

Projet OPTI-SCREEN

OPTIMISATION DE L'ECHANTILLONNAGE A LA LIVRAISON

Décembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *DALKIA SA, CYLERGIE - ENGIE LAB et FCBA*
N° de convention : 1301C0080

Coordination technique : DALKIA SA déléguée à FCBA – **Direction\Service** : DALKIA SA



SYNTHESE

En partenariat avec :



SOMMAIRE

1. Problématique de l'échantillonnage de biomasse	3
1.1 Qualification de l'approvisionnement des chaufferies biomasse	3
1.2 Références normatives de l'échantillonnage et préconisations	4
1.2.1 Les paramètres de collecte.....	4
1.2.2 Les paramètres de mesures	4
1.3 Objectifs du projet OPTI-SCREEN	5
2. Les pratiques actuelles d'échantillonnage de biomasse	5
2.1 Etat des lieux des pratiques en France.....	5
2.2 Etat des lieux des pratiques à l'étranger	7
3. Etude des paramètres d'échantillonnage à l'aide de campagnes de mesures et d'analyses statistiques.....	8
3.1 Calcul du volume minimal de prélèvement.....	8
3.2 Campagnes de mesures.....	9
3.3 Étude du nombre minimal de prélèvements et de leur localisation.....	9
4. Le protocole OPTI-SCREEN pour assurer un bon suivi qualitatif	12
4.1 Etude du facteur humain : entretiens avec les opérateurs de réception biomasse	12
4.2 Le protocole OPTISCREEN.....	13
4.3 Évaluation de l'opérationnalité du protocole OPTISCREEN	13

Introduction

Le projet OPTI-SCREEN traite de l'analyse des paramètres d'échantillonnage de matière (*volume minimal d'un prélèvement, nombre et localisation des prélèvements*) lors de la réception de biomasse en chaufferie. L'objectif est d'améliorer les protocoles existants en vue d'obtenir une meilleure connaissance des produits entrants (*taux d'humidité, granulométrie, taux de cendres*), éléments essentiels pour la facturation du fournisseur et pour la conduite de la chaudière.

Ce rapport présente l'ensemble des résultats du projet. Une étude préalable s'est intéressée à la problématique de l'échantillonnage et aux pratiques actuellement réalisées en France et à l'étranger (*visites de chaufferies et entretiens avec le personnel*). La rédaction d'un cahier des charges fonctionnel a été menée parallèlement. L'analyse des paramètres d'échantillonnage a ensuite été réalisée en appliquant la théorie de l'échantillonnage des solides aux produits biomasse (*Annexe n°6*) et à partir des données collectées lors d'une campagne d'échantillonnage menée spécifiquement dans le cadre du projet. L'ensemble des résultats a abouti à la rédaction de fiches opérationnelles sous forme d'aides à la décision et de préconisations pour le responsable de site et pour l'opérateur. Des entretiens complémentaires ont enfin été menés pour tester l'opérationnalité du protocole OPTISCREEN par les chefs de site et opérateurs en charge de l'échantillonnage.

1. Problématique de l'échantillonnage de biomasse

Cette partie est une synthèse du rapport d'étude bibliographique sur l'échantillonnage de biomasse (tâche 1.1), fourni en annexe 1.

1.1 Qualification de l'approvisionnement des chaufferies biomasse

Connaissance de la qualité de l'approvisionnement

La méthode d'échantillonnage consiste à effectuer des prélèvements élémentaires sur les produits réceptionnés par camion en chaufferie. La mise en commun de ces prélèvements permet d'obtenir un échantillon qui doit représenter le plus fidèlement possible l'ensemble du chargement réceptionné. Les différents paramètres mesurés sur cet échantillon fournissent les résultats qualitatifs relatifs au chargement réceptionné.

Cet échantillonnage est réalisé par les chaufferies biomasse lors de la réception des produits. Une bonne connaissance de la teneur en humidité, de la répartition granulométrique, et du taux de cendres de l'approvisionnement permet :

- d'adapter la facturation du produit (*paiement en adéquation avec la qualité de la livraison*) ;
- d'adapter les paramètres de combustion (*optimiser le rendement de la chaudière*) ;
- garantir une bonne qualité de l'approvisionnement (*réduire les éventuels dysfonctionnements imputés à la qualité du combustible biomasse*).

Hétérogénéité des livraisons de biomasse

Les combustibles bois-énergie faisant l'objet de référentiels sont les plaquettes forestières (*broyage de bois après exploitation*), les produits connexes issus des industries du bois (*écorces, copeaux, plaquettes et broyats...*) et les produits bois en fin de vie (broyats de palettes). Ces produits sont souvent réceptionnés purs (*produit unique dans le chargement*), parfois en mélange (*mix de produits*).

Les camions à fond-mouvant sont en provenance soit de chantiers forestiers, soit de plateformes de stockage. Le mode de remplissage (par broyeur directement, par grappin ou par chargeur), le transport et le mode de déchargement en chaufferie (*en fosse ou en silo de plain-pied*) sont des facteurs de brassage et donc d'homogénéisation de la matière au sein du chargement.

1.2 Références normatives de l'échantillonnage et préconisations

1.2.1 Les paramètres de collecte

La norme CEN TC 335 - EN 14 778 précise, pour différents types de réception, les paramètres de l'échantillonnage de biomasse : fréquence d'échantillonnage ; nombre, taille et localisation des prélèvements ; outils de prélèvements.

Fréquence d'échantillonnage

Pour un suivi de la qualité de l'approvisionnement, le lot à échantillonner est la biomasse contenue dans un camion réceptionné ou dans un tas. Chaque chargement doit être échantillonné pour garantir une bonne qualité des produits réceptionnés. Pour un contrôle lié à la facturation du fournisseur, le lot à échantillonner peut être la série des camions réceptionnés, subdivisible en distinguant les fournisseurs par exemple. L'échantillonnage doit alors permettre de caractériser globalement les chargements des fournisseurs, la fréquence d'échantillonnage est dépendante de l'uniformité du produit livré.

