pâte. Ces facteurs ont démontré la nécessité de mieux maîtriser la farine et son impact en production. Dans ce contexte, l'entreprise La Boulangère & Co (BCO) a décidé de collaborer avec BIA dans le cadre d'un projet intitulé "Vers un outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre de farine de blé en boulangerie industrielle" (OdAMFar) afin de mieux connaître les mécanismes régissant le comportement de la pâte de farine de blé sur la ligne de production et anticiper sa mise en œuvre.

Résultats

Les experts BCO ont validé notre hypothèse initiale en confirmant que l'hydratation de la pâte et son pétrissage sont les principaux facteurs influençant le comportement de la pâte. Le comportement des pâtes en fin de pétrissage dépend essentiellement de la structuration du réseau de gluten.

L'eau est distribuée dans la pâte entre les composants de la farine en quatre ou cinq populations définissant quatre états d'hydratation de la pâte associés

à un état spécifique de développement du réseau de gluten. À l'échelle microscopique, l'analyse quantitative des images, permet de suivre l'évolution de la structure du réseau de gluten en évaluant l'épaisseur des filaments protéiques, qui, en moyenne, varie entre 1,7 et 2,5 μm . En augmentant l'hydratation de la pâte, la morphologie du réseau devient plus grossière et présente des filaments de gluten plus épais et moins ramifiés.

À l'échelle macroscopique, le comportement rhéologique des pâtes est décrit par l'indice de consistance (k) qui diminue avec l'hydratation suivant une même loi exponentielle pour toutes les farines testées.

La mise en œuvre de la farine sur la ligne de production peut être anticipée via l'analyse de la courbe de puissance au pétrissage $P(t)$, qui varie avec l'hydratation de la farine, et peut être ajustée par une distribution gaussienne, ce qui permet de définir un intervalle d'hydratation optimal.

Perspectives

L'outil d'aide à la décision sera mis au point spécifiquement pour l'entreprise et les méthodes et modèles seront appliqués pour évaluer l'impact de la variabilité du blé dans le cadre du projet ANR-EvaGrain.



© AdobeStock

Vers un pilotage de la production des arômes du vin



En savoir plus

Godillot J. *et al.*

Analysis of volatile compounds production kinetics: A study of the impact of nitrogen addition and temperature during alcoholic fermentation.

Frontiers in Microbiology . 2023

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1124970>

Beaudeau F. *et al.*

Modelling the effects of assimilable nitrogen addition on fermentation in oenological conditions.

Bioprocess and Biosystems . 2023

<https://doi.org/10.1007/s00449-023-02861-w>

Partenariat

- UE Pech Rouge, INRAE, Gruissan
- UMR MISTEA, INRAE, Montpellier
- UMR TBI, INRAE, INSA, CNRS, Toulouse
- UMR SayFood, Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, Palaiseau

Projet support: projet ANR StarWine (2019-23).

Contacts

Jean-Roch Mouret et Vincent Farines

UMR SPO

jean-roch.mouret@inrae.fr

vincent.farines@inrae.fr



Contexte

Les consommateurs recherchent des vins de plus en plus fruités. Les arômes fermentaires et plus particulièrement les esters contribuent à cette saveur fruitée.

Le contrôle de la température de fermentation et la gestion des ajouts d'azote (initiaux ou en cours de fermentation) sont les paramètres clés dans la production de ces composés. Nous avons donc étudié les effets synergiques de ces trois facteurs sur les cinétiques de synthèse de ces molécules d'intérêt. Pour répondre à cette problématique, dans le cadre du projet ANR StarWine, une approche pluridisciplinaire innovante, combinant le suivi en ligne, les bioprocédés et la modélisation a été développée.

Résultats

Les données obtenues nous ont permis de déterminer avec précision l'impact des trois paramètres sur les cinétiques de synthèse des arômes et de mettre en évidence l'existence de fortes interactions entre ces différents facteurs.

Le poids relatif de chaque facteur varie en fonction des différentes familles d'arômes. Cette observation indique que les voies métaboliques impliquées dans la synthèse de chaque groupe de composés volatils sont régulées différemment. Ces résultats ont également permis de construire un modèle cinétique inédit prédisant les

cinétiques de production des arômes fermentaires au cours de la fermentation alcoolique œnologique.

Enfin, ce projet constitue une « preuve de concept » pour la gestion des arômes en fermentation. Il est en effet possible d'obtenir une cible aromatique pré-déterminée par une gestion optimale des principaux paramètres fermentaires.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent de larges perspectives en termes de contrôle de procédé. En effet, il apparaît possible d'adapter la gestion de la fermentation (apports de nutriments, contrôle de la température) pour obtenir des vins ayant des qualités organoleptiques définies à partir de moûts de raisin de qualités très différentes, dans le cadre d'une démarche d'ingénierie reverse.

D'un point de vue plus appliqué, certaines données pourront également être utilisées pour proposer aux vignerons et aux œnologues une approche raisonnée de la gestion de l'azote en fonction du profil de vin visé. Cela leur permettra de faire face aux fortes variations de la qualité de la matière première, en lien avec le changement climatique et/ou l'utilisation de nouvelles variétés de raisin (notamment les variétés résistantes aux maladies).



© AdobeStock

Modélisation multi-échelle pour des mélanges d'huiles optimisés



En savoir plus

Touffet M. *et al.*

A comprehensive two-scale model for predicting the oxidizability of fatty acid methyl ester mixtures

Food Research International . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113289>

Partenariat

- Global Core R&D, Cargill R&D Centre Europe, Belgium

Contact

Olivier Vitrac

UMR SayFood

olivier.vitrac@agroparistech.fr



Contexte

Les huiles végétales sont utilisées dans notre alimentation, mais aussi comme solvants et carburants. Les huiles riches en acides gras insaturés ont une valeur nutritionnelle et technologique plus importante. Ces derniers sont particulièrement sensibles à la thermo-oxydation et doivent être utilisés en mélange au risque de voir apparaître des composés toxiques ou des défauts de goût. La crise énergétique et les tensions géopolitiques exacerbent le besoin de diversification des sources d'huiles et de construction de règles de mélange. Leurs propriétés, telles que la viscosité, la valeur nutritionnelle et la sensibilité à l'oxydation, ne sont pas linéaires et varient significativement avec la température. Cette étude s'emploie à décrire les mécanismes réactionnels radicalaires de ces mélanges sur une gamme de températures de 80 à 200°C correspondant aux conditions de cuisson et de friture des aliments.

Résultats

Nous avons développé un modèle prédictif intégrant des descriptions multi-échelles. À l'échelle macroscopique, un modèle combinatoire prend en compte l'ensemble des réactions potentielles entre les différentes espèces radicalaires. Les mécanismes endothermiques (c.-à-d, activés par la chaleur) qui conduisent à la production de ces espèces sont relativement bien connus mais la recombinaison de ces espèces extrêmement instables l'est beaucoup moins. Un modèle

de collision à l'échelle moléculaire contrôlée par la diffusion en phase liquide a été utilisé pour décrire la réactivité des réactions les plus exothermiques qui propagent ou terminent le mécanisme radicalaire. La viscosité du mélange joue ici un rôle clé. La double paramétrisation macroscopique et moléculaire a permis de mettre en lumière les effets de co-oxydation entre espèces et de les corrélés à l'évolution des taux de composés polaires dans différentes conditions de friture. Sur un plan plus théorique, les échelles associées au libre parcours moyen de ces espèces radicalaires, même éphémères, ont été identifiées.

Perspectives

Les retombées de cette recherche sont plurielles, notamment pour la formulation de mélanges d'huiles aux propriétés contrôlées. La modélisation offre un outil puissant pour évaluer la substitution de certaines huiles en fonction de leur disponibilité sur les marchés internationaux. En outre, l'approche multi-échelle pourrait être étendue pour décrire l'ensemble des mécanismes oxydatifs, y compris la production de radicaux et la décomposition des hydroperoxydes. Pour des systèmes plus complexes tels que les triacylglycérols et les diacylglycérols, une troisième échelle sera requise pour incorporer la dépendance de la réactivité des fonctions chimiques à la mobilité locale du squelette auquel elles sont attachées.



© AdobeStock

Exploration des liens entre structures moléculaires et odeurs par des approches computationnelles



En savoir plus

Rugard M. *et al.*

Combining the Classification and Pharmacophore Approaches to Understand Homogeneous Olfactory Perceptions at Peripheral Level: Focus on Two Aroma Mixtures.

Molecules . 2023

<https://doi.org/10.3390/molecules28104028>

Partenariat

- Systems toxicology T3S team, Université Paris Cité- Inserm U1124

- Equipe Computational Modeling of Protein Ligand Interactions (CMPLI), Université de Paris - Inserm U1133

Projet support: Contrat ANR-18-CE21-0006 MULTIMIX

Contact

Anne Tromelin

UMR CSGA

anne.tromelin@inrae.fr



Contexte

Le lien entre la structure des odorants et leur qualité odorante a fait l'objet d'études depuis de nombreuses années, et la recherche de ces liens représente encore un défi. L'odeur d'une molécule a comme origine la liaison à un ou des récepteur(s) olfactif(s). Le processus de perception de l'odeur procède selon un codage combinatoire où une molécule peut activer plusieurs récepteurs et un même récepteur peut être activé par plusieurs molécules. Interpréter ce codage est particulièrement complexe dans le cas des mélanges odorants. La compréhension des liens entre la structure des odorants et leur qualité odorante apparaît essentielle pour comprendre comment procède ce codage au niveau périphérique du système olfactif et ainsi conduire à maîtriser la conception de nouveaux mélanges et accords odorants.

Résultats

Une réduction de dimension à partir d'un espace de 1024 variables décrivant la structure de chaque molécule a été suivie d'une classification qui a permis de répartir 5000 odorants en 13 clusters de quelques centaines de molécules chacun. À l'intérieur de ces clusters, les molécules partagent des caractéristiques structurales et odorantes communes. L'étude des co-occurrences entre notes odorantes dans les descriptions des odeurs montre une spécificité propre à chacun des clusters. Ce résultat est essentiel pour établir les liens structure-

odeur pour l'ensemble des molécules odorantes actuellement connues et décrites. En effet, les phénomènes qui ont lieu au niveau périphérique du système olfactif passent par l'interaction entre les odorants et les récepteurs olfactifs. Ces interactions ont des déterminants structuraux qui régissent la première étape de la formation du signal olfactif, un processus complexe qui va jusqu'à l'intégration au niveau cérébral. À ce titre, la connaissance des liens structure-odeur apparaît comme un élément crucial pour la compréhension de la formation de l'image sensorielle des objets odorants comme les aliments.

Perspectives

Les résultats de la classification peuvent être appliqués aux composants d'autres mélanges d'odorants pour identifier des caractéristiques structurales déterminantes pour leur activité. L'approche computationnelle est complémentaire d'études in vitro sur des récepteurs olfactifs exprimés en cellules hétérologues menées dans le cadre du projet ANR MULTIMIX, associées au développement d'un réseau destiné à identifier les cibles biologiques potentielles des molécules odorantes. La meilleure compréhension des liens structure-odeur qui en résultera permettra de mieux gérer la formulation des arômes utilisés dans les aliments et ainsi favoriser l'acceptabilité par le consommateur d'aliment plus sains et durables.



© AdobeStock

Un modèle de connaissances basé sur une approche de Génie Industriel pour aider à la conception de systèmes de réfrigération durables



En savoir plus

Salehy Y. *et al.*

Choosing an optimized refrigeration system based on sustainability and operational scenarios applied to four supermarket architectures in three European countries

Journal of Cleaner Production . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136307>

Partenariat

- LGI CentraleSupelec

Contacts

Yasmine Salehy, Anthony Delahaye et Hong-Minh Hoang

UR FRISE

yasmine.salehy@inrae.fr

anthony.delahaye@inrae.fr

hong-minh.hoang@inrae.fr



Contexte

La demande mondiale croissante de réfrigération exige la conception de systèmes plus durables. Cependant, l'adoption à grande échelle de technologies prometteuses environnementalement rencontre des obstacles. Un premier diagnostic auprès d'acteurs du domaine a mis en évidence qu'il manque, dans les études scientifiques, l'intégration de la complexité socio-technique du terrain.

Pour répondre à cet enjeu, nous proposons une approche générique originale capable de décrire les performances basées sur les piliers de la durabilité des systèmes de réfrigération dans un cas réel. Elle s'appuie sur l'approche classique du génie des procédés pour évaluer la performance, mais structurée dans un cadre issu du génie industriel (appelé modèle de connaissances). Effectivement, pour mieux comprendre le potentiel des technologies innovantes dans un contexte décisionnel réaliste, une analyse globale agrégeant les performances industrielles est essentielle pour fournir des données interprétables.

Résultats

Le modèle de connaissances est une formalisation des étapes de décision. Ce type d'approche et la performance sociale (maintenance qualitative, ergonomie et risques) sont évalués pour la première fois en utilisant des connaissances en génie industriel.

Pour proposer un cadre d'étude réaliste, quatre architectures de systèmes

de supermarché sont modélisées et simulées à l'aide de données de terrain dans différentes conditions climatiques (France, Suède, Espagne).

Les résultats globaux de ces scénarios opérationnels montrent que le mix électrique est le paramètre le plus influant sur le coût et l'impact environnemental. De plus, l'architecture au CO₂ montre des performances intéressantes pour toutes localisations, et ce malgré des régimes dégradés lors des pics de chaleur. Cette nouvelle approche met en avant que, malgré une meilleure efficacité énergétique, le coût de la maintenance peut être un facteur limitant pour son installation. Ayant testé plusieurs scénarios, nous montrons par exemple que les panneaux photovoltaïques permettent d'améliorer les performances économique et environnementale mais impactent fortement la maintenance. Enfin, nous cherchons à comprendre comment une aide financière permettrait aux installations plus durables d'être compétitives.

Perspectives

Il serait intéressant de tester cette méthodologie avec des technologies à basse maturité et de l'implémenter dans une plateforme d'exploration d'espace de conception, c'est-à-dire une plateforme d'aide à la décision dans la phase initiale de conception. Nous pourrions nous concentrer sur une phase spécifique du cycle de vie des systèmes de réfrigération, comme la fin de vie, ou sur une technologie particulière développée au sein de l'UR FRISE.

Modélisation du potentiel de garde des vins rouges



En savoir plus

Garcia L. *et al.*

Impact of phenolic composition and antioxidant parameters on the ageing potential of Syrah red wines measured by accelerated ageing tests.

Food Chemistry . 2023

<https://10.1016/j.foodchem.2023.136613>

Contact

Cédric Saucier

UMR SPO

cedric.saucier@umontpellier.fr



Contexte

L'élevage est une étape importante dans l'évolution du vin rouge et impacte ses caractéristiques chimiques et sensorielles. La cinétique de cette évolution influence le potentiel de vieillissement du vin. Généralement, les vins rouges de grande qualité nécessitent une longue période de vieillissement en bouteille avant d'être consommés. Le potentiel de vieillissement est un paramètre important pour la qualité du vin et est lié à la capacité d'un vin à subir une oxydation au fil du temps.

Les composés phénoliques qui sont l'un des principaux substrats de l'oxydation peuvent alors potentiellement moduler le potentiel de vieillissement.

Résultats

Trois tests de vieillissement accéléré (Accelerate Ageing Test ou AAT) différents ont été réalisés sur ces vins : un test thermique à 60° C, un test enzymatique utilisant la laccase et un test chimique utilisant le peroxyde d'hydrogène.

Il n'a pas été trouvé de corrélation entre les trois tests ce qui montre que ceux-ci impliquent des mécanismes et des cibles différents. Les résultats ont montré des corrélations élevées entre la

composition phénolique et les propriétés antioxydantes des échantillons. Des régressions des moindres carrés partiels (PLS) ont été utilisées afin d'établir des modèles capables de prédire les résultats des tests AAT en fonction de leurs différentes compositions initiales et propriétés antioxydantes. Les modèles de régression PLS présentaient globalement une très bonne précision et impliquaient différentes variables explicatives pour chaque test. Les modèles prenant en compte l'ensemble des paramètres mesurés et la composition phénolique ont montré les meilleures capacités prédictives avec des coefficients de corrélation (R^2) > 0,89.

Perspectives

Les modélisations et tests de vieillissements accélérés mis au point vont permettre à l'avenir de pouvoir segmenter les qualités de vins dès la production initiale pour l'industrie viticole. Ils pourraient également permettre de tester des vins expérimentaux de nouveaux cépages pour s'adapter au réchauffement climatique ou à l'évolution du goût des consommateurs.



©Florence Meunier - Culture d'hybrides de maïs dans 3 conditions hydriques contrôlées par l'UE Diascope dans le cadre du projet Mamma Mia

Du champ à l'analyse de données : un pipeline haut débit pour quantifier la lignification tissulaire



En savoir plus

Lopez-Marnet P.-L. *et al.*

A robust and efficient automatic method to segment maize FASGA stained stem cross section images to accurately quantify histological profile

Plant Methods . 2022

<https://doi.org/10.1186/s13007-022-00957-0>

Partenariat

Projets supports :

- DECLIC (Promaïs)
- MAMMA MiA (Plant2Pro)
- Ibhérique (INRAE BAP)

Contacts

Valérie Méchin, Oscar Main et Matthieu Raymond

UMR IJPB

valerie.mechin@inrae.fr

oscar.main.1@inrae.fr

matthieu.reymond@inrae.fr



Contexte

La répartition des tissus lignifiés au sein des tiges varie beaucoup en fonction du génotype considéré, de la condition hydrique de culture, du stade de développement, etc. La répartition tissulaire de la lignification peut se présenter comme l'une des cibles en sélection qui permettent d'améliorer la digestibilité du maïs fourrage et le maintien du rendement en conditions de déficit hydrique. Cette répartition est ainsi un caractère intéressant dans le cadre des recherches menées autour du changement climatique. Pour étudier de nombreux lignées/hybrides et de nombreuses conditions environnementales, des méthodes fiables et haut débit doivent être développées.

Résultats

Dans le cadre du projet DECLIC (Promaïs), nous avons développé un plugin sous Image J pour quantifier automatiquement les images de coupes colorées au fasga (tissus lignifiés en rouge et tissus peu lignifiés en bleu) en 44 tissus. Nous avons ainsi montré sur 160 hybrides que plus la coloration bleue dans la moelle était importante, plus les plantes étaient digestibles.

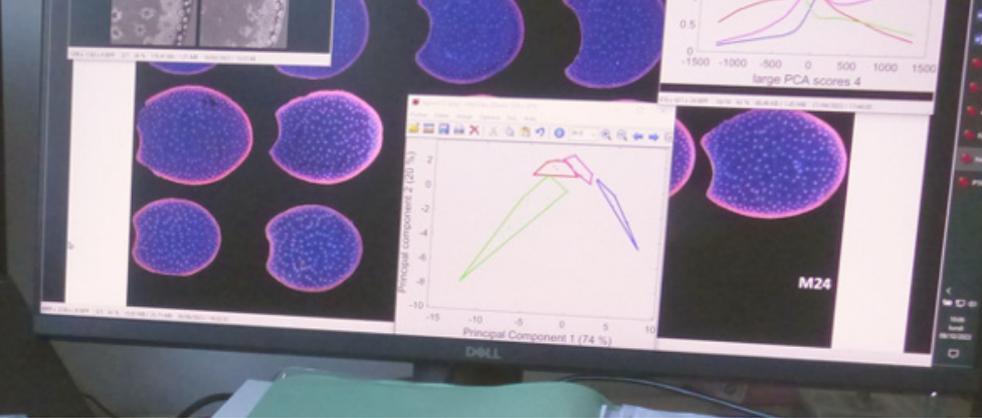
Dans le cadre des projets MAMMA MiA (Plant2Pro) et Ibhérique (INRAE BAP), sur un nombre plus restreint d'hybrides et de lignées, nous étudions l'impact

de l'environnement sur la digestibilité, le maintien du rendement et les cibles permettant leur amélioration. Là encore, la faible lignification de la moelle joue un rôle clé.

Enfin, pour aller plus loin en sélection, nous recherchons les bases génétiques permettant d'expliquer la répartition de la lignification au sein des tiges. Dans le projet DECLIC nous avons montré, au sein d'une population de lignées recombinantes, que 3 loci pilotent la coloration bleue de la moelle.

Perspectives

Nos projets convergent tous vers l'importance de la répartition de la lignification pour améliorer la digestibilité et montrent le fort impact environnemental sur ces caractères. Ces cibles nous semblent importantes en sélection et nous pensons qu'une image colorée au fasga d'une coupe de tige de maïs peut représenter une carte d'identité rapide d'un génotype.



