



LISIERS ET DIGESTATS : DÉTERMINER LEUR COMPOSITION PAR CAPTEURS EMBARQUÉS SUR TONNES

Etat des connaissances

Pascal Levasseur (IFIP)

ifip —
Institut du porc

Introduction

Il y aurait en France, 41 millions de m³ de lisier produit annuellement conjointement par les porcs, les bovins et les volailles (Marsac et al., 2018), dont 17 millions de m³ pour la seule filière porcine. Avec plus de 1700 unités en fonctionnement fin 2023, la méthanisation poursuit son essor, et par là même, les volumes de digestat produits. La valorisation agronomique des lisiers et digestats demeure leur ultime devenir. Comme leurs compositions sont très variables, l'utilisation de références moyennes est peu appropriée pour une fertilisation organique de précision. Si l'analyse de laboratoire constitue la méthode de référence, elle demeure coûteuse et nécessite plusieurs jours voire semaines pour disposer des résultats. Des méthodes d'analyses rapides embarquées sur tonne à lisier constituent une alternative. Elles utilisent des capteurs qui se basent sur certaines propriétés physiques des constituants du lisier. Il existe principalement 3 méthodes : les signaux lumineux dans le proche infrarouge, la conductivité électrique et, plus récemment, la résonance magnétique nucléaire. Ce rapport va dresser une synthèse bibliographique de ces 3 méthodes : mode d'action, atouts et contraintes ; et rapporter 3 propositions commerciales à même de satisfaire la diversité des besoins sur le terrain.

CAPTEURS BASÉS SUR LA SPECTROMÉTRIE PROCHE INFRAROUGE

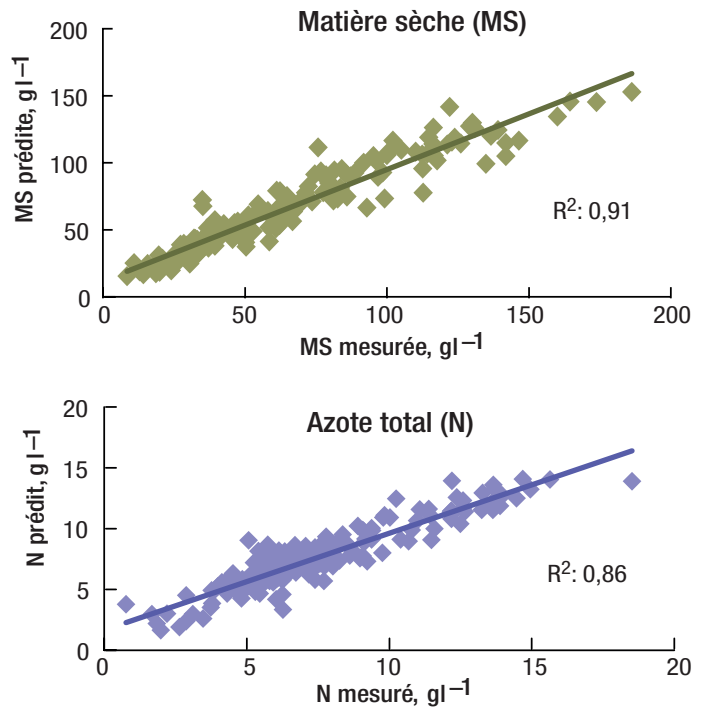
Les longueurs d'ondes proches infrarouge (IR) ont la particularité d'interagir avec les liaisons moléculaires de type C-H, O-H et N-H. Ainsi, différentes études menées à l'échelle internationale ont établi des équations de prédiction de la composition des effluents, tant liquides que solides par comparaison avec des spectres d'absorption de rayonnement IR aux analyses chimiques effectuées en laboratoire. Chaque élément dispose ainsi d'un spectre unique.

Les études menées sur cette technologie ont porté sur différentes gammes de longueur d'ondes, s'échelonnant du visible au proche infrarouge, soit de 400 à 2300 nm pour Reeves et Van Kessels (2000), de 400 à 2498 nm pour Millmier et al. (2000), de 400 à 2500 nm pour Malley al. (2002) et de 306 à 1710 nm pour Saeys et al. (2005). Plusieurs types de sondes et modalités de collecte du signal ont également été utilisés. Pour les lisiers et digestats et à fortiori des solides, il est principalement utilisé la réflectance compte tenu de leur opacité.

Dans le cas du lisier de porc, des prédictions précises, du moins intéressantes, ont été obtenues pour le N-total, N-NH₄, le carbone total, la matière sèche, la matière organique (Reeves et al 2000, Malley et al 2002, Saeys et al. 2005, Reeves 2007, Chen et al. 2009, 2010, 2014, Cabassi et al. 2015) car ils disposent de liaisons rentrant dans le champ de l'absorption spectrale de l'IR.