Nombre et taille des prélèvements élémentaires

La norme présente une formule permettant de calculer le nombre minimal de prélèvements élémentaires en fonction notamment du niveau de représentativité souhaité et du niveau d'hétérogénéité du chargement (*hétérogénéité intrinsèque du produit et hétérogénéité liée à un éventuel mélange de produits*). La taille des prélèvements élémentaires peut être calculée pour différents biocombustibles à partir de références de dimension granulométrie nominale.

Localisation des prélèvements et outils de prélèvement

La norme préconise de réaliser la collecte des prélèvements sur la matière en mouvement, tel que le flux de biomasse lors du déchargement en fosse, sur des zones choisies au hasard, par extraction systématique (*à des instants précis*) ou aléatoire (*instant aléatoire dans des périodes définies*). Il n'est pas préconisé d'échantillonner de la matière statique notamment pour des raisons de sécurité pour l'opérateur, il peut s'agir soit du chargement d'un camion, dans ce cas il faut prélever dans différentes parties permettant notamment de couvrir une éventuelle ségrégation verticale des produits ; soit d'un amoncellement statique (*tas en fosse ou en silo de plain-pied*), dans ce cas il faut diviser visuellement le tas en trois couches horizontales et prélever un nombre de prélèvements proportionnel au volume contenu dans chaque couche.

La biomasse est prélevée par un opérateur à l'aide d'une boîte d'échantillonnage (adaptée à un faible flux de matière) ou d'une pelle d'échantillonnage (pour une matière statique¹). Des solutions technologiques existent pour réaliser des prélèvements automatisés par le haut du camion ou dans le flux de biomasse en déchargement.

1.2.2 Les paramètres de mesures

La norme NF EN 14780 précise la méthode de préparation des échantillons, notamment le quartage pour en réduire la taille.

La détermination de la teneur en humidité peut être réalisée :

- par séchage lent et maîtrisé à l'étuve (*méthode de référence NF EN 14774*) ;
- par séchage rapide (*micro-onde du commerce, Umikron, etc.*) ;
- par des technologies autres (*conductivité, résonance magnétique nucléaire,...*) dont la précision des résultats est fortement dépendante de l'hétérogénéité de la biomasse..

Les méthodes de détermination de la distribution granulométrique et de la teneur en cendre sont décrites respectivement dans les normes NF EN 15149 et NF EN 14775.

¹ Cf. illustration page 11 de l'annexe n°1

Des solutions technologiques (*type sonde proche infra-rouge*) existent pour réaliser des mesures automatisées de taux d'humidité directement sur des chargements de plaquettes forestières². Ces dispositifs semblent permettre d'obtenir une bonne précision mais ils nécessitent du temps de calibration et surtout un investissement financier très important. La qualité des mesures peut être remise en question dans le cas d'analyse d'humidité de biomasses très hétérogènes.

1.3 Objectifs du projet OPTI-SCREEN

Certains paramètres d'échantillonnage préconisés dans la norme CEN TC 335 - EN 14 778 s'avèrent très difficilement applicables en pratique :

- calcul du nombre de prélèvements élémentaires : un pré-échantillonnage serait systématiquement nécessaire pour évaluer le degré d'hétérogénéité du chargement, et en déduire le nombre de prélèvements élémentaires ;
- travail de collecte : la norme fixe le seuil minimal de prélèvements à 10, ce qui représente un travail fastidieux pour une collecte dans le flux ;
- volume total prélevé : ce volume peut représenter plus de 30 à 50 litres (respectivement en plaquettes et écorces) qu'il faudra manipuler (*risques opérateur*) puis réduire par quartage.

L'objectif du projet OPTI-SCREEN est de proposer un protocole d'échantillonnage aux opérateurs en charge de la réception dans les chaufferies biomasse, applicable dans les conditions actuelles de réception. Ce protocole doit permettre au chef de site de choisir *a priori* les paramètres d'échantillonnage (*nombre de prélèvements notamment*) en fonction des livraisons (*natures des produits et mélange de produits*) et du niveau de précision attendu sur la teneur en humidité, la distribution granulométrique et la teneur en cendres. Il doit également permettre à l'opérateur en charge de la réception de calculer *a posteriori* l'incertitude associée à chaque mesure ($X\% \pm ..\%$) en connaissant les paramètres d'échantillonnage appliqués.

2. Les pratiques actuelles d'échantillonnage de biomasse

2.1 Etat des lieux des pratiques en France

Cette partie est un résumé de la synthèse des pratiques d'échantillonnage en France (*tâche 1.2.1*) fournie en annexe 3, cette synthèse a été réalisée à partir de visites de chaufferies gérées par DALKIA SA et COFELY.

Les sites visités ont été choisis pour étudier un échantillon le plus représentatif possible des chaufferies biomasse installées en France : puissance de site, production de chaleur uniquement / cogénération énergétique, localisation des sites (*influence sur les produits consommés*) et personnel chargé de réception entièrement dédié / non entièrement dédié à l'échantillonnage.

Réception de livraisons et approvisionnement

Deux modes de réception de la biomasse ressortent sur les sites visités : en fosse ou en silo de plain-pied. Dans le mode de réception en fosse, la biomasse est déchargée dans une fosse de réception avant d'être transférée dans un silo de stockage (*autonomie de 3 jours environ*), où les produits sont déposés et parfois brassés avant de transiter jusqu'à la chaudière.

Dans le mode de réception en silo de plain-pied, la biomasse y est déchargée directement sur des échelles carrossables. Le silo sert à la fois de stockage et de chargeur actif, au fond des silos un

² Cf. illustration page 21 de l'annexe n°1

convoyeur emmène la biomasse vers la chaudière. Ce système ne permet pas de mélanger les livraisons entre elles (*vidange silo par silo*), ni de stocker une grande quantité de biomasse.