Macrovision, histologie quantitative et statistique



En savoir plus

Devaux M.-F. *et al.*

Maize Internode Autofluorescence at the Macroscopic Scale: Image Representation and Principal Component Analysis of a Series of Large Multispectral Images.

Biomolecules . 2023

<https://doi.org/10.3390/biom13071104>

Partenariat

- UMR IATE, INRAE, Univ. Montpellier, Institut Agro, Montpellier
- Société Limagrain Europe

Contacts

Marie-Françoise Devaux et Fabienne Guillon

UR BIA

marie-francoise.devaux@inrae.fr

fabienne.guillon@inrae.fr



Contexte

L'histologie quantitative a pour but d'extraire des descripteurs de l'hétérogénéité spatiale - morphologique et chimique - des tissus afin d'étudier leur rôle dans la qualité d'usage. Les microscopes ou macroscopes actuels permettent d'acquérir des images multispectrales en autofluorescence avec une résolution spatiale de l'ordre de 2 μm et un champ de vision de 1 à 2 cm^2 . Dans le cas des grains, des graines ou des tiges de graminées, des sections entières d'organes peuvent être observées et des composés majeurs comme la lignine ou la chlorophylle sont naturellement autofluorescents. Des collections de grandes images multispectrales sont acquises facilement. Toutefois, l'exploration sans a priori des données reste une étape critique.

Résultats

Nous proposons une méthodologie d'analyse adaptée au volume de données et dont le résultat est une comparaison statistique des images permettant la prise en compte de la variabilité biologique. L'exploration des données est réalisée par des représentations d'images à différentes échelles et par l'adaptation de l'Analyse en Composantes Principales à des séries de grandes images. Des histogrammes de valeurs des composantes principales ont été construits et utilisés comme descripteurs quantitatifs pour comparer différents échantillons.

Cette approche a été validée pour 40 grandes images multispectrales de sections entières de tiges de maïs, acquises en autofluorescence pour comparer la distribution des composés phénoliques de quatre lignées de maïs fourrage. La série d'images comprenait plus d'un milliard de pixels pour lesquels 11 valeurs d'autofluorescence ont été mesurées.

L'analyse de la série d'images a montré des variations de l'autofluorescence en fonction des tissus et des lignées. Les faisceaux vasculaires de l'écorce sont caractérisés par une fluorescence spécifique de la lignine après excitation visible, tandis que des variations au sein du parenchyme ont été mises en évidence grâce à la fluorescence UV. L'analyse des histogrammes de pixels pour les quatre composantes démontre que ces propriétés de fluorescence dépendaient de la lignée de maïs.

Perspectives

L'analyse de séries de grandes images multispectrales est prometteuse pour la comparaison objective d'échantillons basée sur l'hétérogénéité spatiale de la composition des tissus entre et au sein de sections d'organes. La méthode est facile à mettre en œuvre et convient à toutes les techniques d'imagerie multi ou hyperspectrale. Les histogrammes des composantes sont des outils prometteurs pour la comparaison globale des images et une analyse statistique des échantillons intégrant une variabilité biologique.



©AdobeStock

Des données et modèles du pré-traitement du bois



En savoir plus

Pasquier J. *et al.*

Construction and exploration of a dilute acid pretreatment dataset on poplar wood to propose trade-offs of chemicals evolution

Bioresource Technology Reports . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101636>

Partenariat

- Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec au Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB).

Contact

Gabriel Paës

UMR FARE

gabriel.paes@inrae.fr



Contexte

Dans le cadre de la transition énergétique pour une société durable, il est nécessaire de produire de l'énergie à partir de sources renouvelables. La biomasse végétale, provenant de l'agriculture, de la sylviculture ou encore des déchets végétaux ménagers, représente l'une de ces sources à fort potentiel au travers de ses trois constituants principaux : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. La principale difficulté dans son utilisation réside dans la récalcitrance naturelle de la biomasse, majoritairement due à sa structure 3D complexe qui limite physiquement et chimiquement l'action des enzymes de dégradation. Le prétraitement de la biomasse est donc nécessaire pour améliorer l'accessibilité enzymatique. Parmi les prétraitements existants, celui à l'acide dilué est déjà utilisé en industrie de par son efficacité, mais il doit cependant encore être optimisé pour comprendre son impact sur la production de molécules non désirées.

Résultats

Ce travail fournit l'un des ensembles de données les plus complets à ce jour sur l'évolution chimique des polysaccharides du bois de peuplier et de leurs produits de dégradation au cours du prétraitement à l'acide dilué. Sur la base de la littérature, un ensemble sans précédent de 38

conditions a été généré en utilisant une approche de plan d'expériences dans les plages de paramètres suivantes : 2-60 min, 120-190 °C, 0-4 % H₂SO₄. Les résidus de bois solides et le liquide de prétraitement, récupérés séparément, ont été analysés pour 12 composés : sucres, inhibiteurs et lignine. Pour chacun des composés analysés, un modèle mathématique a été créé pour suivre l'évolution chimique de chacune des espèces chimiques. Leurs superpositions à l'aide de fonctions de désirabilité a mené à l'obtention de scénarios de production permettant de prédire l'évolution simultanée de l'ensemble des composés en fonction des conditions choisies.

Perspectives

Les données et modèles étant entièrement accessibles, ils serviront à prédire des scénarios sur l'évolution chimique de la biomasse en fonction des conditions de prétraitements pour des objectifs de production variés. Par exemple, les modèles montrent qu'il est impossible de séparer complètement et de maintenir l'intégrité des fractions cellulosiques et hémicellulosiques simultanément sans produire d'inhibiteurs, même si des compromis sont possibles.



Modéliser le consommateur en fouillant le web



En savoir plus

Aline S. *et al.*

Infant food users' perceptions of safety: A web-based analysis approach.

Frontiers in Artificial Intelligence . 2023

<https://doi.org/10.3389/frai.2023.1080950>

Partenariat

- Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Projets supports:

- Institut Carnot Cognition

- Projet incitatif TRANSFORM « DÉLICE »

Contact

Rallou Thomopoulos

UMR IATE

rallou.thomopoulos@inrae.fr



Contexte

La prise en compte des points de vue et des attentes de la société civile est devenue un élément incontournable de l'évaluation des possibilités apportées par la science, notamment en termes d'acceptabilité des consommateurs et des citoyens. Ceux-ci sont désormais partie prenante dans la fixation des priorités de nos choix de société. Toutefois les consommateurs sont nombreux, hétérogènes, à la fois indépendants les uns des autres et en interaction. Leurs points de vue combinent des préoccupations variées (santé, plaisir, prix, environnement, etc.), peuvent être influencés par différentes sources médias, réseaux sociaux, etc. et évoluent dans le temps. Toutes ces raisons rendent très complexes l'étude des consommateurs et l'appréhension de leurs points de vue. Classiquement, ils sont étudiés dans les sciences de l'aliment via l'analyse sensorielle et dans les sciences sociales via des questionnaires ou des entretiens. Le web offre un accès différent, méritant d'être analysé, à l'expression spontanée des points de vue des consommateurs et des citoyens.

Résultats

Après avoir classé les messages selon le produit alimentaire et le risque sanitaire discutés, plusieurs métriques issues du domaine de l'analyse de sentiment en traitement de la langue naturelle ont été mesurées. Il ressort de ce travail que la fouille de grands volumes d'informations disponibles sur le web sous la forme de déclarations

« libres » (forums, blogs...) permet d'atteindre l'expression spontanée des points de vue de panels de consommateurs. L'utilisation de méthodes automatiques ou semi-automatiques apporte une plus-value pour l'analyse de ces déclarations.

1. Constat global : Nous avons observé que la majeure partie des discussions sur les risques concerne les laits infantiles.
2. Perception des risques commune à tous les aliments infantiles : La catégorie « conservateurs, édulcorants et additifs » est très présente pour tous les produits.
3. Perception des risques spécifiques à certains aliments : Le bisphénol A est très présent dans les discussions sur les laits infantiles mais pas sur les autres produits. La catégorie « pesticides » est prédominante pour les céréales infantiles.
4. Expression d'incertitude : Les messages concernant les catégories « pesticides », « parasites » et les produits infantiles à base de fruits expriment un faible degré de certitude de la part des consommateurs.

Perspectives

Une perspective méthodologique envisagée consistera à identifier et traiter les éventuels biais pouvant entacher les résultats obtenus.

Une perspective applicative sera d'étendre l'approche à d'autres pays, communautés, voire cas applicatifs, et d'analyser l'homogénéité des résultats obtenus.

Partie 2

Assurer la qualité des aliments
**et leur appréciation par le
consommateur,**
de la production à la digestion



© AdobeStock

La transition vers des systèmes alimentaires durables conduit à la production de nouveaux aliments, notamment via l'introduction d'espèces végétales. Il convient désormais de construire les qualités nutritionnelles et sensorielles de ces nouveaux aliments et de s'assurer qu'ils sont adaptés aux besoins des individus et des populations.



©AdobeStock

Mesure de l'acceptabilité d'une innovation de rupture fromagère par le consommateur



En savoir plus

Martin C. *et al.*

Acceptability of a sustainable technological innovation applied to traditional soft cheese : information concerning the benefits for health and the environment can compensate for a lower hedonic appreciation

Food Quality and Preference . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104753>

Partenariat

- UMR 1324 CSGA, INRAE, Institut Agro, Université de Bourgogne-Franche Comté, Dijon

- Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, Paris-Saclay Applied Economics, Palaiseau



Contacts

Marielle Harel-Oger, Gilles Garric et Christophe Martin

UMR STLO

marielle.harel-oger@inrae.fr

gilles.garric@inrae.fr

christophe.martin@inrae.fr



Contexte

La place de choix détenue par les produits laitiers dans les pays développés (350 kg d'équivalent lait consommé par an et par habitant en France en 2021) suscite néanmoins de forts questionnements liés aux aspects nutritionnels et environnementaux de ces produits de la part des consommateurs.

L'innovation alimentaire doit répondre aux enjeux de santé publique et de transition des systèmes alimentaires ainsi que des contraintes techniques, économiques et organisationnelles des filières, tout en tenant compte des attentes et des préférences des consommateurs.

Nous avons testé concrètement cette problématique de l'acceptabilité de l'innovation par le consommateur en nous appuyant sur une nouvelle technologie fromagère mise au point et brevetée par INRAE (From'Innov).

Résultats

La méthode utilisée pour répondre à ces interrogations est celle du consentement à payer (CAP) du consommateur couplé à un test hédonique. Le principe consiste à réaliser auprès de 142 consommateurs un premier test hédonique à l'aveugle de trois camemberts : un du commerce avec des arômes doux et deux issus de la technologie innovante dont l'un avec des notes aromatiques fortes et l'autre, douces. Les consommateurs attribuent une note sur dix à chacun des produits corrélée à un consentement à payer. Puis, des informations

concernant la nature des procédés utilisés pour fabriquer les produits, les avantages nutritionnels (- 20 % de sel et -10 % de gras) et les avantages environnementaux (-25 % d'eau et d'énergie) du procédé ont été révélées progressivement. Il est à noter que les informations « avantages » sont inversées à chaque nouvelle session afin de ne pas biaiser les résultats par l'ordre de la révélation.

Les résultats montrent une diminution significative du CAP lorsque les consommateurs sont informés du procédé de rupture mais les arguments santé puis sobriété (ou inversement) remontent de manière significative le CAP. En condition d'information complète, les CAP des 3 produits ne diffèrent pas significativement. Ces résultats montrent que les consommateurs sont sensibles aux arguments nutritionnels et environnementaux des fromages obtenus grâce à cette nouvelle technologie.

Perspectives

Nous souhaitons poursuivre nos investigations en interrogeant les potentiels acteurs pouvant adopter ce procédé : petites, moyennes et grandes structures (coopératives ou privées), quels produits : existants ou à créer ? À quel prix et selon quelle rentabilité ? Ainsi, l'ensemble des travaux nous permettra d'avoir une méthodologie originale et globale puisque tous les acteurs de la filière auront été questionnés depuis les producteurs/transformateurs jusqu'aux consommateurs.



© Valentin Drigon - Exemples de produits fictifs présentés aux participant-te-s



Attitudes et attentes vis-à-vis d'un nouveau type d'aliment à base de lait et de végétal



En savoir plus

Drigon V. *et al.*

Attitudes and beliefs of French consumers towards innovative food products that mix dairy and plant-based components

International Journal of Gastronomy and Food Science . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100725>

Partenariat

Projet support:

IMAGINABLE- Metaprogramme SYALSA

Contacts

Gaëlle Arvisenet, Valérie Gagnaire et Fanny Guyomarc'h

UMR CSGA et UMR STLO

gaelle.arvisenet@agrosupdijon.fr

valerie.gagnaire@inrae.fr

fanny.guyomarc-h@inrae.fr



Contexte

La consommation de protéines animales par les populations des pays développés, toujours croissante à l'échelle globale de la planète, exerce aujourd'hui une trop forte pression sur les ressources et accentue la prévalence des maladies métaboliques chroniques telles que les inflammations intestinales ou le cancer. L'enjeu de la substitution des protéines animales par des protéines végétales dans les régimes des pays développés est de réussir la transition vers une alimentation plus saine et plus durable. Pour de nombreux consommateurs, cette transition ne sera acceptable qu'à la condition de disposer d'un choix de produits alimentaires sensoriellement plaisants, pratiques et accessibles économiquement. Une voie possible passe par la proposition de produits mixtes innovants, alliant protéines de lait ou d'œuf et protéines végétales à destination des consommateurs peu attirés par les produits végans ou qui les rejettent.

Résultats

Nous avons présenté à des volontaires des images de produits fictifs à base de lait et d'un ingrédient végétal. Au cours d'entretiens dirigés, nous avons identifié les verbatims associés à ces produits, que nous avons ensuite utilisés dans un questionnaire en ligne. Selon les motivations qui les animent,

les consommateurs présentent des attitudes différentes vis-à-vis des produits mixtes. Les personnes motivées par le plaisir gustatif, et celles déjà engagées dans une transition vers des régimes végétalisés, sont les moins réceptives à l'idée d'adopter des produits mixtes. Le profil le plus réceptif est celui de personnes ayant des motivations multiples ; de santé, d'environnement et d'éthique notamment, et qui sont encore faiblement engagées dans une transition alimentaire. L'attitude de ce groupe est interprétée comme un intérêt pour des produits permettant d'amorcer une transition vers une alimentation plus végétale sans compromettre leurs autres attentes. Les produits mixtes faisant référence à l'univers laitier (boissons, yaourts...) sont mieux acceptés que les produits mixtes imitant le tofu.

Perspectives

Ce travail prospectif nous a permis d'engager une action financée par le métaprogramme SYALSA. L'objectif du projet IMAGINABLE est ainsi d'évaluer les effets des informations de composition et de fabrication, des informations nutritionnelles et des informations environnementales sur les motivations hédoniques et le consentement à payer des consommateurs à choisir un nouveau type de produits à base de lait et d'une source végétale.



© AdobeStock

Lait humain vs. préparations pour nourrissons : biodisponibilité des acides aminés



En savoir plus

Charton E. *et al.*

Ileal Digestibility of Nitrogen and Amino Acids in Human Milk and an Infant Formula as Determined in Neonatal Minipiglets

The Journal of Nutrition . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.tjn.2023.02.025>

Partenariat

- Institut NUMECAN (INRAE AlimH), Rennes
- CHU Rennes
- RIDDET Institute (Nouvelle Zélande)

Contacts

Amélie Deglaire, Isabelle Luron et Didier Dupont

UMR STLO

amelie.deglaire@institut-agro.fr

isabelle.luron@inrae.fr

didier.dupont@inrae.fr

Contexte

Malgré les recommandations d'allaitement jusqu'à 6 mois de vie, une majorité de nourrissons reçoivent des préparations pour nourrissons (PPNs) fabriquées à base de lait bovin. Des différences subsistent entre lait humain et PPNs avec, notamment, un profil protéique et un aminogramme différents ainsi que des structures protéiques différentes. Les besoins du nourrisson en acides aminés sont établis à partir de la composition en acides aminés du lait humain. Cependant, ce dernier contient des protéines bioactives résistantes à la digestion et donc avec des acides aminés potentiellement moins biodisponibles. Ainsi, il est important de mesurer la biodisponibilité de ces acides aminés pour estimer plus finement les besoins du nourrisson, et pour évaluer la qualité nutritionnelle des protéines des PPNs. L'objectif de ce projet est: (1) de quantifier précisément les besoins du nourrisson via l'analyse de la teneur et de la biodisponibilité des acides aminés et de l'azote du lait humain et (2) comparer ces données à celles d'une PPN.

Résultats

La digestibilité iléale vraie, estimatrice de la biodisponibilité des acides aminés du lait humain et de la PPN mesurée chez le mini-porcelet, est très bonne et similaire voire plus élevée pour certains acides aminés de la PPN,

en partie due à la moindre résistance à l'hydrolyse des protéines dénaturées de la PPN. La digestibilité de la lysine est réduite dans la PPN, en lien avec les traitements thermiques appliqués à la PPN. La digestibilité iléale vraie de l'azote total est plus faible pour le lait humain que pour la PPN, de par la forte teneur en azote non protéique dans le lait humain (urée, N-acétyl-glucosamine, ...), non digestible et non absorbable dans l'intestin grêle. Globalement, la PPN couvre les besoins du nourrisson en acides aminés, mais pour cela elle doit contenir 1,2 fois plus de protéines que le lait humain, tel qu'indiqué par le DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score).

Perspectives

La qualité des protéines entre lait humain et PPNs diffère par leur profil protéique du fait de la dénaturation importante des protéines dans la PPN. Il faut s'interroger quant à la qualité de la fraction azotée, protéique et non-protéique, des PPNs et l'impact du procédé sur la qualité de cette fraction. La fraction non-protéique des PPNs, serait à mieux prendre en compte pour la formulation des PPNs, de par son importance pour le microbiote. Enfin, ces données mettent en évidence la nécessité de réviser les besoins du nourrisson, proposé par la FAO en 2007.





Simuler in vitro la digestion du senior, un nouvel outil d'aide à la conception de produits adaptés



En savoir plus

Ménard O. *et al.*

Static in vitro digestion model adapted to the general older adult population: an INFOGEST international consensus

Food and Function . 2023

<https://doi.org/10.1039/d3fo00535f>

Partenariat

- UMR 1324 CSGA, INRAE, Institut Agro, Université de Bourgogne-Franche Comté, Dijon

- UR QuaPA, INRAE, Saint-Genès-Champanelle



Projet support: Projet EAT4AGE financé par les agences nationales de 7 pays, sous la houlette de l'initiative européenne de programmation conjointe « A Healthy Diet for a Healthy Life » (JPI-HDHL).

Contacts

Didier Dupont et Martine Morzel

UMR STLO

didier.dupont@inrae.fr

martine.morzel@inrae.fr



Contexte

La population croissante en Europe et dans le monde des plus de 65 ans présente un risque accru de malnutrition. Étant donné ses graves conséquences sur la santé et la qualité de vie des personnes âgées, prévenir la malnutrition est un enjeu majeur de santé publique. Cela peut passer par la mise à disposition de produits adaptés, notamment enrichis en protéines. Toutefois, les spécificités physiologiques de cette population en termes de digestion doivent être prises en compte afin de vérifier si les produits proposés ont effectivement un intérêt nutritionnel. Un modèle in vitro considérant ces spécificités est donc nécessaire, mais il n'existait pas de modèle harmonisé et reconnu largement, à l'image des protocoles établis par le consortium INFOGEST pour le nourrisson ou l'adulte de moins de 65 ans.

Résultats

Dans le cadre du projet européen EAT4AGE, une recherche bibliographique exhaustive a permis d'identifier les adaptations permettant de se rapprocher au mieux des conditions digestives de la personne de plus de 65 ans sans pathologie digestive. La synthèse des résultats a ensuite été discutée en comité élargi, en incluant des membres du réseau INFOGEST ayant déjà engagé cette réflexion sur des modèles adaptés.

Au final, un modèle de digestion statique résultant d'un consensus international a été publié par un groupe de chercheurs de onze instituts situés dans neuf pays. Le modèle traduit notamment un ralentissement de la vidange gastrique, un environnement moins acide dans l'estomac et l'activité réduite de certaines d'enzymes digestives. Des améliorations pour simuler la phase orale sont également suggérées.