Le coefficient de détermination R², compris entre 0 et 1, est ainsi un indicateur de précision, plus la valeur se rapproche de 1, plus la précision des prédictions est élevée. Selon les auteurs, les R² s'avèrent compris entre 0,75 et 0,91 pour la matière sèche, entre 0,83 et 0,91 pour l'azote total, entre 0,67 et 0,91 pour l'azote ammoniacal et entre 0,59 et 0,99 pour le phosphore (voir annexe 2).

Les prédictions sont un peu moins précises, pour des minéraux tels que le potassium et le magnésium. Pour le phosphore, la qualité de la prédiction est plus variable selon les auteurs. Certains arrivent à obtenir de bonnes prédictions pour 2 raisons (1) les liaisons du phosphore sont spectralement actives (Chen et al., 2014) et (2) compte tenu des corrélations entre cet élément et la matière sèche. Il en serait de même (lien



Figures 1 et 2 : Teneurs en matière sèche et azote d'un lisier de porc mesurées en laboratoire et prédites par IR selon Saeys et al. 2005a

avec la matière sèche) pour le magnésium selon Saeys et al. (2005). Pour d'autres éléments comme Ca, Zn, Cu, Fe, Mg, Na, Mn pouvant présenter un intérêt agronomique ou présenter des risques environnementaux, la prédiction s'avère moins bonne dans la plupart des études. Les dispositifs commerciaux ne déterminent toutefois que les principaux éléments (i.e. matière sèche, azote totale et ammoniacal, phosphore et potassium).

L'ensemble des coefficients de détermination, disponibles en annexe, sont issus de dispositifs statiques employés à l'échelle du laboratoire et de manière discontinue. Les dispositifs embarqués sur tonne à lisier doivent pouvoir fonctionner de manière continue avec des contraintes de température, de vibrations et chocs rarement rencontrées en laboratoire.



Photo Ifip

Console d'affichage des valeurs d'analyse dans la cabine du tracteur

Deux constructeurs, John Deere et Dinamica Générale, ont été contactés pour faire le point sur la commercialisation de leur dispositif.

A ce jour, **John Deere** a vendu une centaine de Manure Sensing. La prédiction de la composition des lisiers et digestats est l'une des 4 fonctions de ce capteur pouvant par ailleurs analyser des fourrages et des céréales, tant en version mobile que fixe, le Harvestlab™ 3000 étant le dispositif générique. Selon la compatibilité du tracteur et de la tonne à lisier au Manure Sensing, 4 niveaux d'automatisation sont envisageables. En cas de compatibilité intégrale, la vitesse du tracteur et le débit en sortie de tonne à lisier sont réglables automatiquement pour atteindre le dosage souhaité. A défaut, il peut n'y avoir qu'une simple valeur indicative en cabine préconisant d'accélérer ou de ralentir afin d'atteindre l'objectif de fertilisation. Les principales tonnes à lisier disponibles à la vente (Joskin, Pichon, Samson, Fliegl, Vervaet, ...) sont partenaires de John Deere pour le montage du Manure Sensing.

Leur dispositif propose 3 équations de prédiction : lisier de porc, lisier de bovin et digestat. Ces 3 équations sont régulièrement alimentées et donc réactualisées par de nouvelles données. Le capteur doit être recalibré toutes les 500 heures de fonctionnement ou au moins une fois par an, opération réalisée par le concessionnaire.



photo John Deere

Capteur IR HarvestLab™ 3000



Photo Ifip

Dispositif IR en sortie de tonne à lisier avant enfouisseur

Les clients du Manure Sensing sont surtout des entreprises de travaux agricoles (Eta), et des Cuma dans une moindre mesure. Les tonnes à lisier de grandes unités de méthanisation comptent également parmi les clients de ce capteur. Le coût d'investissement d'un dispositif IR complet se situe entre 15 000 et 30 000 €, selon les options retenues et la compatibilité initiale des systèmes d'information. La commercialisation et le suivi sont réalisés par les concessionnaires locaux. Le coût au m³ d'effluent épandu dépend également du taux d'usage de la tonne à lisier. Une Eta contactée facture ainsi un surcoût de 8 ct€/m³ de lisier épandu sur un coût total d'épandage de 2 à 4 €/m³ environ, selon la distance à parcourir.

