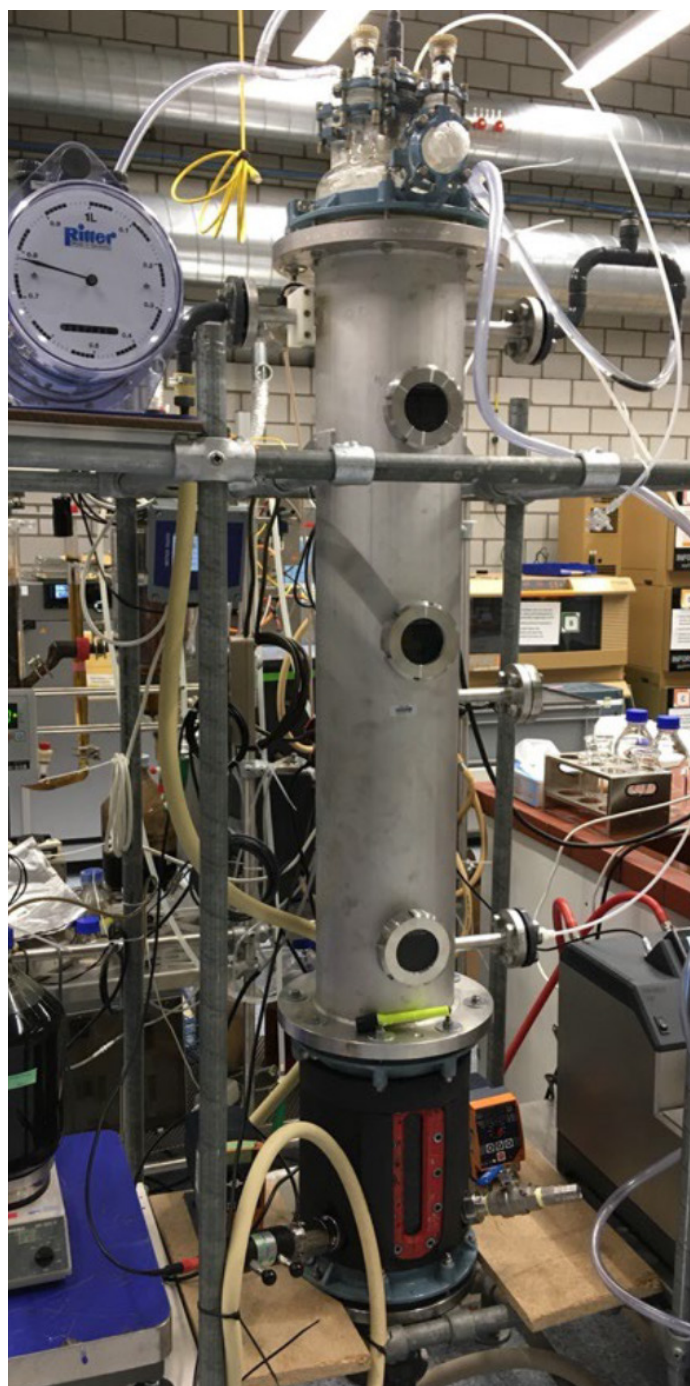


DE LA CHALEUR À PARTIR DE RÉSIDUS BIOGÉNIQUES

Les biodéchets industriels liquides contiennent une grande quantité de carbone, et ainsi d'énergie. Une équipe de chercheurs de la Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW) a étudié, en collaboration avec des partenaires autrichiens, un nouveau concept pour le recyclage de ces déchets : Celui-ci permet d'obtenir du biométhane et du charbon végétal et de produire de la chaleur industrielle à haute température à des fins industrielles. La « preuve de concept » a été apportée, mais des obstacles techniques et une rentabilité insuffisante empêchent encore toute application commerciale.