Ce nouveau modèle de digestion in vitro a été utilisé sur des produits laitiers riches en protéines, et les résultats ont été comparés à ceux obtenus en utilisant le modèle INFOGEST standard pour l'adulte plus jeune. Si en fin de phase intestinale, les deux modèles donnent des résultats semblables en termes de protéolyse, la protéolyse en phase gastrique est ralentie pour le modèle senior. Ceci souligne une vitesse de digestion différente entre les deux cibles physiologiques.

Perspectives

Après ces premiers résultats, nous travaillons actuellement sur la digestion des lipides dans des matrices du type fromage tartinable. Plus globalement, ce modèle a vocation à devenir une référence mondiale, facilitant ainsi la comparaison d'études effectuées dans différents laboratoires.

Caractérisation par IRM de la digestion in vitro d'un simili repas



En savoir plus

Musse M. *et al.*

Quantitative Magnetic Resonance Imaging of in vitro gastrointestinal digestion of a bread and cheese meal

Food Research International . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112821>

Partenariat

Projet support:

ANS DIGIRM (département TRANSFORM)

Contacts

Maja Musse, Steven Le Feunteun et Thiphaine Lucas

UR OPAALE et UMR STLO

maja.musse@inrae.fr

steven.le-feunteun@inrae.fr

thiphaine.lucas@inrae.fr



Contexte

La digestion gastro-intestinale est un processus dynamique complexe au cours duquel les aliments sont décomposés en nutriments absorbables. Le suivi de cette déstructuration est essentiel pour comprendre les mécanismes régulant la digestion, et plus particulièrement l'impact de la structure des aliments sur l'absorption des nutriments. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une approche unique dans sa capacité d'accéder, de manière non destructive et résolue dans l'espace, à des informations sur les changements structuraux des aliments à différentes échelles, de la molécule à la particule de plusieurs millimètres, et aussi sur les transferts de matière entre phases solide (aliment) et liquide (fluide digestif). Ces potentialités ne sont cependant que très peu exploitées, notamment pour l'étude de la digestion de repas composés d'aliments complexes.

Résultats

Le simili repas composé de morceaux de pain avec croûte épaisse et d'emmental et d'eau a permis d'étudier les hydrolyses gastriques des trois principaux macronutriments, à savoir les protéines, les lipides et l'amidon. Une grande variété de phénomènes se produisant au cours de la digestion de ces particules alimentaires et de taille réaliste a pu être caractérisée. Ainsi, la cinétique d'imbibation par le liquide digestif des morceaux de pain

et la libération du gaz piégé dans la mie ont pu être suivis. Les morceaux de croûte ont été les plus lents à s'imbiber, à se déstructurer et à libérer leur gaz. D'autres phénomènes, tels que l'érosion enzymatique des plus grosses particules de fromage et le crémage progressif des lipides associés ont également été démontrés. La digestion de particules d'aliments et celle des lipides est difficile à étudier via des prélèvements à cause des phénomènes de séparation de phase. Les résultats montrent donc le fort potentiel de l'IRM pour l'exploration in vitro de la digestion des repas réalistes.

Perspectives

La démarche mise en place ouvre de nombreuses potentialités d'études in vitro des mécanismes de digestion de différentes catégories d'aliments et sous conditions variables. Elle permettra, en particulier, d'investiguer des phénomènes difficiles à caractériser via l'analyse de prélèvements, tels que l'établissement de gradients de concentration (dont possiblement du pH) et de déstructuration au sein de particules d'aliments millimétriques. Un objectif supplémentaire est d'apporter des preuves de concept au cours d'expériences in vitro et d'identifier les compromis à réaliser en vue de leur transposition à des études in vivo.

© Jordane Ossemond et Jun Wang- Encapsulation de l'huile de DHA avec des protéines de lait : impact in vivo sur les dérivés métaboliques ?

L'encapsulation du DHA modifie en profondeur son métabolisme et son impact physiologique



En savoir plus

Wang J. *et al.*

Effect of docosahexaenoic acid encapsulation with whey proteins on rat growth and tissue endocannabinoid profile

Nutrients . 2023

<https://doi.org/10.3390/nu15214622>

Partenariat

- Plateforme Lipides INRAE UMR STLO, Rennes

- ARCHE Biosit Rennes

Contacts

Frédérique Pédrone et Didier Dupont

UMR STLO

frederique.pedrono@institut-agro.fr

didier.dupont@inrae.fr



Contexte

Améliorer la qualité des aliments est un enjeu nutritionnel majeur pour garantir la fonctionnalité des nutriments. Le DHA étudié est un acide gras omega 3 indispensable dont l'apport alimentaire est insuffisant pour compenser la faible production par le corps humain. Fortifier les aliments en DHA est ainsi devenu une stratégie de choix pour augmenter les apports nutritionnels de la population.

L'huile de DHA a été encapsulée avec des protéines de lactosérum, vectorisée dans une matrice alimentaire de type omelette, puis proposée à des animaux modèles. L'objectif de l'encapsulation est d'augmenter l'enrichissement en DHA du cerveau et du cœur pour favoriser son métabolisme et ainsi améliorer son impact santé. Cette hypothèse repose sur la dynamique de digestion de l'huile de DHA modifiée par son encapsulation. En effet, l'huile de DHA encapsulée présente une répartition en gouttelettes lipidiques plus petites que celles de l'huile de DHA non encapsulée, ce qui favorise l'accessibilité aux enzymes de digestion et améliore l'efficacité lipolytique. Le DHA est ainsi libéré en plus grande quantité dans le tractus gastro-intestinal, ce qui modifierait à la fois la régulation de la prise alimentaire et son métabolisme subséquent. Ainsi dans ce projet, la digestion spécifique de l'huile de DHA a été favorisée en l'isolant de celle des aliments de croissance par un jeûne partiel mis en place avant l'administration de l'omelette.

Résultats

Quatre résultats ressortent de ce travail. Premièrement, l'encapsulation du DHA a considérablement modifié le métabolisme des acides gras en leurs dérivés oxylipines et endocannabinoïdes. Ainsi un profil stable en acides gras peut cacher des profils très contrastés en dérivés métaboliques. Deuxièmement, c'est à notre connaissance la première fois que de tels médiateurs lipidiques sont quantifiés dans les aliments. Troisièmement, le design expérimental particulier conduit à des teneurs en DHA dans le cerveau remarquables jamais observées dans une étude interventionnelle (24 % des acides gras totaux). Enfin, l'encapsulation du DHA a favorisé la croissance des animaux en augmentant la prise alimentaire des croquettes. Cet effet serait synergique au jeûne partiel mis en place avant la consommation de l'omelette.

Perspectives

Supplémenter les formules infantiles avec une huile de DHA encapsulée dans des protéines de lait peut devenir une approche pertinente à explorer pour favoriser la croissance du nourrisson. Par ailleurs, l'association du jeûne partiel avec la digestion d'aliments restructurés reste un point clé à explorer pour comprendre les modes d'administration des nutriments les plus efficaces en termes de bénéfice santé.



© AdobeStock

Une composition en polyphénols et en produits d'oxydation très contrastée dans les jus de pomme



En savoir plus

Castillo-Fraire C.M. *et al.*

Detailed LC-UV-MS quantification of native and oxidized phenolic compounds in experimental and commercial apple juices revealed highly contrasting compositions

Journal of Food Composition and Analysis . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105450>

Partenariat

- Institut Français des Productions Cidricoles (IFPC) dans le cadre de l'UMT ACTIA Nova2cidre

Contact

Sylvain Guyot

UR BIA

sylvain.guyot@inrae.fr



Contexte

Dans le monde, les jus de pomme sont largement produits à partir de pommes de table généralement pauvres en polyphénols car ces fruits ont été sélectionnés pour leur faible sensibilité au brunissement et leur faible amertume ou astringence. Ainsi, les jus issus de pommes de table sont nutritionnellement pauvres car riches en sucres et peu concentrés en antioxydants. Cependant, en France, certains jus sont produits à partir de variétés locales dont la culture a perduré avec la production de cidre. Ainsi, le verger cidricole offre une réelle opportunité pour élaborer des produits riches en polyphénols à condition d'en maîtriser l'impact sur les qualités organoleptiques. Pour cela, l'oxydation enzymatique est un levier pour éliminer les polyphénols les plus astringents tout en autorisant le passage dans le jus des polyphénols d'intérêt. Cette oxydation génère aussi de nouvelles molécules polyphénoliques n'ayant jamais été quantifiées dans les jus de pomme.

Résultats

Une méthode chromatographique couplée à la spectrométrie de masse a été développée en ciblant des familles de composés issus de l'oxydation enzymatique de deux polyphénols majeurs de la pomme (l'acide chlorogénique et l'épicatéchine). La méthode qui permet aussi de doser les polyphénols natifs, a été appliquée

à une série de 54 jus de pomme commerciaux ou expérimentaux en comparant les produits disponibles en supermarché à ceux élaborés à partir du verger cidricole français et commercialisés localement. On montre ainsi que deux familles de produits d'oxydation contribuent en moyenne pour près de 5 % des polyphénols dosés par chromatographie mais peuvent atteindre 14 % dans certains jus. Autre résultat remarquable, les jus élaborés à partir de pommes à cidre et produits localement ont une concentration beaucoup plus élevée en polyphénols que ceux commercialisés en supermarché. Ainsi, un rapport de 1 à 8 est observé entre les teneurs moyennes en polyphénols des groupes extrêmes (jus industriels vraisemblablement issus de pommes de table par opposition au groupe des jus issus de pommes à cidre).

Perspectives

Ces teneurs contrastées en polyphénols sont à mettre en relation avec un impact nutritionnel qui pourrait dépendre largement de l'usage de fruits à cidre dans l'élaboration des jus de pomme de demain. Les travaux futurs portent sur certaines propriétés fonctionnelles des polyphénols et de leurs produits d'oxydation telles que leurs propriétés antioxydantes et leur capacité d'interaction avec les protéines (effet tannant) en lien avec la qualité organoleptique et nutritionnelle.

Les mannoprotéines de levure : un additif bio-sourcé à haut potentiel pour la qualité du vin



En savoir plus

Assunção Bicca S. *et al.*

Exploring the influence of *S. cerevisiae* mannoproteins on wine astringency and color: Impact of their polysaccharide part
Food Chemistry . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136160>

Partenariat

- Lallemand SAS (Blagnac)

Contacts

Saul Assunção Bicca, Céline Poncet-Legrand et Aude Vernhet[†]

UMR SPO

saul.assuncao@supagro.fr

celine.poncet-legrand@inrae.fr

aude.vernhet@inrae.fr



Contexte

Les mannoprotéines (MPs) relarguées par la levure présentent de nombreuses propriétés fonctionnelles ayant un impact direct sur la qualité organoleptique et la stabilité des vins, mais dont les mécanismes ne sont pas encore bien compris. Les MPs sont des macromolécules hypercomplexes composées d'un noyau protéique sur lequel sont branchées plusieurs chaînes polysaccharidiques chargées négativement. La structure (composition en acides aminés et en monosaccharides, conformation et poids moléculaire, polydispersité et charge nette) joue un rôle dans les interactions avec les composés polyphénoliques et notamment les tanins. Ces interactions conduisent à des systèmes colloïdaux stables dans le temps et affectent le potentiel astringent des tanins et donc celui des vins. Notre étude s'est focalisée sur la caractérisation structurale et physico-chimique des MPs de *Saccharomyces cerevisiae* et sur le rôle de leurs parties polysaccharidiques dans les interactions avec les tanins et les anthocyanes. L'objectif est de progresser dans la compréhension des mécanismes mis en jeu dans les propriétés de ces molécules en établissant les relations structure-fonction.

Résultats

Nous avons extrait des MPs de différentes souches de *S. cerevisiae*, dont la composition et la structure polysaccharidiques sont différentes (tailles, charges, branchements). L'analyse par chromatographie d'exclusion stérique associée aux

détections MALLS (Multiple Angle Laser Light Scattering) et QELS (Quasi Elastic Light Scattering) permet de démontrer que ces différences structurales impactent la conformation moléculaire des MPs, notamment la densité moléculaire. Cette dernière s'est révélée être un facteur essentiel pour l'établissement des interactions physico-chimiques responsables de l'effet modulateur de l'astringence des MPs vis-à-vis des tanins du vin. Nous avons également montré que les MPs sont capables de promouvoir des interactions électrostatiques entre la charge négative intrinsèque à leur structure polysaccharidique et les anthocyanes, molécules clés de la couleur des vins rouges. Ces interactions sont aussi affectées par la «compacité» moléculaire qui rend les sites d'interactions plus ou moins accessibles aux polyphénols. Ainsi, cette étude a permis de confirmer l'importance de la structure polysaccharidique des MPs dans les propriétés d'interaction avec les polyphénols importants pour la qualité des vins rouges.

Perspectives

Nous souhaitons déterminer l'impact de la partie polysaccharidique des MPs sur d'autres propriétés technofonctionnelles. Ceci nous permettra une compréhension plus globale de l'effet des MPs dans la matrice vin et de développer cet outil technologique de façon à répondre de manière plus efficace aux problématiques de la filière œnologique, aux demandes sociétales et à l'évolution des normes et réglementations.



Vers des produits carnés plus sains et sensoriellement acceptables



En savoir plus

Meurillon M. *et al.*

Sensory acceptability of antioxidant-based formulations dedicated to mitigate heterocyclic aromatic amines in cooked meat

Meat Science . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109088>

Partenariat

- Institut de Recherche en Infectiologie de Montpellier (IRIM), Montpellier

- Toxalim, INRAE, Toulouse / Plateforme Metatoul-Axiom, MetaboHUB, Toxalim, Toulouse

Projet support:

ANS MARMEAT (TRANSFORM)

Contact

Maïa Meurillon

UR QuaPA

maia.meurillon@inrae.fr



Contexte

En 2015, la viande rouge a été classée probablement cancérigène pour l'homme par le CIRC qui incriminait notamment les amines aromatiques hétérocycliques (AAHs). La formulation par ajout d'antioxydants est une des méthodes de remédiation des AAHs les plus prometteuses, mais le choix de ces antioxydants reste très empirique. Une méthode unique et originale basée sur des approches de chimie médicinale a été développée et a permis de sélectionner les aliments riches en antioxydants les plus adaptés pour inhiber la formation d'AAHs dans la viande: câpre, origan, vin rouge et thé vert. Cependant il est nécessaire de valider que ces formulations soient acceptées par le consommateur.

Résultats

Une étude hédonique a été réalisée pour déterminer quelles formulations parmi les quatre testées étaient les plus appréciées par les consommateurs. Du fait de leur congruence avec la viande cuite, il a été trouvé que les câpres et l'origan ne différaient pas de manière significative du standard le plus apprécié par les juges. Des analyses non verbales ont ensuite été effectuées pour évaluer les dissemblances globales entre les formulations standard, câpres et origan ainsi que les différences gustatives et olfactives. Il a été démontré que les variations olfactives étaient à l'origine de ces différences. Les formulations

standard et câpres se sont révélées très proches, tandis que l'origan s'en éloignait. Une analyse descriptive quantitative simplifiée rapide a mis en évidence que la note « plantes aromatiques » était discriminante pour l'origan. La chromatographie en phase gazeuse-olfactométrie a donc été utilisée pour identifier les composés odorants responsables de cette note végétale aromatique. Cette discussion sur le meilleur équilibre entre bénéfice santé et inconvénient sensoriel a permis d'identifier l'origan comme meilleure option de formulation car à des concentrations moyennes (i.e. 0,25% en masse) il présente une acceptabilité comparable à celle d'un steak haché standard tout en inhibant la formation de certaines AAHs.

Perspectives

Les résultats du projet ont permis de rationaliser le choix des antioxydants pouvant inhiber la formation d'AAHs tout en étant acceptés par le consommateur. Des résultats sont ainsi en cours de traitement pour étudier le rôle protecteur du carvacrol, principe actif de l'origan, sur la cancérogénèse induite par les AAHs. Ces travaux pourraient être étendus au choix d'ingrédients culinaires et non pas qu'à des principes actifs antioxydants. De plus cette méthode pourrait être transposée à la remédiation d'autres composés néoformés tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, générés lors de cuisson intense ou fumage de viande.



© AdobeStock

L'obscurité clarté du chocolat noir



En savoir plus

Dials A.L.S. *et al.*

Shades of Fine Dark Chocolate Colors: Polyphenol Metabolomics and Molecular Networking to Enlighten the Brown from the Black

Metabolites . 2023

<https://doi.org/10.3390/metabo13050667>

Partenariat

- Valrhona SA, Tain l'Hermitage, France

Projet support:

Projet PhenoVal (FEDER, Région Occitanie Pyrénées-Méditerranée, Valrhona SA).

PROBE Platform for profiling properties of food and bio-based products

CALIS
Consommateur | Aliment | Santé

PFP Plateforme d'analyse des polyphénols

Contact

Nicolas Sommerer

UMR SPO

nicolas.sommerer@inrae.fr



Contexte

Les amateurs de chocolat noir de dégustation apprécient ses subtilités sensorielles. Depuis quelques années, les chocolatiers s'intéressent à la couleur de leurs chocolats et proposent des innovations comme le chocolat blond ou le chocolat ruby.

Suite à une précédente collaboration fructueuse, notre partenaire Valrhona S.A., chocolatier haut de gamme, nous a sollicités pour essayer de comprendre les fortes nuances de teinte de certains de leurs chocolats noirs à 70 % de cacao.

Ces chocolats d'étude sont élaborés via une recette standard et certains sont très foncés, comme serait attendu de chocolats noirs à très forte teneur en cacao, alors que d'autres sont très clairs, comme le sont les chocolats au lait.

Nous avons sélectionné visuellement les 8 chocolats les plus noirs et les 8 chocolats les plus clairs dans un lot de 37 chocolats. Par spectrométrie de masse à haute résolution (HRMS), nous avons analysé sans a priori les métabolites spécialisés non volatils de ces chocolats et fait des analyses uni- et multi-variées pour mettre en avant les différences moléculaires entre nos deux groupes de chocolats très noirs et chocolats très clairs.

Résultats

Les analyses en composantes principales (ACP) et ANOVA proposent une liste de variables discriminantes.

L'approche des réseaux de corrélations moléculaires permet d'accélérer le processus d'identification de ces composés en les rassemblant par familles moléculaires présentant des similarités spectrales élevées.

Dans les chocolats foncés, 27 métabolites spécialisés discriminants sont identifiés, principalement des polyphénols, pour la plupart des flavanols O-glycosylés et des petits tanins dimères et trimères de type A.

Dans les chocolats clairs, 50 composés phénoliques discriminants sont identifiés. Parmi ceux-ci, 27 sont des tanins aglycones de plus grande taille, du trimère au nonamère. Des dimères et trimères C-glycosylés et des déhydrocatéchines de type B font aussi partie de la liste des composés discriminants.

Perspectives

Les chocolats de cette étude sont élaborés via une recette standard ; la variabilité de couleur et de composition moléculaire provient donc de l'amont, de la fève de cacao marchande. La variété génétique, l'origine géographique, les conditions de fermentation des fèves fraîches puis de leur séchage ont un impact sur la couleur du produit fini. Nous allons « remonter » dans le procédé et analyser les fèves correspondant à ces chocolats pour faire un premier lien moléculaire entre la fève de cacao et le produit fini et rechercher l'existence de groupes génétiques et géographiques.

Diminuer les défauts d'odeurs dans les fractions de féverole en optimisant le choix du cultivar et les étapes de production



En savoir plus

Karolkowski A. et al.

Origins of volatile compounds and identification of odour-active compounds in air-classified fractions of faba bean (*Vicia faba L. minor*)

Food Research International . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112260>

Partenariat

- Groupe Soufflet-In Vivo et Groupe Avril (Thèse CIFRE)

PROBE Platform for profiling ingredients of food and bio-based products

CALIS Commissariat à l'Alimentation Santé

ChemoSens Plate-Forme Chimio-Sensorielle

Contacts

Adeline Karolkowski, Loïc Briand et Christian Salles

UMR CSGA

adeline.karolkowski@inrae.fr

loic.briand@inrae.fr

christian.salles@inrae.fr



Contexte

La féverole (*Vicia faba L. minor*) est une source de protéines végétales qui présente des propriétés fonctionnelles intéressantes pour la production de produits alimentaires innovants. Les industriels proposent ainsi différents ingrédients protéiques de féverole (farine, concentrat et fraction appauvrie en protéines) obtenus par turbo-séparation (voie sèche) pour la formulation de nouveaux produits. Cependant, la présence de défauts sensoriels dans ces protéines végétales limite leur acceptabilité et entraîne des pertes économiques importantes pour les fabricants. Des notes désagréables de pois, d'herbe, de métal ou de poussière caractérisent ces défauts sensoriels et sont produites au cours des différentes étapes : culture, stockage et transformation. L'identification des composés volatils et odorants de différentes fractions et cultivars de féverole ainsi que leurs origines est donc essentielle pour définir des stratégies permettant de diminuer ces perceptions négatives.