Dinamica Générale commercialise des capteurs infrarouge tant en version embarquée que portable. La société s'est associée avec la société Latitude GPS (revendeur de solution d'agriculture de précision, notamment des GPS PTX Trimble) pour l'installation des dispositifs embarqués, et avec Photon Lines pour les dispositifs portatifs. En version embarquée, le capteur peut être installé même si l'exploitant n'a pas d'équipement Trimble. Dinamica Générale dispose de partenariats spécifiques avec certaines marques de tracteurs (New holland, Claas ...) et tonnes à lisier (Vredo, Joskin, Fliegl, Vervaet, ...). La compatibilité des connectiques et équipements permet de moduler automatiquement le dosage des lisiers et digestat par le débit de lisier (et non par la vitesse du tracteur), le montage du capteur s'effectuant à 90 % en sortie de tonne à lisier. A défaut, il n'est transmis qu'une indication du dosage.

Dinamica générale met à disposition 4 courbes de référence pour la prédiction de la composition des effluents : porc, bovin, mélanges de ces deux espèces et digestat. La première année de fonctionnement, Dinamica - ou son revendeur - procède à une comparaison de la valeur prédite par le capteur et les résultats d'analyse de lisier effectués par un laboratoire désigné par l'éleveur. Les valeurs de prédiction sont modulables dans une certaine mesure. Les années suivantes, l'éleveur peut procéder lui-même à cette comparaison, les ajustements des valeurs de prédiction pouvant s'effectuer à distance.

Sur les 3 dernières années, une vingtaine de capteurs a été vendu, essentiellement à des ETA et des Cuma.



photo Dinamica

Capteur IR Dinamica Générale en sortie d'automoteur Vredo



photo Dinamica

Même capteur mais sur tonne à lisier

Récapitulatif des atouts et contraintes du capteur IR pour déterminer la composition des lisiers et digestats

ATOUS

- Rapidité de la lecture
- Peu ou pas de préparation de l'échantillon
- Evaluation de plusieurs composants simultanément
- Prédiction assez précise pour l'azote totale et ammoniacal, le carbone total, la matière sèche, la matière organique, variable (selon les auteurs) pour le phosphore
- Méthode ayant fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement



POINTS DE VIGILANCE

- Coût d'investissement relativement élevé
- Le recalibrage du capteur doit être régulièrement effectué par un opérateur spécialisé
- Prédiction un peu moins précises pour K et Mg



CAPTEURS BASÉS SUR LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

La conductivité électrique (CE) d'un lisier ou d'un digestat se mesure en mS/cm (millisiemens par centimètre). Elle est corrélée à sa teneur en éléments solubles, c'est une mesure indirecte. Elle est d'autant plus élevée pour les éléments ayant la plus forte représentation cationique. Les ions ammonium (36 à 80 %) et potassium (21 à 54 %) comptent majoritairement dans la capacité cationique totale (Piepel et al., 2022). Les teneurs en éléments cationiques mineurs (sodium, magnésium, calcium) impactent bien moins la CE. Les études (voir annexe 2) ont ainsi montré une bonne concordance entre valeurs prédites par CE et analyses de laboratoire (R^2 de 0,55 à 0,95 en valeurs extrêmes) pour l'azote total et ammoniacal et, à quelques exceptions près, pour le potassium (Provolo et Martinez-Suller, 2007). La CE n'a pas montré une bonne corrélation avec des éléments tels que le phosphore (Provolo et Martinez-Suller, 2007 ; Suresh et al., 2009), qui est principalement liés à la fraction solide du lisier et n'affectent pas de manière significative les propriétés électriques des lisiers (Provolo et Martinez-Suller, 2007).

Piepel et al. (2022) recommande d'intégrer différentes conduites d'élevage et mode d'alimentation dans les équations de prédiction, ce qui n'est pas le cas dans les modèles

commercialisés. La conduite d'élevage, le type d'alimentation et le taux de dilution impact la qualité des résultats. Martinez-Suller et al. (2008) ont augmenté le R^2 de 0,82 à 0,95 en distinguant ainsi des sous-populations de lisier de porcs. Suresh et al. (2009) ont obtenu un R^2 de 0,91 en distinguant des gammes de poids chez le porc charcutier (30/70 contre 70/100 kg de poids vif). En pratique, ces préconisations pourraient être difficiles à mettre en œuvre compte tenu de la diversité des conduites d'élevage et/ou des mélanges de lisiers dans les fosses de stockage. La diversité des matières premières rentrant dans la composition des aliments est également source de variation de la conductivité électrique qui est une résultante de la charge cationique globale. Ainsi, l'augmentation de la teneur en matières azotées totales des aliments va augmenter la CE du lisier et donc l'estimation de la teneur en potassium, même si les matières premières alimentaires sont moins pourvues en cet élément. L'inverse est moins vrai compte tenu des rapports de charges cationiques. En tout état de cause, l'étalonnage de départ des capteurs basés sur de la CE (à leur construction en usine) est très important.