L'économie circulaire signifie que les résidus sont réutilisés et qu'il n'y a plus besoin d'éliminer les déchets. Cette approche « zéro déchet » est appliquée dans le cadre d'un projet de recherche mené par l'Institut de chimie et de biotechnologie de la ZHAW. Le projet intitulé « Valorisation of industrial residues for a sustainable industry » (VARESI) vise à valoriser les résidus organiques directement dans les entreprises industrielles afin de fournir de la chaleur industrielle.

Des déchets industriels organiques liquides constituent le point de départ. En raison de leur forte teneur en eau, ils sont difficilement réutilisables, mais ils présentent une teneur élevée en carbone, ce qui les rend précieux sur le plan éner-



Grâce à cette installation expérimentale, les chercheurs de la ZHAW ont apporté la « preuve de concept » du processus VARESI. Le fermenteur EGSB du laboratoire avait une capacité de 60 litres. Photo : rapport final VARESI

gétique. Ces déchets proviennent par exemple des usines à papier, des laiteries, des abattoirs ou de l'industrie des jus de fruits. Traditionnellement, ils sont déshydratés et séchés à grands frais énergétiques, puis brûlés en vue de produire de l'énergie. « Nous souhaitons tirer le maximum d'énergie de ces résidus par le biais d'une bioraffinerie », explique Hajo Nägele, chef de projet à la ZHAW. « La bioraffinerie désigne ici un concept de valorisation global qui utilise une installation de biogaz comme étape centrale du processus et la complète par d'autres technologies. »

Un processus en trois étapes

L'équipe de chercheurs de la ZHAW propose de mettre en œuvre un processus en trois étapes dans cette bioraffinerie.

Première étape : les résidus liquides fermentent dans une installation de biogaz, ce qui génère du méthane (CH_4). Ce biogaz peut être utilisé à des fins énergétiques, par exemple dans des systèmes de chauffage pour fournir de la chaleur ou dans des centrales de cogénération pour la production simultanée d'électricité et de chaleur. En fonction de la composition de la biomasse, cette première étape du processus peut être supprimée, ce qui permet de passer directement à la deuxième étape.

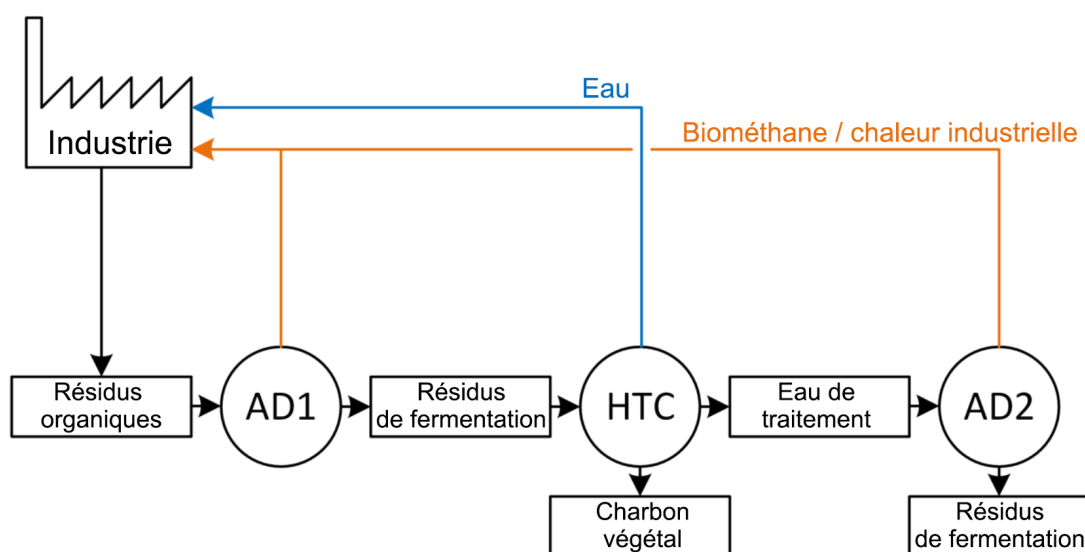
Deuxième étape : le carbone présent dans les résidus de fermentation qui n'a pas été méthanisé par les micro-organismes dans l'installation de biogaz est transformé en charbon sous pression (environ 20 bars) et à haute température (200-220 °C), tandis que les composants liquides des résidus de fermentation donnent de l'eau de traitement. Ce proces-