Résultats

Le contenu volatil des farines, concentrats et fractions appauvries en protéines de 3 cultivars de féverole a été extrait par la méthode SAFE (Solvent-Assisted Flavour Evaporation). Un total de 147 composés volatils a été

identifié par GC-MS (Chromatographie Gazeuse-Spectrométrie de Masse). Les concentrats sont plus riches en composés volatils et contiennent plus de molécules issues de l'oxydation des acides gras libres (voie enzymatique ou auto-oxydation). En revanche, les fractions d'un des cultivars sont caractérisées par une importante dégradation des acides aminés libres qui témoigne d'un contrôle non maîtrisé des conditions au champ ou lors du stockage. Enfin, 35 composés odorants ont été mis en évidence par GC-Olfactométrie (GC-O) et de nouvelles classes d'odeurs ont permis de mieux identifier les odeurs de féverole. La diversité du profil olfactif des fractions étudiées pourrait être attribuée aux différences entre les cultivars et les événements lors du développement de la graine au champ, du stockage et de la transformation.

Perspectives

Ce travail ouvre la voie vers de nouvelles recherches permettant de limiter les notes désagréables dans les nouvelles sources de protéines végétales. Un choix pertinent des cultivars et un contrôle maîtrisé des étapes de production des différentes fractions de féverole permettront de limiter ces défauts olfactifs et ainsi de démocratiser la consommation de cette légumineuse.



© AdobeStock

Identification des acteurs clés du métabolisme des aldéhydes odorants dans la cavité nasale



En savoir plus

Boichot V. *et al.*

Characterization of human oxidoreductases involved in aldehyde odorant metabolism

Scientific Reports . 2023

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31769-4>

Partenariat

- CHU Dijon-Bourgogne
- Synchrotron SOLEIL
- Smell and Taste Clinic, TU Dresden
- Chair of Tissue Engineering and Regenerative Medicine, University Hospital Wuerzburg
- Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, University Hospital Aachen

Contact

Mathieu Schwartz

UMR CSGA

mathieu.schwartz@inrae.fr



Contexte

L'olfaction a une importance primordiale dans la perception d'un aliment ; elle constitue donc un élément clé dans l'apport alimentaire. En conséquence, une dysfonction olfactive entraîne une diminution du plaisir alimentaire et de la consommation de nourriture et une réduction du bien-être et de la qualité de vie pouvant parfois conduire jusqu'à la dépression. Les sensations olfactives sont basées sur la liaison de molécules odorantes aux récepteurs olfactifs situés dans la fente olfactive. Avant leur liaison aux récepteurs, les molécules odorantes peuvent être métabolisées par les enzymes présentes dans le mucus et les tissus olfactifs, avec un impact sur la perception. Ce métabolisme des odorants et les enzymes impliquées ont été étudiés en détail.

Résultats

Une des principales familles de molécules odorantes a été étudiée: les aldéhydes, présents dans un grand nombre d'aliments et connus pour leur réactivité et leurs seuils de perception bas (perçus même en faible quantité). En combinant des approches immunohistologiques, protéomiques, biochimiques et structurales, le métabolisme des aldéhydes a pu être étudié. Les oxydoréductases des familles des aldéhydes déshydrogénases

(ALDH) et des aldo-kétoréductases (AKR) ont été identifiées dans le mucus olfactif et l'épithélium olfactif humain et caractérisées avec un panel d'odorants. Ces enzymes sont capables de métaboliser la plupart des aldéhydes odorants grâce un site actif unique qui a pu être décrypté grâce à des mesures de diffraction aux rayons X au synchrotron SOLEIL. Les oxydoréductases identifiées présentent cependant des réactivités différentes (oxydation ou réduction) ainsi que des spectres d'affinité différents suivant les membres enzymatiques.

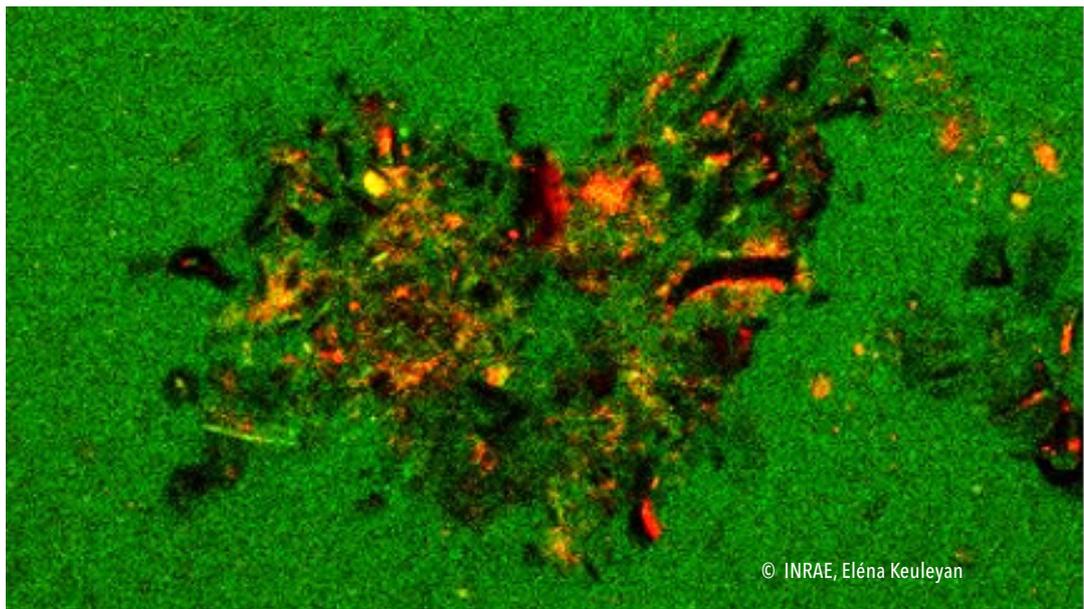
Perspectives

Au niveau du système olfactif, les oxydoréductases assurent un rôle de protection contre les molécules d'aldéhydes réactives mais impacteraient également la perception sensorielle puisque les métabolites formés ont des propriétés sensorielles différentes des substrats. De futures études pourront préciser en quoi des différences de métabolisme des odorants peuvent conduire à des variabilités de perception sensorielle.

Partie 3

Optimiser les fonctions

de molécules naturelles



© INRAE, Eléna Keuleyan

Les recherches sur les relations structure-fonction qui sous-tendent les différentes fonctionnalités des aliments et bioressources s'accroissent. Elles visent à comprendre comment les propriétés et fonctionnalités intrinsèques des matières biologiques évoluent et peuvent être exploitées. Ces informations sont essentielles pour développer et introduire de nouveaux ingrédients alimentaires et des molécules pharmaceutiques.

Vers de nouveaux vecteurs lipidiques naturels pour l'encapsulation de molécules lipophiles bioactives : les sphingosomes



En savoir plus

Lopez C. *et al.*

Solubilization of Free β -Sitosterol in Milk Sphingomyelin and Polar Lipid Vesicles as Carriers: Structural Characterization of the Membranes and Sphingosome Morphology

Food Research International . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112496>

Partenariat

- Institut de Physique de Rennes
- Synchrotron SOLEIL, ligne SWING

Contact

Christelle Lopez

UR BIA

christelle.lopez@inrae.fr



Contexte

Des nutriments essentiels à la santé humaine sont apportés exclusivement par l'alimentation, par exemple les stérols végétaux (réduction du risque de maladies cardio-vasculaires) et la lutéine (caroténoïde xanthophylle d'intérêt pour les yeux). Or, ils sont consommés en quantité trop faible pour avoir des effets bénéfiques. La conception d'aliments sains apportant à la population les nutriments nécessaires en quantité suffisante via un enrichissement est donc un enjeu important. Cependant, les molécules lipophiles telles que les stérols végétaux et la lutéine ont une très faible solubilité dans l'eau et dans les lipides ce qui limite leur incorporation dans des formulations alimentaires et diminue leur biodisponibilité. La conception de vésicules lipidiques permettant la solubilisation efficace des molécules lipophiles d'intérêt pourrait améliorer leur biodisponibilité. Dans ce travail, nous avons émis l'hypothèse que la sphingomyéline, phospholipide naturellement présent dans le lait et les œufs, pourrait contribuer efficacement à l'encapsulation de molécules lipophiles exogènes grâce à l'établissement d'interactions hydrophobes et hydrogènes spécifiques.

Résultats

Des vésicules lipidiques composées de sphingomyéline issues du lait ou de l'œuf, appelées sphingosomes, ont été fabriquées avec succès. Leur capacité à solubiliser et encapsuler des molécules telles que les stérols végétaux, les tocophérols (anti-oxydants) et la lutéine

a été étudiée avec une approche multi-échelles, par la combinaison de techniques de biophysique (diffraction des rayons X, calorimétrie) et d'observations par microscopie pour visualiser la morphologie des sphingosomes. L'incorporation de molécules exogènes d'intérêt modifie les propriétés physiques de la membrane des sphingosomes et peut conduire à leur élongation. Ainsi, les sphingosomes de forme sphérique évoluent vers des formes allongées en présence des molécules exogènes d'intérêt. Au-delà d'une certaine teneur, les molécules exogènes telles que la lutéine et les stérols végétaux forment des cristaux non solubles dans la phase aqueuse entourant les sphingosomes. Des sphingosomes fabriqués à partir d'un mélange naturel complexe de phospholipides issus de la membrane des globules gras du lait ont montré leur intérêt pour l'encapsulation de stérols végétaux.

Perspectives

La preuve de concept de l'intérêt des sphingosomes, composés de molécules naturelles issues du lait ou de l'œuf et valorisées à partir de co-produits de l'industrie alimentaire, ouvre un champ d'investigations et d'applications pour une solubilisation efficace dans des aliments de nutriments lipophiles essentiels à la santé humaine. Cette stratégie d'encapsulation dans des aliments constitue donc une voie de prévention primaire de certaines maladies.

© INRAE, Eléna Keuleyan (observation réalisée sur la plateforme BIBS, INRAE). Image de microscopie confocale de fluorescence d'un concentré de protéines de lupin en suspension aqueuse.

Les lipides, des co-passagers dans les ingrédients protéiques de légumineuses ?



En savoir plus

Keuleyan E. *et al.*

Pea and lupin protein ingredients: New insights into endogenous lipids and the key effect of high-pressure homogenization on their aqueous suspensions

Food Hydrocolloids . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108671>

Partenariat

Projet support :

Projet Connect Talent VESTA - Région Pays de la Loire – Nantes Métropole.

Contacts

Claire Berton-Carabin, Alain Riaublanc et Anne Meynier

UR BIA

claire.ber-ton-carabin@inrae.fr

alain.riau-blanc@inrae.fr

anne.meynier@inrae.fr



Contexte

La transition protéique vise à réduire la part des protéines animales au profit des protéines végétales dans notre alimentation, notamment en raison de la préoccupation croissante pour la durabilité environnementale. Dans ce contexte, les légumineuses, telles que les pois et le lupin, se révèlent être des sources prometteuses de protéines alimentaires. Cependant, leur déploiement dans les systèmes alimentaires est limité par le fait que leurs propriétés fonctionnelles (notamment en termes de capacités émulsifiantes, moussantes, gélifiantes) sont souvent loin d'être optimales. En effet, les mécanismes et les propriétés physico-chimiques sous-jacents sont encore très mal connus et le rôle possible des composés non protéiques présents dans ces fractions est aussi largement inexploré.

Résultats

Cette étude a porté sur une caractérisation approfondie de la composition d'ingrédients protéiques commerciaux de pois et de lupin. Ces ingrédients contiennent des quantités surprenantes de lipides endogènes. En effet, ces teneurs en lipides sont nettement supérieures à celles des graines dont les ingrédients sont issus, ce qui montre que les procédés d'obtention de ces ingrédients protéiques induisent, incidemment, une accumulation des molécules lipidiques. Une proportion importante

de ces lipides (parfois plus de la moitié) est constituée par des phospholipides, molécules amphiphiles ayant donc une affinité mixte pour l'huile et pour l'eau. Ceux-ci pourraient ainsi largement moduler les propriétés émulsifiantes des ingrédients protéiques en question. Lorsqu'un procédé d'homogénéisation haute pression est appliqué aux suspensions aqueuses de ces ingrédients, la morphologie des structures présentes est modifiée et la solubilité des protéines est améliorée. Ainsi, les structures à base de polysaccharides sont réduites en taille par ce traitement mais tendent à se regrouper, tandis que des petites structures contenant des lipides (apparaissant sous forme de petites gouttelettes sphériques) sont libérées des grosses particules composites initialement présentes.

Perspectives

Ces travaux vont au-delà des stratégies de caractérisation habituellement mise en œuvre dans le domaine des ingrédients protéiques d'origine végétale, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour comprendre leur comportement dans des matrices alimentaires. La mise en lumière du rôle potentiel des lipides – et autres « co-passagers » non protéiques dans ces ingrédients – nous semble clé pour promouvoir l'utilisation de ces fractions protéiques pour des applications alimentaires de façon raisonnée.



© Fanny Vinter

Quand pectines et protéines s'associent : un nouveau mécanisme d'assemblage de la paroi végétale



En savoir plus

Moussu S. *et al.*

Plant cell wall patterning and expansion mediated by protein-peptide-polysaccharide interaction

Science . 2023

<https://doi.org/10.1126/science.adi4720>

Partenariat

- The Plant Signaling Mechanisms Laboratory, Department of Plant Molecular Biology, University of Lausanne

- Department of Plant Molecular Biology, University of Lausanne

- Electron Microscopy Facility, University of Lausanne

- Integrated Molecular Plant Physiology Research (IMPRES), Department of Biology, University of Antwerp

- Department of Plant and Microbial Biology & Zurich-Basel Plant Science Center, University of Zurich

- IINS, CNRS UMR5297, University of Bordeaux

Projet support: ANR HOMEOWALL

Contacts

Estelle Bonnin, Bernard Cathala et Herman Höfte

UR BIA et UMR IJPB

estelle.bonnin@inrae.fr

bernard.cathala@inrae.fr

hermanus.hofte@inrae.fr



Contexte

Les plantes ont la capacité extraordinaire d'utiliser l'énergie solaire pour convertir le CO₂ atmosphérique en sucres. À partir de cette source inépuisable d'énergie et d'éléments structuraux des cellules, et pour protéger chaque cellule, les plantes ont formé la paroi cellulaire. Elle est formée d'un réseau à la fois extrêmement robuste et flexible, principalement composé de polysaccharides (de longues chaînes de sucres) parmi lesquels les pectines sont connues de longue date pour leurs propriétés gélifiantes. La paroi constitue un matériau composite pouvant supporter des pressions jusqu'à 10 bar. Elle joue également un rôle de barrière contre les agents pathogènes et participe à la communication intercellulaire. In vivo, la paroi doit simultanément être plastique, pour permettre la croissance de la cellule, et solide pour assurer ses fonctions protectrices.

La question qui se pose est donc : comment les cellules végétales peuvent-elles croître sans risquer l'explosion ? Pour comprendre le mécanisme de croissance des plantes, il est essentiel de décortiquer le processus d'assemblage et d'élongation de cette paroi.

Résultats

Le tube pollinique, organe unicellulaire de la plante modèle *Arabidopsis*, montre une croissance orientée à sa pointe. Des pectines

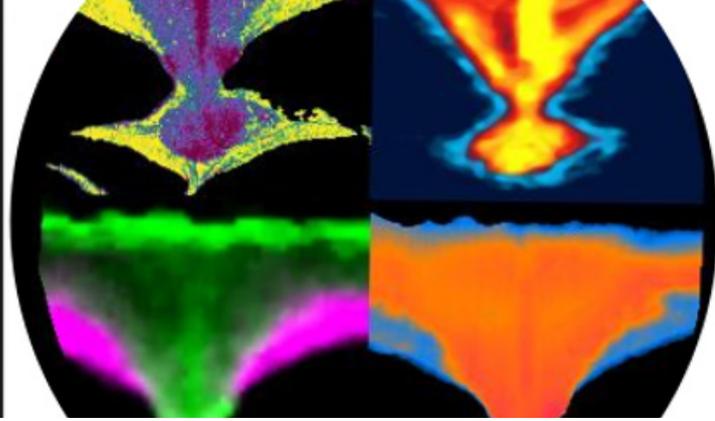
non chargées s'y accumulent et leur modification enzymatique génère l'apparition de charges négatives. Elles sont alors reconnues par un complexe formé d'un peptide (RALF4) et de son récepteur (LRX8). Cette interaction provoque la condensation des pectines, créant ainsi un motif réticulé qui confère résistance et extensibilité à la paroi. La paroi du tube pollinique de plantes portant des mutations sur les peptides, ou sur leur récepteur protéique, ne montre pas cette structure réticulée et se désintègre prématurément. Cette interaction est donc nécessaire à la croissance et à la fertilité du pollen. La formation du complexe peptide-récepteur-pectines et la condensation des pectines ont également été démontrées in vitro.

Perspectives

Cette étude, qui révèle le double rôle signalétique et structurel de ce complexe peptide-récepteur-pectines pour façonner l'extension de la paroi cellulaire, est source d'inspiration pour rationaliser de nouveaux mécanismes d'interactions protéines-polymères. Au-delà, ces résultats devraient faciliter la sélection de nouvelles variétés de plantes adaptées au changement climatique.



© N. Reynoud - La face cachée de la cuticule du fruit de tomate au cours du développement (cartographie RAMAN et AFM)



La face cachée de la cuticule des plantes



En savoir plus

Reynoud N. *et al.*

Cuticle architecture and mechanical properties: a functional relationship delineated through correlated multimodal imaging

New Phytol . 2023

<https://doi.org/10.1111/nph.18862>

Partenariat

- UMR BPF, Biologie et Pathologie du Fruit, Bordeaux

- ICP, Institut de Chimie Physique, Univ. Orsay



Contacts

Bénédicte Bakan, Angelina D'Orlando et Marc Lahaye

UR BIA

benedicte.bakan@inrae.fr

angelina.dorando@inrae.fr

marc.lahaye@inrae.fr



Contexte

La cuticule, à la surface de tous les végétaux, est un composite naturel hydrophobe qui protège les plantes des risques environnementaux (résistance à la déshydratation, adaptation aux stress climatiques et biologiques). Au cours du développement des fruits, les cuticules doivent s'adapter à différentes contraintes mécaniques combinant extensibilité et rigidité. Les données structurales qui régissent ces propriétés sont méconnues. Pourtant, comprendre l'architecture des cuticules des plantes est une condition préalable pour contrôler leurs fonctionnalités en vue d'une production et d'une transformation durables des cultures. Chimiquement complexe la cuticule inclue des lipides, polysaccharides et composés phénoliques. En utilisant comme modèle la tomate du début de la phase d'expansion jusqu'à maturité, un schéma expérimental a été conçu pour permettre d'imager et de coupler des informations de compositions chimiques (biochimie, imagerie RAMAN associée à des analyses de données multivariées) à des mesures de propriétés mécaniques à l'échelle nanométrique (microscopie par force atomique).

Résultats

Au sein de la cuticule, les analyses ont permis d'identifier des clusters chimiques avec des contributions différentes des composants (c.-à-d. cutine, polysaccharide, composés

phénoliques). Par ailleurs, ces zones sont finement ajustées au cours du développement du fruit entraînant des réarrangements compositionnels mais aussi de conformation macromoléculaire.

Nous avons ensuite étudié les propriétés mécaniques locales de la cuticule du fruit en relation avec les hétérogénéités chimiques et structurales, en développant une approche d'imagerie multimodale corrélative. Des hétérogénéités de propriétés mécaniques sans précédent ont ainsi pu être mises en évidence au sein de la cuticule. Les modifications de ces zones au cours du développement sont associées à des variations locales de compositions chimiques et d'arrangements macromoléculaires. Un tel ajustement structurel permet une adaptation du continuum cutine-polysaccharides et des performances fonctionnelles de la cutine et des polysaccharides.