Le distributeur **Vantage Atlantique-Méditerranée** a été contacté pour faire le point sur la commercialisation de leur capteur Ana'Lisier qui peut s'installer sur toutes les tonnes à lisier. La notice d'emploi, très claire, permet de le monter soi-même. Il est nécessaire de disposer d'un orifice d'accès à la tonne à lisier pour immerger la sonde dans le lisier et de télécharger l'application Ana'Lisier gratuite pour système Android. Dans 1/3 des cas, les éleveurs installent eux-mêmes le dispositif.

Sans dispositif proportionnel à l'avancement (DPA), la dose, affichée en temps réel, permet d'ajuster soi-même la vitesse d'avancement du tracteur. Le débit de la tonne à lisier est rentré dans l'application, après avoir été téléchargée par l'éleveur. En option, il est proposé une trappe Autotaj permettant de réguler automatiquement le débit en fonction de la vitesse d'avancement. Avec DPA, le dosage est réglable automatiquement.

L'application propose 6 équations de prédiction de la composition des effluents selon leur origine : lisier de truie, de

porc charcutier ou en mélange (naisseur-engraisseur), lisier de vache laitière ou de bovin, digestat. Le temps de lecture minimal est de 2 minutes, au-delà de ce temps, la lecture se poursuit, améliorant la précision de la prédiction. Chaque parcelle ayant reçu du lisier peut ensuite être enregistrée dans l'application (nom de la parcelle, date, paramètres d'épandage...) ainsi que les coordonnées GPS, le boîtier disposant de cette fonction. Les données peuvent ensuite être exportées sous forme de fichier excel pour aider au remplissage du cahier d'épandage. Si la sonde ne nécessite pas de calibrage annuel, elle peut toutefois s'obstruer avec des lisiers pailleux ou très épais. Compte tenu de sa fixation avec une attache rapide, elle peut cependant être aisément démontée et nettoyée.

Entre juin 2023 et août 2024, 55 unités ont été vendues. Les principaux clients sont des détenteurs individuels de tonnes à lisier, dans une moindre mesure des Eta (proportion en augmentation) et marginalement des Cuma.

ATOUS

- Technologie simple et aisée à mettre en œuvre, et de ce fait peu coûteuse
- Mesure rapide
- Donne des résultats intéressants pour l'azote ammoniacal (un peu moins précise pour l'azote total) et le potassium

POINTS DE VIGILANCE

- Moins fiable pour le phosphore et la matière sèche



Source : notice d'installation Ana'Lisier (Vantage AM)

kit d'installation de l'Ana'Lisier et procédure d'installation de la sonde (a)

CAPTEURS BASÉS SUR LA SPECTROMÉTRIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

La résonance magnétique nucléaire (RMN), mise en œuvre par exemple dans les IRM, est une méthode spectroscopique d'analyse de la matière, fondée sur les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques. L'échantillon à étudier, placé dans un champ magnétique très intense, acquiert une aimantation des noyaux qui est détectée par sa mise en résonance avec un champ électromagnétique.

La RMN, mise en œuvre pour les capteurs à lisier, est configurée pour des isotopes ^{14}N , ^{31}P et ^{39}K . Il s'agit donc d'une mesure sélective de l'azote dissous (c'est à dire l'azote ammoniacal), des ions potassium et du phosphore, tant solide que dissous. La RMN est également configurée pour le ^{17}O , indicateur de l'azote organique et de la matière sèche. Ces derniers sont donc mesurés indirectement.

Sorensen et al. (2015) ont montré que la prédiction par RMN des teneurs en azote ammoniacal, organique et total, en phosphore et en potassium de 16 lisiers et digestats ont montré une bonne concordance avec des analyses de laboratoires. Cette fiabilité a été confirmée ultérieurement pour le phosphore, l'azote ammoniacal et total sur plus de 300 lisiers d'espèces

animales différentes (principalement bovins et porcs) et digestats ($R^2 > 0,90$; Jensen et al., 2021), puis sur 20 échantillons de lisiers de vaches laitières ($R^2 > 0,85$; Feng et al., 2022). Selon ces derniers, l'analyseur RMN est également performant pour la matière sèche ($R^2 = 0,86$). Il l'est aussi sur l'azote total et ammoniacal lorsque les effluents contiennent moins de 8 % de matière sèche. Ils précisent également que la prédiction du phosphore présente une certaine variabilité intra et inter-échantillons. Selon Feng et al. (2022), les meilleures prédictions peuvent toutefois nécessiter des temps de contacts de 30 minutes et plus pour l'azote total et le phosphore.