Les chaufferies visitées réceptionnent de 1 à 5 produits différents, la plupart des sites reçoivent plus ou moins fréquemment des mélanges de produits, soit en mix hétérogène (*produits mal brassés et parfois présents en couches dans le camion*), soit en mix homogène (*produits préalablement brassés*).

La mesure du taux d'humidité sert toujours de base pour la facturation au fournisseur. Elle est parfois utilisée pour le réglage de la combustion dans la chaudière. Cependant, il est difficile d'avoir un suivi fin du devenir de la biomasse livrée et celle utilisée dans la chaudière à un moment donné. Il n'est donc pas toujours évident de relier l'humidité de la biomasse mesurée à la réception à celle de la biomasse qui entre dans la chaudière. Quant aux sites de fortes puissances, étant donné la taille du silo de stockage et la séparation des tâches entre opérateurs, il est souvent d'usage de régler le fonctionnement de la chaudière au moyen des mesures d'humidité des fumées. Ces dernières introduisent cependant un biais de par leur décalage avec l'humidité de la biomasse.

Pratiques d'échantillonnage

La première étape de réception est une appréciation du chargement par l'opérateur, cela peut être une estimation de la masse volumique du camion, un contrôle visuel (*couleur, granulométrie, éléments étrangers*) ou encore un contrôle de l'humidité au toucher. Un problème de qualité détecté peut donner lieu à un pré-contrôle du taux d'humidité, à un échantillonnage plus intensif (*en nombre et localisation*) ou à une mesure complémentaire de granulométrie, pour éventuellement refuser un camion avant la livraison.

Chaque chaufferie adopte en général une procédure d'échantillonnage qui lui est propre. Les pratiques peuvent être très différentes à la fois concernant le nombre de prélèvements élémentaires, leur localisation et les outils de prélèvement (*tableau n°1*).

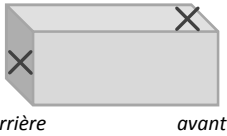
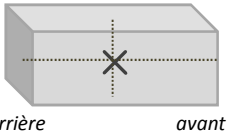
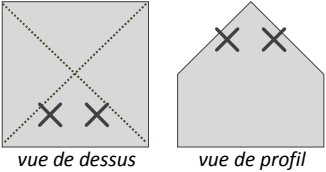
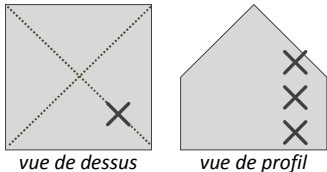
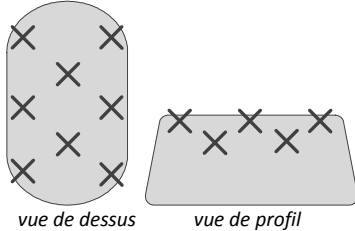
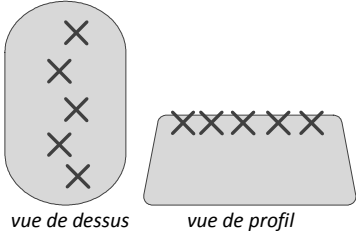
	STATIQUE (tas de matière)	DYNAMIQUE (flux de matière)
Dans le camion	1 prélèvement localisation :  <i>arrière</i> <i>avant</i>	1 prélèvement localisation :  <i>arrière</i> <i>avant</i>
En fosse	1 à 3 prélèvements localisation :  <i>vue de dessus</i> <i>vue de profil</i>	2 à 3 prélèvements localisation :  <i>vue de dessus</i> <i>vue de profil</i>
En silo de plain-pied	3 à 8 prélèvements localisation :  <i>vue de dessus</i> <i>vue de profil</i>	5 prélèvements localisation :  <i>vue de dessus</i> <i>vue de profil</i>

Tableau n°1 : synthèse du nombre et de la localisation des prélèvements élémentaires sur les sites visités

Le tableau n°1 indique le nombre et la localisation des prélèvements élémentaires selon le type d'échantillonnage pratiqué. Ces différences ne sont en apparence pas liées aux caractéristiques de l'approvisionnement (*nombre de produits consommés, livraison en mélanges*) mais elles sont plutôt une conséquence du mode de réception (*fosse ou silo de plain-pied*) et de la facilité d'accès aux produits réceptionnés.

Préparation et mesure des sous-échantillons

Les prélèvements sont souvent superposés dans un seau pour former l'échantillon. Sur une majorité de sites, cet échantillon est rarement mélangé et la préparation des sous-échantillons de mesure ne se fait pas par quartage mais de façon subjective en prélevant la biomasse à la main.

Les mesures du taux d'humidité sont majoritairement réalisées par séchage à l'étuve.

2.2 Etat des lieux des pratiques à l'étranger

Cette partie est un résumé de la synthèse des pratiques d'échantillonnage à l'étranger (*tâche 1.1*) fournie en annexe 2, réalisée à partir de 8 visites de chaufferies et de plateformes (*Italie, Finlande, Suède, Autriche*).

Réception de livraisons et approvisionnement

Sur la plupart des sites visités, l'échantillonnage des produits est réalisé à l'entrée de la chaufferie, comme cela est pratiqué en France. Cependant, certaines chaufferies d'Autriche et de Finlande disposent de plateformes dédiées à la réception de leur approvisionnement. Dans ce cas, la réception et l'échantillonnage des produits ont lieu à l'entrée de la plateforme. Après stockage, la biomasse est transférée directement à la chaufferie sans échantillonnage complémentaire.

La mesure du taux d'humidité sert souvent de base pour la facturation au fournisseur (*forfaits par classe d'humidité*). Lorsque l'approvisionnement est réalisé en propre, le contrôle qualitatif devient plus sommaire.