Perspectives

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

- i) l'amélioration de l'adaptation des plantes aux modifications de leur environnement
- ii) de nouvelles pistes pour le design à façon de nouveaux matériaux biosourcés, bio-inspirés.



© Laurent Chaunier, INRAE - Impression 3D de matrices complexes à base d'une protéine thermoplastique extraite du maïs

Des matrices biopolymères à porosité ciblée pour contrôler la libération de molécules pharmaceutiques



En savoir plus

Thadasack M. *et al.*

Tuning pharmaceutically active zein-based formulations for additive manufacturing

Additive Manufacturing . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103849>

Partenariat

- Institut UTINAM UMR CNRS 6213

- UMR GEPEA Génie des Procédés Environnement - Agroalimentaire, CNRS, Saint-Nazaire

- Synchrotron SOLEIL, Ligne de lumière ANATOMIX

Contacts

Denis Lourdin, Sofiane Guessasma et Laurent Chaunier

UR BIA

denis.lourdin@inrae.fr

sofiane.guessasma@inrae.fr

laurent.chaunier@inrae.fr



Contexte

La délivrance contrôlée de médicaments constitue un enjeu thérapeutique majeur et la mise au point de systèmes personnalisés de libération de principes actifs est déterminante pour le domaine pharmaceutique. Ainsi, les technologies de fabrication additive sont étudiées pour l'obtention de médicaments imprimés en 3D permettant une posologie et une vitesse de délivrance adaptée au patient. Le défi est actuellement d'utiliser des polymères naturels répondant au cahier des charges du procédé afin d'obtenir des matrices comestibles et résorbables.

Résultats

Ce travail a permis de développer des systèmes de délivrance de molécules actives imprimées en 3D à partir de matériaux biopolymères à base de zéine. La plastification de cette protéine extraite du maïs a été réalisée avec deux composés : le [Lidocaïnium] [Ibuprofénate] ([Lid][Ibu]), un Liquide Ionique-Principe Actif et le glycérol.

La fenêtre de mise en oeuvre (temps, température) en fabrication additive par extrusion-dépôt de fil fondu a été déterminée à partir de l'étude des caractéristiques rhéologiques de différentes formulations. Il a été montré que le glycérol peut être combiné au [Lid][Ibu] afin d'ajuster la viscosité des fondus. Cette co-plastification a aussi un impact sur la cinétique de fusion-adhésion de filaments juxtaposés étudiée par tomographie aux rayons X

au Synchrotron SOLEIL.

Le comportement des matériaux a été étudié en conditions de digestion simulée. Le glycérol est libéré dès l'immersion des matrices et on observe une dissociation du liquide ionique avec un relargage progressif de la lidocaïne dès la phase gastrique. Ces phénomènes sont causés par des mécanismes de diffusion.

Ces données expérimentales ont alimenté la construction d'un modèle numérique de transfert d'espèces chimiques. Un écart a été mesuré entre les profils de libération simulés et expérimentaux. Cela pourrait être dû à une interconnectivité des pores et donc un volume de réseau poreux plus important pour les pièces imprimées 3D que pour les géométries virtuelles. Cette interconnectivité entre les pores est liée à des défauts dans leur cloisonnement causés par des lacunes d'adhésion.

Perspectives

L'une des perspectives à ce travail est la compréhension des mécanismes de co-plastification de la zéine par des liquides ioniques combinés à un plastifiant standard tel que le glycérol. Par ailleurs, la détermination des capacités d'adhésion de couches superposées de filaments fondus serait aussi une perspective déterminante pour un meilleur contrôle des paramètres d'impression et la conception des modèles numériques des pièces imprimées 3D.

La surprenante capacité des céréales à modifier leur production de polysaccharides



En savoir plus

Francin-Allami M. *et al.*

Mixed-Linkage Glucan Is the Main Carbohydrate Source and Starch Is an Alternative Source during *Brachypodium* Grain Germination

International Journal of Molecular Sciences . 2023

<https://dx.doi.org/10.3390/ijms24076821>

Partenariat

- Joint Genome Institute, Berkeley, USA
- USDA-Agricultural Research Service, Western Regional Research Center, Albany, USA

Contacts

Mathilde Francin-Allami et Richard Sibout

UR BIA

mathilde.francin-allami@inrae.fr

richard.sibout@inrae.fr



Contexte

Contrairement aux céréales domestiquées où l'amidon est le polysaccharide prédominant, les grains de la plante modèle des graminées, *Brachypodium distachyon*, ont une teneur particulièrement élevée en β -glucanes mixtes, soit 45 % du poids du grain, contenus dans d'épaisses parois cellulaires, et une faible teneur en amidon, soit moins de 6 %. Les β -glucanes mixtes sont une source carbonée particulièrement intéressante puisque ces fibres solubles sont bénéfiques pour la santé humaine et influent sur les procédés de transformation des matières premières.

En raison de sa forte teneur en β -glucanes mixtes dans ses parois, *Brachypodium* a couramment été utilisée pour caractériser et étudier la synthèse de ce polysaccharide. Cependant, aucune donnée n'était encore disponible avant notre étude sur la fonction de ce polysaccharide pendant la germination des grains.

Résultats

En utilisant des approches de biochimie et d'immunomarquages, nous avons montré que la dégradation des β -glucanes mixtes commence quelques jours après la germination. L'activité des enzymes de dégradation des β -glucanes mixtes a été détectée tôt dans le processus de germination, et est maximale dès 48 heures après l'imbibition des grains. Nous avons également identifié trois hydrolases dont les gènes sont fortement exprimés dans les grains germés et nous avons

caractérisé l'activité lichénase pour deux d'entre elles. Nous avons aussi montré que les plantes délétées du gène de biosynthèse des β -glucanes mixtes, CSLF6, sont totalement dépourvues de β -glucanes mixtes et ont une teneur en amidon plus élevée. Ces plantes mutantes sont viables avec un taux de germination similaire à celui du type sauvage et une croissance des plantules à peine plus lente. Ce phénotype s'accompagne d'une diminution du niveau d'expression de la lichénase et d'une augmentation de l'expression du gène de l' α -amylase, ce qui indique que les plantes mutantes se sont adaptées à la nouvelle source de polysaccharide de réserve.

Perspectives

Nos résultats suggèrent une co-régulation des voies métaboliques des β -glucanes mixtes et de l'amidon dans les grains des graminées. Cependant, à ce jour, les mécanismes biochimiques et moléculaires régulant la balance entre ces deux sources carbonées ainsi que les enzymes cataboliques associées intervenant pendant la germination, restent trop peu documentés. La compréhension de ces mécanismes apparaît pourtant essentielle et pourrait constituer une voie supplémentaire pour améliorer la qualité et la valeur nutritionnelle globale des grains destinés à la consommation humaine, les β -glucanes mixtes des céréales étant particulièrement bénéfiques pour la santé humaine en tant que fibres alimentaires.

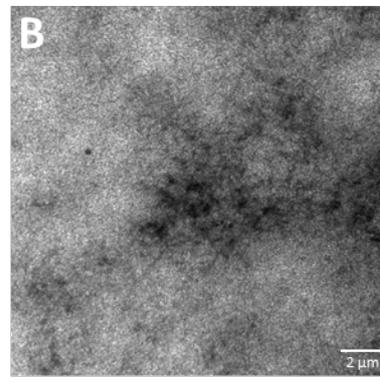
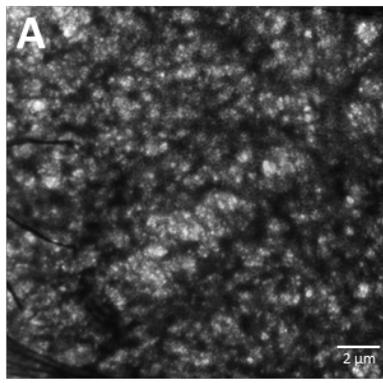
Partie 4

Considérer et maîtriser la texture,
**une propriété essentielle de la
matière première et des produits**



© AdobeStock

Divers processus chimiques et enzymatiques déstructurent la matière première et lui confèrent de nouvelles propriétés de texture. Etudier ces processus permet de déterminer l'aptitude des matières premières à la transformation et de contrôler la texture des produits.



© Images acquises au Centre d'Imagerie Cellulaire Santé - CICS (université Clermont-Auvergne) - Observation de gels de gélatine en microscopie électronique à transmission, effet de l'indice Bloom sur l'ultrastructure de la gélatine après glycation : A - Gélatine 125 Bloom, teneur en eau élevée, glyquée ; B - Gélatine 200 Bloom, teneur en eau élevée, glyquée.

La glycation pour texturer un aliment



En savoir plus

Portanguen S. *et al.*

Impact of water content and Bloom index on gelatin glycation

Food Hydrocolloids . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109096>

Contact

Stéphane Portanguen

UR QuaPA

stephane.portanguen@inrae.fr



Contexte

L'accroissement et le vieillissement global de la population va entraîner une augmentation des pathologies bucco-dentaires telles que des déficiences masticatoires. Ces déficiences peuvent entraîner de la dénutrition protéino-énergétique. Pour aider les personnes concernées à bien vieillir, il est important de mettre en œuvre un ensemble de méthodes et de procédés destinés à améliorer leur apport en protéines tout en les aidant à mastiquer et à déglutir sans danger. Cela passe par la conception d'aliments riches en protéines animales (riches en acides aminés indispensables) dont la texture est contrôlée et adaptée aux capacités masticatoires de ces personnes en association avec un procédé d'impression 3D alimentaire.

Résultats

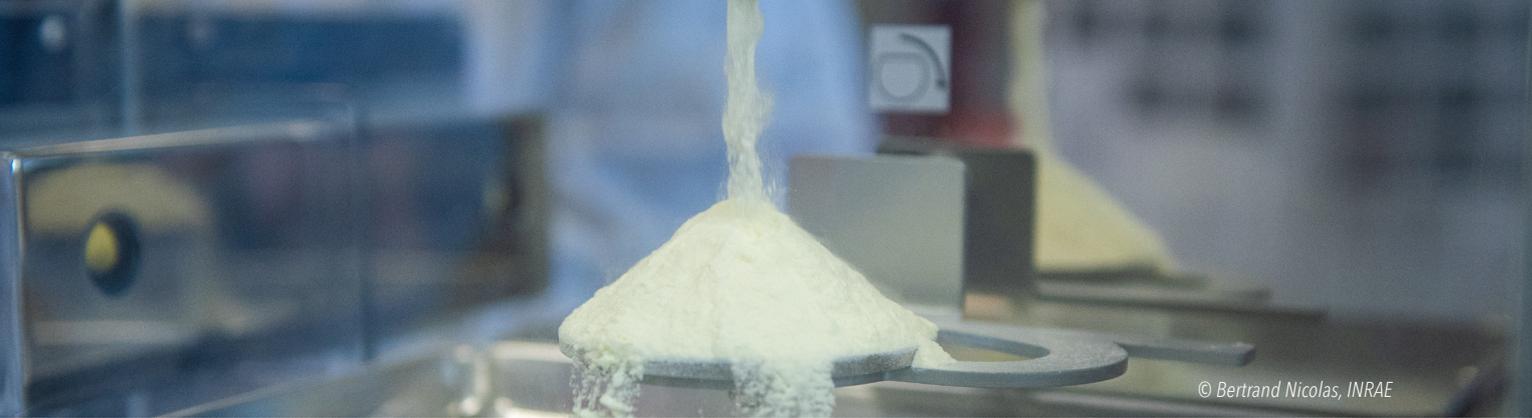
L'amélioration de la texture de produits carnés, par la réaction de glycation, a été étudiée sur un produit modèle : la gélatine. La réaction de glycation conduit à l'apparition de composés colorés, dont la formation est favorisée lorsque la teneur en eau initiale de la gélatine est faible. Une gélatine plus ferme (indice Bloom 200) contient un grand nombre d'amas de triple-hélices de gélatine. Cela semble affecter le déroulement de la glycation en créant un encombrement stérique qui limite la capacité du

ribose à accéder aux acides aminés. En revanche, une gélatine moins ferme (indice Bloom 125), en association avec une teneur en eau initiale élevée, présentait moins d'amas, ce qui suggère une structure plus colloïdale et un nombre plus faible de triple-hélices. Les sites réactifs sont alors plus accessibles pour la formation de liaisons covalentes, mais aussi pour la formation de liaisons hydrogène, dépendantes de la quantité d'eau disponible. Cet ensemble de liaisons favorise une structuration en agrégats, ayant l'apparence d'un maillage.

La teneur en eau initiale et l'indice Bloom ont donc un impact significatif sur l'ultra-structure et sur les propriétés rhéologiques des gels de gélatine. Une teneur en eau élevée et un indice Bloom faible favorisent la réaction de glycation.

Perspectives

L'application concrète de la réaction de glycation pour texturer les gels de gélatine est soumise à la variabilité de la matière première, qui dépend à son tour des conditions environnementales, de stockage et d'utilisation. Sur la base de ces résultats et des méthodes mises au point, de prochaines expérimentations tendront à évaluer la plus-value de la réaction de glycation en termes de texturation, directement sur des aliments à base de viande ou sur des aliments mixtes à base de viande et de protéines végétales.



© Bertrand Nicolas, INRAE

Influence des interactions entre la formulation et le procédé de fabrication sur la structure et les propriétés fonctionnelles des poudres de protéines laitières



En savoir plus

Lee J. *et al.*

Unravelling the Influence of Composition and Heat Treatment on Key Characteristics of Dairy Protein Powders Using a Multifactorial Approach

Foods . 2023

<https://doi.org/10.3390/foods12173192>

Partenariat

- UMR UMET, INRAE, CNRS, Lille

- Université de Lorraine, Libio à Nancy

Projet support :

Programme de recherche ETUVE avec le CNIEL (Centre Interprofessionnel de l'Economie Laitière).



Contacts

Cécile Le Floch-Fouéré, Jeehyun Lee et Romain Jeantet

UMR STLO

cecile.lefloch@institut-agro.fr

jeehyun.lee@institut-agro.fr

romain.jeantet@institut-agro.fr



Contexte

Les opérations de concentration/séchage constituent des étapes clés de la transformation laitière car elles permettent de stabiliser des produits sous forme de poudre et ainsi facilitent leur stockage et leur transport. Un objectif majeur du secteur laitier est d'accroître simultanément la maîtrise des fonctionnalités des produits pulvérulents et les performances (y compris environnementales) des opérations unitaires impliquées par l'établissement de relations de causalité entre les paramètres de conduite des procédés d'une part, les propriétés physicochimiques et structurales des poudres d'autre part. Dans ce contexte et afin de guider les pratiques industrielles, l'objectif de nos travaux est d'évaluer l'influence des interactions existant entre la formulation et le schéma technologique de fabrication sur la structure et les propriétés physico-chimiques des poudres de protéines laitières.

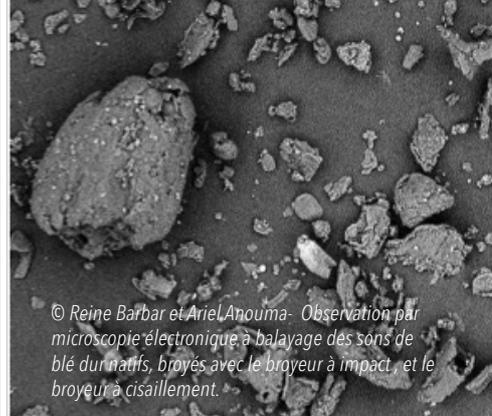
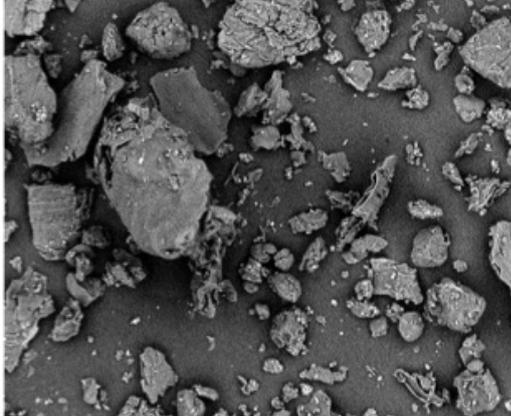
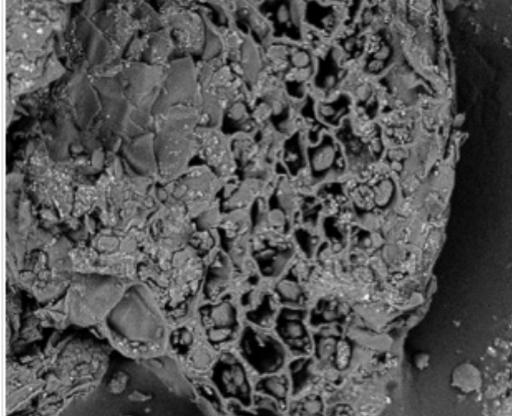
Résultats

L'influence de la composition (caséine (Cas), protéines de lactosérum (WP), base de mélange (eau osmosée vs perméat d'ultrafiltration)) et du traitement thermique sur les principales caractéristiques des poudres de protéines (hygroscopicité, taille des particules, sphéricité, densité et évolution du brunissement pendant le stockage) a été évaluée. Les isothermes de sorption de l'eau ont montré que l'absorption d'eau des poudres dépendait principalement de la base de

mélange et, dans une moindre mesure, du rapport Cas:WP. Plus la proportion de WP est élevée, plus les poudres sont hygroscopiques. La base de mélange n'a pas d'influence sur la sphéricité des particules de poudre. Quant aux mesures de la couleur des poudres pendant leur vieillissement à 13 °C, elles ont confirmé la participation du lactose et des WP aux réactions de brunissement. Finalement, il a été montré que, par ordre décroissant, les facteurs influençant les propriétés physico-chimiques des poudres sont dans notre cas : le rapport Cas:WP, la base de mélange et la modalité du traitement thermique.

Perspectives

Ces travaux présentent une contribution originale à la compréhension des évolutions de structure et de propriétés fonctionnelles subies par les concentrés protéiques laitiers au cours de leur élaboration, en lien avec les paramètres de procédés appliqués. Ce vaste programme expérimental, impliquant de très nombreux essais à échelle pilote représentative de l'échelle industrielle, a permis de préciser l'influence du schéma technologique de fabrication sur un même procédé. Ce travail est précurseur de futures investigations qui permettront à terme d'investiguer dans une même étude expérimentale la variation exhaustive des schémas technologiques et la détermination détaillée des fonctionnalités des poudres, que ce soit au niveau des propriétés de réhydratation, nutritionnelles et digestives.



© Reine Barbar et Ariel Anouma- Observation par microscopie électronique à balayage des sons de blé dur matifs, broyés avec le broyeur à impact et le broyeur à cisaillement.

Sons de blé dur et de blé tendre : quels sont les liens entre les propriétés intrinsèques et les processus de déstructuration ?



En savoir plus

Barbar R. *et al.*

Comparison of hydration water properties of common and durum wheat brans upon grinding with different loading modes

Food Hydrocolloids . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103786>

Partenariat

- UR BIA, INRAE, Nantes

Projet support:

Projet DEFI BLE DUR et ses membres industriels partenaires



Contacts

Reine Barbar, Claire Mayer-Laigle et Cécile Barron

UMR IATE

reine.barbar@supagro.fr

claire.mayer@inrae.fr

cecile.barron@inrae.fr



Contexte

Le son de blé est un co-produit encore sous-valorisé de la mouture conventionnelle du blé. En effet seuls 10 % des sons sont actuellement utilisés pour des applications alimentaires alors qu'il a été démontré que sa consommation diminue le risque de maladies cardiovasculaires en réduisant le temps de transit intestinal. Pour faciliter son incorporation dans les produits alimentaires, le son de blé est généralement réduit en une fine poudre par broyage. Cependant, cette opération est plus complexe qu'il n'y paraît car, pour être optimale, elle doit intégrer l'hétérogénéité structurale des sons, matériaux multicouches, composés de tissus de compositions différentes ayant des propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et mécaniques spécifiques. La réponse des sons aux sollicitations mécaniques générées par le broyeur est de ce fait variable, conduisant à une poudre hétérogène qui peut impacter la qualité du produit final.