Selon Jensen et al. (2021), la RMN pourrait être même plus précise que l'analyse de laboratoire pour la détermination du phosphore, de l'azote ammoniacal et totale : ils l'ont démontré via une amélioration du R^2 lorsque la comparaison s'effectue avec 6 laboratoires (où est prise en compte la variabilité inter-laboratoire) par rapport à un seul laboratoire.

Samson Agro avait reçu une médaille d'argent au salon Agri-technica en 2019 pour un capteur basé sur la RMN. Toutefois, le dispositif n'a pas été commercialisé par la suite.

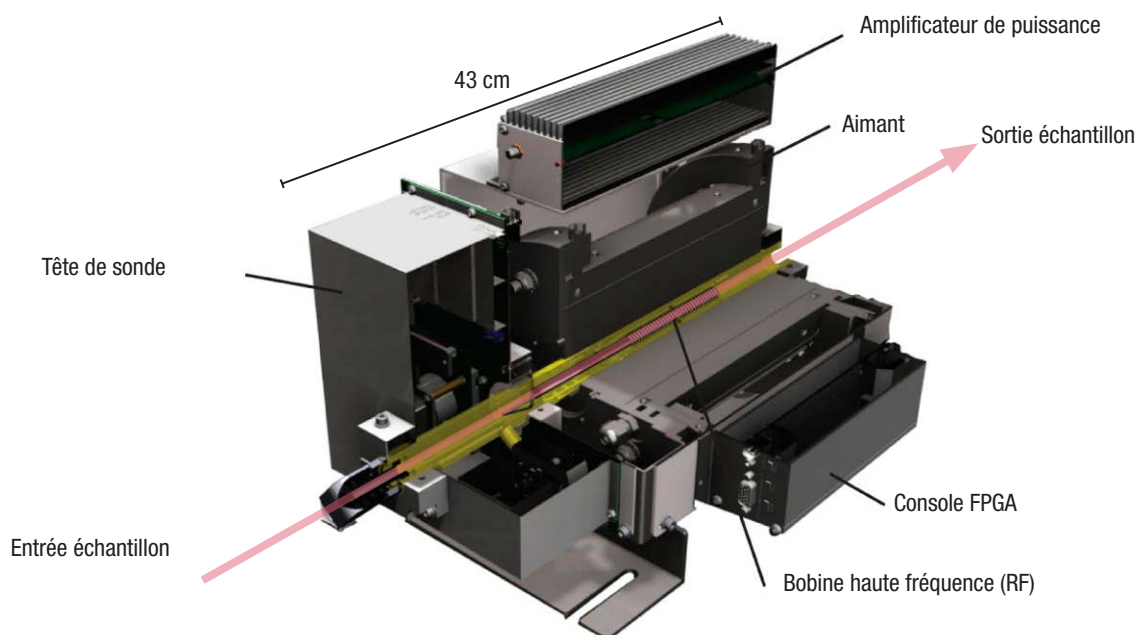
ATOUTS

- Technologie a priori la plus précise
- Pas de contact direct avec l'effluent et pas de calibration : technique simple
- Potentiel de mobilité



POINTS DE VIGILANCE

- Temps d'analyse plus long (pour une prédiction fiable) et bien moins de retours d'expériences que pour les 2 autres techniques
- Pas de constructeurs/distributeurs identifiés
- Mesure indirecte de la matière sèche et de l'azote total → source potentielle d'erreur car mesure indirecte



Dispositif se composant d'un aimant cylindrique de Halbach avec un champ magnétique statique de 1,5 T, d'un amplificateur de puissance de 400 W et d'une sonde blindée (Sorensen et al., 2015)

CONCLUSION

Parmi les 3 techniques envisageables pour des capteurs embarqués permettant d'estimer la composition des lisiers - mais aussi des digestats - seuls le proche infrarouge (IR) et la conductivité électrique se déploient actuellement sur le terrain. La méthode IR apparaît comme la technique la plus précise pour prédire la teneur des principaux composants du lisier. Toutefois, la qualité des résultats obtenus nécessite de calibrer régulièrement les mesures spectrales. Ces calibrations nécessitent une maintenance techniquement difficile devant être préférentiellement réalisée par un opérateur spécialisé. L'installation, assez complexe, et cette maintenance la rend assez coûteuse. Une tonne à lisier très utilisée dans le cadre d'une Eta ou d'une Cuma pourra mieux amortir son coût.

La mesure de la conductivité électrique est bien adaptée aux éléments solubles, notamment l'azote ammoniacal et dans une moindre mesure le potassium. Par le jeu des corrélations entre éléments, le résultat peut être intéressant pour l'azote total mais demeure imprécis pour le phosphore. L'équipement, sa pose et sa maintenance est simple. Il en résulte un coût d'usage très raisonnable.