Pratiques d'échantillonnage

Deux principales manières d'échantillonner ont été observées (*tableau n°2*) :

- sur le haut du camion (*5 sites visités sur 8*) : prélèvements de 1 à 3 prises réparties sur la longueur du chargement, effectués depuis un pont sur la zone de réception à l'aide d'une pelle ou d'une boîte d'échantillonnage.
- sur le tas déchargé (*4 sites visités sur 8*) : prélèvements de 1 à 5 prises à la pelle sur le tas de matière.

nom du site	pays	avt D	après D	prélèvements				mesure H de l'échantillon		
				zone	nb	outil	réceptif	préparation	nb	outil
chaufferie ENA KRAFT	Suède	X		haut du camion	3	pelle	seau	à la main	1	étuve et micro-ondes
chaufferie Fortum	Finlande		X	tas déchargé	4	pelle	seau	non		
chaufferie Enon Energia	Finlande		X	tas déchargé	plusieurs	pelle	bac	à la main	1	étuve
plateforme Güssing	Autriche	X		haut du camion	plusieurs	pelle	seau	à la main	1	étuve
plateforme Vienna Simmering	Autriche	X		haut du camion	4-5	pelle	seau	à la main	1	étuve
chaufferie Allasia	Italie	X	X	haut du camion + tas déchargé	2	pelle	seau	à la main	2	mini étuve Sartorius
Usine AGO/Pellerei	Italie	X		haut du camion	plusieurs	pelle	seau	non	1	humidimètre
chaufferie communale	Italie		X	tas déchargé	5	pelle	seau autrichien	non	1	seau autrichien

Tableau n°2 : Pratiques d'échantillonnage observées sur les sites visités à l'étranger (D : déchargement)

Préparation et mesure des sous-échantillons

Les prélèvements sont souvent brassés avant la préparation des sous-échantillons de mesure. Comme en France, la préparation ne se fait pas systématiquement par quartage mais par prélèvement à la main.

Les appareils de mesures sont identiques à ceux utilisés en France (*étuve et micro-ondes*). Deux sites utilisent le seau autrichien (*mesure par résistivité*) et un appareil portatif de mesure instantanée.

3. Etude des paramètres d'échantillonnage à l'aide de campagnes de mesures et d'analyses statistiques

3.1 Calcul du volume minimal de prélèvement

Cette partie est une synthèse de la note sur la théorie de l'échantillonnage des solides (*tâche 2.1*) fournie en annexe 6. L'analyse a porté sur 10 principaux biocombustibles utilisés en chaufferie biomasse (*3 types de plaquettes forestières, écorces, plaquettes de scierie, 2 types de refus de crible, broyats de souches, broyats de palettes, plaquettes de peuplier*). Chaque produit a été séparé en 7 fractions granulométriques, pour chaque fraction sont mesurés : la masse humide, le nombre de grains, la teneur en humidité et la teneur en cendres. En première interprétation, la fraction la plus fine des biocombustibles étudiés est généralement la moins humide et le taux de cendres y est le plus élevé.

Les calculs de volume minimal de prélèvement ont été réalisés selon la méthodologie développée par P. GY (*Hétérogénéité, échantillonnage, homogénéisation*, 1988) et reprise par C. PASCUAL (*Comment mesurer l'humidité de la biomasse ? Réflexions sur l'échantillonnage et les moyens de mesure*, 2005), les résultats sont présentés dans le tableau n°3.

	TAUX D'HUMIDITE				TAUX DE CENDRES			
	Masse minimale (g) pour une erreur max de				Masse minimale (g) pour une erreur max de			
	0.1%	0.5%	1.0%	5.0%	0.1%	0.5%	1.0%	5.0%
Broyat palettes	27 390	1 096	274	11	888 529	35 541	8 885	355
Broyat souches	1 990	80	20	1	485 791	19 432	4 858	194
Ecorce	29 710	1 188	297	12	125 539	5 022	1 255	50
Plaq For 1	1 821	73	18	1	1 288 502	51 540	12 885	515
Plaq For 2	52 889	2 116	529	21	2 985 351	119 414	29 854	1 194
Plaq For 3	6 561	262	66	3	367 551	14 702	3 676	147
Plaq peuplier	69 200	2 768	692	28	449 912	17 996	4 499	180
Plaq scierie	4 541	182	45	2	374 158	14 966	3 742	150
Refus crible 1	177 829	7 113	1 778	71	7 212 032	288 481	72 120	2 885
Refus crible 2	24 824	993	248	10	322 913	12 917	3 229	129

Tableau n°3 : volume minimal de prélèvement pour les 10 biocombustibles étudiés

Les différentes répétitions d'un même matériau peuvent donner des résultats très différents (plaquettes forestières, refus de crible). Dans le pire des cas, le prélèvement d'un échantillon de 1,8 kg assure d'obtenir une précision d'au moins 1 % sur la mesure d'humidité. Pour obtenir la même précision pour le taux de cendres, il faut une masse nettement plus importante (*>29kg pour une précision de 1% et environ 3kg pour une précision de 5%*).

Connaissant les caractéristiques de chaque matériau, il est possible de réaliser les mêmes calculs pour différents mélanges³.

³ Détail des résultats en annexe 6

3.2 Campagnes de mesures

Cette partie est une synthèse de la présentation des campagnes de mesures du rapport d'analyse statistique (*tâche 2.3*) fournie en annexe 8.

Des campagnes de mesures ont été réalisées sur 32 camions en échantillonnant à l'aide de boîte d'échantillonnage⁴ :

- 16 camions standards, pris au hasard parmi ceux arrivant à la chaufferie ;
- 16 camions constitués spécialement à partir de 2 ou 3 produits en mélange (*par couches, ou en mélange préalablement brassé*).