Résultats

L'étude démontre que le broyage ne se limite pas à la réduction de la taille mais affecte également la structure physique des particules de son et génère des modifications à l'échelle moléculaire. Celles-ci peuvent notamment être mises en évidence

par la force des interactions entre les particules de son et l'eau et dépendent du type de son, du mode de sollicitation majeur généré par le broyeur et de l'intensité du travail mécanique. L'analyse conduite aux échelles macro et microscopique, incluant la distribution de la taille des particules et des facteurs de forme et composition biochimique, a permis de mettre en évidence les relations « produit-procédé-processus ». Ainsi, les modes de sollicitation mécanique affectent plus fortement l'eau d'hydratation et la capacité de sorption de vapeur d'eau des sons de blé dur. Ce comportement a été relié à (i) la compétition entre les mécanismes d'ouverture des parois cellulaires lors du broyage et ceux d'effondrement de la structure (ii) la diminution du degré de cristallinité de l'amidon résiduel dans le cas du blé dur.

Perspectives

Des études complémentaires sont envisagées pour clarifier l'effet de la sollicitation mécanique du broyage sur la dissociation des tissus et l'accessibilité des constituants ainsi que son impact sur les propriétés d'hydratation. L'objectif à terme serait de piloter l'étape de fragmentation du son de blé à partir de propriétés d'hydratation cibles permettant une incorporation optimale au sein de matrices alimentaires.



© AdobeStock

L'environnement minéral de la micelle de caséine pilote la coagulation du lait à l'origine des fromages



En savoir plus

Bauland J. *et al.*

Non-linear properties and yielding of enzymatic milk gels

Soft Matter . 2023

<https://doi.org/10.1039/d2sm01556k>

Partenariat

- Chr-Hansen SAS, Hoersholm, Denmark.
- UMR TBI, Université de Toulouse, CNRS, INRAE, INSA, Toulouse, France

Contact

Thomas Croguennec

UMR STLO

thomas.croguennec@institut-agro.fr

Contexte

Une des premières étapes de la fabrication du fromage consiste à supprimer la stabilité colloïdale des micelles de caséine par ajout d'un enzyme coagulant afin d'initier la transition de phase liquide-gel du lait. Après l'initiation de la gélification, la structure et les propriétés rhéologiques du gel évoluent. Le choix du moment du décaillage est un élément crucial pour atteindre les propriétés du caillé souhaitées et pour minimiser les pertes de protéines et de matière grasse dans le sérum. La structure et les propriétés du gel obtenu dépendent des paramètres physico-chimiques du lait. Actuellement, l'effet des équilibres salins entre les micelles de caséine et la phase aqueuse du lait et leur impact sur les propriétés des gels laitiers enzymatiques n'est pas entièrement compris. L'objectif scientifique de l'étude est de mieux comprendre ces liens mécanistiques afin d'optimiser de manière objective le moment du décaillage du gel laitier enzymatique. L'originalité du travail réside d'une part dans la prise en compte d'une description fine de la structure des micelles de caséines et en particulier de ses formes minérales en distinguant le calcium lié aux phosphosérines des caséines ($Ca_{lié}$) et le calcium précipité sous forme de petits granules de phosphate de calcium ($Ca_{pré}$) et d'autre part d'étudier les gels enzymatiques obtenus aux grandes déformations.

Résultats

Après avoir modifié la composition minérale des laits et les avoir gélifiés par ajout de l'enzyme coagulant, une forte corrélation entre les teneurs en $Ca_{lié}$ et $Ca_{pré}$ et les propriétés rhéologiques des gels enzymatiques a été obtenue. La fermeté maximale des gels est positivement corrélée à la teneur en $Ca_{lié}$ des micelles de caséines. Les propriétés viscoélastiques des gels, c'est-à-dire le rapport des contributions visqueuse et élastique, est négativement corrélée à la teneur en $Ca_{pré}$ indépendamment de la fermeté des gels. La cinétique de raffermissement des gels enzymatiques s'explique par les différences d'aptitudes à la fusion des micelles de caséine et de leur réarrangement dans les gels. L'aptitude à la fusion est meilleure lorsque le $Ca_{lié}$ est augmenté et que le $Ca_{pré}$ diminue, conduisant à un réarrangement rapide du réseau protéique et une structure hétérogène.

Perspectives

En distinguant les formes de calcium micellaires, un lien logique entre les équilibres salins du lait, propriétés mécaniques et charge des micelles de caséine ainsi que propriétés de gélification des micelles de caséines a pu être démontré. Les résultats obtenus permettent de prédire les propriétés de coagulation du lait et d'optimiser le moment du décaillage durant la fabrication de fromages.



Réticulation des micelles de caséine pour contrôler la viscosité des boissons hyperprotéinées



En savoir plus

Velazquez-Dominguez A. *et al.*

Influence of enzymatic cross-linking on the apparent viscosity and molecular characteristics of casein micelles at neutral and acidic pH

Food Hydrocolloids . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108552>

Partenariat

- INGREDIA, Arras

- Ecole d'Ingénieurs de PURPAN, Toulouse

Contacts

Guillaume Delaplace et Paulo Peixoto

UMR UMET

guillaume.delaplace@inrae.fr

paulo.perez-de-sa-peixoto@inrae.fr



Contexte

Les boissons hyperprotéinées répondent aux besoins de sportifs ou de populations seniors qui, avec l'âge, sont plus enclines à souffrir de fonte musculaire, de sarcopénie ou de dénutrition suite à une maladie. Les caséines sont des protéines clés du lait car elles apportent des acides aminés essentiels et sont les protéines majoritaires du lait (80 % des protéines totales). L'élaboration de ces boissons peut poser des problèmes de processabilité (colmatage des lignes de transformation industrielles) et d'application à l'usage (déglutition) car la concentration importante en protéine induit une viscosité accrue. De plus, les caséines, organisées en micelles, sont instables au pH visé pour apprécier et faciliter la conservation des boissons. Pour maîtriser la viscosité de ces boissons (pour un taux de protéine donné), on cherche à limiter la dissociation des micelles en les réticulant via l'utilisation d'une enzyme: la transglutaminase microbienne. Malheureusement, peu de données quantitatives sont disponibles pour établir un lien entre taux de réticulation enzymatique (DP), structure de la micelle de caséine (CM) réticulée et viscosité des dispersions à base de caséines.

Résultats

Les expérimentations à différents taux d'incubation et de concentration enzymatique ont permis de mieux

connaître les cinétiques de réticulation envisageables.

Le fractionnement asymétrique de champ de flux (A4F), mené via une collaboration avec la plateforme Purpan, a permis d'établir que la micelle de caséine (CM) réticulée présente à pH 3 une densité apparente comparable à la CM native à pH 7 et une forme plus sphérique due à la réticulation intramoléculaire.

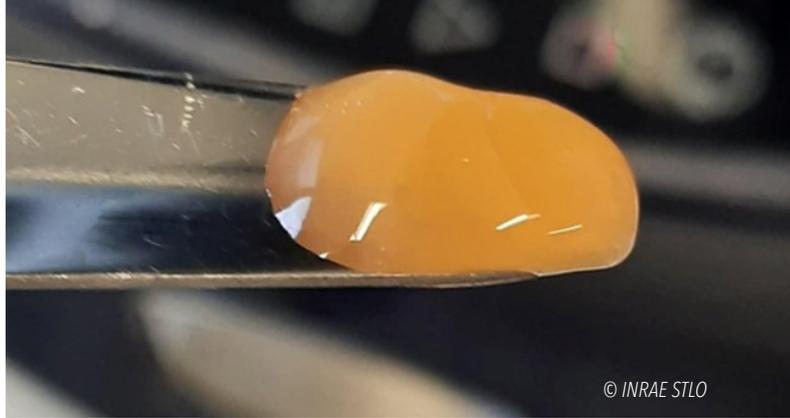
Enfin, une courbe maîtresse a été proposée à un pH acide décrivant l'évolution de la viscosité apparente des dispersions de CM réticulées en fonction du DP. Cette courbe montre le lien entre réticulation et propriété technofonctionnelle.

Perspectives

D'un point de vue fondamental, ces connaissances fournissent des informations sur les changements de structure des micelles de caséine en dessous du point isoélectrique et sur les nouvelles possibilités de contrôler la viscosité des dispersions de caséine acidifiées.

Ces données peuvent être mobilisées pour mettre en place des paramètres de procédés à l'échelle industrielle pour la production de boissons hyperprotéinées riches en caséines.

Au-delà de ces travaux, le partenariat public-privé initié via le labcom ANR Proteinolab (<https://proteinolab.hub.inrae.fr/>) a été pérennisé via une chaire industrielle ANR ProteinoPepS.



© INRAE STLO

Des assemblages de protéines aux propriétés texturantes exceptionnelles



En savoir plus

Soussi Hachfi R. *et al.*

Ionic Strength Dependence of the Complex Coacervation between Lactoferrin and β -Lactoglobulin Foods . 2023

<https://doi.org/10.3390/foods12051040>

Contacts

Saïd Bouhallab et Marie-Hélène Famelart

UMR STLO

said.bouhallab@inrae.fr

marie-helene.famelart@inrae.fr

Contexte

Les industries de l'alimentation et de l'agro-alimentaire axent de plus en plus leur stratégie R&D sur l'innovation et le développement permanent de nouveaux produits et ingrédients afin de s'adapter aux enjeux du marché et à la demande des consommateurs. Cela passe par une bonne connaissance à la fois des propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des aliments et ingrédients de base et de l'effet des procédés de fabrication et de formulation sur ces propriétés.

L'objectif de nos travaux est d'élucider les propriétés rhéologiques et texturales d'assemblages générés par la maîtrise des phénomènes de séparation de phase liquide-liquide (SPLL) dans des mélanges de protéines alimentaires. La connaissance des propriétés rhéologiques donne en effet des informations fondamentales sur la nature et l'intensité des forces d'interaction impliquées dans la constitution du réseau protéique et qui gouvernent les phénomènes de transition telle que la SPLL.

Résultats

Le présent travail se focalise sur la caractérisation rhéologique approfondie des coacervats de deux protéines globulaires dérivées du lait, la β -lactoglobuline (β -LG) et la lactoferrine (LF), dont nous avons élucidé précédemment les mécanismes de

formation. La combinaison de plusieurs méthodes rhéologiques révèle des propriétés texturales exceptionnelles des coacervats de β -LG/LF à faible force ionique et à 20 °C en comparaison des protéines individuelles :

- Une viscosité extrêmement élevée, 2500 fois celle d'une solution de protéines pures à la même concentration;
- Une résistance de réseau de type solide 100 fois moins intense que la résistance à l'écoulement, ce qui indique la présence d'un très faible réseau élastique dans un liquide visqueux;
- Un comportement thixotrope, montrant une déstructuration sous cisaillement réversible, c'est à dire suivie d'une restructuration du coacervat pour un cisaillement limité.

Perspectives

Un des objectifs futurs de ces travaux vise à utiliser ces nouveaux réseaux protéiques comme ingrédients de texturation dans la fabrication des aliments. La formation de ce réseau est cependant sensible à l'augmentation de la force ionique. Pour élargir la palette des applications, le challenge des travaux en cours consiste à contrebalancer cette sensibilité au sel par la variation d'autres paramètres incontournables dans les processus de formulation, telles que la température et les concentrations totales.



Partie 5

Eviter pathogènes,

allergènes,

contaminants et polluants



© AdobeStock

Travailler sur des matières premières alternatives exige de caractériser les contaminants et allergènes associés aux nouvelles filières durables. Nos chercheurs développent des méthodes analytiques pour détecter et suivre les produits nocifs et ainsi assurer l'innocuité des produits alimentaires et non alimentaires.



© AdobeStock

Découverte d'enzymes agissant sur la paroi d'un champignon pathogène du maïs



En savoir plus

Reyre J.L. *et al.*

The maize pathogen *Ustilago maydis* secretes glycoside hydrolases and carbohydrate oxidases directed toward components of the fungal cell wall

Applied Environmental Microbiology . 2022

<https://doi.org/10.1128/aem.01581>

Partenariat

- AFMB, Marseille



Projets supports :

- AIC CAZYFUN (2023-2024)

- ANR JCJC OXIWALL (2024-2027)

- Bourse de thèse école doctorale ED62 AMU

Contacts

Bastien Bissaro, Jean-Guy Berrin et Olivier Tranquet

UMR BBF

bastien.bissaro@inrae.fr

jean-guy.berrin@inrae.fr

olivier.tranquet@inrae.fr



Contexte

Les enzymes actives sur les polysaccharides (CAZymes) constituant la paroi cellulaire fongique (incluant chitine et β -glucanes) sont mal connues. Nos recherches se focalisent sur les CAZymes oxydatives du champignon phytopathogène modèle *Ustilago maydis*, responsable de la maladie du charbon du maïs qui engendre des pertes de production agricole importantes chaque année. Au cours de son cycle infectieux, *Ustilago maydis* est capable de passer de l'état levure à l'état filamenteux, ce qui suggère un remodelage à la fois massif et rapide de sa paroi cellulaire. Son génome présente un petit nombre de gènes codant pour des CAZymes, avec peu de redondance fonctionnelle, ce qui facilite la mise en place des études fonctionnelles.

Résultats

L'analyse des données (post)-génomiques disponibles couplée à des études de phylogénie et de modélisation moléculaire ont permis de sélectionner des CAZymes potentiellement actives sur les β -glucanes et la chitine des parois fongiques. Après production d'une dizaine d'enzymes d'*Ustilago maydis* en système recombinant, des études biochimiques ont permis de révéler que deux d'entre elles (une hydrolase et une oxydase) sont actives sur les β -1,3/ β -1,6-glucanes et leurs oligosaccharides en agissant de façon complémentaire au sein d'une cascade enzymatique plus complexe qui reste à élucider. La

caractérisation détaillée des β -glucanes issus des parois fongiques ainsi que des produits libérés après action des enzymes ont révélé de nouvelles spécificités de substrat parmi les enzymes caractérisées. En parallèle, l'unique LPMO (Lytic Polysaccharide Monooxygenase) d'*Ustilago maydis* a été caractérisée de manière approfondie. Les LPMO sont des enzymes à cuivre largement étudiées pour leur capacité unique à stimuler la dépolymérisation des polymères récalcitrants. Ces dernières années, nous avons assisté à l'expansion des fonctions biologiques divergentes des LPMO. Les résultats de cette étude montrent que la LPMO d'*Ustilago maydis* clive de façon oxydative la chitine commerciale, mais aussi celle issue du champignon, et stimule son hydrolyse par une chitinase. Ces résultats représentent une étape importante dans la compréhension du rôle des LPMO dans le processus de remodelage de la paroi cellulaire fongique au cours du cycle de vie du champignon .

Perspectives

Le décryptage du rôle des CAZymes ciblant la paroi fongique et de leur orchestration permettra d'approfondir la compréhension de la biologie des champignons filamenteux, notamment chez les phytopathogènes, tout en favorisant l'émergence d'une nouvelle génération d'enzymes pour des applications biotechnologiques à partir des polysaccharides fongiques, telles que la conception de nouveaux biomatériaux ou biostimulants.

FOOD SAFETY

© AdobeStock



Analyser les échantillons par pools pour renforcer la surveillance des contaminants chimiques alimentaires



En savoir plus

Ratel J. *et al.*

Implementation of sample pooling to strengthen the surveillance of food chemical safety: Case study of nDL-PCBs in pork meat

Food Chemistry . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137111>

Partenariat

- USC StatSC Oniris, INRAE, Nantes

Projet support:

- ANR SENTINEL (2020-2025, ANR-19-CE21-0011)

Contacts

Jérémy Ratel et Erwan Engel

UR QuaPA

jeremy.ratel@inrae.fr

erwan.engel@inrae.fr



Contexte

La surveillance de la sécurité chimique des aliments repose aujourd'hui sur des méthodes analytiques très sensibles mais coûteuses et lourdes à mettre en œuvre. Cela limite la portée et la fréquence de la surveillance des contaminants chimiques par les autorités sanitaires et empêche quasiment leur utilisation pour l'autocontrôle industriel. Pour surmonter ces limites et améliorer le système de surveillance, une approche basée sur le mélange, ou « pooling », d'échantillons a été mise en œuvre. Au lieu d'analyser n échantillons « un par un » à l'aide de méthodes à haute sensibilité, ces mêmes méthodes sont utilisées pour évaluer des mélanges de n échantillons afin d'identifier les échantillons contaminés à moindre coût et dans des délais beaucoup plus courts. Une étude preuve de concept a été réalisée en prenant le cas de la surveillance des polychlorobiphényles non-dioxine like (PCB-nDL) dans la viande de porc.

Résultats

La première partie de l'étude a consisté à tester la faisabilité de produire des pools résultant de mélange de grand nombre d'échantillons. L'influence de la taille du pool sur la justesse et l'incertitude de la mesure des PCB a été évaluée. Les résultats ont montré que jusqu'à 100 échantillons mélangés, la construction de pools pouvait être

considérée comme valable. Dans la seconde partie de l'étude, des simulations numériques basées sur la stratégie de pooling proposée par le mathématicien Dorfman ont été mises en œuvre à partir d'une base de données de contamination de viandes de porc françaises par les PCB-nDL. Ceci a permis de déterminer le nombre optimal d'échantillons individuels à « pooler » afin d'obtenir le meilleur compromis entre coût et bénéfice. Les résultats des simulations ont montré que pour une prévalence de contamination réaliste de 0,1 %, l'analyse de pools de 25 échantillons de viande réduisait de 19 fois le nombre total de tests par rapport à la méthode classique de surveillance, tout en conservant la sensibilité et la spécificité des résultats. En utilisant le pooling des échantillons, les analyses des contaminants dans les aliments pourraient donc être effectuées à un débit plus élevé et à un coût réduit.

Perspectives

Pour les autorités sanitaires, utiliser le pooling d'échantillons pourrait permettre soit d'effectuer davantage d'analyses pour un contaminant donné, soit de suivre davantage de contaminants pour un coût inchangé. Pour les industriels ou autres acteurs des filières, la mise en commun d'échantillons pour construire les pools pourrait à terme faciliter l'autosurveillance.



© AdobeStock

Devenir de polluants environnementaux au cours de l'élevage d'insectes destinés à l'alimentation animale



En savoir plus

Ratel J. *et al.*

Fate of polychlorobiphenyls in *Tenebrio molitor* larvae: consequences for further use as food and feed

Journal of Insects as Food and Feed . 2022

<https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0104>

Partenariat

- Société d'histoire naturelle Alcide-d'Orbigny

- Société INVERS

Projet support:

- Projet R&D Booster INSECT2FEED financé par la région Auvergne Rhône Alpes.

Contact

Christelle Planche

UR QuaPA

christelle.planche@inrae.fr



Contexte

Face à l'augmentation constante de la population mondiale et la diminution des ressources disponibles, il est nécessaire de trouver des sources de protéines alternatives pour l'alimentation humaine et animale. Les insectes constituent une piste sérieuse pour répondre aux besoins. Parmi la grande variété d'insectes, le ver de farine (*Tenebrio molitor*) est l'espèce la plus élevée et la plus commercialisée en Europe. Cependant, afin d'éviter un nouveau scandale sanitaire et permettre le développement de cette filière, il est nécessaire de pouvoir évaluer et maîtriser les risques chimiques liés à l'utilisation de ces insectes. Face à cet enjeu, cette étude a pour objectif d'évaluer la capacité des larves de *Tenebrio molitor* à bioaccumuler au cours de leur élevage une famille de polluants organiques persistants, les polychlorobiphényles (PCBs), à partir de leur substrat d'alimentation.

Résultats

Grâce à la mise en place à l'échelle pilote d'un élevage expérimental de *Tenebrio molitor* permettant de simuler un élevage industriel, cette étude a permis de montrer qu'une contamination du substrat alimentaire par les PCBs (entre 0,4 et plus de 14 fois le seuil réglementaire) n'a pas d'impact significatif sur la croissance des larves. Cependant, les résultats indiquent qu'au cours de l'élevage de *Tenebrio molitor*, les PCBs contenus

dans le substrat alimentaire peuvent être transférés dans les larves. Les résultats montrent également que le processus de séchage généralement utilisé en vue de leur commercialisation entraîne une concentration de ces contaminants dans les larves. Les larves séchées présentent ainsi des concentrations en PCBs jusqu'à trois fois plus élevées que la concentration initiale de leur substrat. Cela démontre l'importance de contrôler la qualité sanitaire des substrats alimentaires utilisés pour l'élevage d'insectes destinés à l'alimentation animale afin de garantir la sécurité chimique des produits dérivés d'insectes d'ores et déjà sur le marché.

Perspectives

Afin d'évaluer les risques chimiques tout au long de la chaîne alimentaire, il sera maintenant intéressant d'évaluer la bioamplification des PCBs chez les animaux d'élevage nourris avec des larves de *Tenebrio molitor*. Il sera également intéressant d'élargir cette étude à d'autres polluants susceptibles de contaminer les substrats alimentaires des insectes utilisés en élevage. Enfin, il sera nécessaire d'envisager d'autres voies de valorisation (production de biocarburants par exemple) pour les insectes qui seraient identifiés comme impropres à la consommation en raison de leur teneur en contaminants chimiques.