L'arbitrage entre ces deux techniques s'effectuera vraisemblablement selon le profil de l'utilisateur : degré d'exigence dans la qualité et la nature des prédictions, type d'équipements déjà acquis, taux d'utilisation de la tonne à lisier, services associés souhaités (outils cartographiques, automatisation des saisies d'épandage), polyvalence du capteur, etc.

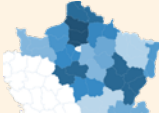
Les prédictions par résonance magnétique nucléaire dispose d'atouts (précision de l'estimation, pas de composants sensibles en contact avec les effluents, ni d'opérations de calibration). Mais malgré cela et compte tenu certainement d'une moindre maturité, elle n'est pas déployée sur le terrain.

L'essor de ces capteurs demeure encore marginal, vraisemblablement moins de 200 tonnes à lisier équipées à ce jour pour un marché potentiel de plusieurs milliers d'unités mais leur essor se poursuit sous l'effet d'une pression économique et réglementaire croissante pour une fertilisation organique de précision.

Références bibliographiques

- Cabassi G., Cavalli D., Fucella R., Gallina P.M., 2015. *Biosystems Engineering* 133, 1-13.
- Chen L.J., Xing L., Han L.J., 2009. *Poultry Science* 88, 2496-2503.
- Chen L.J., Xing L., Han L.J., 2010. *J. Environ. Qual.* 39, 1841-1847.
- Chen L.J., Xing L., Han L.J., 2013. *J. Environ. Qual.* 42, 1015-1028.
- Dagnew, M.D., T.G. Crowe, and J.J. Schoenau., 2004. *Can. Biosyst. Eng.* 46 : 633-637.
- Feng X., Larson R.A., Digman M.F., 2022. *Sensors*, 22, 2438. doi.org/10.3390/s22072438.
- Jensen O.N., Beyer M., Sørensen M.K., Kreimeyer M., Nielsen N.C., 2021. *ACS Omega*, 6, 17335-17341.
- Malley D.F., Yesmin L., Eilers R.G., 2002. *Journal of the American Soil Society* 66, 1677-1686.
- Marsac S., Heredia M., Labalette F., Delaye N., Levasseur P., Capdeville J., Gervais F., Ponchant P., Lauga B., Callens J. 2018. ELBA – Rapport Ademe. 33 pages.
- Martinez-Suller L., A. Azzellino and G. Provolo., 2008. *Biosyst. Eng.* 99:540-552. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.12.002
- Millmier, A., J. Lorimor, C.H. Jr, C. Fulhage, J. Hattey, and H. Zhang, 2000. *Trans. ASAE* 43:903-908.
- Moral, R., M.D. Perez-Murcia, A. Perez-Espinosa, J. Moreno-Caselles, and C. Paredes, 2005. *Waste Manag.* 25:719-725. doi:10.1016/j.wasman.2004.09.010.
- Mouazen, A.M., W. Saeys, J. Xing, J.D. Baerdemaeker, and H. Ramon, 2005. *J. Near Infrared Spectrosc.* 13 (Spec.):87-97. doi:10.1255/jnirs.461.
- Piepel M.-F., Ditter K., and Olf H.-W., 2023. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186, 266-275. doi.org/10.1002/jpln.202200088.
- Provolo G., and Martínez-Suller L., 2007. *Bioresource Technology*, 98(17), 3235-3242.
- Reeves J.B., Van Kessel J.S., 2000. *J. of Dairy Science* 83, 1829-1836.
- Reeves, J.B. 2007. *Livest. Sci.* 112:224-231. doi:10.1016/j.livsci.2007.09.009.
- Saeys W., A.M. Mouazen, and H. Ramon. 2005a. *Biosyst. Eng.* 91 : 393-402. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.05.001.
- Saeys W., J. Xing J. Baerdemaeker, and H. Ramon. 2005b. *J. Near Infrared Spectrosc.* 13:99-107. doi:10.1255/jnirs.462.
- Savary C., 2019. *Effluents d'élevage et digestat : les dispositifs embarqués d'analyse des valeurs fertilisantes. Chambre d'agriculture de Normandie.* 4 p.
- Sørensen M.K., Jensen O., Bakharev O.N., Nyord, T., Nielsen, N.C, 2015. *Anal. Chem.* 87, 6446-6450.
- Suresh A., Choi H. L., Oh D. I., and Moon O. K., 2009. *Bioresource Technology*, 100(20), 4683-4689.
- Ye W., J.C. Lorimor, C. Hurburgh, H. Zhang, and J. Hattey, 2005. *Trans. ASAE* 48:1911-1918.

Annexe 1 : Bilan récapitulatif des propositions commerciales (adapté de Savary, 2019)

Marque	John Deere	Dinamica Générale	Vantage AM
Nom commercial	Capteur HarvestLab TM 3000 disposant de 4 fonctions dont celui de « Manure Sensing »	Evo NIR 4.0	Ana'Lisier
Technologie	Proche infrarouge	Proche infrarouge	Conductivité électrique
Distribution	Réseau John Deere et les constructeurs tonnes à lisier partenaires mettent des prédispositions	 Départements couverts par Latitude GPS	Vantage AM et partenariat avec SCAR
Investissement			
Capteur	16000 € (HarvestLab™ 3000)	Le prix dépend de la machine sur laquelle elle est installée - Pour les utilisateurs 18000 € (selon l'application, rajouter 5000 € pour l'interface d'adaptation et l'installation) – Cartographie incluse.	4000 € (tout compris) 3380 € sans téléphone
Ecran - Console	2500 € (type « G5 ») à 4500 € (type « 4640 »)	Terminal tracteur ou tonne (si IsoBUS) ou avec App Field Trace	Informations visualisables sur smartphone
Faisceau adaptation (yc le boîtier de traduction)	750 €	A voir, selon l'application.	Bluetooth

Courbes de référence

Effluents	5000 € (porc, bovin, digestat)	Compris en année 1. 4 courbes : porc, bovin, mélanges de ces deux espèces et digestat	Digestat et cinq catégories de lisier : porc naisseur-engraisseur, porc charcutier, truies, bovin, vache laitière
Mise à jour	Gratuite	Abonnement de 1600 €/an comprenant l'ensemble des points suivants : mise-à-jour des courbes d'étalonnage, licence Logiciels FIELD Trace Cloud et NIR Evolution Cloud pour une année, 1 lampe de recharge pour le capteur, mises à jour automatiques du logiciel, assistance à distance, détection des valeurs aberrantes	L'application est mise à jour gratuitement et régulièrement
Stockage données	Gratuit (Operations center) sur un cloud connecté	Application field track est gratuite -Tablette (à voir en fonction de l'application, si elle est déjà intégrée chez certains fabricants, l'application n'est pas nécessaire)	Gratuite, sur l'application
GPS	GPS pour cartographie 3300 € Le GPS est obligatoire pour l'automatisation de la vitesse	Inclus	GPS associé en version de base mais pas de fonction cartographique
Suivi annuel client /maintenance/ autres points à souligner	Prévoir recalibrage de la sonde (et autres mise à jour) une à plusieurs fois par an (selon taux d'utilisation), prix selon concessionnaire Utilisable sur ensileuse, batteuse et à poste fixe	Suivi annuel client inclus dans la mise à jour. Utilisable sur ensileuse, moissonneuse (+ 4000 € d'interface), trémie céréales, presse à balles, mélangeuse.	Tablette Android :150 € (7 pouces) Trappe autotaj : Régule le débit en fonction de la vitesse d'avancement, 4000 €, installation comprise Rallonge de câble si nécessaire (150 €) – Adaptateur si orifice plus large que version de base (150 €) Mise en route possible de l'ensemble en visio
Montage sur tonnes	Techniquement sur toutes les tonnes, plus aisé sur tonne à lisier partenaires : Joskin, Pichon, Samson, Fliegl, Vervaet...	Diverses marques sont partenaires : Trimble(Latitude GPS), New Holland, Class, Joskin, Fliegl, Vervaet, Vredo,...	Toutes tonnes à lisier
Contacts	Romain Lassausse LassausseRomain@JohnDeere.com	Massimo Sabattini massimos@dinamicagenerale.com Elisa Gobbi elisag@dinamicagenerale.com	Aurélien Pasquet a.pasquet@vantage-am.fr
Sites	www.johndeere.fr	https://www.dinamicagenerale.com/fr ww/evonir.aspx	www.vantage-am.fr info@vantage-am.fr

Annexe 2 : Coefficient de détermination (R^2) (*) des principaux composants des lisiers prédits par les différents types de capteurs en comparaison avec des analyses de laboratoire

(*) Le coefficient de détermination R^2 , compris entre 0 et 1, est un indicateur de précision, plus la valeur se rapproche de 1, plus la précision est élevée.