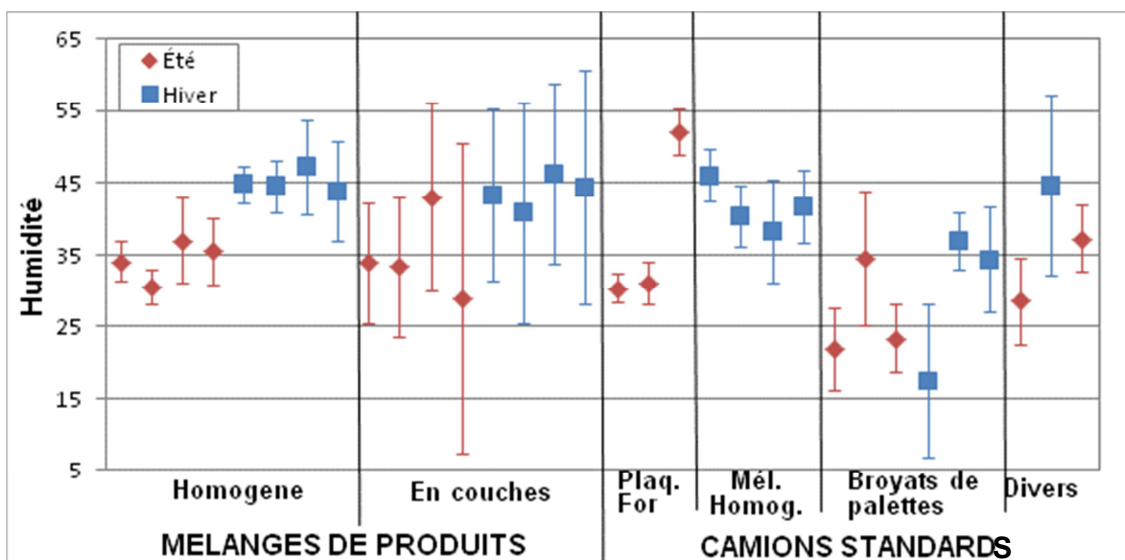
Les campagnes d'échantillonnage ont été menées par DALKIA et CYLERGIE - ENGIE LAB en été (16 camions) et en hiver (16 camions), les camions standards ont été échantillonnés sur 3 chaufferies différentes. 19 camions ont fait l'objet de 20 prélèvements et 13 camions ont fait l'objet de 30 prélèvements. Un protocole a été défini entre les partenaires du projet pour la réalisation de ces manipulations, il est fourni en annexe 7. Au total, ces campagnes de mesures ont permis la réalisation de 770 prélèvements, 1 370 préparations d'échantillons, 980 mesures d'humidité, 390 mesures de granulométrie et 390 mesures de taux de cendre.

3.3 Étude du nombre minimal de prélèvements et de leur localisation

Cette partie est une synthèse de l'analyse statistique (*tâche 2.3*) fournie en annexe 8.

Valeurs moyennes et dispersion

Le graphique n°1 présente pour chaque camion la moyenne des taux d'humidité des prélèvements et l'écart-type. Concernant les mesures d'humidité, on observe que les taux sont nettement plus élevés en hiver qu'en été et que les camions en mélange homogène sont nettement moins variables (*dispersion faible*) que les camions en mélange par couches (*dispersion forte*).



Graphique n°1 : humidité moyenne et intervalle de confiance de la distribution

Répartition des produits dans le chargement

Les prélèvements ont été répartis dans différentes zones du camion : haut/bas, droite/gauche, et sur toute la longueur du camion. Cependant, l'effondrement de la matière au déchargement fait qu'il est très difficile de distinguer la partie haute de la partie basse du chargement lors des prélèvements.

⁴ Cf. illustration de gauche en page 11 de l'annexe n°1

Une analyse de variance a été réalisée pour tester la significativité des écarts entre les différentes zones. Dans certains cas, des zones très différentes peuvent être identifiées sur des camions en mélange (ce qui n'est pas surprenant, ces camions ayant été constitués dans ce but pour les besoins de l'étude), mais également sur certains camions standards, preuve que ce genre de chargement peut se rencontrer dans l'approvisionnement classique d'une chaufferie.

Nombre minimal de prélèvements

Concernant les taux d'humidité, les dispersions observées dans le graphique n°1 conduisent à distinguer 4 types de chargement :

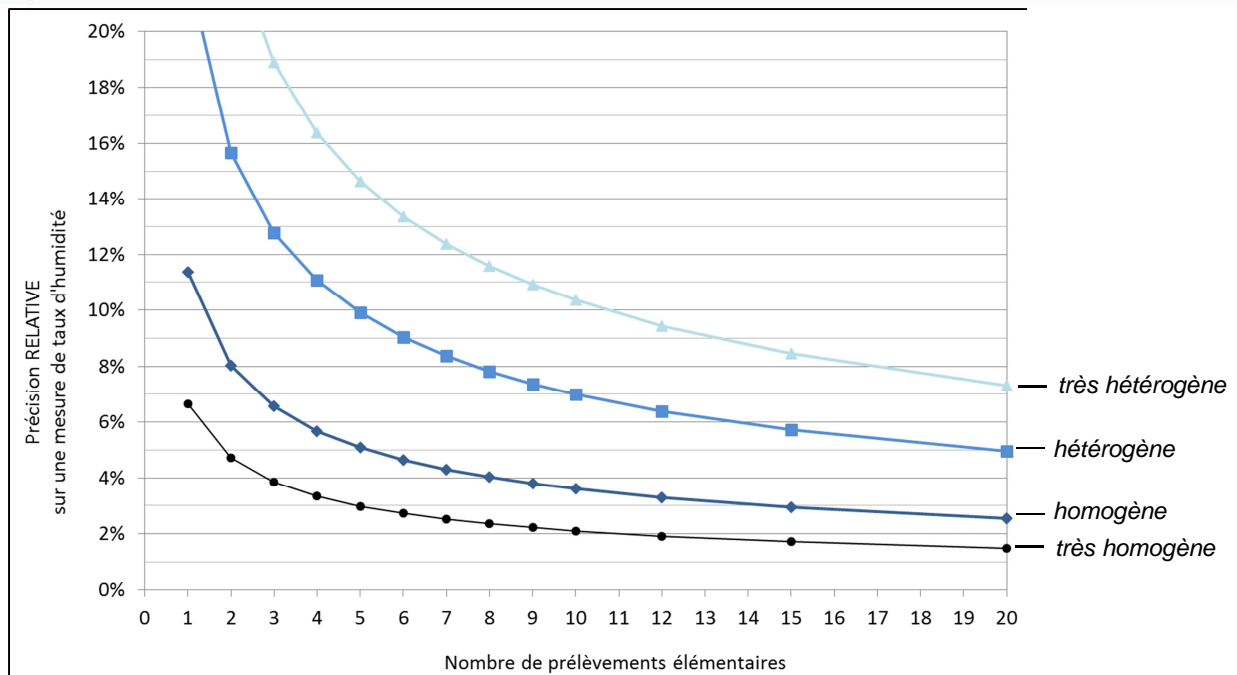
- camion très homogène : produit pur très homogène (ex. : plaquettes de scierie sans écorce) ;
- camion homogène : un produit homogène ou un mélange de produits homogénéisé ;
- camion hétérogène : un produit hétérogène ou plusieurs produits non homogénéisé ;
- camion constitué de strates ou de zones.

