



Rapport du 30.06.2025

XyloChips II

Dispositif mobile de mesure en continu du contenu énergétique de plaquettes forestières



Source : © HEIG-VD



énergie
durable

GERMAPLAKET

Date : 16 décembre 2023

Lieu : Berne

Prestataire de subventions :
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :
Fondation Suisse pour le Climat
Case postale 2832, CH-8022 Zürich
<https://www.klimastiftung.ch>

Bénéficiaires de la subvention :
HEIG-VD
Avenue des Sports 20 – CH 1400 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Aficor
Route du Village 1 – CH 1409 Chanéaz
www.aficor.ch

Énergie Durable
Rue du pré-Salomon 25 – CH 1242 Satigny
www.groupe-serbeco.ch/energie-durable

Germaplaket
Rue du Valentin 102 CH 1400 Yverdon-les-Bains
www.germaplaket.ch

Auteurs :
Julien Ropp, HEIG-VD, julien.ropp@heig-vd.ch
Gabriel Tschumi, HEIG-VD, gabriel.tschumi@heig-vd.ch
Roger Röthlisberger, HEIG-VD, roger.roethlisberger@heig-vd.ch

Suivi du projet à l'OFEN :
Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch et Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502138-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

Das Projekt XyloChips II zielt darauf ab, die Transparenz und Effizienz der Holzenergiebranche in der Schweiz zu verbessern, indem ein System entwickelt wird, das die im Moment der Lieferung enthaltene Energie in Holzhackschnitzeln kontinuierlich misst. Dieses Vorgehen adressiert ein zentrales Problem: Die Abrechnung von Holzhackschnitzeln erfolgt heute meist auf Basis indirekter Kriterien wie Volumen, Masse oder nutzbare Wärme beim Verbraucher, was weder eine faire Bewertung des Brennstoffs noch eine Optimierung der Heizsysteme ermöglicht.

Um dieser Situation zu begegnen, wurde das Projekt ins Leben gerufen. Durch die direkte Messung der gelieferten Energie nähert sich die Holzenergiebranche den Standards fossiler Brennstoffe an und gewinnt dadurch an Wettbewerbsfähigkeit, Transparenz und Attraktivität. Im Kontext des Schweizer Energiesystems trägt diese Innovation zur Umstellung auf lokale erneuerbare Energiequellen bei und fördert eine effizientere Nutzung von Heizsystemen.

Zur Umsetzung dieser Ziele gliederte sich das Projekt in zwei Hauptbereiche. Der erste, ein Pilot- und Demonstrationsvorhaben, ermöglichte die Realisierung einer stationären industriellen Anlage bei Énergie Durable SA, die Masse und Feuchtigkeit der Holzhackschnitzel beim Beladen kontinuierlich misst. Zusätzlich wurde eine mobile Version entwickelt, die in einen landwirtschaftlichen Anhänger integriert ist und mit Masse- und Feuchtigkeitssensoren ausgestattet wurde, um den Anforderungen von Teillieferungen gerecht zu werden. Der zweite Bereich, angewandte Forschung und Entwicklung, konzentrierte sich auf die Validierung der Feuchtigkeitsmessung mittels Infrarotsensor durch Vergleich mit einem Mikrowellen-Referenzsensor (Moistscan®), der die Feuchtigkeit der gesamten Ladung erfasst. Die Tests wurden sowohl auf Prüfständen als auch unter realen Bedingungen durchgeführt, mit einer Kalibrierung, die auf unterschiedliche Holzarten, Korngrößen und Wassergehalte abgestimmt ist. Zusätzlich wurde eine explorative Studie zur kapazitiven Feuchtigkeitsmessung durchgeführt.

Die erzielten Ergebnisse sind sehr vielversprechend. Die stationäre Anlage erreichte eine durchschnittliche Fehlerquote von $\pm 0,7$ % bei der Massemessung und $\pm 0,5$ % bei der Feuchtigkeitsmessung, wobei der Gesamtfehler bei der Energiemessung stets unter 5 % lag. Der Mikrowellensensor SWR wurde für die mobile Version validiert und zeigte eine hohe Robustheit sowie eine bessere Integrationsfähigkeit als der IR-Sensor. Der Moistscan®-Sensor erwies sich als besonders präzise für stationäre Anwendungen, insbesondere bei stark schwankender Feuchtigkeit. Für alle Sensoren wurde eine dynamische Kalibrierung entwickelt, ergänzt durch regelmäßige Kontrollprotokolle. Die kapazitive Messung zeigte zwar Vorteile hinsichtlich Kosten und Kompaktheit, erwies sich jedoch bei gefrorenen Holzhackschnitzeln als ungeeignet.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Projekt die technische und betriebliche Machbarkeit der kontinuierlichen Energiemessung in Holzhackschnitzeln sowohl in stationärer als auch mobiler Form erfolgreich demonstriert hat. Die Ergebnisse ebnen den Weg für eine direkte Energieabrechnung, die für beide Parteien fairer und motivierender ist. Langfristig könnte dieser Ansatz in Lieferverträge, Qualitätsmanagementsysteme für Holzenergie und Förderpolitiken integriert werden. Die Firma Aficor treibt die kommerzielle Entwicklung der Systeme weiter voran, mit mehreren laufenden Initiativen. Weitere Tests sind geplant, um die Kalibrierung zu verfeinern und die Leistung unter verschiedenen Bedingungen zu validieren. Das System könnte auch auf andere Biomassearten ausgeweitet werden und so zur Diversifizierung und Resilienz des Schweizer Energiesystems beitragen.

Résumé

Le projet XyloChips II vise à améliorer la transparence et l'efficacité de la filière bois-énergie en Suisse, en développant un système permettant de mesurer en continu l'énergie contenue dans les plaquettes forestières (PF) au moment de leur livraison. Cette démarche répond à une problématique centrale : aujourd'hui, la facturation des PF repose souvent sur des critères indirects (volume, masse ou chaleur



utile mesurée chez le consommateur), ce qui ne permet ni une valorisation équitable du combustible, ni une optimisation des installations de combustion.

C'est pour répondre à cette situation que le projet a été lancé. En permettant une mesure directe de l'énergie livrée, il rapproche la filière bois-énergie des standards appliqués aux combustibles fossiles, renforçant ainsi sa compétitivité, sa transparence et son attractivité. À l'échelle du système énergétique suisse, cette innovation contribue à la transition vers des sources renouvelables locales, tout en favorisant une meilleure gestion des installations de chauffage.

Pour atteindre ces objectifs, le projet s'est articulé autour de deux volets complémentaires. Le premier, de type pilote et démonstration, a permis de réaliser un dispositif industriel fixe chez Énergie Durable SA, capable de mesurer en continu la masse et l'humidité des PF au moment du chargement. Une version mobile a également été développée, intégrée à une remorque agricole équipée de capteurs de masse et d'humidité, afin de répondre aux besoins des livraisons fractionnées. Le second volet, orienté recherche appliquée et développement, a consisté à valider la mesure d'humidité par capteur infrarouge (IR) en la comparant à un capteur de référence à micro-ondes (Moistscan®), capable de mesurer l'humidité sur l'ensemble de la charge. Des essais ont été réalisés sur banc d'essai et en conditions réelles, avec une calibration adaptée à aux différentes essences de bois, de granulométrie et de teneur en eau variable. Une étude exploratoire sur la mesure capacitive a également été menée.

Les résultats obtenus sont très encourageants. Le dispositif fixe a permis d'atteindre une erreur moyenne de $\pm 0,7$ % sur la masse et de $\pm 0,5$ % sur l'humidité, avec une erreur globale sur l'énergie dans tous les cas inférieurs à 5 %. Le capteur à micro-ondes SWR a été validé pour la version mobile, avec une bonne robustesse et une facilité d'intégration supérieure à celle du capteur IR. Le capteur Moistscan® a montré une bonne précision pour les installations fixes, notamment dans les cas de forte variabilité d'humidité. Une calibration dynamique a été développée pour les capteurs, avec des protocoles de contrôle périodique. Enfin, la mesure capacitive, bien que prometteuse en termes de coût et de compacité, s'est révélée inadaptée en cas de gel des PF.

En conclusion, le projet a démontré la faisabilité technique et opérationnelle de la mesure en continu de l'énergie contenue dans les PF, tant en version fixe que mobile. Ces résultats ouvrent la voie à une facturation énergétique directe, plus équitable et plus incitative pour les deux parties. À terme, cette approche pourrait être intégrée dans les contrats d'approvisionnement, les systèmes de gestion de la qualité du bois-énergie, et les politiques de soutien à la bioénergie. La société Aficor poursuit le développement commercial des dispositifs, avec plusieurs démarches en cours. Des essais complémentaires sont prévus pour affiner les calibrations et valider les performances en conditions variées. Le système pourrait également être adapté à d'autres types de biomasse, contribuant ainsi à la diversification et à la résilience du système énergétique suisse.

Summary

The XyloChips II project aims to improve transparency and efficiency in Switzerland's wood-energy sector by developing a system capable of continuously measuring the energy content of wood chips at the time of delivery. This approach addresses a key issue: currently, billing for wood chips is often based on indirect criteria such as volume, weight, or useful heat measured at the consumer's site, which prevents fair valuation of the fuel and optimal operation of heating systems.

To address this situation, the project was launched. By enabling direct measurement of the delivered energy, it brings the wood-energy sector closer to the standards applied to fossil fuels, thereby enhancing its competitiveness, transparency, and appeal. Within the Swiss energy system, this innovation supports the transition to local renewable sources and encourages better management of heating installations.



To achieve these goals, the project was structured around two main components. The first, a pilot and demonstration phase, led to the construction of a fixed industrial installation at Énergie Durable SA, capable of continuously measuring the mass and moisture of wood chips during loading. A mobile version was also developed, integrated into an agricultural trailer equipped with mass and moisture sensors, to meet the needs of fractional deliveries. The second component, focused on applied research and development, involved validating moisture measurement using an infrared sensor by comparing it with a microwave reference sensor (Moistscan®), which measures moisture across the entire load. Tests were conducted both on a test bench and in real-world conditions, with calibration adapted to various wood species, particle sizes, and moisture levels. An exploratory study on capacitive moisture measurement was also carried out.

The results obtained are highly encouraging. The fixed installation achieved an average error of $\pm 0.7\%$ for mass and $\pm 0.5\%$ for moisture, with overall energy measurement errors consistently below 5%. The SWR microwave sensor was validated for the mobile version, showing strong robustness and easier integration than the IR sensor. The Moistscan® sensor demonstrated good accuracy for fixed installations, especially in cases of high moisture variability. A dynamic calibration protocol was developed for all sensors, along with periodic control procedures. Although capacitive measurement showed promise in terms of cost and compactness, it proved unsuitable when wood chips were frozen.

In conclusion, the project successfully demonstrated the technical and operational feasibility of continuous energy measurement in wood chips, both in fixed and mobile configurations. These results pave the way for direct energy billing, offering a fairer and more motivating system for both suppliers and consumers. In the long term, this approach could be integrated into supply contracts, wood-energy quality management systems, and bioenergy support policies. Aficor is continuing the commercial development of the systems, with several initiatives underway. Additional tests are planned to refine calibrations and validate performance under varied conditions. The system could also be adapted to other types of biomasses, contributing to the diversification and resilience of Switzerland's energy system.



Table des matières

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Table des matières	6
Liste des abréviations.....	7
1 Introduction.....	8
1.1 Contexte et arrière-plan.....	8
1.2 Justification du projet.....	8
1.3 Objectifs du projet.....	10
2 Description des installations.....	10
3 Procédure et méthode.....	13
4 Travaux effectués	13
4.1 Installation pilote de mesure d'énergie chez Énergie Durable SA – lot 1a	13
4.2 Évaluation d'un nouveau capteur à micro-ondes pour la détermination de l'humidité – lot 1b	15
4.3 Développement d'un dispositif mobile – lot 2	15
5 Résultats obtenus et analyse	18
5.1 Installation stationnaire – lot 1a	18
5.2 Évaluation d'un nouvel analyseur d'humidité par micro-ondes – lot 1b	23
5.3 Installation mobile – lot 2	25
5.4 Récapitulatif global	34
6 Méthodologie de mise en œuvre	36
7 Perspectives et suites.....	36
8 Conclusions	37
9 Coopération nationale et internationale.....	38
10 Communication	38
11 Publications	38
12 Annexes.....	38
12.1 Documentation Moistscan®	38
12.2 Documentation EDIT	38
12.3 Documentation SWR -Sens 2.....	38
12.4 Poster tapis fixe	39
12.5 Poster version mobile	40



Liste des abréviations

PF : Plaquettes Forestières

P&D : Pilote et Démonstration

Ra&D : Recherche appliquée et Développement

IR : Infrarouge

μO : micro-ondes

CC : Cahier des Charges

ED : Énergie Durable SA

IE : Institut des Énergies



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

La détermination du contenu énergétique des plaquettes forestières (PF) se fait actuellement, dans la majorité des cas, sur la base de la chaleur utile mesurée chez le consommateur. Ce mode de facturation pratique présente plusieurs limites : il n'encourage pas l'utilisateur à exploiter au mieux le contenu énergétique des plaquettes en assurant un entretien approprié du générateur de chaleur, d'une part. D'autre part, il ne motive pas le fournisseur à livrer des plaquettes d'une qualité appropriée à assurer le bon fonctionnement du générateur de chaleur. Finalement, il restreint l'approvisionnement à un seul est unique fournisseur par période de chauffage. À ce jour, aucun système opérationnel ne permet, au niveau national ou international, de mesurer directement et de manière fiable le contenu énergétique des plaquettes forestières au moment de la livraison.

Dans ce contexte, la HEIG-VD a développé, dans le cadre d'une étude financée par le canton de Vaud et l'OFEN, un système permettant la détermination en continu de l'énergie contenue dans les PF. Le concept repose sur une valeur conservative du pouvoir calorifique par unité de masse, complétée par une mesure dynamique de l'humidité et de la masse de bois délivrée. Ce système a été validé expérimentalement, avec une erreur sur la quantité d'énergie fournie à la livraison inférieure à 5 %.

Les documents concernant ce premier projet XyloChips (I) sont disponibles via les liens suivants :

- [rapport Aramis](#) ;
- vidéo en français : [XyloChips-FR](#) ;
- vidéo en allemand : [XyloChips-DE](#).

Le présent rapport rend compte de la poursuite du projet, qui a permis :

- d'éprouver le système en situation opérationnelle, sur une saison de chauffe complète ;
- de développer une version mobile, adaptée aux livraisons fractionnées par benne de vrac.

Ces avancées permettent désormais une mise en œuvre concrète du procédé sur le marché, en réponse aux besoins identifiés lors du projet initial.