© AdobeStock



La graine de chanvre : une source d'allergènes avec une réactivité croisée potentielle avec la noisette



En savoir plus

Beriziky P. *et al.*

Hemp Seed: An Allergen Source with Potential Cross-Reactivity to Hazelnut
Food Research International . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112932>

Partenariat

- CHU d'Angers

Contact

Wieneke Dijk

UR BIA

wieneke.dijk@inrae.fr



Contexte

Le chanvre est une culture durable à usages multiples qui a connu un fort regain d'intérêt au cours des dernières décennies. La graine de chanvre décortiquée ainsi que ses formes plus transformées émergent sous forme de nouveaux ingrédients alimentaires d'origine végétale grâce à leurs propriétés nutritionnelles intéressantes. L'exposition accrue de la population à la graine de chanvre a déjà révélé des allergies, avec des symptômes allant de manifestations cutanées isolées jusqu'à l'anaphylaxie. Ces allergies peuvent notamment apparaître chez un patient déjà allergique à un autre aliment, c'est ce qu'on appelle une réaction croisée. L'objectif de ce travail est d'évaluer les populations à risque susceptibles de développer une réaction allergique croisée et d'identifier les allergènes impliqués.

Résultats

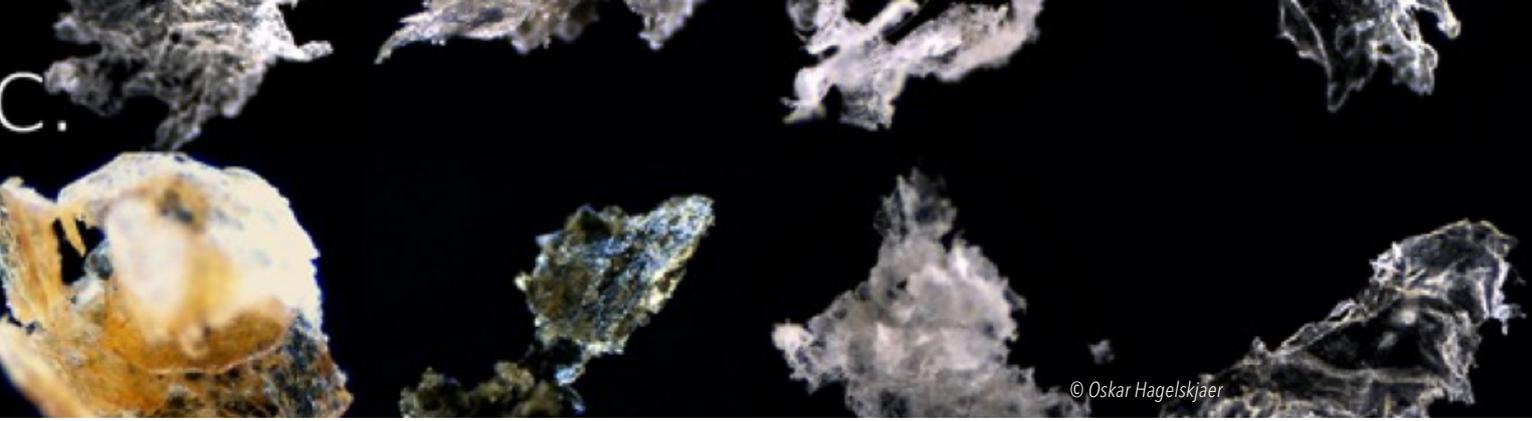
Dans un premier temps, différents extraits de graine de chanvre avec des compositions protéiques bien distinctes ont été préparés et caractérisés. Nous avons ensuite évalué dans quelle mesure les anticorps IgE présents dans le sérum de patients allergiques - les IgE étant principalement impliquées dans des réactions anaphylactiques alimentaires - étaient capables de se lier avec des protéines dans ces extraits. Ces extraits ont été analysés par deux techniques utilisant les séra de patients, des immunoblots et des ELISAs. Différentes populations ont été comparées : des sujets sensibilisés

aux graines de chanvre, des patients sensibilisés ou allergiques à d'autres graines et fruits à coque, et des patients allergiques à l'arachide ou à divers pollens.

De manière intéressante, nos études ont révélé une corrélation entre la sensibilisation à la noisette et la sensibilisation à un extrait spécifique de la graine de chanvre, enrichi en protéines de réserve. Une réactivité croisée entre certaines protéines de la noisette et certaines protéines de la graine de chanvre a été confortée par les résultats des tests ELISA d'inhibition. Nous avons ensuite analysé les protéines de la graine de chanvre reconnues par les IgE des patients sensibilisés ou allergiques à la noisette. C'est ainsi que nous avons identifié les vicilines et les édestines, protéines de réserve majeures de la graine de chanvre, comme des allergènes potentiels.

Perspectives

D'autres études sont nécessaires pour confirmer formellement que les édestines et les vicilines sont des allergènes de la graine de chanvre. De plus, il faudra évaluer en clinique si les graines de chanvre peuvent induire une réaction croisée in vivo chez les sujets allergiques à la noisette, par des tests d'activation des basophiles voire un test de provocation orale à la graine de chanvre. La question de savoir si les protéines de la graine de chanvre présentent aussi une réactivité croisée avec d'autres plantes arborescentes devra également être approfondie.



© Oskar Hagelskjaer

Identification de microplastiques dans les matrices végétales



En savoir plus

Hagelskjaer O. *et al.*

The recovery of aerosol-sized microplastics in highly refractory vegetal matrices for identification by automated Raman microspectroscopy

Chemosphere . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138487>

Partenariat

- Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement (CRBE), CNRS-UT3-Toulouse INP-Ensat

- Géosciences Environnement Toulouse (GET) CNRS, IRD, UPS, CNES, Toulouse

Contacts

Philippe Behra, Gaël Le Roux et Jeroen Sonke

UMR LCA

philippe.behra@toulouse-inp.fr

gael.le-roux@cnrs.fr

jeroen.sonke@Get.omp.eu



Contexte

Notre addiction aux plastiques et notre mauvaise gestion des déchets contribue à une pollution globale par ces matériaux. Les microplastiques d'une taille micrométrique dérivés de cette pollution atteignent les milieux les plus reculés de la planète. Les tourbières ombrotrophes, alimentées uniquement par des apports atmosphériques, ont un fort potentiel comme archives temporelles des dépôts microplastiques atmosphériques. Pour identifier les microplastiques, une méthode spécifique a été développée afin de les extraire de la matière organique de la tourbe tout en s'affranchissant des problèmes de contamination, les plastiques étant ubiquistes dans l'environnement, et du contrôle de la qualité. Cependant, détecter ces matériaux dans une matrice complexe presque exclusivement organique est extrêmement difficile.

Résultats

Nous avons proposé un protocole original de digestion de la tourbe utilisant de l'hypochlorite de sodium ou « eau de Javel » (NaClO) afin d'éliminer la matrice biogénique. NaClO s'est révélé plus efficace que le peroxyde d'hydrogène, ou eau oxygénée (H₂O₂), couramment utilisé. La digestion assistée par de l'air purgé avec NaClO (50 % en volume) permet de digérer 99 % de la matrice en masse, à comparer avec 28 et 75 % pour H₂O₂ (30 % en volume) et le réactif de Fenton (à base de fer), respectivement. Ce protocole a été appliqué à trois

échantillons de mousse de sphaigne commerciale, dans lesquels des particules de microplastiques, entre 0,8 et 65,4 µm, ont été détectées par microspectroscopie Raman. Le pourcentage massique de microplastiques a été déterminé à 0,012 %, correspondant à 129 000 particules de microplastiques par gramme, dont 62 et 80 % étaient inférieures à 5 et 10 µm, respectivement, représentant seulement 0,4 (500 ng) et 3,2 % (4 µg) de la masse totale de microplastiques, respectivement. Ces résultats soulignent l'importance d'identifier des particules de moins de 5 µm lors de l'étude du dépôt de microplastiques atmosphériques. La récupération des microplastiques suite au protocole complet a été estimée à 60 %. Ce protocole permet d'isoler et de pré-concentrer la plupart des microplastiques de la taille des aérosols dans de grandes quantités de matrices végétales réfractaires, et de numériser automatiquement par microspectroscopie Raman des milliers de particules à une résolution spatiale de l'ordre du µm².

Perspectives

Ce travail devrait permettre de comprendre comment les microplastiques se déposent dans les tourbières afin de mieux évaluer leur impact sur ces écosystèmes fragiles et sur l'environnement dans son ensemble, et d'étudier la photodégradation des microplastiques en fonction du type de polymères et de rayonnement.

Partie 6

Intégrer l'impact environnemental et éco-concevoir



L'économie circulaire propose un système sans déchet. Concevoir dans ce système des produits et matériaux biosourcés exige d'explorer les possibilités de réutilisation du produit ou la valorisation efficace des co-produits et résidus. En ce sens, nos chercheurs élaborent de nouvelles stratégies biotechnologiques pour concevoir des matériaux ou produire des molécules à partir des co-produits et résidus et en optimiser les propriétés d'usage. Ils estiment également l'impact environnemental de ces productions et de leurs usages.



© Marine Colpaert - Pizzas fromages prêtes à consommer, industrielles, assemblées-maison et totalement faites-maison



Les pratiques à domicile des consommateurs ont une importance majeure dans les impacts environnementaux des produits alimentaires



En savoir plus

Cortesi A. *et al.*

Contribution of consumer practices to the environmental impacts of pizzas

Sustainable Production and Consumption . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.002>

Contacts

Caroline Penicaud, Anne Saint-Eve et Isabelle Souchon

UMR SayFood et UMR SQPOV

caroline.penicaud@inrae.fr

anne.saint-eve@inrae.fr

isabelle.souchon@inrae.fr



Contexte

La production et la consommation d'aliments ont un impact important sur l'environnement. Alors que les impacts environnementaux de la production agricole des aliments sont largement étudiés, les effets environnementaux associés à la préparation à domicile des aliments par les consommateurs sont très peu connus. Il semble crucial d'apporter des éléments pour documenter ces effets, afin d'identifier les voies d'amélioration environnementale les plus pertinentes pour la production alimentaire et d'orienter les comportements des consommateurs vers des comportements vertueux sur le plan environnemental.

Résultats

Nous avons évalué l'influence des pratiques de préparation à domicile sur les impacts environnementaux d'un produit alimentaire. La pizza a été choisie comme modèle d'étude, préparée à l'aide de différentes méthodes de fabrication (industrielles, assemblées à domicile et totalement faites maison) par soixante-neuf participants recrutés pour l'étude. Les impacts environnementaux ont été calculés par analyse du cycle de vie. Les pratiques peuvent varier considérablement d'un consommateur à l'autre (temps de préchauffage du four, gaspillage alimentaire...), ce qui a une influence significative sur les impacts environnementaux finaux des pizzas. Par exemple, la variabilité de durée d'usage du four domestique se traduisait par un doublement de certains impacts environnementaux à l'échelle du cycle de vie des pizzas.

Par ailleurs, nous avons comparé la performance environnementale des pizzas selon leurs modes de préparation et leurs recettes (une pizza jambon-fromage et une pizza fromages, préparées selon chacune des trois méthodes). Certains impacts environnementaux étaient davantage affectés par la recette que le mode de préparation : la pizza fromages générerait alors plus d'impacts que la pizza jambon-fromages. Pour d'autres indicateurs, notamment ceux sensibles à la consommation électrique, la préparation intégralement à domicile tendait à générer des impacts plus importants, mais cet effet dépendait beaucoup des pratiques des consommateurs.

Enfin, suite aux dégustations des pizzas, les consommateurs ont déclaré préférer les pizzas faites maison et les ont perçues comme ayant moins d'impact sur l'environnement, ce qui n'est pas forcément en accord avec nos résultats.

Perspectives

Afin de décrire correctement les impacts environnementaux des aliments, il est important d'intégrer les pratiques des consommateurs dans les évaluations environnementales. Cependant, très peu de données sont disponibles pour documenter ces pratiques, un travail important reste à faire pour être en mesure de collecter ces données. Par ailleurs, informer les consommateurs des impacts environnementaux de leurs pratiques en cuisine pourrait être utile pour les inciter à des comportements plus vertueux.



©Françoise Irlinger - Produits mixant protéines animales (lait) et végétales (pois)



Impacts environnementaux de produits fermentés mixant protéines végétales et animales



En savoir plus

Huguet J. *et al.*

Environmental performance of mixed animal and plant protein sources for designing new fermented foods

Cleaner Environmental Systems . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100115>

Huguet J. *et al.*

Dataset about the Life Cycle Assessment of new fermented food products mixing cow milk and pea protein sources

Data in Brief . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109263>

Partenariat

- UMRF

- UMR SQPOV, INRAE, Aix-Marseille Université - Faculté des Sciences, Avignon

- PSAE

Projet support: ANR DIET+

Contacts

Caroline Penicaud et Anne Saint-Eve

UMR SayFood

caroline.penicaud@inrae.fr

anne.saint-eve@inrae.fr



Contexte

Les alternatives végétales aux produits laitiers suscitent beaucoup d'intérêt pour soutenir la transition alimentaire vers des régimes plus végétaux. Leur offre sur le marché est d'ailleurs en pleine expansion. On suppose couramment que ces produits présenteraient des avantages environnementaux par rapport aux produits laitiers, sans que cela ne soit actuellement démontré.

Pour pallier ce manque, nous avons quantifié les performances environnementales de nouveaux produits fermentés créés en utilisant différents mélanges de sources de protéines d'origine végétale (pois) et animale (lait de vache) et préparés selon un procédé de technologie fromagère inspiré de celui de la production de camembert. Ces performances environnementales ont été comparées à celles d'autres produits, préparés selon le même procédé mais à base de lait (camembert) ou selon d'autres technologies et à base de légumineuses (tofu, houmous).

Résultats

Les Analyses du Cycle de Vie des produits fermentés mixant lait et protéines de pois ont révélé que la production de lait et l'affinage des produits sont les étapes générant le plus d'impacts environnementaux. Plus les produits sont riches en protéines de pois, moins leur impact environnemental est grand, démontrant le bénéfice environnemental à

substituer en partie le lait par le pois. Par exemple, le produit préparé totalement à base de protéines de pois présentait un impact sur le changement climatique presque divisé par deux par rapport au produit mixant 25 % de protéines de pois et 75 % de protéines de lait.

Cependant, tous les produits à base de pois présentent des impacts environnementaux substantiels en raison de la forte consommation d'énergie (et d'eau) de leur procédé de fabrication. C'est pourquoi les produits contenant des protéines de pois se sont révélés globalement plus impactants sur l'environnement que le camembert, le houmous ou le tofu. Même si ces résultats doivent être nuancés par la différence dans les sources de données utilisées (mesures sur site de production pour les mélanges lait-pois vs données issues de la littérature pour les autres produits), nos résultats montrent que le procédé de transformation d'un produit peut avoir des incidences importantes sur l'environnement, qui peuvent contrebalancer les avantages d'un changement de matière première.

Perspectives

Ces travaux montrent l'intérêt de simplifier et d'optimiser les procédés de production de produits végétaux fermentés. Ils montrent également que la conception de ce type de produits doit intégrer la conception du procédé et les impacts environnementaux associés dès l'amont de la phase de conception.



© Alejandra Gomez -Photo prise à AGROMAT

Production et évaluation environnementale de panneaux d'isolation acoustique à base de tige de tournesol



En savoir plus

Gomez-Campos A. *et al.*

Towards fossil-carbon free buildings: production and environmental performance of innovative sound absorbing panels made from sunflower straw

Journal of Cleaner Production . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136620>

Partenariat

- Halle de transfert technologique AGROMAT (UMR LCA)
- Ateliers LUMA, centre culturel expérimental basé à Arles.

Contacts

Caroline Sablayrolles, Claire Vialle et Lorie Hamelin

UMR LCA et UMR TBI

caroline.sablayrolles@ensiacet.fr

claire.vialle@ipst-cnam.fr

lorie.hamelin@insa-toulouse.fr



Contexte

Les tiges de tournesol représentent une matière première d'intérêt pour la production de matériaux biosourcés mais leur récolte suscite des inquiétudes, notamment quant à l'épuisement des stocks de carbone des sols. Les ACV disponibles sur l'utilisation de la biomasse résiduelle du tournesol n'abordent pas la question de l'épuisement des stocks de carbone et se limitent souvent à la phase agricole de la production de tournesol. Pour combler cette lacune, l'objectif de la présente étude est de déterminer les conditions environnementalement pertinentes pour récolter les tiges de tournesol pour une application de production de panneaux d'isolation acoustique au lieu de laisser ces tiges sur le sol. Pour cela, une analyse de cycle de vie conséquente intégrant la dynamique du carbone dans l'évaluation a été réalisée.

Résultats

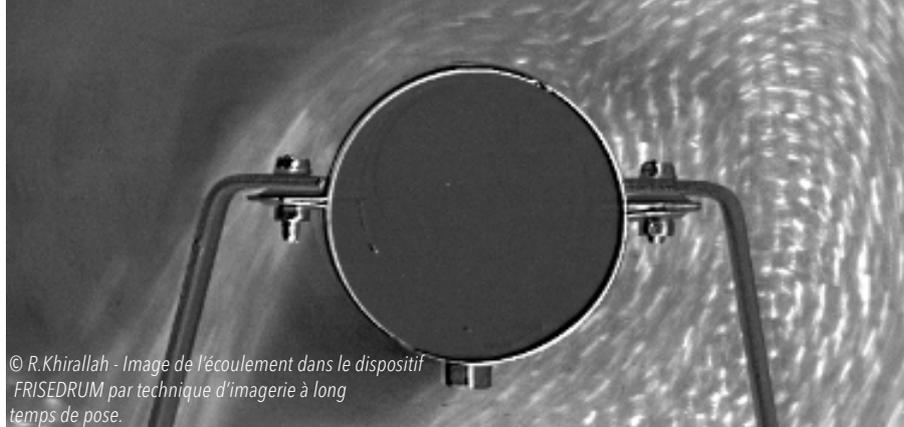
La présente étude examine un cas de démonstration réel d'un champ de tournesol de quatre hectares en Camargue (France) où des tiges de tournesol ont été collectées après récolte des graines et utilisées. Des panneaux de moelle de tournesol, située en partie centrale de la tige, ont été produits en testant différents liants naturels. Les formulations d'amidon et de chitosan se sont avérées être les plus adaptées à une application en tant que matériaux d'absorption acoustique. Les panneaux

de moelle de tournesol, représentent une option intéressante pour les applications d'absorption acoustique à basse fréquence, en particulier la formulation à base d'amidon.

Les résultats de l'analyse de cycle de vie montrent que la valorisation des tiges de tournesol comme panneaux d'absorption acoustique présente un avantage environnemental pour sept des neuf catégories d'impact évaluées, par rapport aux alternatives commerciales. Le remplacement des panneaux en mousse de mélamine par l'une ou l'autre des formulations de panneaux à base de moelle de tournesol a le potentiel de réduire les impacts, notamment sur le changement climatique (50-70 %).

Perspectives

L'efficacité environnementale des panneaux pourrait être améliorée en augmentant la quantité de tiges récoltées. Cependant, cela entraînerait un éventuel épuisement des nutriments dans le sol. Une autre solution pourrait être une adaptation des moissonneuses-batteuses actuelles afin de permettre la récolte simultanée des graines et des tiges, ce qui limiterait les émissions liées à la combustion du diesel par les machines agricoles.



© R.Khirallah - Image de l'écoulement dans le dispositif FRISEDRUM par technique d'imagerie à long temps de pose.

Comment refroidir efficacement la matière en grain biosourcée ?