Coefficients de détermination obtenus par capteurs infrarouge par rapport à des analyses de laboratoire

Composants du lisier	R^2	Longueur d'onde	Nombre d'échantillons	Sources
Matière sèche	$R^2 = 0,91$	426-1683 nm	584	Saeys et al, 2005a
	$R^2 = 0,76$ à 0,91	300-1700 nm	195	Mouazen et al 2005
	$R^2 = 0,75$ à 0,86	400-2498 nm	194	Saeys et al, 2005b
Matière organique	$R^2 = 0,90$	426-1683 nm	584	Saeys et al, 2005a
	$R^2 = 0,73$ à 0,89	300-1700 nm	195	Mouazen et al 2005
	$R^2 = 0,73$ à 0,85	400-2498 nm	194	Saeys et al, 2005b
Azote total (AT) et azote ammoniacal (AA)	$R^2 = 0,91$ (AT) – 0,91 (AA)	1100-2500 nm	85	Ye et al, 2005
	$R^2 = 0,89$ (AT)	250-2500 nm	88	Dagneu et al, 2004
	$R^2 = 0,86$ (AT) – 0,76 (AA)	426-1683 nm	584	Saeys et al, 2005a
	$R^2 = 0,89$ (AT) - 0,77 (AA)	400-2498 nm	194	Saeys et al, 2005b
	$R^2 = 0,83$ à 0,89 (AT) – 0,67 à 0,71 (AA)	300-1700 nm	195	Mouazen et al 2005
Phosphore	$R^2 = 0,94$ à 0,99	400 - 2498 nm	64	Malley et al, 2002
	$R^2 = 0,90$	1100-2500 nm	85	Ye et al, 2005
	$R^2 = 0,85$	1000-2500 nm	195	Mouazen et al 2005
	$R^2 = 0,79$	250-2500 nm	88	Dagneu et al, 2004
	$R^2 = 0,75$	400-1710 nm	584	Saeys et al, 2005a
	$R^2 = 0,69$	400 -2498 nm	174	Millmier et al, 2000
	$R^2 = 0,59$	400-1710 nm	169	Saeys et al, 2004
Potassium	$R^2 = 0,89$	400 -2498 nm	174	Millmier et al, 2000
	$R^2 = 0,87$	400 - 2498 nm	64	Malley et al, 2002
	$R^2 = 0,87$	1100-2500 nm	85	Ye et al, 2005
	$R^2 = 0,71$ à 0,83	-	195	Mouazen et al, 2005
	$R^2 = 0,69$	426-1683 nm	169	Saeys et al, 2004
	$R^2 = 0,68$	250-2500 nm	88	Dagneu et al, 2004

Coefficients de détermination obtenus par conductivité électrique par rapport à des analyses de laboratoire

Composants du lisier	R ²	Nombre et nature des échantillons	Sources
Matière sèche	R ² = 0,5	41 élevages porcin	Suresh et al, 2009
Azote total (AT) et azote ammoniacal (AA)	R ² = 0,73 à 0,95 pour AT et AA	Lisiers	Provolo et Martinez-Suller, 2007
	R ² = 0,82 (AA)	83 lisiers	Martinez-Suller et al, 2008
	R ² = 0,74 (AT) et 0,91 (AA)	41 élevages porcin	Suresh et al, 2009
	R ² = 0,55 (AA)	391 lisiers de porc	Piepel et al, 2022
Phosphore	R ² < 0,5	41 élevages porcin	Suresh et al, 2009
Potassium	R ² = 0,82	Lisier de porc	Moral et al, 2005
	R ² = 0,69	41 élevages porcin	Suresh et al, 2009
	R ² = 0,58	391 lisiers de porc	Piepel et al, 2022
	R ² = 0,52	83 lisiers	Martinez-Suller et al, 2008

Coefficients de détermination obtenus par résonance magnétique nucléaire par rapport à des analyses de laboratoire

Composants du lisier	R ²	Echantillons testés	Sources
Matière sèche	R ² = 0,86	20 échantillons de vaches laitières (pour MS<8%)	Feng et al, 2022
Azote total (AT) et azote ammoniacal (AA)	R ² = 0,94 (AT) et 0,98 (AA)	20 échantillons de vaches laitières	Feng et al, 2022
	R ² = 0,94 (AT) et 0,97 (AA)	318 échantillons lisiers de différentes espèces et digestats	Jensen et al, 2021
Phosphore	R ² > 0,87	20 échantillons de vaches laitières	Feng et al, 2022
	R ² = 0,93	318 échantillons lisiers de différentes espèces et digestats	Jensen et al, 2021



**Synthèse réalisée
dans le cadre du projet Val'Or,
et mise en forme par l'IFIP
(4e trimestre 2024).**

Document ayant bénéficié des avis et commentaires des personnes suivantes :
**Jérôme Lenouvel (FRCuma Ouest), Hervé Masserot (FDCuma 53),
Samuel Nicolas (FDCuma 44), Adeline Haumont (Aile)**

Contact :
pascal.levasseur@ifip.asso.fr

*Ce projet a bénéficié du soutien financier du MASA.
La responsabilité du ministère chargé de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire ne saurait être engagée.*

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE LA SOUVERAINÉTÉ
ALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT**

*Liberté
Égalité
Fraternité*