sus est connu sous le nom de carbonisation hydrothermique (HTC). Le charbon HTC (ou « charbon végétal ») peut faire office de combustible climatiquement neutre. Une autre solution consisterait à l'enfouir dans le sol, ce qui permettrait d'éliminer durablement le carbone fixé dans le charbon HTC de l'atmosphère et d'obtenir ainsi des émissions négatives (Carbon Capture and Storage). Avant de réaliser un tel stockage à grande échelle, les effets sur le sol et la faune doivent être clairement définis. Des adaptations législatives seraient également nécessaires.

Troisième étape : l'eau de traitement issue de l'étape 2 contient encore du carbone dissous, lequel est en grande partie transformé en méthane lors d'une nouvelle fermentation dans une installation de biogaz. Le carbone supplémentaire libéré dans l'eau de traitement par le procédé HTC est en principe très facilement valorisable en anaérobie. Le carbone à haut poids moléculaire non valorisable sur le plan microbiologique est récupéré par filtration sur membrane puis carbonisé. Il ne reste alors que de l'eau purifiée, laquelle peut être utilisée dans l'industrie.

Essais à l'échelle du laboratoire

L'équipe de chercheurs du site ZHAW de Wädenswil a testé ce processus de valorisation en trois étapes dans la pratique avec des boues de papier déshydratées. Outre la production d'eau de traitement HTC et sa caractérisation, l'accent portait sur la valorisation systématique de ce flux de déchets (comme indiqué ci-dessus à l'étape 3). Cela constitue un défi particulier, car l'eau de traitement contient des substances indésirables qui inhibent le processus de fermentation ou, dans les



Le processus VARESI en trois étapes consiste en une première fermentation anaérobie dans une installation de biogaz (AD1), suivie d'une carbonisation hydrothermique (HTC) et enfin d'une deuxième fermentation anaérobie des eaux de traitement produites (AD2). Illustration : rapport final VARESI

cas extrêmes, le stoppent complètement. La valorisation des eaux de traitement produites est donc considérée comme un critère de réussite de la technologie HTC.

Afin de créer des conditions de dégradation idéales pour le carbone contenu dans les eaux de traitement, les chercheurs ont utilisé un « Expanded granular sludge bed Fermenter » (EGSB) (cf. encadré à droite). Le fermenteur à alimentation continue a montré une dégradation fiable pendant les 200 jours qu'a duré l'essai, sans remplacement de la biologie de fermentation. Selon les chercheurs, le processus aurait fonctionné en continu si l'installation expérimentale n'avait pas dû être démontée dans le cadre de la rénovation du laboratoire. Même sans dilution de l'eau de traitement, une valorisation étendue du substrat est garantie. Dans la plupart des cas, le carbone dissous a été dégradé à 80% et plus. Le carbone restant a été éliminé de l'eau par filtration membranaire. « Grâce à notre installation expérimentale, nous avons démontré la faisabilité du procédé VARESI en trois étapes », affirme Hajo Nägele. « Nous avons également pu démontrer qu'un processus de dégradation anaérobie stable est possible malgré la présence de substances potentiellement inhibitrices. »

Un meilleur rendement énergétique

Afin de démontrer les avantages du procédé VARESI, l'équipe de chercheurs a calculé la quantité d'énergie qui pourrait être produite si les résidus liquides de l'usine à papier TELA GmbH (Niederbipp) étaient valorisés à l'aide de ce nouveau procédé. Les quelque 20'000 tonnes de matière sèche issues des boues papetières et biologiques pourraient permettre de

RÉACTEUR EGSB

Le fermenteur EGSB (pour: Expanded granular sludge bed) est un bioréacteur destiné à la fermentation anaérobie (en l'absence d'air) de résidus biogéniques liquides en biogaz (méthane). Il convient à la fermentation des eaux usées à forte teneur en matières organiques. Contrairement au digesteur de biogaz classique, le réacteur EGSB utilise des boues granulaires anaérobies (en anglais « granular sludge ») et une circulation élevée des eaux usées pour décomposer efficacement les substances organiques et les transformer en méthane. La forte agitation entraîne une augmentation du volume (« expansion ») des granulés de boue. La surface de contact entre les matières organiques est ainsi plus grande et les granulés de boue augmente l'efficacité du processus de fermentation.

produire environ 34'000 MWh d'énergie thermique par an, soit un gain net de 12'600 MWh par rapport au processus de valorisation classique avec déshydratation et incinération. Le surplus correspond à 7% des besoins énergétiques totaux de l'usine à papier enregistrés en 2023. Le remplacement du gaz naturel permettrait de réduire les émissions annuelles de CO₂ d'environ 13%.

Comme le consignent les scientifiques dans le rapport final du projet, « les résultats expérimentaux prouvent que le potentiel énergétique des boues de papier peut déjà être large-



Lors de l'étape de carbonisation hydrothermique, le mélange charbon-eau (à gauche) génère du charbon HTC (au centre) et de l'eau de traitement (à droite). Photos : rapport final VARESI

ment exploité dans des conditions de traitement modérées de carbonisation hydrothermique ». Ils partent du principe que le rendement énergétique pourrait être encore amélioré si le processus HTC était adapté encore plus précisément au substrat à l'avenir.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires

Hajo Nägele considère le concept VARESI comme une « technologie clé » pour une meilleure valorisation des biodéchets industriels liquides. L'un des principaux défis consiste à rendre le processus rentable. Pour cela, et afin de garantir un bilan environnemental positif de l'ensemble du processus, une efficacité carbone élevée est d'une importance cruciale. Les procédés actuels de traitement des eaux industrielles, dont l'efficacité repose principalement sur la conversion du carbone en CO_2 , ne sont ni énergétiquement positifs ni économiquement avantageux. Outre une récupération optimale de la chaleur dans le processus HTC, l'extraction maximale d'énergie de l'eau de traitement est une condition préalable fondamentale pour un fonctionnement rentable.

Selon le scientifique Nägele de la ZHAW, l'évolutivité de la technologie HTC et de la fermentation anaérobie ouvre la perspective de la construction de bioraffineries décentralisées. Il s'agit ici de petits réseaux destinés à la valorisation des biomasses humides produites localement. Cela permettrait d'exploiter des synergies, de réduire les coûts et de réaliser conjointement des certificats d'émissions négatives, explique M. Nägele. Ce nouveau concept pourrait également contribuer à la décarbonisation d'autres secteurs, tels que le traitement des eaux usées ou l'agriculture, et pourrait être combiné efficacement avec la récupération des nutriments (azote, phosphore).



Jusqu'à présent, les boues déshydratées issues de la fabrication du papier sont incinérées avec du bois et d'autres combustibles (d'appoint), ce qui permet de produire de la vapeur industrielle. Les chercheurs de la ZHAW ont démontré que le processus VARESI permettrait d'augmenter de 50% le rendement énergétique de la valorisation des boues. Photo : rapport final VARESI

- Le **rapport final** du projet « Valorisation of industrial residues for a sustainable industry » (VARESI; en français: Valorisation des résidus industriels pour une industrie durable) est disponible sur <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=50255>.
- Vanessa Burg (vanessa.burg@bfe.admin.ch), responsable du programme de recherche de l'OFEN Bioénergie, communique des **informations** à ce sujet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de la bioénergie sur www.bfe.admin.ch/ec-bioenergie-fr.