1.2 Justification du projet

Le présent projet s'inscrit dans la continuité du développement du dispositif XyloChips, dont le concept a été validé lors d'une première phase financée par l'OFEN et le canton de Vaud. Cette nouvelle étape vise à démontrer la viabilité du système en conditions réelles d'utilisation et à étendre son champ d'application à des livraisons fractionnées, tout en approfondissant la compréhension des phénomènes de mesure liés à l'humidité.

Le projet comporte deux volets :

Volet 1 – Démonstration en conditions réelles

Un prototype industriel a été réalisé par Aficor SA et installé chez Énergie Durable SA, où il est utilisé pour déterminer le contenu énergétique des plaquettes forestières livrées à ses clients, directement au moment du chargement. En parallèle, une version mobile du dispositif est testée en collaboration avec Aficor et Germaplaket, pour répondre aux besoins des livraisons fractionnées typiques du marché agricole ou semi-industriel.

Volet 2 – Recherche et développement

Ce volet vise à valider le concept de mesure linéique de l'humidité par un capteur à point focal unique, en le comparant à une méthode de référence capable d'évaluer l'humidité sur l'ensemble de la charge.



Cette comparaison peut permettre d'optimiser l'étalonnage du capteur en tenant compte de la diversité des essences, des teneurs en eau et des granulométries rencontrées. Une version mobile intégrant pesons, capteur d'humidité et dispositif de déchargement est également développée en collaboration avec Aficor pour les livraisons en vrac.

Importance pour la bioénergie en Suisse

La bioénergie représente une composante essentielle du mix énergétique suisse, notamment dans les régions rurales et forestières. Or, l'absence de système fiable pour mesurer le contenu énergétique des PF à la livraison freine la transparence commerciale, la valorisation équitable du bois-énergie et l'optimisation des installations de combustion.

Ce projet apporte une innovation à deux niveaux :

- Technique : par le développement d'un système de mesure en continu, fixe et mobile, du contenu énergétique des PF, utilisable directement à la livraison.
- Connaissance : par l'approfondissement des mécanismes de mesure de l'humidité et leur influence sur la précision énergétique, avec des résultats transférables à d'autres formes de biomasse.

Ces avancées permettent d'envisager une facturation basée sur l'énergie livrée, à l'instar des combustibles fossiles, ce qui renforcerait la compétitivité et la crédibilité de la filière bois-énergie. Elles contribuent également à une meilleure gestion des ressources locales, à la réduction des émissions de CO₂ et à la sécurité d'approvisionnement énergétique.



1.3 Objectifs du projet

Le volet Ra&D de ce projet a deux objectifs principaux. Le premier consiste à valider la mesure de l'énergie contenue dans des PF en vérifiant que la mesure d'humidité telle qu'elle est réalisée actuellement (bande linéaire de 70 mm de largeur, par infra-rouge) est appropriée. Pour ce faire, il est prévu de la comparer avec l'humidité de la charge totale en faisant l'acquisition d'un capteur d'humidité de référence (Moistscan® MA-500HD) qui utilise la technologie des micro-ondes au travers de l'épaisseur totale du lit de PF. Cet appareil de mesure est développé par Realtime group, basé en Australie.

Par ailleurs, les mesures avec le Moistscan doivent permettre d'optimiser la calibration du système afin qu'il soit à même de caractériser des plaquettes forestières produites à partir d'essences de bois et ayant une teneur en eau et une granulométrie rencontrée dans la pratique. Le but final est d'obtenir un jeu de paramètres de réglage unique, approprié pour déterminer avec une précision suffisante le contenu énergétique dans la majorité des situations courantes.

La validation sera réalisée au moyen du dispositif développé dans le cadre de la première phase du projet XyloChips (I). La validation doit se baser sur une mesure de l'humidité au moyen des deux capteurs d'humidité (standard et de référence), ainsi que par la prise d'échantillons qui seront analysés en laboratoire. Une telle validation est requise préalablement à la mise sur le marché d'un tel système.

Le second objectif principal du volet Ra&D est de développer en collaboration avec Aficor SA et Germaplaket Sàrl un système mobile de mesure du contenu énergétique en équipant une remorque agricole, destinée à la livraison de PF, de capteurs de masse (pesons) et d'humidité. Les capteurs de masse doivent être installés de manière à pouvoir déterminer en continu et avec une précision suffisante l'évolution du contenu en PF de la remorque. La remorque doit par ailleurs être modifiée de manière appropriée à réaliser une mesure fiable de l'humidité des plaquettes lors de leur déchargement. La validation des mesures de l'installation mobile se fera par comparaison avec les mesures effectuées par l'installation fixe, utilisée lors du chargement de la remorque. Un tel dispositif mobile permettra de livrer de manière groupée (et donc efficacement du point de vue de l'énergie nécessaire au transport) des clients n'ayant pas besoin de la capacité de chargement complète d'une remorque. La technologie de mesure de l'humidité des PF sur cette version mobile est basée sur un capteur μ O fabriqué par SWR et déjà testé dans le cadre du projet Xylochips I. Un placement du capteur en sortie de remorque combiné à une nouvelle calibration permettra une mesure fiable.

2 Description des installations

1.a Dispositif fixe, volet P&D :

Le dispositif fixe a été réalisé par Aficor SA et installé chez Énergie Durable SA. Il se compose de deux modules assurant un débit de 9 m³/min (Figure 1) :

- Tapis de mesure [2a] équipé d'une trémie [1a] d'une capacité de 14 m³, il permet la mesure du débit massique et de l'humidité des plaquettes forestières. L'encombrement est de 6,8 × 3,6 × 2,8 m. Ce tapis est plus simple que celui du projet XyloChips I. Des échantillons sont prélevés à chaque chargement pour analyse en laboratoire (pouvoir calorifique, humidité, granulométrie) ;

Tapis de chargement [3a] : il permet de remplir les bennes de livraisons [4] jusqu'à une hauteur de 5,8 m, évitant une reprise par chargeuse sur pneus du lot mesuré par le premier tapis [2a].

L'encombrement est de 5,8 × 3,3 × 8,6 m en position haute et 3,2 × 3,3 × 9,8 m en position basse. Le système est automatisé par la HEIG-VD. La calibration du capteur IR (EDIT) a été ajustée suite à des



évolutions matérielles du fabricant. L'installation finale est visible en Figure 5 du rapport.

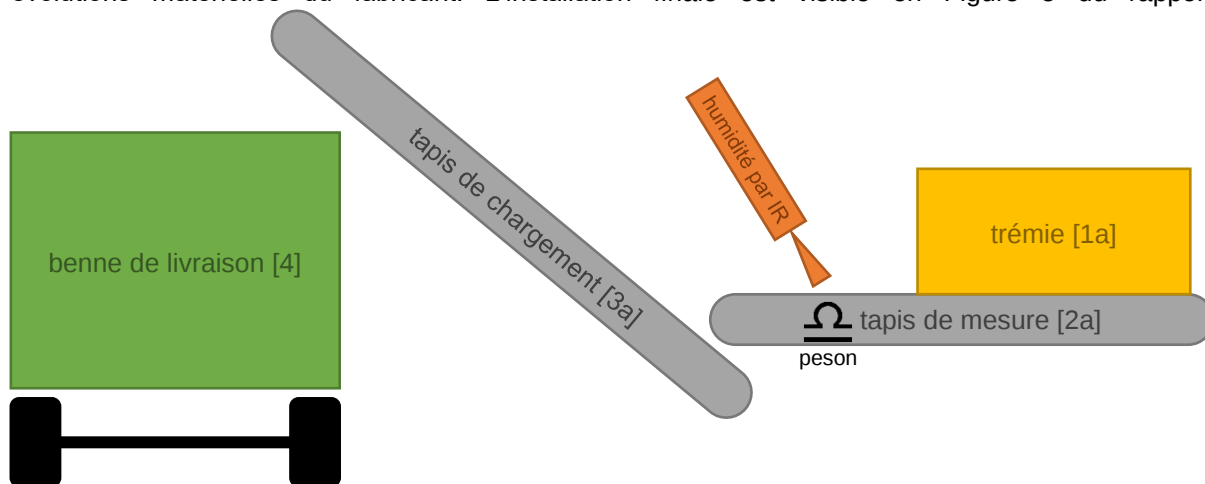


Figure 1: schéma d'implantation du tapis de mesure et de chargement pour le dispositif fixe

1.b Dispositif fixe, volet Ra&D :

Ce dispositif consiste à valider dans le terrain la mesure d'humidité par IR en parallèle d'un capteur d'humidité de référence (Moistscan®) mesurant l'intégralité de la charge (Figure 2).

Cette validation se fait sur le prototype existant (développé dans le cadre du projet XyloChips I). L'installation complète, comprenant un tapis de chargement [3b], un tapis de mesure [2b] et un tapis d'évacuation [5] installé sur le site d'Afikor à Chanéaz. Germaplaket Sàrl a fourni les plaquettes forestières sur place ce qui a permis de modifier plus facilement l'installation.

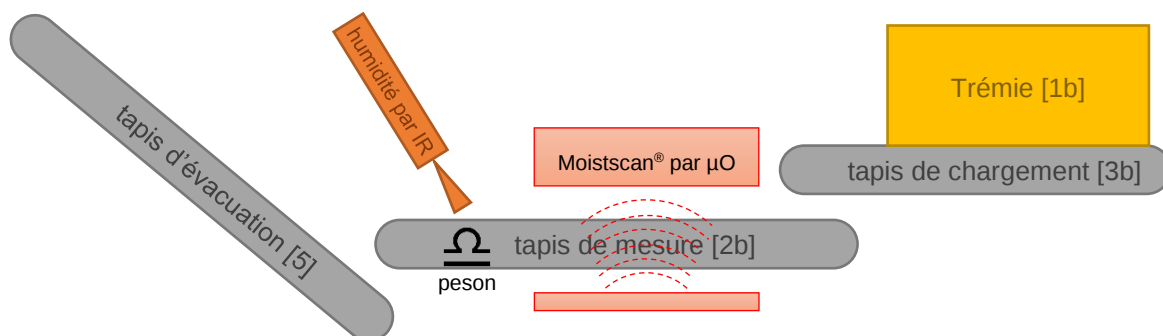


Figure 2 : schéma d'implantation du capteur par µO Moistscan® sur le prototype développé dans le projet XyloChips (I)

Cette démarche vise à déterminer si la mesure linéaire actuelle (un point focal unique positionné au milieu du sillon de plaquettes forestières), qui s'est avérée appropriée en laboratoire, le reste bien dans les conditions réelles du terrain (hétérogénéité des plaquettes en humidité, essence et forme). L'humidité a donc été mesurée de trois manières différentes dans ce lot : par analyse en laboratoire sur prélèvement d'échantillons, par le dispositif actuel à infrarouge de l'installation existante et par le dispositif de référence à micro-ondes MoistScan® (Figure 7) au travers de la totalité de la charge de plaquettes forestières.



2. Dispositif mobile, volet Ra&D et P&D :

Le dispositif mobile a été développé par Aficor et Germaplaket, avec la HEIG-VD. Il est destiné aux livraisons fractionnées par remorque agricole.

- 2.a développement technique :
La remorque est équipée de capteurs de masse (pesons) sur les vérins de stabilisation (cf. Figure 23) et d'un capteur d'humidité IR ou μO SWR monté sur un déflecteur en sortie de benne. Plusieurs configurations ont été testées (cf. Figure 19 et Figure 20), avec une calibration validée pour la version surélevée des capteurs.
- 2.b Validation des mesures :
Les mesures de masse et d'humidité sont comparées à celles obtenues lors du chargement via le prototype équipé du Moistscan®. L'objectif est de vérifier la fiabilité des capteurs soumis aux vibrations et chocs routiers.
- 2.c Suivi terrain :
Plusieurs essais ont été réalisés, avec trois méthodes de mesure d'humidité : prélèvement/laboratoire, capteur IR, capteur μO .

Performances et spécifications :

- Précision masse : erreur moyenne de $\pm 0,7\%$ sur le dispositif fixe ; objectif de $\leq 3\%$ pour la version mobile.
- Précision humidité : erreur moyenne de $\pm 0,5\%$ avec une variabilité de $4,5\%$ pour le capteur μO SWR.
- Erreur globale sur l'énergie : $< 5\%$ dans toutes les configurations validées.
- Schémas et photos

Les schémas d'implantation et les photos des installations sont disponibles dans les Figure 1 à Figure 5 pour le dispositif fixe, et Figure 18 à Figure 21 pour le dispositif mobile. Les posters techniques sont en annexes 12.4 (tapis fixe) et 12.5 (version mobile).



3 Procédure et méthode

Avant de commencer les travaux de réalisation des tapis, plusieurs rencontres bilatérales entre Aficor et Énergie Durable SA (ED) ainsi qu'Aficor et la HEIG-VD ont permis de définir le cahier des charges tant au niveau des besoins d'ED qu'à la définition des attentes d'Aficor en termes de transfert de compétences de la part de la Haute École.

Les analyses sur les plaquettes forestières déterminées en laboratoire sont comparées avec les valeurs d'énergie obtenues par les tapis de mesure, que ce soit via l'installation fixe ou mobile.

Pour que ces données soient représentatives, l'échantillonnage se fera selon la norme ISO 18135 (Biocombustibles solides) avec dans tous les cas un minimum de dix échantillons. Les autres grandeurs le seront selon :

- Humidité, ISO 18134-2 ;
- Pouvoir calorifique, ISO 18125 ;
- Masse volumique apparente, ISO 17828 ;
- Classification, ISO 17225-4.

Toutes les normes ISO citées ont valeurs de norme suisse (SN). Le laboratoire de biomasse sèche de la HEIG-VD est équipé pour réaliser toutes ces mesures en interne. La masse sera comparée avec des prises de mesures de charges complètes (bennes de 40 m³) sur des balances pour véhicules lourds.

4 Travaux effectués

4.1 Installation pilote de mesure d'énergie chez Énergie Durable SA – lot 1a

Dans le cadre du développement d'une installation pilote de mesure en continu de l'humidité contenue dans des plaquettes forestières avant livraison, la société Aficor a développé et réalisé à ce jour :

- Le tapis de mesure [2a] pour ED équipé d'une trémie de 14 m³ et d'un encombrement de 6,8 x 3,6 x 2,8 m (Figure 3) ;
- Le tapis de chargement [3a] pour ED d'un encombrement de 5,8 x 3,3 x 8,6 m en position haute et de 3,2 x 3,3 x 9,8 m en position basse (Figure 4).

Le matériel a été monté et testé dans leur atelier de Chanéaz. La calibration du nouveau capteur infrarouge, toujours de la marque EDIT, a été faite à partir des données récoltées lors des essais de la première campagne (XyloChips I). Par la suite, il est ressorti que les courbes de calibration ne sont pas parfaitement compatibles entre les deux capteurs, principalement en raison d'une évolution hardware réalisée par le fabricant.

À noter que le développement de l'automatisme du système complet a été réalisé par la HEIG-VD pour le compte d'Aficor.