	Produit très HOMOGÈNE	Produit HOMOGÈNE	Produit HÉTÉROGÈNE	Produit très HÉTÉROGÈNE
Chargement PUR 				
en MÉLANGE 		 mélange brassé avec soin	 mélange peu brassé	 mélange en couches distinctes

Un mélange de produits homogénéisé, ou mélange homogène, correspond à plusieurs produits qui ont été préalablement brassés. Pour chaque type de camion, nous pouvons calculer une variabilité moyenne des mesures, exprimée par le coefficient de variation :

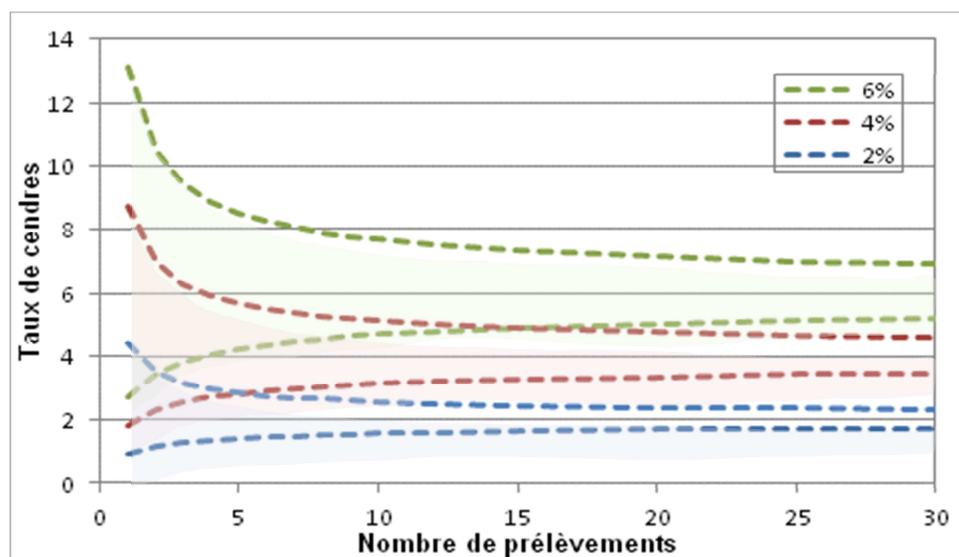
	Coefficient de variation
Type très homogène	3,4 %
Type homogène	5,8 %
Type hétérogène	11,3 %
Type très hétérogène	16,7 %

Il est possible d'en déduire une précision en fonction du nombre de prélèvements effectués, cette précision est exprimée en **valeur relative** dans le graphique n°2. Une autre présentation possible consiste à calculer le nombre minimal de prélèvements à effectuer pour une précision donnée et une humidité estimée du camion.



Graphique n°2 : précision **relative** en fonction du nombre de prélèvements élémentaires