En savoir plus

Rioual F. *et al.*

Characterisation of the granular dynamics at the interface between a pipe and a granular flow in a rotating drum

Particuology . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.05.003>

Contact

François Rioual

UR FRISE

francois.rioual@inrae.fr



Contexte

La réfrigération est généralement une étape finale incontournable dans la chaîne de procédés pour assurer le conditionnement et le convoyage du matériau en toute sécurité. Réfrigérer un matériau granulaire biosourcé représente un défi important en termes d'efficacité énergétique dans de nombreux secteurs de l'industrie agroalimentaire (sucre, cacao, café, graines oléagineuses, etc.) et de la bioénergie (pellet de bois, boue granulée, etc.). En outre, les propriétés hygroscopiques de ce type de matériau granulaire biosourcé entraînent une absorption d'humidité de l'air ambiant et un risque d'agglomération du matériau en l'absence de réfrigération. Les échangeurs de chaleur à contact indirect assurent un transfert thermique par conduction entre un milieu granulaire en écoulement et un fluide réfrigérant circulant dans une conduite à travers une surface d'échange. Ils représentent une alternative intéressante aux échangeurs à contact direct (typiquement les lits fluidisés) en raison de leur potentielle sobriété énergétique liée notamment à un plus faible volume de fluide réfrigérant mobilisé. Nous proposons un nouveau type d'échangeur indirect, FRISEDRUM, constitué d'une conduite axiale et d'un tambour tournant, qui a l'avantage d'être simple et compact avec un objectif d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Résultats

La modélisation de l'écoulement

dans l'échangeur prédit l'existence sous certaines conditions d'un régime « Biflow » pour lequel l'écoulement apparaît à la fois sur la partie inférieure et supérieure de la conduite. Ce comportement a été confirmé par imagerie sur prototype lors des expériences. Ce régime d'écoulement est favorable au transfert entre la conduite et le matériau en favorisant la convection, c'est-à-dire la capacité à transporter l'énergie thermique du fait du mouvement propre des grains.

L'analyse couplée des champs de vitesses et de fraction volumique des grains nous permet d'identifier des zones caractéristiques autour de la conduite : zone en déplétion en aval de la conduite – zone quasi-statique, à faible vitesse et dense en amont et sous la conduite – zone à vitesse rapide et diluée au-dessus de la conduite. Leur évolution nous donne de premières informations sur le transfert thermique.

Perspectives

La prochaine étape consiste à accéder à un coefficient d'échange conduite/matériau pour identifier les conditions paramétriques d'un transfert maximal.

L'analyse des modes de transfert thermique pour la matière granulaire biosourcée et le couplage futur avec la modélisation numérique du procédé apporteront des informations microstructurelles sur le scénario de transfert autour de la conduite, ce qui nous guidera vers de nouvelles voies d'intensification de ce transfert.



© AdobeStock

Éco-conception d'une bioraffinerie intégrée pour l'extraction et la purification de Rubisco à partir de résidus végétaux



En savoir plus

S. Bayomie O. *et al.*

Cleaner green protein production from vegetable byproducts: Energy recovery and water reuse strategies

Sustainable Production and Consumption . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.004>

Partenariat

- AgroParisTech
- Université de Wageningen
- Université Nikola Tesla (Serbie)
- Cosun (Pays-Bas)
- Ruitenberg Ingredients (Pays-Bas)
- Bionet Engineering (Espagne)
- Innovarum (Espagne)

Projet support :

GreenProtein (<https://greenproteinproject.eu/>)

Contact

Hedi Romdhana

UMR SayFood

hedi.romdhana@inrae.fr



Contexte

La Rubisco se distingue par ses qualités nutritionnelles et ses applications dans l'alimentation, et la production de matériaux biodégradables. L'exploitation de ces protéines végétales, en particulier pour l'obtention de protéines à haute valeur nutritive, nécessite l'élaboration de techniques spécifiques pour leur purification et concentration, tout en préservant leurs propriétés essentielles. Notre étude consiste à optimiser la conception du procédé ainsi que d'évaluer son empreinte environnementale.

La purification de la Rubisco à partir de déchets de salades ou de feuilles de betteraves commence par le broyage des feuilles pour libérer les cellules végétales, suivi d'un pressage sous vide. Le jus vert est ensuite ajusté en pH pour anticiper la précipitation des protéines, puis traité thermiquement. Après clarification et microfiltration, le jus est concentré via ultrafiltration, puis purifié davantage par chromatographie.

Un simulateur Python a été développé pour modéliser l'ensemble du procédé, offrant des paramètres pour le dimensionnement, le scale-up, l'intégration et l'intensification du procédé. Les données générées par la simulation sont également utilisées pour l'ACV.

Résultats

Cette approche a permis de prédire les économies potentielles, notamment

en termes d'utilités énergétiques (~87 % en chauffage et ~45 % en refroidissement), ainsi que de ressources en eau (~22 %). Une synthèse du procédé a été élaborée en identifiant les couplages thermiques et massiques.

L'outil SimaPro a été utilisé pour compiler les données d'inventaire du procédé et comparer les impacts environnementaux de la purification de la Rubisco à partir de sous-produits de l'industrie agroalimentaire ainsi que d'autres ressources.

La RuBisCo a un impact environnemental moindre que l'œuf, plus élevé que la protéine de soja, et un impact comparable à celui des microalgues. Cette étude a permis d'identifier l'utilisation de l'électricité comme principal point sensible du procédé.

Perspectives

Une perspective d'amélioration du procédé consiste à mettre en œuvre une approche Pinch-thermo (ou Pinch-mécanique) comme extension de l'analyse Pinch-thermique et massique développée dans cette étude. Cette approche offre de nouvelles opportunités pour optimiser l'utilisation du froid obtenu par des machines à compression, ce qui permet de décarboner le procédé. En effet, l'utilisation du froid constitue un poste majeur, étant donné que tout au long de la ligne de production, les flux de matières doivent être maintenus à une température inférieure à quatre degrés.



© AdobeStock

Des déchets de maraîchage pour des matériaux biosourcés utilisés par les maraîchers : l'économie circulaire vertueuse



En savoir plus

Bourmaud A. *et al.*

A circular approach for the valorization of tomato by-product in biodegradable injected materials for horticulture sector

Polymers . 2023

<https://doi.org/10.3390/polym15040820>

Partenariat

- IRDL UMR CNRS 6027, Université de Bretagne Sud, Lorient

Projet support:

Programme opérationnel FEDER-FSE 2014-2020, projet SOLUSERRE PL0016383

Contacts

Estelle Bonnin et Johnny Beaugrand

UR BIA

estelle.bonnin@inrae.fr

johnny.beaugrand@inrae.fr



Contexte

La culture de tomate en serre est un segment très consommateur d'accessoires plastiques d'origine fossile tels que les clips qui fixent la tige sur la ficelle et les porte-bouquets qui renforcent le pédoncule. Lorsque la serre est vidée en fin de récolte, la présence de ces contaminants plastiques trop nombreux pour être triés rend impossible le compostage des déchets végétaux. Ce déchet mixte représente des millions de tonne/an en Europe et son incinération est coûteuse à la fois économiquement et environnementalement. Le projet SOLUSERRE propose l'utilisation de la biomasse des déchets de plants de tomate comme renforts afin de développer de nouveaux matériaux composites dégradables et injectables permettant de substituer les plastiques traditionnels pour la production de clips et porte-bouquets.

A partir de co-produits de tomate générés lors de l'évacuation des plantes en fin de production, nous avons caractérisé les particules obtenues par broyage, leur comportement à la dégradation enzymatique, ainsi que les propriétés morphologiques, mécaniques et de biodégradabilité des biocomposites préparés à partir de différentes matrices renforcées par l'ajout de co-produit.

Résultats

Les particules issues de tiges et feuilles de tomate broyées présentent une faible variabilité de composition

selon la taille de particules. En particulier la teneur en lignines, polymère hydrophobe et récalcitrant à la dégradation, augmente avec la taille de particules. Cela est à relier avec les comportements au broyage des différents tissus constitutifs des tiges et feuilles. Les matériaux composites constitués d'une matrice de Poly-Butylène-Succinate et de particules de tomate présentent des propriétés mécaniques tout à fait intéressantes, qui augmentent régulièrement avec la taille des particules, atteignant leur maximum pour des lots d'une longueur moyenne de 500 μm . En combinant ces particules de tomates avec une gamme de matrices biodégradables (PHA, norme home compost), nous avons démontré qu'elles offraient des propriétés mécaniques satisfaisantes par rapport aux plastiques pétrosourcés. Dans la plupart des cas, les particules de tomate agissent comme un renfort mécanique et pas seulement comme remplissage.

Perspectives

Des travaux ultérieurs ont démontré la biodégradabilité de la biomasse issue de tomate et des composites renforcés par cette biomasse, en combinant des approches de biochimie et d'imagerie. Ces travaux sont prêts à être publiés et démontreront la faisabilité d'une chaîne de valeur innovante et circulaire. Au-delà, nous rechercherons des possibilités de mettre en place une étape de prématuration pour réaliser des essais en serre en conditions réelles en collaboration avec des maraîchers.



© Eqwan Roslan - Stockage des déchets alimentaires broyés. Dispositif expérimental pour la fermentation lactique réalisée avec un mélange de déchets représentatif de la composition de déchets alimentaires en Europe.

La fermentation lactique, une nouvelle stratégie de stockage des déchets alimentaires avant valorisation



En savoir plus

Roslan E. *et al.*

Lactic acid fermentation of food waste as storage method prior to biohydrogen production: effect of storage temperature on biohydrogen potential and microbial communities

Bioresource Technology . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128985>

Partenariat

- Institute of Sustainable Energy & Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Universiti Tenaga Nasional (UNITEN) Malaysia

Projet support:

Thèse en co-tutelle INRAE (ED GAIA) et UNITEN

Contacts

Eric Trably et Hélène Carrère

UR LBE

eric.trably@inrae.fr

helene.carrere@inrae.fr



Contexte

Les pertes et gaspillages alimentaires représentent 10 millions de tonnes par an. La réduction de ces déchets et leur valorisation constituent un enjeu pour la transition écologique. En raison de leur composition riche en matière organique, ils représentent un substrat de choix pour la production de biohydrogène par fermentation sombre. Le biohydrogène, vecteur énergétique du futur, est caractérisé par une forte densité énergétique et dont la combustion produit uniquement de l'eau. Cependant, la principale limite pour l'utilisation des déchets alimentaires est la perte en potentiel de production d'hydrogène pouvant être observée pendant le transport et le stockage, en raison de leur fermentation spontanée. L'originalité de ces travaux réside dans l'application de la fermentation lactique, procédé utilisé pour la conservation des aliments et des cultures, en tant que procédé de stockage des déchets alimentaires en amont de leur fermentation sombre.

Résultats

La fermentation lactique des déchets alimentaires (concentration en matière sèche 10 %) a été réalisée en mode discontinu à 4 °C, 10 °C, 23 °C, 35 °C, 45 °C et 55 °C sur une durée de 15 jours, en conditions anaérobies et sans agitation. Des tests de potentiel hydrogène (aussi dénommé BHP pour 'Biological Hydrogen Potential') ont ensuite été réalisés sans ajout

d'inoculum à pH=6 et 37 °C.

Les résultats ont montré que la température était un paramètre crucial pour la distribution de métabolites en fin de stockage. Le bioéthanol a été majoritaire aux faibles températures alors que l'acide lactique a été favorisé aux températures plus élevées. Dans tous les cas, la fermentation lactique s'est révélée efficace pour conserver les déchets alimentaires, le stockage contrôlé n'ayant pas affecté le rendement hydrogène (95 ± 25 mL/g de matière organique). De plus, les cinétiques de production de biohydrogène ont été améliorées de près de 57 % après fermentation lactique. Les analyses microbiologiques ont montré la dominance de bactéries lactiques lors du stockage, notamment *Lactobacillus* sp., *Lactococcus* sp., *Weissella* sp., *Streptococcus* sp. et *Bacillus* sp. Des bactéries productrices d'hydrogène, principalement *Clostridium* sp, ont émergé pendant la phase de fermentation sombre, co-existant avec les bactéries lactiques initialement présentes.

Perspectives

Ces résultats sur le couplage de la fermentation lactique en amont de la fermentation sombre ouvrent de nouvelles possibilités pour la gestion des déchets alimentaires, et plus généralement des déchets facilement biodégradables, et leur valorisation en biohydrogène dans une large gamme de climats.

© P.H. Ducrot - Du blé aux produits finis en passant par les lignines greffées

La biocatalyse pour l'amélioration du potentiel des lignines comme additifs dans des formulations industrielles



En savoir plus

Sarieddine A. *et al.*

Biocatalytic selective acylation of technical lignins: a new route for the design of new biobased additives for industrial formulations

Frontiers in Chemistry . 2023

<https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1239479>

Partenariat

- URCOM UR 3221, Université Le Havre
- UMR FARE, INRAE, Université de Reims Champagne Ardenne, Reims
- IFF-Lucas Meyer Cosmetics (LMC) Massy

Valorisation

Brevet No. 23 305556.5 (2023)

"Emulsifying agent based on lignin fraction and uses thereof"

Contacts

Pau-Henri Ducrot et Florian Pion

UMR IJPB

paul-henri.ducrot@inrae.fr

florian.pion@inrae.fr



Contexte

Les consommateurs sont de plus en plus attirés et guidés dans leurs choix par la naturalité des ingrédients utilisés dans les produits industriels, si bien que les industriels sont avides de solutions pour remplacer leurs ingrédients ou additifs pétrosourcés par des produits biosourcés.

Dans ce cadre, notre étude propose de remplacer les additifs antioxydants utilisés en chimie des polymères, ainsi que des émulsifiants cosmétiques, par des dérivés de lignines techniques.

Résultats

Cette étude a permis de mettre au point un procédé en deux étapes pour la fonctionnalisation d'une lignine technique modèle. Cette lignine, issue d'un procédé de bio raffinage dit « alcalin », ne possède pas de propriétés de solubilité compatibles avec les procédés de formulation de polymères ou d'émulsions cosmétiques. La première étape consiste à fractionner cette lignine par deux solvants successifs, ce qui permet d'obtenir une fraction soluble dans la butanone homogène en termes de distribution de masse molaire et de concentration en groupements hydroxyles. Dans une deuxième étape, cette fraction est soumise à une estérification enzymatique utilisant une enzyme supportée facilement recyclable et des acides aliphatiques de longueur de chaîne variable. Une étude exhaustive des conditions de réaction a été menée pour optimiser le procédé et, en combinant des méthodes de chimie analytique utilisées en chimie des

esters d'acides gras et celles dédiées aux lignines, nous avons mis en place une méthodologie analytique, robuste et transposable à d'autres types de substrats qui permet de décrire de manière satisfaisante l'impact structural du procédé sur la lignine de départ.

Ces lignines greffées ont été ensuite incorporées en différentes proportions dans des polymères synthétiques suivant plusieurs modes de formulation. Les propriétés rhéologiques, thermomécaniques et de résistance à l'oxydation de ces polymères additivés ont été étudiées et montrent l'intérêt significatif de l'utilisation des lignines greffées issues de notre procédé par rapport à la lignine de départ. Parallèlement, ces mêmes lignines ont été utilisées comme émulsifiants cosmétiques et ont permis d'améliorer la stabilité et les propriétés sensorielles des émulsions eau-dans-huile.

Perspectives

Pour poursuivre les collaborations académiques et industrielles établies au cours de cette étude, nous envisageons de mener des études sur les relations structure-activité, en variant acides gras et lignine de départ. L'objectif est de développer de nouveaux additifs antioxydants optimisés pour l'industrie des polyoléfinés et des polyesters, tout en travaillant à de nouveaux émulsifiants cosmétiques. Actuellement, nous sommes en phase de formulation pilote pour des produits, tels que du mascara et des fonds de teint en collaboration avec LMC.



© Florent Bouchon-
Réacteur de Couette-Taylor
Electrochimique (eCTR) –
Version 1.0

eCTR : Un réacteur innovant pour l'étude de la formation et du vieillissement des biofilms électroactifs



En savoir plus

Bouchon F. *et al.*

First electrochemical Couette-Taylor reactor for studying the influence of transport phenomena on electrochemical kinetics

Chemical Engineering Science . 2023

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119103>

Partenariat

- Laboratoire de Génie Chimique

Projet support:

ANR BIOTUBA (ANR-17-CE06-0015-01, 2018-2024)

Contacts

Yannick Fayolle, Théodore Bouchez et Ahlem Filali

UR PROSE

yannick.fayolle@inrae.fr

theodore.bouchez@inrae.fr

ahlem.filali@inrae.fr



Contexte

Les procédés électromicrobiens connaissent actuellement un fort développement dans le domaine des biotechnologies environnementales pour la valorisation de la matière organique résiduaire. Leur application au niveau industriel se heurte encore à la difficulté de maintenir les performances de ces systèmes complexes sur le long-terme. La variabilité de cette efficacité est liée notamment au vieillissement des biofilms développés à la surface des électrodes, encore peu étudié à ce jour par manque de système expérimental adapté permettant de développer et maintenir sur le long terme des biofilms électromicrobiens reproductibles.

Résultats

Les travaux, en collaboration avec le Laboratoire de Génie Chimique, ont permis de concevoir un réacteur innovant de Couette-Taylor électrochimique de laboratoire (eCTR) répondant aux limitations des systèmes expérimentaux de la littérature. Ce réacteur, de 3,6L et alimenté en eaux usées réelles, est composé de deux cylindres concentriques dont une partie interne mobile intégrant un ensemble de 20 électrodes indépendantes de grandes surfaces (18 cm²) constituant les anodes. La vitesse de ce cylindre intérieur permet de fixer le régime hydrodynamique au sein du réacteur ainsi que la contrainte de cisaillement

appliquée au niveau de l'ensemble des électrodes.

Pour chacune des conditions opératoires appliquées, ce réacteur a permis d'obtenir des biofilms reproductibles sur des triplicats d'électrodes sur une durée de suivi totale de 347 jours. Cette reproductibilité a été évaluée pour différents régimes hydrodynamiques sur la base des courants générés et de la diversité microbienne des biofilms. Ces résultats ont permis de mettre en évidence que le contrôle et l'homogénéisation des écoulements appliqués sur les bio-électrodes est un facteur prépondérant de la répétabilité des performances des technologies électro-microbiennes.

Perspectives

Une version améliorée du réacteur a été conçue. Elle permet de prélever individuellement les électrodes afin de permettre la caractérisation structurale des biofilms mais également de réaliser des expérimentations court-terme. Celui-ci permettra à la fois de tester différentes stratégies de contrôle des biofilms via l'application de contraintes hydrodynamiques, mais également de recueillir de nouvelles données relatives aux propriétés des biofilms développés.

Contactez nos unités



Auvergne - Rhône-Alpes

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



Bourgogne - Franche Comté

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

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



PROCÉDÉS ALIMENTAIRES ET MICROBIOLOGIQUES (UMR PAM)

AGROSUP DIJON - ERASME
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 OPAALE)

INRAE RENNES - BEAUREGARD
17 avenue de Cucillé CS 64427 35044 RENNES cedex
+33 (0)2 23 48 21 55
anne.tremier@inrae.fr

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

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



Grand-Est

FRACTIONNEMENT DES AGRO-RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT

(UMR FARE)

INRAE - Université de Reims Champagne Ardenne - Centre de recherche en environnement et agronomie
51686 REIMS CEDEX 2
33 (0)3 26 77 35 92
gabriel.paes@inrae.fr



Hauts-de-France

UNITE MATERIAUX ET TRANSFORMATIONS (UMR UMET)

CNRS - Université de Lille 1 - Ecole nationale supérieure de Chimie - INRAE
59651 VILLENEUVE-D'ASCQ Cedex
33 (0)3 20 43 54 00
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)

Campus Agro Paris-Saclay, bâtiment E, 22 place de l'agronomie
91120 PALAISEAU
+33 (0)1 89 10 11 32
catherine.bonazzi@inrae.fr

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

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

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

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

Nouvelle Aquitaine

ŒNOLOGIE (UMR Œ)

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



Contactez nos unités



INSTITUT DE MECANIQUE ET INGENIERIE DE BORDEAUX (USC I2M)

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

Occitanie Pyrénées-Méditerranée

INGENIERIE DES AGROPOLYMERES ET TECHNOLOGIES EMERGENTES (UMR IATE)

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



SCIENCES POUR L'AGROLOGIE (UMR SPO)

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

LABORATOIRE DE BIOTECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT (UR LBE)

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



PECH ROUGE UNITE EXPERIMENTALE (UE PR)

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

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



TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (UMS TWB)

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 (USC StatSC)

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

GENIE DES PROCÉDÉS ENVIRONNEMENT - AGROALIMENTAIRE (USC GEPEA)

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

Provence - Alpes - Côte d'Azur

BIODIVERSITE ET BIOTECHNOLOGIE FONGIQUES (UMR BBF)

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



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

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



ARCHITECTURE ET FONCTION DES MACROMOLECULES BIOLOGIQUES (USC AFMB)

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





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

Rejoignez-nous sur :



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

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