Figure 3 : Atelier d'Afcor, vue de la fabrication de la trémie de chargement combinée avec les mesures d'humidité et de masse.

L'ensemble du système a été mis en place chez Énergie Durable (Figure 5) en septembre 2022. Les essais ont alors changé de nature puisqu'ils ont consisté en la validation des données obtenues sur le terrain en comparaison avec les analyses du laboratoire de l'IE (voir §5).



Figure 4 : tapis de chargement en fabrication



Figure 5 : Installation finale dans le hangar de Châtillon - Énergie Durable SA



4.2 Évaluation d'un nouveau capteur à micro-ondes pour la détermination de l'humidité – lot 1b

Lors du premier projet (XyloChips I), le capteur retenu pour la mesure de l'humidité des plaquettes forestières a été un capteur IR fourni par la société EDIT. Il avait été déterminé qu'au maximum 2% de la totalité des plaquettes étaient caractérisées (ce pourcentage va déjà au-delà des prélèvements conventionnels, voir norme ISO 18135 : Biocarburants solides – Échantillonnage) et qu'une humidité de surface trop importante des PF pouvait dans certains cas fausser les résultats.

D'un autre côté, la mesure par μO en contact avec la matière à analyser n'a pas donné entièrement satisfaction dans le cadre du projet Xylochips I en termes de dispersion des résultats.

L'étude proposée dans le lot 1b a consisté à évaluer un autre système de mesure, combinant les avantages de l'IR (mesure sans contact) avec ceux du μO (mesure dans la matière elle-même). Le matériel sélectionné, le Moistscan®, permet de combiner l'analyse par ondes radios et sans contact (Figure 7).

Ce capteur a été monté sur le tapis de mesure en série avec l'EDIT (Figure 6), ce qui doit permettre de comparer les deux systèmes (§5.2).

Parallèlement à ces travaux, le capteur IR a été mis à niveau par le fabricant après un arrêt de plus de 18 mois.

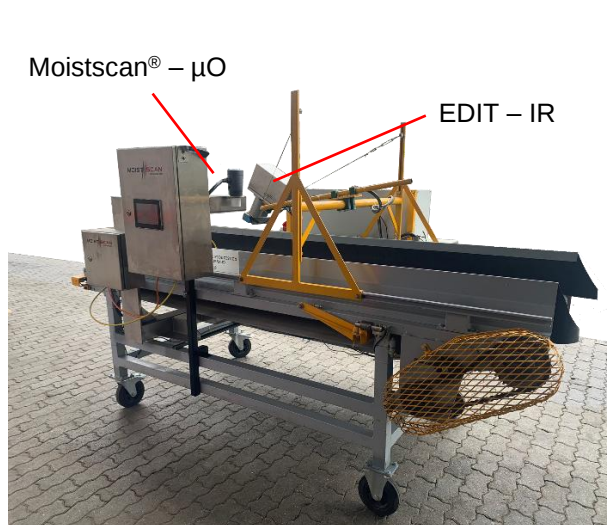


Figure 6 : intégration du Moistscan® sur tapis XyloChips I

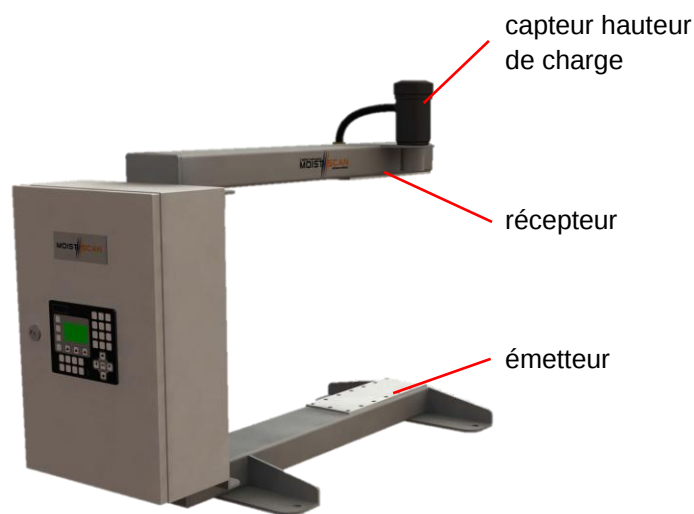


Figure 7 : Moistscan®

4.3 Développement d'un dispositif mobile – lot 2

4.3.1 Étude sur des mesures alternatives d'humidité d'une charge de plaquettes forestières

Comme abordé au chapitre 2, la mise en place du capteur EDIT (IR) sur une benne de livraison, a fait apparaître deux problèmes d'intégration :

- choix de la position du capteur pour une mesure représentative et reproductible ;
- protection du capteur contre les chocs routiers et lors du déchargement de la matière.

Il a donc été décidé d'explorer d'autres pistes pour la mesure de l'humidité des PF. Notamment le principe basé sur la valeur capacitive d'une charge, les résultats sont présentés au chapitre 0. Une configuration différente du projet Xylochips I du capteur μO SWR est également étudiée.



4.3.2 Développement d'un déflecteur de mesure de l'humidité des PF lors de la livraison

Une autre alternative au capteur IR d'EDIT est proposé dans cette étude, en réutilisant les capteurs μ O SWR qui avaient été écartés du fait de leur variabilité. Pour cela, une nouvelle configuration est proposée (Figure 8) en les plaçant sur un déflecteur en sortie de benne, toujours en contact avec les PF mais sous la charge.

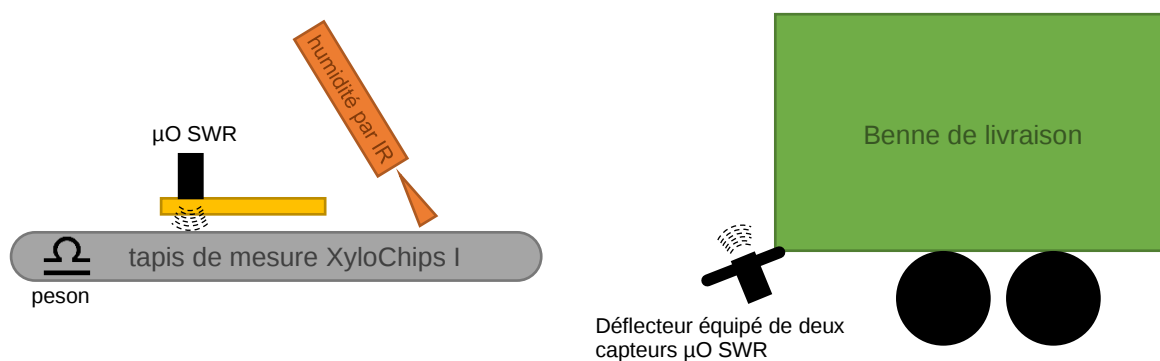


Figure 8 : changement de configuration pour les capteurs μ O SWR, entre le projet XyloChips I (à gauche) et la version mobile (à droite)

Avant installation sur une benne de livraison, le tapis de mesure développé lors du projet XyloChips I a été équipé pour tester cette configuration (Figure 9).

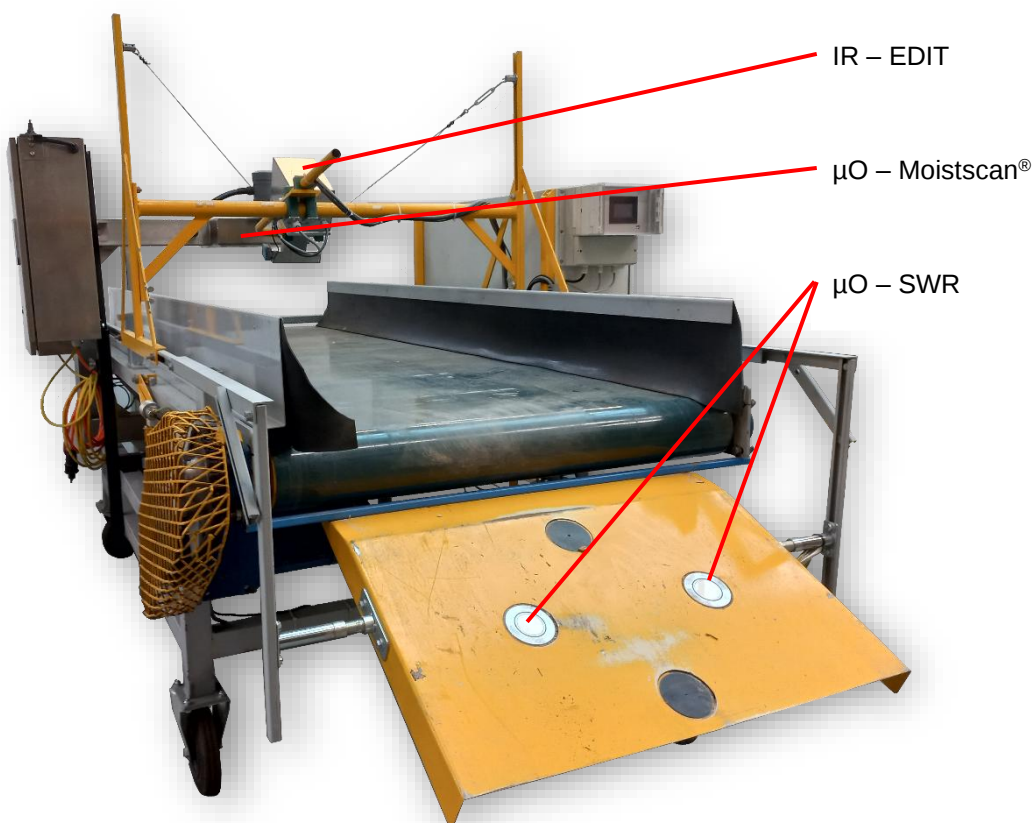


Figure 9 : tapis de mesure développé sous XyloChips I équipé d'un déflecteur muni de deux capteurs μ O SWR



4.3.3 Banc d'essai pour la calibration dynamique des capteurs

Le banc d'essai pour le développement d'un dispositif mobile pour une benne (Figure 9) a permis de valider l'utilisation des capteurs μO SWR déjà utilisés lors du projet XyloChips I.

Les essais ont consisté en la calibration statique des capteurs SWR. Ils ont été complétés par des essais dynamiques. C'est en ce sens qu'une installation permettant de réaliser une calibration en circuit fermés a été mis en place par Aficor SA (Figure 10).

Des lots de bois de différentes humidités ont été placés directement sur les capteurs et de nouvelles courbes d'étalonnage ont été définies. Par rapport au premier projet, une attention particulière a été apportée aux fortes teneurs en eau, pour réduire les grandes variabilités alors observées.

La configuration du projet Xylochips I a été récupérée et adapté pour permettre le test et la validation des trois capteurs d'humidité. La Figure 10 montre le dispositif permettant ces essais. Cette configuration permet une mesure dynamique en continu puisque les plaquettes tournent en circuit fermées.

L'installation complète se trouve dans les locaux d'Aficor, dans un hangar, à l'abri des intempéries mais non chauffé.

Le tapis de mesure est composé, dans l'ordre, du capteur μO Moistscan®, du capteur IR Edit et du capteur μO SWR.



Figure 10 : Dispositif de test des 3 capteurs d'humidité pour la mesure en continu des plaquettes forestières avec, en encadré, le tapis de mesure



5 Résultats obtenus et analyse

Les intervalles de tolérance (IT) mentionnés dans ce chapitre sont tous calculés pour un risque $\alpha = 5\%$. Cela signifie que 95% des moyennes calculées à partir de n'importe quel lot d'au moins trois échantillons prélevés seront compris dans cet IT.

5.1 Installation stationnaire – lot 1a

5.1.1 Détermination de la masse

Le tapis de mesure relève un débit massique et permet de calculer une masse cumulée (Figure 11, courbe bleue). La valeur finale est comparée à celle relevée lors de la pesée de la benne sur une balance pour camion.

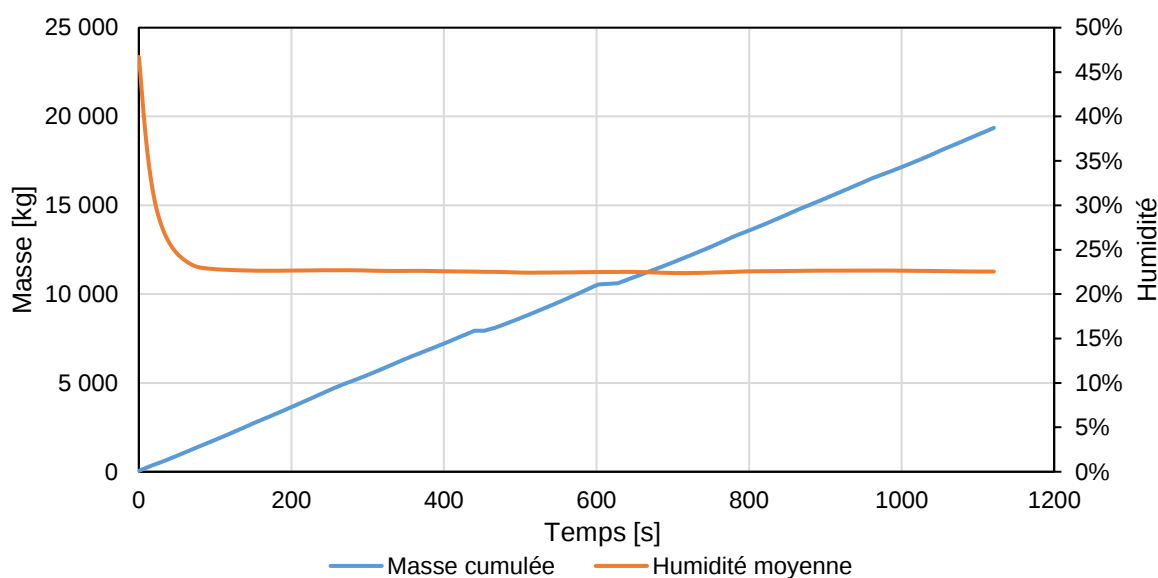


Figure 11 : exemple de courbe obtenue lors du passage des PF sur le tapis de mesure chez Énergie Durable SA

Les paramètres de réglage ont permis d'atteindre des valeurs comprises entre : $0,7 \pm 2,0\%$, soit une limite absolue inférieure à 3% (voir Figure 14).



5.1.2 Détermination de l'humidité

La mesure de l'humidité est la grandeur la plus complexe à déterminer sur cette installation. Le capteur IR a un temps de réponse d'environ 30 secondes au démarrage de l'installation et il doit être tenu compte de cette constante pour ne pas fausser le résultat général.

De plus, le capteur d'humidité peut relever des valeurs faussées dues à des perturbations qu'il reste à définir précisément (Figure 12). Il convient donc d'appliquer les filtres adéquats au traitement du signal sans péjorer la détermination de l'énergie totale délivrée.

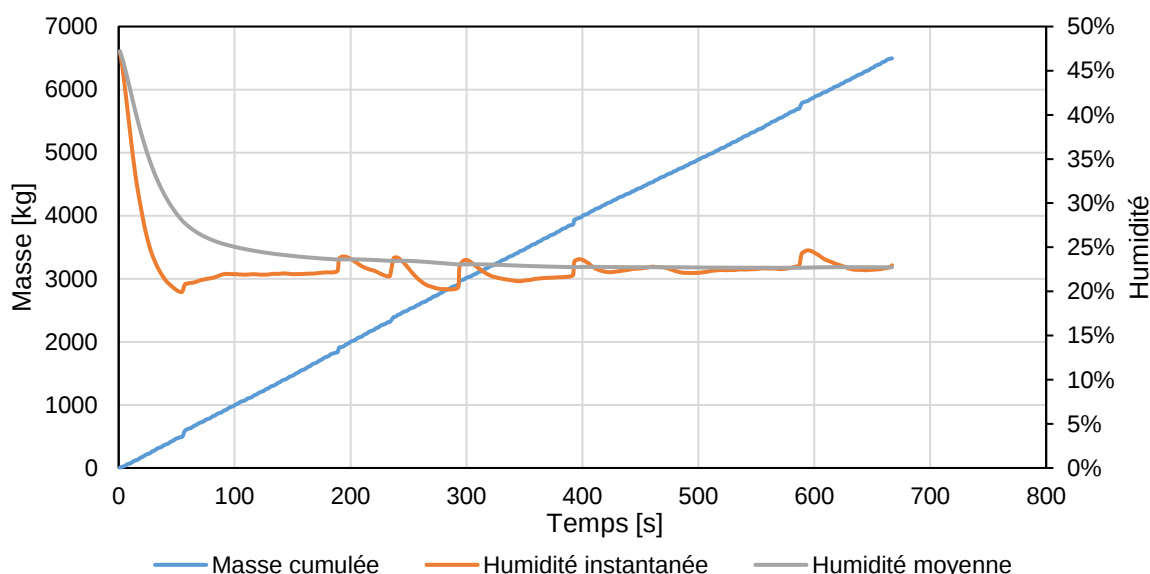


Figure 12 : exemple de variations de l'humidité instantanée dues à des saccades du tapis

La variation moyenne des différences entre les humidités, entre les relevés sur le tapis et le laboratoire, était supérieure à 10% au début des essais (Figure 14). L'objectif était d'atteindre une différence nulle, comprise dans un IT de 5%.

Cependant, les premières mesures complémentaires n'ont pas permis d'améliorer cet objectif. Une raison identifiée était que la courbe de calibration de Xylochips I n'offrait pas une précision suffisante au-delà de 40%. Des points supplémentaires ont permis sa mise à jour lors de la campagne d'essai de la partie mobile (§5.2). Cette nouvelle calibration a été introduite début décembre 2023. De plus, la calibration a été établie sur la base d'un capteur Edit d'ancienne génération. Le capteur présent a dû faire l'objet d'un réglage au moyen d'offsets. Pour des questions de temps, un échange standard a été réalisé entre la tête présente chez ED et celle utilisée lors de la calibration de Xylochips I.

Une nouvelle campagne de validation des mesures a eu lieu en 2024 avec le capteur d'ancienne génération. Il en ressort une variation moyenne plus faible (de l'ordre de 5%) mais toujours avec des problèmes d'exploitation. En effet, ce type de capteur a besoin d'un temps de chauffe important (20 min) ce qui ne convient pas aux processus de travail de l'exploitant (cf. Figure 13). En outre, il est observé qu'à la fin de la période de mesure du graphique de droite (soit après un préchauffage correct), le taux d'humidité converge vers les valeurs initiales présentées au début du graphique de gauche.

Le capteur de nouvelle génération a été recalibré sur le banc de test présent chez Aficor puis réinstallé chez ED. Quelques essais supplémentaires ont permis d'ajuster les offsets pour atteindre l'objectif final (différence <5% entre la mesure effectuée en laboratoire et celle mesurée par le dispositif, Figure 14).

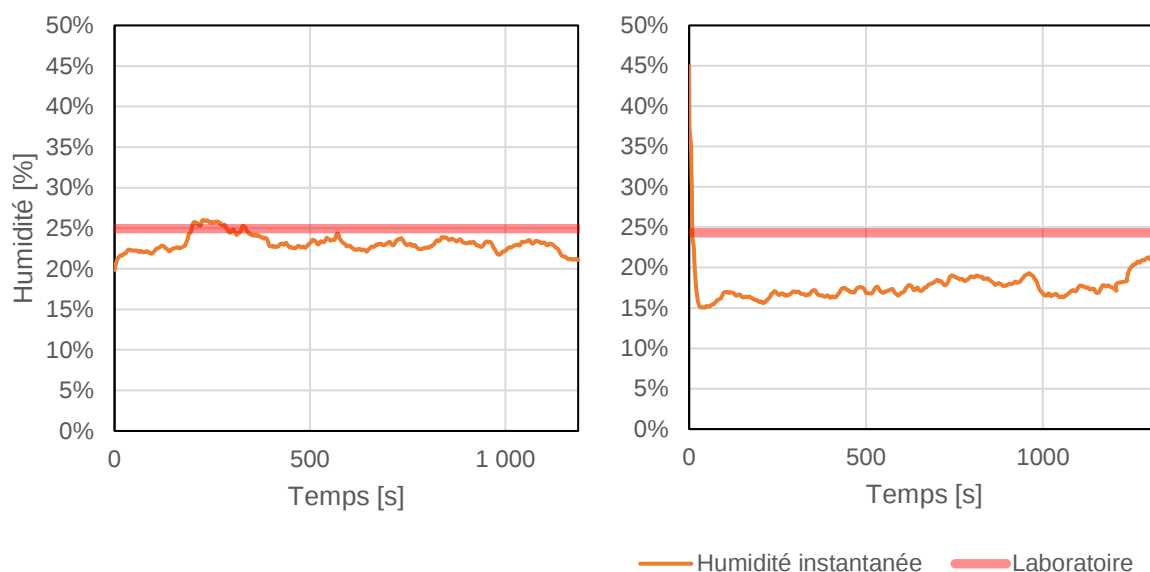


Figure 13 : Comparaison des mesures entre l'humidité instantanée et le laboratoire pour à gauche, un temps de chauffe du capteur respecté et à droite, non respecté

5.1.3 Détermination de l'énergie

L'énergie n'est pas mesurée directement mais calculée à partir des valeurs mesurées de la masse et de l'humidité. Le calcul est le suivant :

Équation 1

$$E = \frac{q_{p,net,ar} \cdot m_{PF}}{3600}$$

Avec E l'énergie totale en MWh, $q_{p,net,ar}$ le pouvoir calorifique inférieur à réception à pression constante en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et m_{PF} la masse des plaquettes forestières humide en kg.

Le pouvoir calorifique est calculé comme suit :

Équation 2

$$q_{p,net,ar} = (q_{v,gr,d} - 212,2 \cdot H - 0,8 \cdot (N + O)) \cdot \frac{(100 - w_R)}{100} - 24,43 \cdot w_R$$

Avec $q_{v,gr,d}$ le pouvoir calorifique supérieur sur sec et à volume constant en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, H le taux d'hydrogène sur sec en %, N le taux d'azote sur sec en %, O le taux d'oxygène sur sec en % et w_R l'humidité relative du bois en %.

Les valeurs constantes suivantes sont prises pour le calcul final de l'énergie :

Grandeurs	Unités	Valeurs
$q_{v,gr,d}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	19'500
H	%	6,0
N	%	0,1
O	%	44,0



Il est important de noter que la valeur du pouvoir calorifique supérieur est conservative pour ne pas préteriter le client final.

La variation des premiers résultats comparatifs entre les données du tapis et le laboratoire était de : $-2,3 \pm 11,5\%$ (cf. Figure 14, histogramme de gauche). Si la moyenne est acceptable ($< 3\%$), la variabilité était encore trop importante pour valider pleinement le processus.

La principale source de variabilité a été identifiée comme étant l'humidité (cf. § 5.1.2), comme le laisse apparaître la Figure 14, histogramme de gauche.

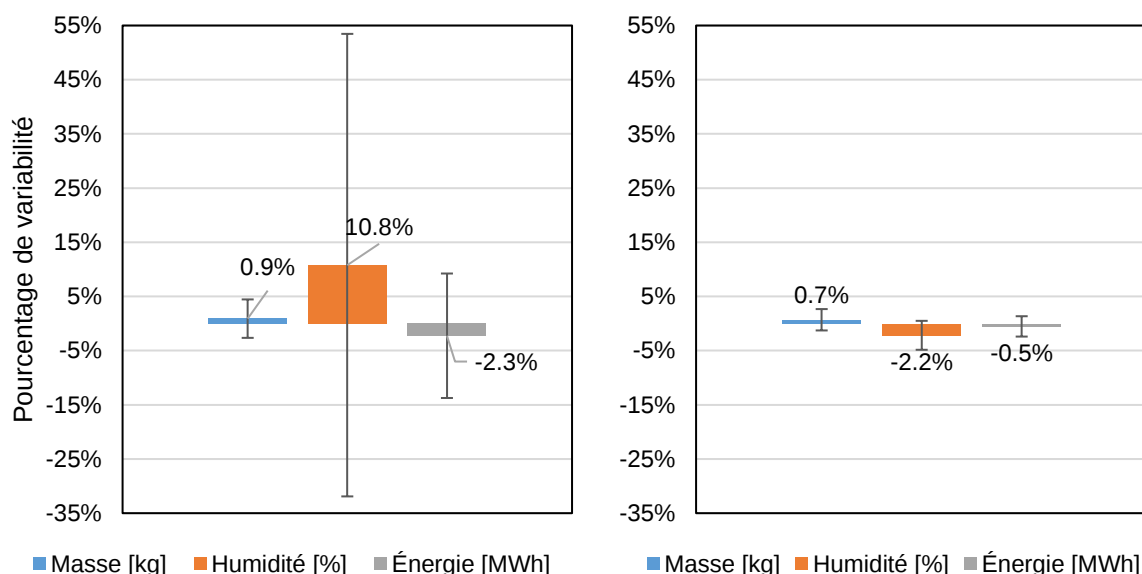


Figure 14 : variabilités relevées entre les mesures effectuées sur tapis vs. Laboratoire avant la recalibration (à gauche) et après la recalibration (à droite)

Comme mentionnée au § 5.1.2, la gamme de mesure du capteur IR ainsi que le changement de génération de capteur n'ont pas permis, dans un premier temps, d'obtenir une précision suffisante pour l'humidité de PF analysées.

À la suite de ce constat, une mise à jour de la calibration a été effectuée et a permis de nettement améliorer la situation comme le montre l'histogramme de droite de la Figure 14 avec une variation sur l'énergie de $-0,5 \pm 1,9\%$.

Il peut néanmoins avoir une source d'erreur supplémentaire liée au prélèvement des échantillons. Sur plusieurs mètres cubes de plaquettes, débités à grande vitesse (2 m/s), il est possible de créer un biais entre les échantillons récoltés pour être caractérisés en laboratoire et l'échantillonnage traité par le capteur IR qui est environ dix fois plus important (0,3% pour le capteur IR vs. 0,03% manuellement).

5.1.4 Étude de l'influence des grandeurs mesurées sur l'énergie des PF

Si les essais réalisés en condition de terrain sont idéals pour éprouver la robustesse des mesures, il apparait important de connaître l'influence de la précision des grandeurs mesurées sur l'énergie et ce, pour contrôler au minimum de manière théorique si toute la plage de mesure permet de respecter le seuil de 5% d'erreur sur la mesure énergétique.



La Figure 15 montre l'influence sur la mesure de l'énergie d'une erreur sur la masse et sur l'humidité et ce pour toute la plage d'humidité attendue de PF (10% à 50%). Quatre dimensions sont présentées :

- Abscisse : erreur relative de l'humidité mesurée ;
- Ordonnée : humidité du bois dans la plage de mesure des PF ;
- Nuancier de couleur : erreur relative sur l'énergie ;
- Titre : chaque graphique représente une valeur d'erreur de masse de +2,5% à -2,5% représentée dans le titre.

Les pointillés noirs représentent la limite admise d'erreur relative de 5% sur l'énergie. Les pointillés rouges mettent en évidence l'écart moyen d'humidité mesuré lors de nos campagnes de mesure.

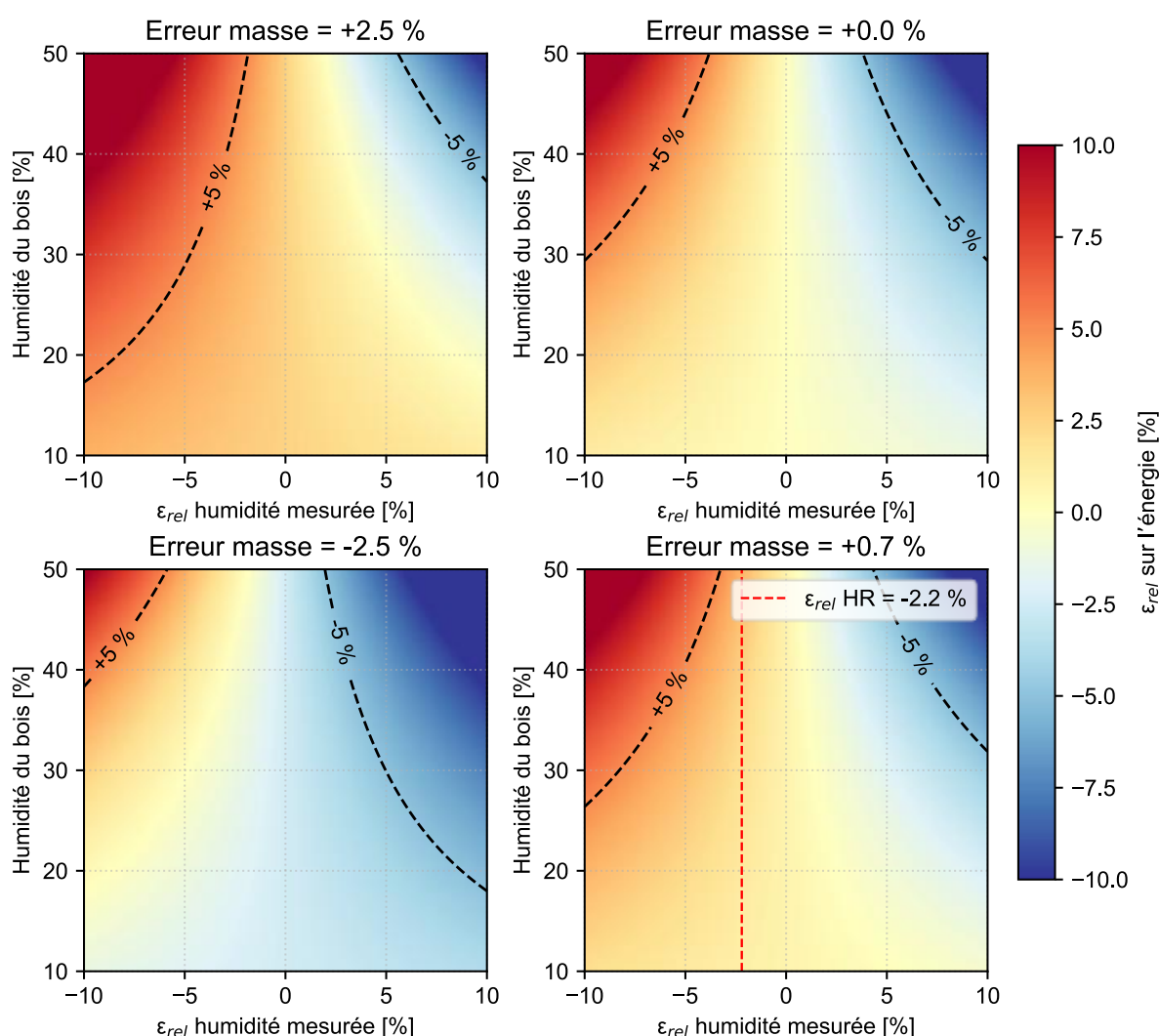


Figure 15 : Variation relative de l'énergie calculée en fonction de l'erreur relative sur l'humidité mesurée, pour quatre hypothèses d'erreur sur la masse (+2.5 %, 0 %, -2.5 %, +0.7 %). Les courbes pointillées noirs indiquent les seuils d'écart $\pm 5 \%$, et la ligne verticale en pointillés rouge correspond à une erreur moyenne d'humidité de -2.2 % relevée lors des campagnes d'essai.