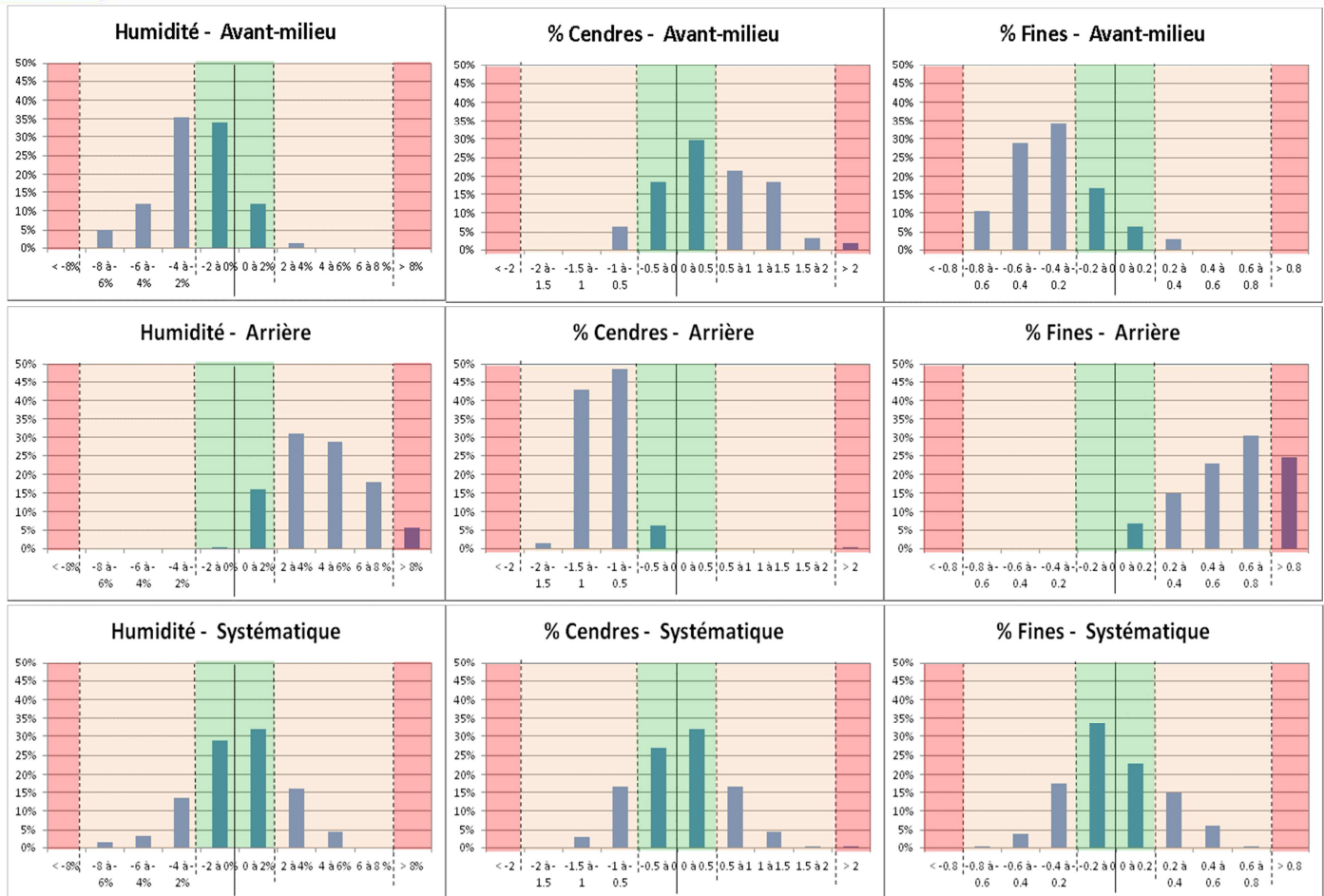
Concernant les taux de cendres, la précision des mesures en fonction du nombre de prélèvements peut être visualisée sous forme d'un intervalle de confiance à 95% dans le graphique n°3. Par exemple avec 5 prélèvements, l'intervalle de confiance d'un taux de cendres de 4% est [2,5 ; 5,7].



Graphique n°3: intervalle de confiance d'un taux de cendre de 2, 4 et 6%

Localisation des prélèvements

Dans quelques camions, il a été détecté des différences entre les mesures à l'arrière, à l'avant et au milieu. En se basant sur la variabilité des mesures d'un de ces camions (*broyats de palettes*), il est possible de simuler 200 tirages de 3 prélèvements, selon différentes procédures de collecte (*orientée à l'avant-milieu, orientée à l'arrière, ou systématique en répartition à l'avant-milieu-arrière*). Le graphique n°4 présente les écarts entre la moyenne de référence et les moyennes des tirages.



Graphique n°4 : répartition des écarts à la moyenne de référence selon le mode d'échantillonnage (en abscisse : écart à la moyenne de référence ; en ordonnée : part des tirages concernés)

Dans le cas étudié, si l'échantillonnage est uniquement réalisé à l'arrière du camion, l'humidité est toujours sur-estimée et dans 50% des cas, cette sur-estimation est de plus de 15%. Ce biais se retrouve sur l'estimation du taux de cendres (*mais inversé, sous-estimation à l'arrière*). La conclusion qui ressort est donc qu'un échantillonnage systématique (*répartition équilibrée des prélèvements à l'avant-milieu-arrière du camion*) permet une plus grande représentativité du chargement et limite grandement le risque de biais dans l'estimation des caractéristiques mesurées.

4. Le protocole OPTI-SCREEN pour assurer un bon suivi qualitatif

4.1 Etude du facteur humain : entretiens avec les opérateurs de réception biomasse

La finalité du projet OPTISCREEN est de consigner l'ensemble des résultats et des préconisations dans un protocole d'échantillonnage opérationnel, simple et efficient afin que les opérateurs puissent aisément le comprendre et se l'approprier. L'étude du facteur humain, menée par un spécialiste en ergonomie, consiste à analyser l'activité des opérateurs en charge de la réception et de l'échantillonnage, ainsi qu'à analyser les aspects organisationnels de l'opération d'échantillonnage. L'objectif est d'apporter des informations sur les modes d'organisation et de fonctionnement et sur la faisabilité/acceptabilité de nouvelles règles.

Cette partie est une synthèse de l'analyse du facteur humain (*tâche 1.2.2*) fournie en annexe 4. Une grille d'entretien a été construite pour décrire les principaux aspects de l'activité (*aspects organisationnels et fonctionnels, tâches prescrites et réalisées, conditions de travail, déplacements,...*). En parallèle une grille d'observations systématiques a été définie pour pouvoir caractériser les principaux déterminants (*espaces de travail, coopération, outils et machines*). 15 entretiens ont ainsi été réalisés dans 10 chaufferies biomasse. Les sites ont sélectionnés pour constituer un panorama le plus représentatif possible (*taille de la chaufferie, localisation, nombre d'opérateurs dédiés ou non dédiés à l'échantillonnage*).

La principale problématique de la réception est la connaissance en amont du chargement, plusieurs pistes sont présentées pour faciliter l'activité :

- favoriser l'échange entre fournisseur et chaufferie pour établir une relation de confiance ;
- préciser les techniques d'appréciation des produits livrés dans un cahier des charges ;
- pouvoir anticiper les résultats de mesure d'humidité à l'aide d'outils de mesure instantanée.

Concernant les pratiques d'échantillonnage, il apparaît fondamental d'améliorer la compréhension de la méthode et de l'utilisation des mesures réalisées. Une piste serait de co-concevoir un cahier des charges précisant chaque étape (réception, échantillonnage, préparation des échantillons, mesures) avec tous les acteurs de la chaufferie.

La charge de travail peut impliquer un stress que l'opérateur gère par de nouvelles solutions et adaptations pour modifier son mode opératoire. La plupart du temps, il a été observé que les opérateurs recherchent une amélioration en continue de leurs pratiques en étant innovants et en proposant des solutions/adaptations face aux variabilités inhérentes à leur activité.