Les graphiques « +2,5% » et « -2,5% » montrent les extrêmes. Pour une erreur de masse à ce niveau, une erreur sur l'humidité de maximum 2% est tolérée pour respecter le seuil de 5% d'erreur sur l'énergie. Un compromis est à trouver entre erreur sur la masse et l'humidité. Pour la version fixe, l'erreur sur la masse moyenne a été de +0,7% (graphique en bas à droite) avec peu de variabilité. Ce qui montre une certaine robustesse. L'erreur est plus grande sur l'humidité avec -2,2% relevée en moyenne (pointillés rouge). En tenant compte des erreurs combinées masse et humidité pour la campagne réalisée, il est possible de confirmer le respect du seuil de 5% d'erreur sur l'énergie et ce, sur toute la plage d'humidité attendu des PF.

Concernant la partie mobile, en raison de la diversité des remorques pouvant être équipées d'un système de pesée et de leur caractère itinérant, une vigilance particulière devra être portée à la mesure de la masse, source potentielle d'erreur significative.

Il est important de noter que d'autres paramètres influencent la mesure de l'énergie comme la composition élémentaire (CHNO) et le pouvoir calorifique supérieur. Ces paramètres sont considérés comme constant dans le calcul de l'énergie et correspondent aux données usuellement employé pour du bois non analysé. Le pouvoir calorifique supérieur est plutôt conservatif pour favoriser le client. Des valeurs plus élevées sont régulièrement mesurées.

5.2 Évaluation d'un nouvel analyseur d'humidité par micro-ondes – lot 1b

Une première campagne de mesure a été effectuée sur l'installation localisée dans les locaux d'Afidor avec des PF fournies par Germaplaket. L'humidité à réception était de 30,7%. Une partie a été introduite dans le dispositif et plusieurs points ont été relevés à mesure que les plaquettes séchaient naturellement. Une autre partie a été laissée à l'extérieur, non couverte, pour permettre à la pluie d'humidifier le bois. Ce lot a par la suite été introduit dans le dispositif de test pour augmenter l'étendue de la calibration.

Toutes les valeurs sont comparées aux mesures d'humidité réalisées en laboratoire sur des échantillons prélevés lors des mesurages par les capteurs.

À ce jour, 10 points de calibrations avec des humidités allant de 13,5% jusqu'à 60,2% ont pu être réalisés. Il s'agit, dans ce chapitre, de comparer le nouvel analyseur d'humidité par μO (Moistscan®) aux deux capteurs connus.

La Figure 16 compare les mesures du laboratoire avec l'humidité relative relevées par les trois capteurs testés. En premier lieu, il convient de préciser que les données des deux capteurs μO bénéficient de la calibration la plus récente, basé sur les résultats du laboratoire. Il n'est cependant pas possible de recalculer l'humidité avec une nouvelle calibration pour le capteur IR. C'est pour cette raison que de gros écarts subsistent pour une faible et haute humidité (mesures I, II, VIII, IX et X). C'est la calibration réalisée dans le cadre de Xylochips I qui a servi de base, avec une étendue de calibration entre 20% et 45%. Les nouveaux extrêmes ont été ajoutés à la calibration, améliorant ainsi la gamme de mesure pour le capteur Edit.

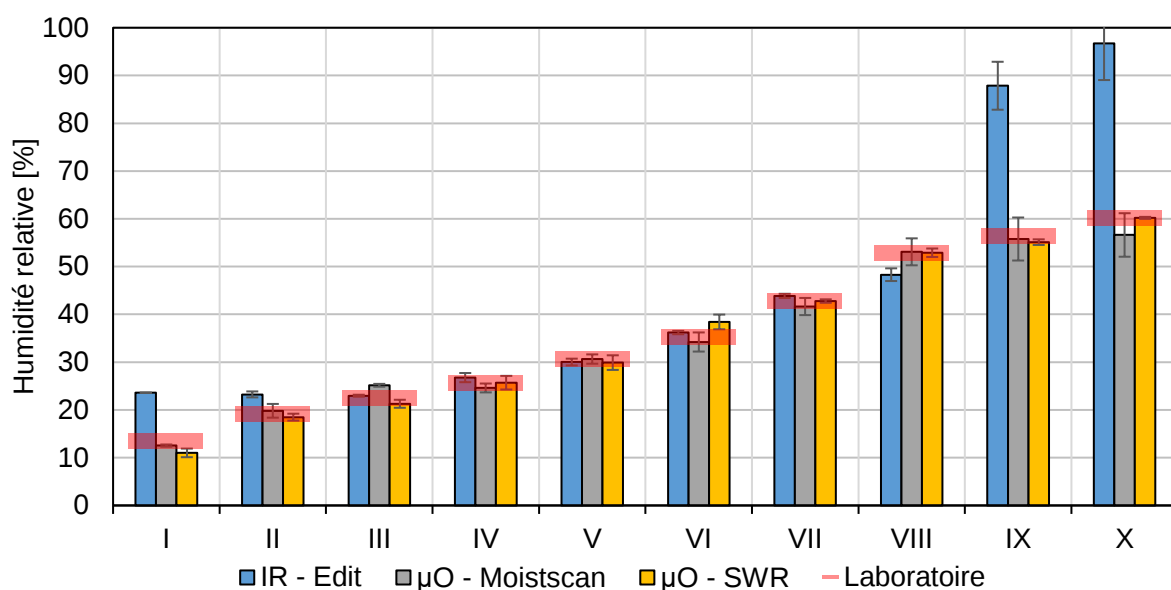


Figure 16 : Comparatif des mesures de PF avec les trois capteurs d'humidité et la mesure en laboratoire

Pour les valeurs intermédiaires (entre 20 et 45%), l'Edit offre une bonne précision avec des écarts relatifs compris entre 4,3% et -2,1% et un RSD (Relative Standard Deviation) maximal de 3,6%.

Le Moistscan® présente des résultats en demi-teinte, avec quelques fois des écarts relatifs très importants (écart relatif de +12% pour la mesure III et -6% pour la X) mais c'est le capteur qui présente la variation d'écart relatif le plus faible. Cela peut être constaté par la somme des carrés des écarts relatifs qui est de 2,7% sur toute la gamme pour le Moistscan® contre 4,7% pour le SWR.

Il a notamment été constaté que le signal du Moistscan® a une forte dépendance à l'épaisseur de matière passant sur le tapis. Ce constat est par ailleurs vrai pour tous les capteurs μO qui voient une partie de l'énergie envoyée absorbée par la matière analysée. Pour le SWR, le placement sur le déflecteur en sortie de tapis avec une pente, permet de garantir une faible épaisseur à peu près constante de la matière et diminue de fait l'interdépendance de l'épaisseur sur le signal μO . Deux possibilités sont envisageables pour le Moistscan®, la première consiste à corriger le signal par une mesure du débit massique des PF alors que le second vise à garantir une épaisseur stable du lit de PF. La 2^{ème} solution réduit la flexibilité de l'installation et oblige une nouvelle calibration pour chaque nouvelle installation.

Le SWR présente des résultats plutôt inattendus. Bien que la somme des carrés des écarts relatifs n'est pas la meilleure (4,7%), à l'exception de deux mesures, c'est le capteur qui présente la plus grande stabilité sur la plage attendue. Le point I ne donne pas de bon résultats (écart relatif de -18%) mais il est très rare de rencontrer des PF avec ce taux d'humidité (<15%). Quant au point VI (~36%), comme on peut le voir dans la Figure 17, il ne semble pas suivre la tendance des autres points.

Les trois capteurs offrent des précisions correctes pour l'application. Des paramètres comme le prix, la robustesse et la facilité de mise en œuvre ont orienté le choix. Pour la partie mobile, le Moistscan® ne convient bien évidemment pas, principalement en raison de son encombrement. L'Edit, plus compact, demande un temps de chauffe important et contient des pièces mobiles pouvant se dégrader à terme. Le choix de son emplacement sur une remorque est également complexe. Le SWR, avec un montage sur déflecteur, convient bien à une partie mobile. Il peut être installé sur une tôle qui serait déployé au moment de la livraison, en même temps que l'ouverture de la porte de la remorque.

En ce qui concerne la partie fixe, le Moistscan® est plus encombrant mais présente un avantage par rapport à l'Edit, le fait qu'il mesure une grande partie de l'échantillon. Il peut être envisagé pour des applications où l'humidité des PF est très variable comme par exemple, lorsque plusieurs lots de



plaquettes d'humidité différentes sont mélangés. Si un tri correct des PF est réalisé et qu'une certaine uniformité peut être garantie, le capteur IR conviendra très bien. Il sera par ailleurs, plus simple à implémenter de par sa compacité et également moins onéreux. Compte tenu de ses qualités (précision et mesure de l'ensemble de la charge), le Moistscan® peut également servir pour le contrôle de la calibration d'autres capteurs moyennant la correction des biais évoqués (dépendance à l'épaisseur du lit de plaquettes).

L'installation fixe sera donc équipée avec un capteur IR Edit en combinaison d'un système de mesure du débit massique TMX110.

5.3 Installation mobile – lot 2

La mesure de masse et d'humidité pour la partie mobile sont étudiés dans ce chapitre.

5.3.1 Mesure de l'humidité - calibration du SWR

La comparaison du capteur SWR par rapport aux deux autres testés a été discuté au §5.2. Ce chapitre décrit la validation de la calibration du capteur pour son utilisation sur la benne mobile.

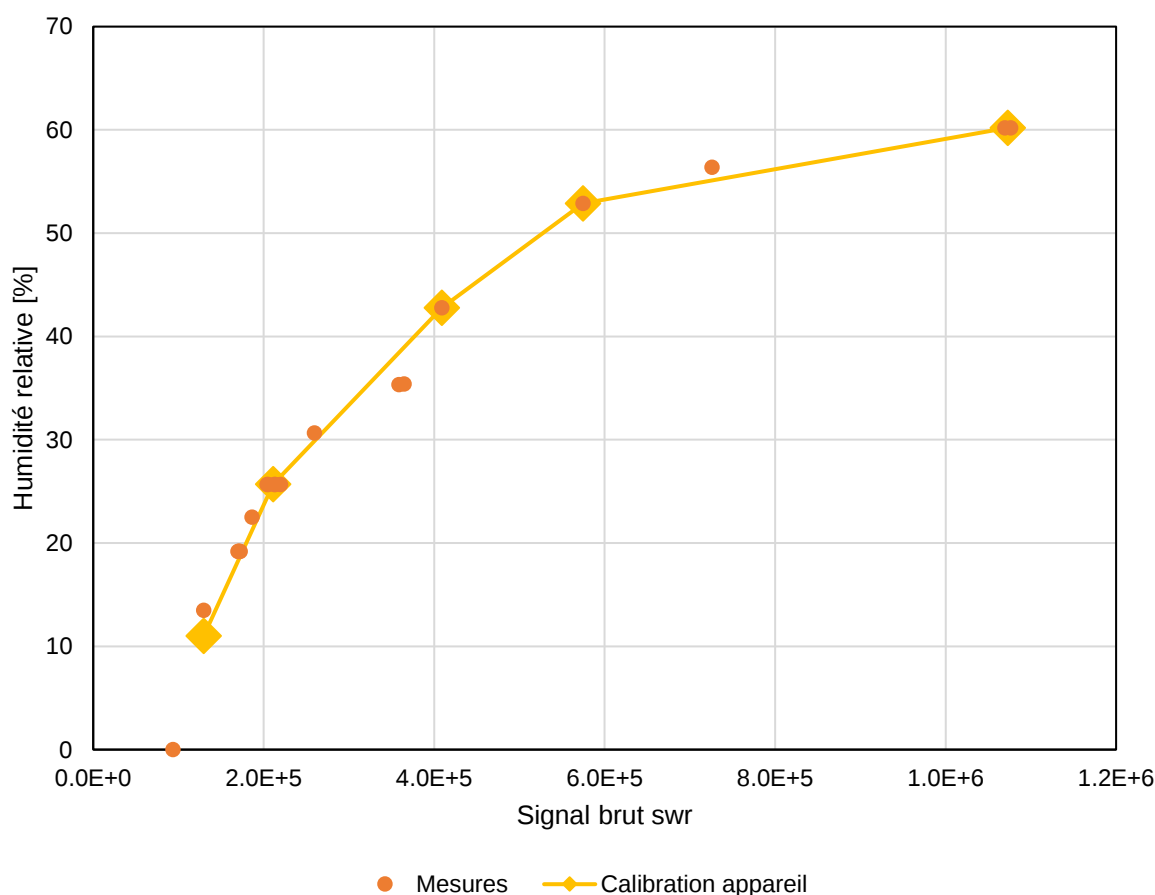


Figure 17 : Humidité relative en fonction du signal brut de l'appareil (état de la calibration au 29.11.2023)

La Figure 17 montre l'humidité relative mesurée en laboratoire par rapport au signal brut donné par le capteur μ O SWR monté sur le banc de test présenté dans la Figure 10. Celui-ci permet d'entrer jusqu'à 5 points de calibration (points jaunes dans la Figure 17). Les points oranges représentent les mesures en laboratoire avec la moyenne du signal donnée lors du prélèvement. On observe clairement que la



relation signal brut-humidité n'est pas linéaire mais plutôt de forme logarithmique avec une zone fortement non-linéaire entre 30% et 55%. Un nombre de points de calibration important est donc utilisé dans cette écart (3 points sur 5 à disposition) pour un résultat satisfaisant. En pratique, des PF avec une humidité relative supérieure à 50% et même inférieure à 15% sont très rares. Une corrélation plus précise n'est donc pas nécessaire pour ces extrêmes.

Une remorque à fond basculant appartenant à Aficor a été équipée d'un déflecteur sur lequel les capteurs μO SWR ont été fixés (voir Figure 18). Plusieurs essais ont été conduits avec un lot de PF fourni par Germaplaket en couvrant la gamme d'humidité de 55% à 10%. Les PF ont été séchées naturellement à l'abri, dans les locaux d'Aficor.



Figure 18 : Remorque à fond basculant équipé d'un déflecteur avec les capteurs μO SWR

La Figure 19 montre la calibration du capteur μO SWR pour trois configurations de montage différentes. La première (en orange) correspond à la modification du tapis de mesure développée dans le cadre de Xylochips I et présentée dans les §4.3.2 et 4.3.3. Il s'agit de la calibration de référence qui a déjà été validée au §5.3.1.

La seconde (en bleu) est la configuration proposée par Aficor et constitué d'une tôle en acier épaisse sur laquelle sont fixés les capteurs. Ceux-ci sont montés à fleur de la surface de sorte que la partie céramique qui cache l'émetteur et le récepteur soit au plus proche du produit. On observe que pour une humidité comprise entre 35% et 55% la calibration est similaire à celle de référence. Pour une humidité inférieure à 35% la courbe a une pente plus importante. C'est-à-dire qu'une faible variation du signal reçu par le capteur (abscisse Figure 19) conduit à une grande variabilité de l'humidité relative et entraîne ainsi une faible précision. Une hypothèse relevée est que la tôle d'acier épaisse absorbe une plus grande partie des μO par rapport au déflecteur d'origine.

Pour ces raisons, Aficor a procédé à la surélévation des capteurs (cf. encadré vert Figure 20). Plusieurs essais (>20) ont été conduits avec cette configuration qui montrent une nette amélioration et a permis de valider la calibration.

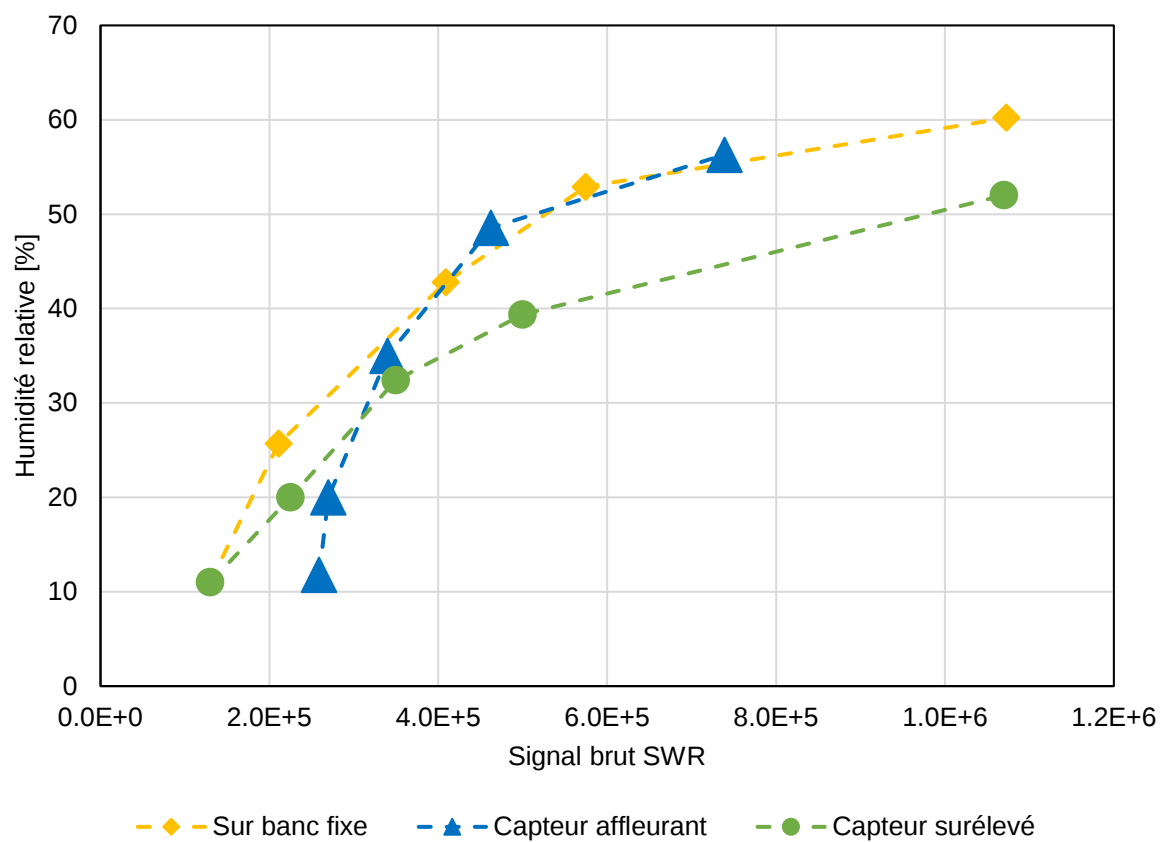


Figure 19 : Calibration du capteur μ O SWR pour trois configurations de montage différentes présentées dans la Figure 20



Figure 20 : Représentations des trois configurations de montage du capteur μ O SWR avec le tapis fixe (orange), le déflecteur de remorque avec capteurs affleurés (bleu) et le déflecteur de remorque avec capteurs surélevées



La Figure 21 montre la calibration retenue (en vert) avec les points correspondants aux humidités des échantillons analysés en laboratoire (en orange) ainsi que les points relevés par le capteur μO SWR (en violet).

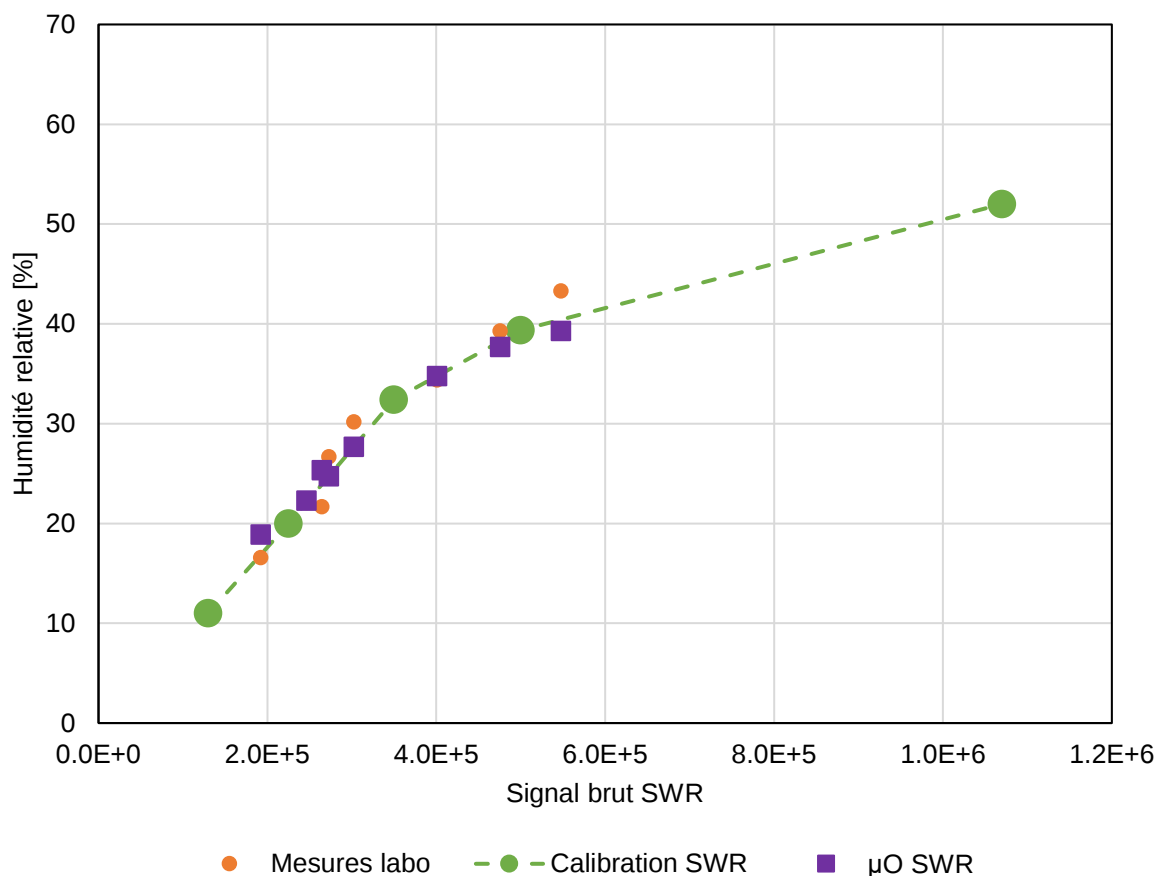


Figure 21 : Calibration retenue du capteur μO SWR après la campagne d'essai avec, en orange, les mesures des échantillons effectués en laboratoire et en bleu, les mesures données par le capteur

En définitive, l'écart relatif moyen entre les analyses laboratoire et les mesures du capteur est de :

$$0,5 \pm 4,5\%$$

L'intervalle de tolérance est donné de sorte à comprendre 95% des moyennes des échantillons. Il est plutôt élevé dans le cas de ces essais en raison du déroulement de ceux-ci. Les PF sont déchargées au sol avec une interaction sur le flux au niveau du déflecteur ainsi qu'une vitesse de vidage plus faible que la réalité (vidage dans une fosse) et une répétabilité moindre en raison de la dépendance des mesures aux manipulations de l'opérateur de la remorque. Des tests complémentaires, toujours en conditions de terrain, permettront de diminuer cet intervalle de tolérance.



5.3.2 Masse

Les remorques neuves du domaine agricole sont, pour la plupart, déjà équipées d'usine de pesons pour le relevé de la masse.

Pour les bennes existantes, ils existent des capteurs qui peuvent être installés mais ils sont onéreux et pas simples à mettre en place. Pour des raisons de coûts et de temps, il peut être plus aisé d'utiliser un système de mesure de masse externe de type piézoélectrique (pont-bascule portable, voir Figure 22) comme ce qui est utilisé par la police pour le contrôle sur le terrain de la masse des véhicules.



Figure 22 : Pont-bascule portable (source : pce-instruments.com)

Concernant la remorque de test, 3 pesons sont montés sur les vérins préexistants qui servent à la stabilisation de la benne (2 proches de l'essieu, 1 sur le timon), comme indiqué dans la Figure 23.

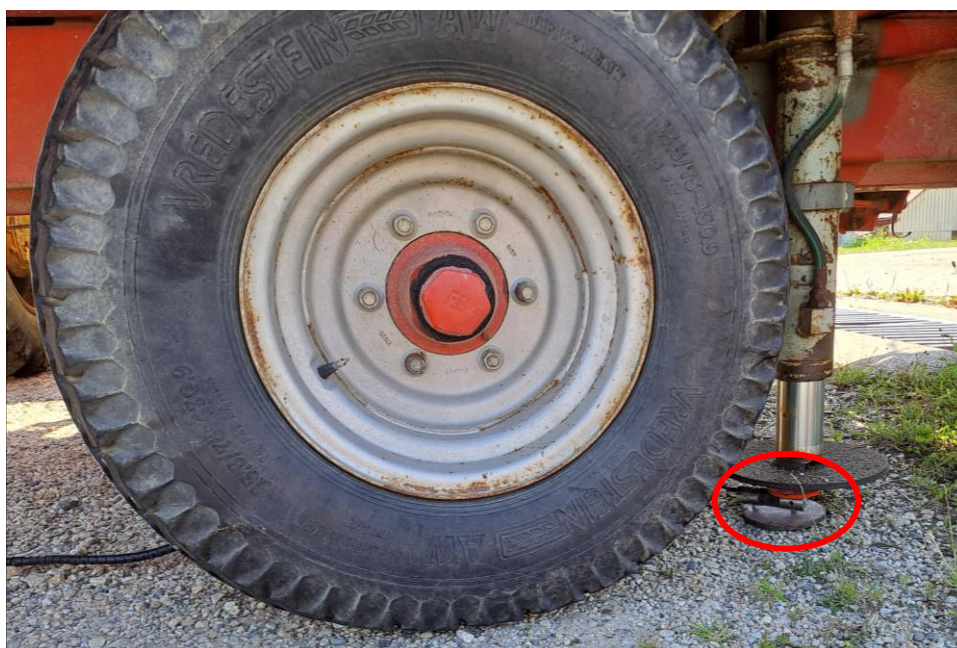


Figure 23 : Pesons équipant le dessous des vérins de stabilisation de la remorque

Le choix est à faire en fonction du client et de son équipement. La précision des capteurs est développée dans le chapitre « 5.3.3 Mesure de l'énergie ».



5.3.3 Mesure de l'énergie

Une comparaison entre les analyses de laboratoire et les mesures terrains ne peut pas être effectuée dans le cadre de ce projet. En cause, le système de mesure de la masse dépend fortement de la remorque utilisée et il n'a pas été implanté de manière durable sur le banc de test. De plus, des analyses de laboratoire supplémentaires comprenant la mesure du PCS devraient être conduites. Ce chapitre vise à établir l'impact des mesures d'humidités sur la mesure d'énergie et d'estimer l'erreur admissible pour un capteur de masse installé sur une version mobile.

À l'instar de la Figure 15, la Figure 24 montre l'influence sur la mesure de l'énergie, d'une erreur sur la masse et sur l'humidité et ce pour toute la plage d'humidité attendue de PF (10% à 50%). Les graphiques mettent en évidence l'écart relatif moyen de la mesure pour le capteur μO SWR (pointillé rouge) et pour une erreur admise sur la masse de 0% (graphique de gauche) et de +3% (graphique de droite). Dans les deux cas, l'erreur combinée d'humidité et de masse permet de respecter l'erreur maximale sur l'énergie. Si l'intervalle de tolérance est inclus dans l'analyse, il apparaît plus compliqué de respecter ce critère pour des humidités élevées. Comme mentionnée dans le paragraphe du dessus, l'intervalle devrait diminuer suite aux essais en conditions réelles.

Dans tous les cas, s'il est possible de réduire l'intervalle de tolérance au même niveau que l'installation fixe ($\pm 2\%$), une erreur de précision de 3% sur la masse resterait acceptable. Après discussion avec des fabricants de système de pesage pour remorques, l'objectif de 3% d'erreur maximale semble atteignable. Des essais supplémentaires à réaliser par Aficor sont cependant nécessaires pour valider la précision de pesage et en définitive la précision de mesure de l'énergie.

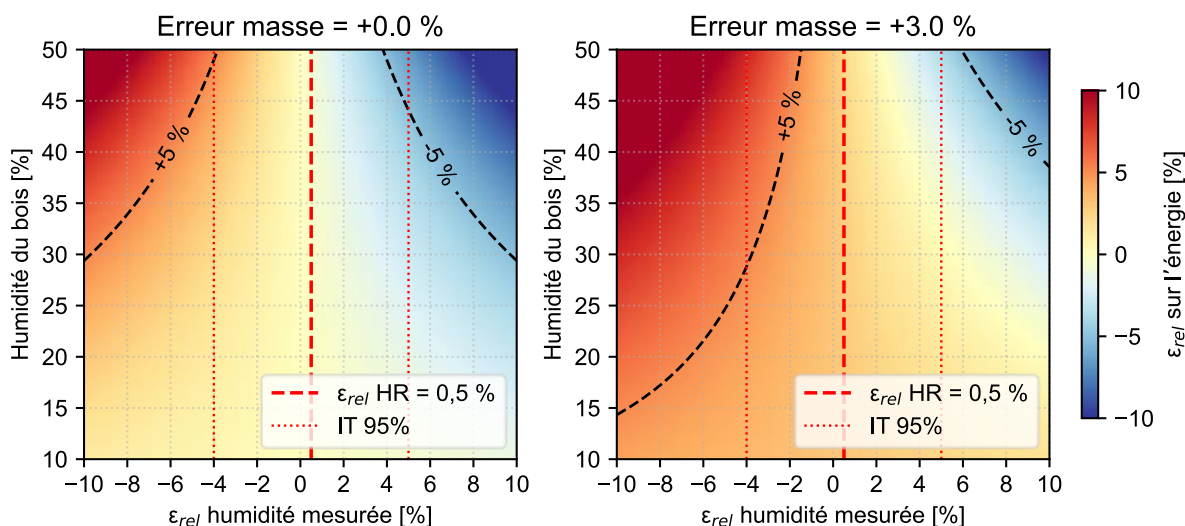


Figure 24 : Variation relative de l'énergie calculée en fonction de l'erreur relative sur l'humidité mesurée, pour deux hypothèses d'erreur sur la masse (0 % et +3%). Les courbes pointillées noirs indiquent les seuils d'écart $\pm 5\%$, et les lignes verticale en pointillés rouge correspond à une erreur moyenne d'humidité de $-0,5\%$ avec l'intervalle de tolérance 95% relevée lors des campagnes d'essai.



5.3.5 Détermination de l'humidité par mesure capacitive

Le présent chapitre documente l'étude de l'intégration d'une méthode capacitive de mesure de l'humidité pour la version mobile du dispositif. Des avantages sont attendus en termes de simplicité de mise en œuvre, de coût réduit, de robustesse ainsi que d'encombrement réduit comparativement à la technologie IR.

Principe

La mesure se base sur la différence importante entre la constante diélectrique du bois ($\epsilon_{\text{bois}} \approx 4$) et de l'eau liquide ($\epsilon_{\text{eau liquide}} \approx 80$).

Déterminer la capacité électrique d'un échantillon de bois se fait à l'aide d'un capacitance-mètre. Ce dernier mesure, non pas la capacité, mais l'impédance (cf. Figure 25) composé d'une résistance et d'une inductance (condensateur ou self) en série.



Figure 25 : différence entre un condensateur réel et idéal

Un capacitance-mètre envoie un courant électrique à travers le condensateur et mesure la chute de tension à ses bornes. Elle est provoquée directement par l'impédance. Dans la loi d'Ohm généralisée, l'impédance est composée d'une résistance (noté R) qui constitue la partie réelle et la réactance (noté X) qui est la partie imaginaire. La réactance représente autant une capacité qu'une inductance, en somme, tout objet électronique capable de déphaser le courant et la tension.

$$\text{Impédance } \underline{Z} = \frac{U_{rms}}{I_{rms}} = R + Xj$$

Il s'ensuit que plus la résistance série est élevée plus l'erreur de mesure de la capacité est grande.

Certaines astuces électroniques permettent de s'affranchir de ce problème comme le pont de capacité (ou Wien-Bridge¹). Le principe est d'appliquer une tension à un réseau de résistances et de capacités en combinaison série-parallèle (voir Figure 26) et de faire varier certaines résistances jusqu'à l'obtention d'une tension nulle au niveau de l'indicateur. La valeur de la résistance R_x et de la capacité C_x dépendent alors uniquement de la valeur des autres impédances (voir Équation 3).

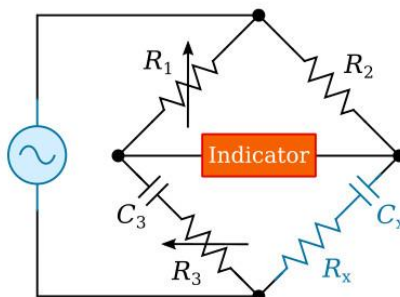


Figure 26 : pont de capacité

¹ https://www.industrial-electronics.com/radio-elec_32.html



Équation 3

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}, C_x = \frac{C_3 R_1}{R_2}$$

Dans le cas d'une capacité, la réactance vaut $\frac{-1}{\omega C}$. Avec ω qui correspond à la pulsation ($\omega = 2\pi f$). La capacité est donc inversement proportionnelle à la fréquence, c'est-à-dire, plus la fréquence est basse, meilleure sera la résolution de mesure.

Équation 4

$$\underline{Z} = R + Xj = R + \frac{1}{j\omega C} = R - j\frac{1}{\omega C}$$

Mesure capacitive dans la littérature

Plusieurs systèmes exploitant la mesure de la capacité sont intégrés dans des appareils industriels. Bon nombre d'entre eux ont été testés pour des échantillons de plaquettes de bois et comparé à d'autres technologies de mesure (IR, μO)².

Il en ressort de grande disparité et une mesure dépendante notamment des paramètres suivants :

- température ambiante ;
- masse volumique apparente ;
- essence de l'arbre ;
- granulométrie.

Une autre étude³ met en exergue le fait que la constante diélectrique de la glace est très similaire à celle du bois. Il en résulte une mesure faussée en cas de gel des plaquettes. Cet état est étudié plus loin (§0).

Mesures exploratoires

Une maquette 1/20 d'une benne à fond poussant (voir Figure 27) est instrumentée par un capacitance-mètre (modèle ESCORT ELC-131D). La borne positive est branchée sur le chassis de la remorque alors que la borne négative est successivement connectée au fond poussant et au déflecteur en sortie.

Deux lots de bois de granulométrie identique (P16F35) mais d'humidité différente (25% et 40%) sont employés. La capacité électrique et la masse de bois restante sont relevées à mesure que le fond poussant avance.

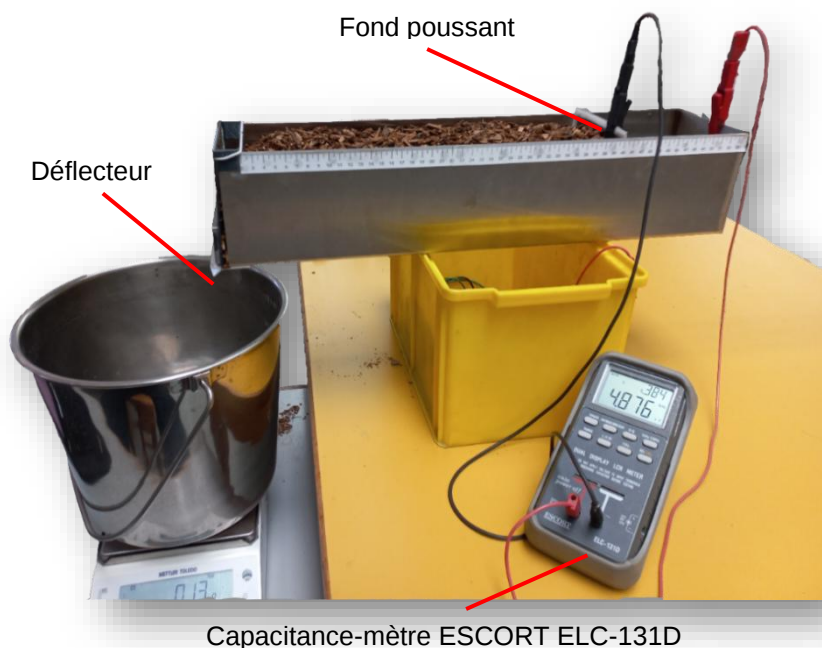


Figure 27 : maquette d'une remorque avec instrumentation pour la mesure capacitive

² P.D. Jensen et al., Biomass and Bioenergy 30 (2006), pp. 935-943

³ L. Fridh, Measuring Forest Fuel Quality for Trade and Production Management, Doctoral Thesis



Les Figure 28 et Figure 29 montrent la capacité électrique en fonction de l'emplacement de l'anode pour des humidités différentes (25% pour la Figure 28 et 40% pour la Figure 29). Une mesure sur le fond poussant semble donner une meilleure résolution mais également une disparité plus dépendante du taux de remplissage de la remorque.

La borne négative branché sur la plaque en sortie de remorque fournit une mesure indépendante du remplissage de la remorque. Ceci s'explique par le fait que la différence de tension entre l'anode et la cathode est mesuré dans une configuration avec un lit de bois d'épaisseur indépendante du taux de remplissage de la remorque. Ce qui n'est pas le cas du fond poussant.

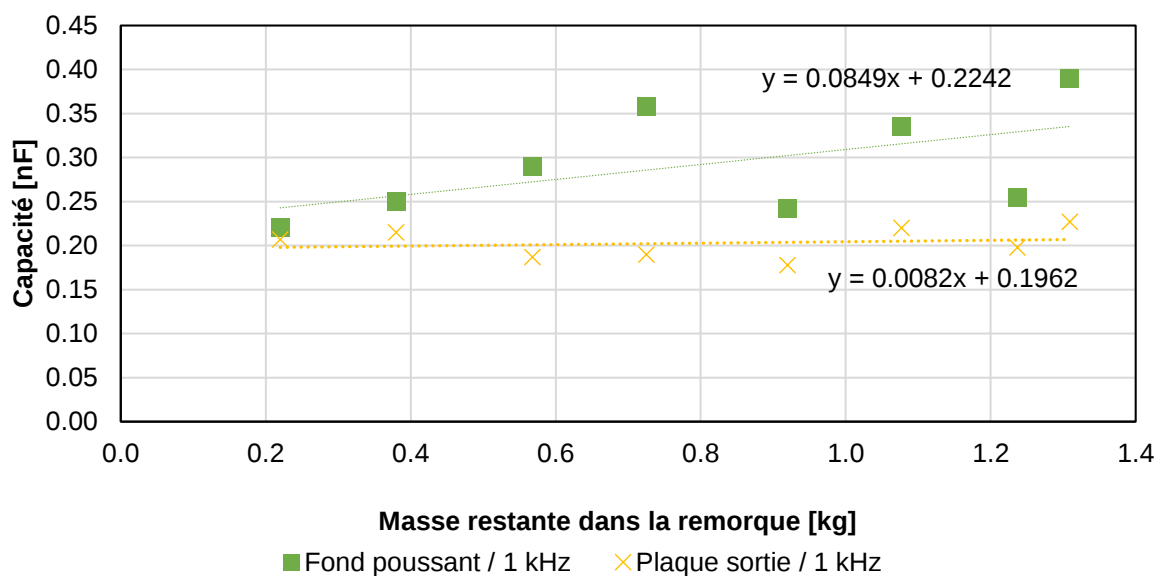


Figure 28 : Capacité électrique en fonction de la masse restante dans la benne pour des plaquettes à 25% d'humidité

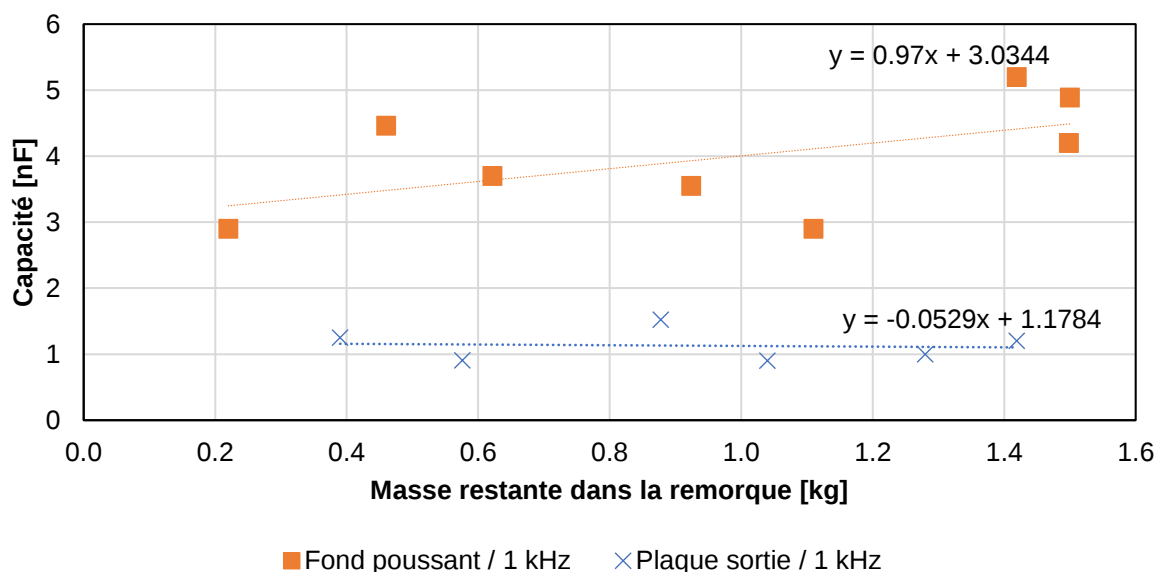


Figure 29 : Capacité électrique en fonction de la masse restante dans la benne pour des plaquettes à 40% d'humidité

La Figure 30 montre une comparaison de la capacité électrique moyenne en fonction de l'humidité des PF. Les barres d'erreur représentent l'écart-type sur la moyenne.



Une différence de capacité moyenne significative est observable pour deux lots de PF d'humidité différentes. Ceci permet de confirmer la corrélation entre capacité électrique et humidité relative du bois.

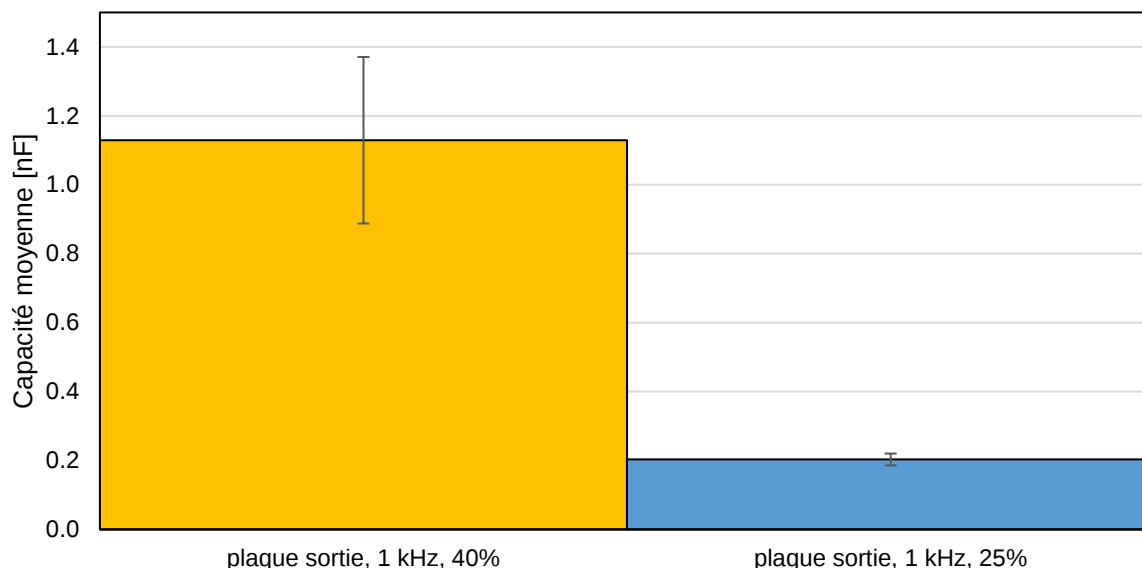


Figure 30 : Comparaison de la capacité moyenne en fonction de l'humidité des plaquettes forestières

D'autres essais pour des humidités différentes pourraient être menés pour connaître plus précisément le relation capacité-humidité du bois.

Essai avec des plaquettes gelées

Les plaquettes forestières employées pour les essais précédents ont été conditionnées à -18°C pendant 72h. Des mesures identiques à celles décrites dans le chapitre précédent ont été réalisées.

La capacité électrique mesurée dans tous les cas (pour une humidité de 40% et 25%) est identique et indique une valeur de 0,06 nF.

La mesure capacitive n'est donc pas appropriée pour la mesure de l'humidité de plaquette forestière gelée.

Conclusion

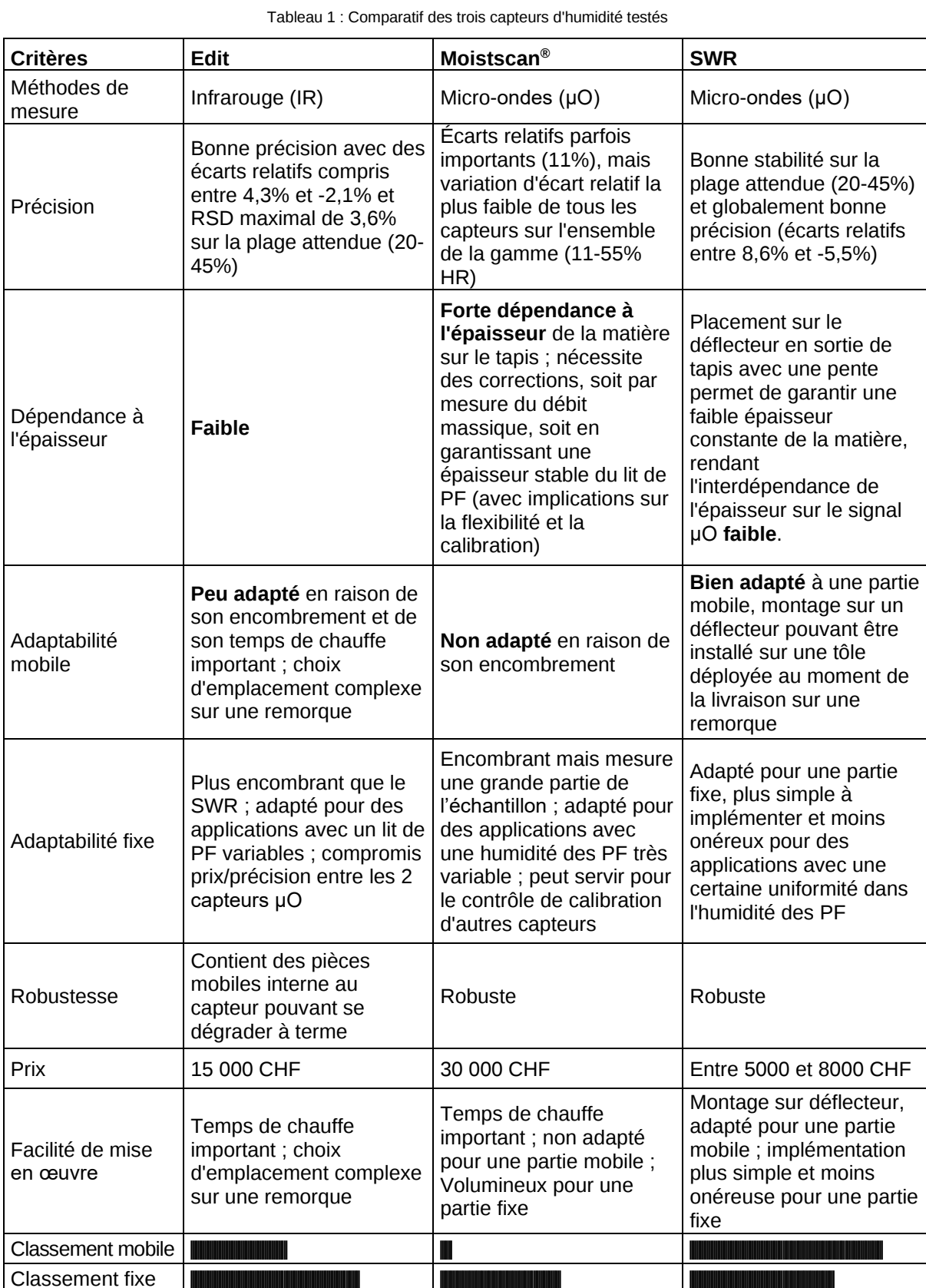
La mise en place d'une mesure capacitive pour la mesure de l'humidité de plaquette forestière dans une benne de livraison démontre plusieurs avantages, notamment en termes de robustesse, de coût et d'encombrement réduit.

Une corrélation entre capacité électrique et humidité de plaquettes forestières a pu être montrée dans cette étude. Des mesures complémentaires permettraient d'affiner la relation.

Un essai sur des plaquettes gelées a montré que l'humidité du bois n'a plus d'influence sur la capacité électrique. Ceci dissuade fortement la mise en place d'une telle technologie sur une remorque de livraison en Suisse puisqu'elle ne permettrait pas de garantir une mesure appropriée en hiver.

5.4 Récapitulatif global

Le Tableau 1 synthétise les principales performances des trois capteurs d'humidité évalués dans cette étude. Il ressort que l'Edit est le plus adapté pour une installation fixe (corrobores Xylochips I). Le μO SWR est quant à lui le capteur retenu pour la version mobile du fait de sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre (ex. : pas de préchauffage requis, compacité) et son coût.





6 Méthodologie de mise en œuvre

Ce chapitre vise à établir les lignes directrices pour la mise en place d'un protocole de mise en service d'une installation stationnaire ou mobile de mesure du contenu énergétique des plaquettes forestières basé sur les résultats et enseignements de la présente étude.

6.1.1 Installation fixe

- Un contrôle du débit massique mesuré par le dispositif TMX110 à vide et à l'aide d'une masse étalon.
- Un contrôle de la calibration du capteur IR avec un ajustage de l'offset si nécessaire basé sur 3 points de mesure entre 15% et 50%. La masse d'essai doit être d'au moins 1000 kg.
- Un contrôle périodique annuel est nécessaire.

6.1.2 Installation mobile

- Contrôle du système de pesage de la benne en comparaison avec une balance officiel contrôlée par un organisme certifié.
- Contrôle de la calibration du capteur d'humidité en place sur le dispositif mobile, sur 4 points aux environs de 15%, 20%, 30% et 45%. Le volume d'essai doit être d'au moins 10 m³.
- Un contrôle périodique annuel est nécessaire.

7 Perspectives et suites

Concernant la partie fixe, une installation est en place chez Énergie Durable SA et permet de déterminer en continu la quantité d'énergie délivrée au chargement.

Pour le système mobile, il existe plusieurs configurations mobiles qui sont différenciées par le système de pesage. L'humidité est mesurée à l'aide du capteur μ O SWR. Le calcul de l'énergie est le même que celui du système fixe.

Aficor poursuit le projet dans sa partie technique et commerciale, plusieurs démarchages sont en cours pour la vente de systèmes fixes et mobiles.



8 Conclusions

La société Aficor, en collaboration avec la HEIG-VD, a pu développer un nouveau tapis de mesure pour la détermination de l'énergie effective contenue dans les plaquettes forestières.

Il a pu être mise en place chez Énergie Durable SA dans des conditions d'utilisation réelles. Les résultats montrent que la détermination de l'énergie via l'humidité et la masse ont une erreur inférieure à 3%.

Parallèlement, un nouveau capteur fonctionnant sur le principe des micro-ondes, scannant la charge de bois dans sa globalité (émetteur et récepteur sont placés de part et d'autre de la charge à caractériser) a été testé et a permis d'obtenir les résultats les plus précis comparativement aux capteurs IR et μO classique (émetteur et récepteur sur le même plan) sous réserve d'adaptation lié à l'interdépendance de la mesure avec la densité du substrat à mesurer. Cet instrument peut servir de référence pour la calibration d'autres systèmes. Il n'est pas adaptable à une solution mobile.

Enfin, une solution mobile a été proposée pour mesurer l'énergie directement lors de la livraison par benne. Elle consiste en la mise en place d'un déflecteur équipé de capteurs SWR (μO). Cette option a été choisie pour servir d'alternative au capteur infrarouge plus fragile. Ce type de capteur est adapté à une utilisation mobile. Les valeurs d'humidité obtenues ont permis d'obtenir une erreur moyenne de 0,5% avec une variabilité de 4,5%. Ces chiffres sont compatibles à une détermination de l'énergie dont l'erreur serait inférieure à 5%, à condition que l'erreur sur la masse reste inférieure à 3%, ce qui est techniquement possible. C'est ce critère qui est déterminant dans le choix du mode de pesée sur la version mobile.

Que ce soit pour une installation fixe ou mobile, il est important de noter que la mesure en continu est plus pertinente que les prélèvements ponctuels, ce qui permet au final une meilleure détermination de l'énergie délivrée avec une erreur inférieure dans tous les cas à 5%.



9 Coopération nationale et internationale

La coopération s'est faite essentiellement de manière bilatérale : entre Aficor, Germaplaket et la HEIG-VD d'une part et Aficor, Énergie Durable SA (ED) et la HEIG-VD d'autre part.

L'équipement a nécessité des collaborations avec les fabricants des capteurs (groupe Cefem, SWR et Moistscan®). Il y a également eu des contacts avec Fibois en France, qui travaille sur une problématique similaire.

10 Communication

Une première présentation du projet a eu lieu lors de l'inauguration du couvert à plaquettes forestières d'Énergie Durable SA à Châtillon. Des posters (§12.4 & 12.5) ainsi qu'une démonstration ont permis de montrer aux visiteurs les avantages de mesures l'énergie contenue dans les plaquettes forestières pour permettre une facturation effective de l'énergie. Liens :

- Énergie-bois Suisse.

11 Publications

Le présent projet n'a pas encore fait l'objet d'une publication.

12 Annexes

12.1 Documentation Moistscan®

<https://moistscan.com/products/ma500-overview/ma500-standard/>

12.2 Documentation EDIT

<https://edit-laser.com/wp-content/uploads/2022/07/Fiche-produit-NIR-2020-BD.pdf>

12.3 Documentation SWR -Sens 2

<https://25w12f.a2cdn1.secureserver.net/wp-content/uploads/2017/09/M-Sens-2-5.16.17.pdf>



12.4 Poster tapis fixe



XyloChips II – système stationnaire

MESURE EN CONTINU DU CONTENU ÉNERGÉTIQUE DE PLAQUETTES FORESTIÈRES

L'Institut de Génie Thermique (IGT) a développé en collaboration avec la PME Aficor une station de mesure fixe permettant une facturation effective de l'énergie avant livraison

Description

> Le contenu énergétique des plaquettes forestières est déterminé actuellement indirectement, à l'aide d'un compteur de chaleur monté à la sortie de la chaudière ; cette quantité de chaleur dépend de son rendement. Pour un automobiliste, cela équivaldrait à payer le carburant en fonction du kilométrage parcouru et non pas de la consommation effective. La méthode de facturation pratiquée n'encourage pas le propriétaire de l'installation à maximiser son efficacité et le contraint à travailler avec un seul fournisseur.

> Un système de mesure en continu a donc été conçu et a permis de valider le bien fondé du concept. Il détermine l'énergie délivrée avec une erreur inférieure à 5%, rendant possible une facturation sur la base du contenu énergétique des plaquettes livrées.

> Une campagne de validation sur le terrain et dans la durée est en cours sur un système stationnaire, en partenariat avec Énergie Durable SA.



Projet XyloChips I



Contacts : Roger Röthlisberger, professeur TIN/IGT, roger.roethlisberger@heig-vd.ch





12.5 Poster version mobile



XyloChips II – système mobile

MESURE EN CONTINU DU CONTENU ÉNERGÉTIQUE DE PLAQUETTES FORESTIÈRES

L'Institut de Génie Thermique (IGT) développe en collaboration avec la PME Aficor un système mobile permettant une facturation effective de l'énergie à la livraison

Description

> Il n'est actuellement pas possible de déterminer l'ensemble du contenu énergétique des plaquettes forestières lors de leur livraison. On procède, dans le meilleur des cas, par sondages et les résultats sont rapportés à l'ensemble du chargement. Cette méthode n'est ni satisfaisante pour le fournisseur, ni pour le consommateur qui ne maîtrise pas la qualité globale de son approvisionnement.

> En parallèle de la validation d'un système stationnaire de mesure de l'énergie, une version mobile destinée à être placée sur les bennes de livraison est en cours de développement. Il reprend les éléments de mesure de l'humidité et de la masse. Le client recevra à terme un bon de livraison à réception des plaquettes forestières, indiquant l'énergie fournie à l'instar de ce qui se fait pour le mazout.



Défecteur équipé de capteurs d'humidité

Prototype pour le développement du système mobile



Contacts : Roger Röthlisberger, professeur TIN/IGT, roger.roethlisberger@heig-vg.ch