4.2 Le protocole OPTISCREEN

Un cahier des charges fonctionnel, fourni en annexe 5 a été établi et validé par les partenaires du projet afin d'identifier les objectifs, le cadre et les règles s'appliquant au protocole. Le protocole OPTISCREEN est un guide de recommandations issu de l'ensemble des résultats obtenus dans le projet. Il permet de déterminer les paramètres et les modes opératoires les mieux adaptés aux besoins et aux possibilités des sites (*types de produits, nombre de personnel, configuration des installations,...*). Le protocole constitue une aide à la décision, à la fois pour les responsables de site et pour les opérateurs en charge de l'échantillonnage.

Le protocole se compose de 8 fiches synthétiques qui permettent d'analyser la représentativité de l'échantillon au fil des étapes de l'échantillonnage, sous la forme de :

- préconisations générales,
- d'aide au choix des paramètres
- de bonnes pratiques du mode opératoire.

L'ensemble du protocole OPTI-SCREEN (*tâche 3.1*) est fourni en annexe 9.

4 niveaux d'hétérogénéité de chargements ont été identifiés en fonction des produits et des mélanges réceptionnés. Les résultats des analyses permettent au responsable de site de définir *a priori* (*avant échantillonnage*) les paramètres d'échantillonnage en fonction des caractéristiques de l'approvisionnement de la chaufferie et de la précision souhaitée sur les mesures. L'opérateur en charge de la réception peut également utiliser le protocole OPTI-SCREEN *a posteriori* (*après échantillonnage*) pour calculer l'incertitude associée à chaque mesure ($X\% \pm ..\%$) d'humidité, de granulométrie et de taux de cendres.

4.3 Évaluation de l'opérationnalité du protocole OPTISCREEN

Cette partie est une synthèse du rapport d'évaluation du protocole (*tâche 3.2*), fourni en annexe 10. Le protocole OPTI-SCREEN a été présenté dans 4 chaufferies (2 chaufferies de grande puissance et 2 de puissance moyenne) puis des entretiens ont été réalisés dans les mois suivants

auprès des chefs de site et opérateurs en charge de l'échantillonnage. Une grille d'entretien a été construite pour décrire les principaux critères d'atteinte des objectifs du protocole OPTI-SCREEN : facilité de mise en œuvre, utilisabilité, efficacité, efficience et acceptabilité.

Les résultats indiquent que la présentation du protocole est nécessaire pour une bonne compréhension des opérateurs. L'appropriation est rapide et le protocole est globalement facilement mis en œuvre. Certains outils (pour les prélèvements et les mesures) nécessitent d'être mis à jour pour éviter les postures sensibles lors des prélèvements (boîte d'échantillonnage), pour faciliter le quartage et pour obtenir une mesure d'humidité plus fiable. Le protocole répond entièrement aux attentes du chef de site et l'opérateur semble considérer ce protocole comme une réelle prise en compte de ses attentes et besoins en termes d'activité de travail, d'équipements à disposition et d'organisation dans le processus. L'opérateur en charge de l'échantillonnage estime ainsi être au centre de l'intérêt porté sur la conduite de la chaufferie et il mesure davantage l'impact d'un taux d'humidité sur la suite du processus.

Conclusion

La première partie du projet OPTI-SCREEN dresse un état des lieux des connaissances sur les procédures d'échantillonnage de biomasse et elle identifie les pratiques actuellement réalisées en France et à l'étranger.

La théorie de l'échantillonnage des solides appliquée à 10 biocombustibles permet de calculer pour chacun d'eux le volume minimal d'un échantillon, en fonction de la précision attendue sur le taux d'humidité et le taux de cendres.

L'analyse des prélèvements collectés lors de la campagne d'échantillonnage menée sur 32 camions, 4 niveaux d'hétérogénéité de chargements ont été identifiés en fonction des produits et des mélanges, en associant pour chaque niveau une variabilité moyenne entre les mesures. A partir de ces résultats, le nombre minimal de prélèvements a été calculé pour ces 4 niveaux, en fonction de la précision souhaitée sur le taux d'humidité. L'effet de la localisation des prélèvements (*prélèvement par zone ou prélèvement systématique*) a également été étudié en analysant le biais provoqué sur les mesures de taux d'humidité, de granulométrie et de taux de cendres.

L'ensemble des analyses a abouti à la rédaction de fiches opérationnelles sous forme d'aides à la décision et de préconisations pour le responsable de site (*définition a priori de l'échantillonnage en fonction de l'approvisionnement de la chaufferie et de la précision souhaitée sur la mesure d'humidité*) et pour l'opérateur (*calcul a posteriori de l'incertitude associée à chaque mesure d'humidité $X\% \pm ..\%$*). L'évaluation du protocole dans 4 chaufferies indique qu'il atteint ses objectifs (*facilité d'utilisation, efficacité, efficience et acceptabilité*). Une présentation rapide du protocole est cependant nécessaire pour faciliter sa mise en œuvre.

TABLE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Rapport d'étude bibliographique (tâche 1.1)
- Annexe 2 : Synthèse des visites à l'étranger (tâche 1.1)
- Annexe 3 : Synthèse des visites en France (tâche 1.2.1)
- Annexe 4 : Rapport d'étude du facteur humain (tâche 1.2.2)
- Annexe 5 : Cahier des charges fonctionnel (tâche 1.3)
- Annexe 6 : Note sur la théorie de l'échantillonnage des solides (tâche 2.1)
- Annexe 7 : Protocole des campagnes de mesures (tâche 2.2)
- Annexe 8 : Rapport d'analyse statistique, synthèse des campagnes de mesures (tâche 2.3)
- Annexe 9 : Le protocole OPTISCREEN (tâche 3.1)
- Annexe 10 : Rapport d'évaluation du protocole (tâche 3.2)

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr