



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 1

Technologie de tri sélectif des granulats béton
concassé et détection en continu de la présence
d'éléments indésirables dans les granulats
recyclés

Auteur : L. LE GUEN (IFSTTAR)

R/15/RECY/018
LC/13/RECY/30
Septembre 2015

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Technologie de tri sélectif des granulats béton concassé et détection en continu de la présence d'éléments indésirables dans les granulats recyclés

RAPPORT N° : R/15/RECY/018

DATE D'ETABLISSEMENT : Septembre 2015

AUTEUR(S) : L. LE GUEN

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR

THEME DE RATTACHEMENT : 1

LETTRE DE COMMANDE : LC/13/RECY/30

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Résumé

Ce rapport comporte une étude bibliographique et expérimentale concernant les technologies de tri des granulats de béton concassé.

L'étude bibliographique se base sur le contexte du tri des granulats de béton recyclé est présenté afin de souligner les réponses que doit apporter le tri des granulats de béton recyclé.

Ensuite, une présentation des méthodes de tri pouvant être utilisées pour le tri des déchets de construction et de déconstruction est réalisée. Cette présentation développe les méthodes de tri optique, et les méthodes de tri densimétrique.

La pratique du tri et des procédés utilisés dans les différentes filières de recyclage est aussi décrite.

Enfin, les technologies de tri et de détection applicables aux granulats de béton recyclé sont présentées, afin de fournir des éléments prospectifs dans ce domaine.

L'étude expérimentale présente les campagnes expérimentales réalisées à l'échelle du laboratoire dans le but de mettre en œuvre des techniques de tri pertinentes pour leur efficacité potentielle.

Les techniques utilisées sont la jig à eau, la technologie NIR, la technologie basée sur l'utilisation des rayons X. Les essais avec la jig à eau se sont déroulés à l'Iffstar.

La pertinence de la technologie optique et NIR appliquée au tri des matériaux de déconstruction, a été évaluée par une étude de faisabilité réalisée par le laboratoire de l'université d'Aix-la-Chapelle.

Les essais avec les rayons X effectués chez Comex en Pologne, ont permis d'avoir des résultats sur la détection de différents types de matériaux avec les rayons X.

Mots-clés : tri, tri optique, tri par densité, valorisation, granulats de béton recyclé, technique infrarouge, rayons X, tri optique

Summary

This document presents the bibliographic study and an experimental campaign about the sorting technologies for recycled concrete aggregates.

First of all, the context of sorting recycled concrete aggregate and objectives set by European and national regulations are presented to highlight the goals of the sorting of recycled concrete aggregates.

Then, an inventory of the sorting methods that can be used for sorting waste construction and deconstruction is realized. This classification is composed of the methods of optical sorting and the processes used the density separation.

The practice of sorting and processes used in the various recycling channels is presented. After a summary of the different sectors in place, the sorting and detection technologies for recycled concrete aggregate are described in order to provide prospective elements.

The experimental program established for the sorting of the deconstruction wastes is composed of three parts: the first experimental campaign in the Ifsttar laboratory, the second one in the Aachen laboratory in Germany, and the third one in the COMEX plant in Poland.

The objectives of this experimental work are to evaluate the sorting of the deconstruction wastes and to appreciate the more relevant technologies.

The Ifsttar campaigns are used the water jig process. The campaigns in Aachen have evaluated the sorting capacity of the optical technology, the NIR process applied to the detection of the C&DW (Construction and Deconstruction Waste). The tests done with the X rays process have allowed obtaining some results for the sorting of the C&DW.

Key-words : sorting, optical sorting, recycled concrete aggregates, ceramic, gypsum, densimetric sorting, infrared technology, X ray sorting

Sommaire

1	INTRODUCTION	7
2	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
2.1	INTRODUCTION	8
2.1.1	CONTEXTE GENERAL DU TRI ET DE LA VALORISATION	8
2.1.2	CONTEXTE PARTICULIER DU TRI ET DE LA VALORISATION DES DECHETS DU BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS	8
2.2	METHODES DE TRI OPTIQUE	10
2.2.1	INTRODUCTION	10
2.2.2	SPECTROMETRIE PROCHE INFRAROUGE	10
2.2.3	TECHNIQUES DE MESURE UTILISANT LE LASER	12
2.2.4	LES TECHNIQUES UTILISANT LES RAYONS X	16
2.3	METHODES DE TRI DENSIMETRIQUE	21
2.3.1	INTRODUCTION	21
2.3.2	METHODES DE TRI DENSIMETRIQUE « MECANIQUE » SEC	21
2.3.3	METHODES DE TRI DENSIMETRIQUE « MECANIQUE AVEC DE L'EAU	24
2.3.4	METHODES DE TRI DENSIMETRIQUE « FLUIDISE »	26
2.4	PRATIQUE DU TRI ET PROCEDES UTILISES DANS LES DIFFERENTES FILIERES ET APPLIQUEE AUX GRANULATS DE BETON RECYCLE	33
2.4.1	INTRODUCTION	33
2.4.2	LA FILIERE PLASTIQUE	33
2.4.3	LA FILIERE PAPIER CARTONS	34
2.4.4	LA FILIERE METAL	34
2.4.5	LA FILIERE METAUX NON FERREUX	34
2.4.6	LA FILIERE BOIS PALETTES	35
2.4.7	LA FILIERE TEXTILE	35
2.4.8	LA FILIERE VERRE	36
2.5	TECHNOLOGIES DE TRI ET DE DETECTION POTENTIELLEMENT APPLICABLES AUX GRANULATS DE BETON RECYCLE	36
3	ETUDE EXPERIMENTALE	39
3.1	INTRODUCTION	39
3.2	CAMPAGNE EXPERIMENTALE UTILISANT LA JIG A EAU	40
3.2.1	MATERIAUX	40
3.2.2	MATERIEL	40
3.2.3	MODE OPERATOIRE	41
3.2.4	RESULTATS.	42
3.2.5	CONCLUSION	57
3.3	CAMPAGNE EXPERIMENTALE UTILISANT LE TRI OPTIQUE ET LE PROCEDE NIR	59
3.3.1	PRESENTATION DE LA CAMPAGNE EXPERIMENTALE	59
3.3.2	MATERIAUX	59
3.3.3	PROTOCOLE	59
3.3.4	MATERIELS UTILISES	59
3.3.5	RESULTATS DU TEST OPTIQUE	61
3.3.6	RESULTATS DES TESTS EFFECTUES SELON LE PROCEDE NIR	66
3.3.7	CONCLUSION	73

3.4	CAMPAGNE EXPERIMENTALE UTILISANT LES RAYONS X ET LE TRI OPTIQUE	75
3.4.1	TRI PAR RAYONS X	75
3.4.2	TRI OPTIQUE	76
3.4.3	RESULTATS D'ANALYSE	77
3.4.4	CONCLUSION	77
4	CONCLUSION	78
5	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79

1 Introduction

Ce rapport est l'action définie dans la réponse à l'appel à projet du Projet National RECYBETON sur la tranche 2 correspondant à l'action 1.6 : « technologie de tri sélectif des granulats de béton concaissé ».

Ce rapport comporte trois grandes parties. La première présente une étude bibliographique concernant les procédés de tri tous domaines confondus. Cette présentation se décline en quatre sous-parties. Les deux principaux procédés de tri sont décrits. Les procédés se basant sur les méthodes optiques comme les infrarouges proches, le laser et les rayons X, sont développés. Des procédés se basant sur la masse volumique des matériaux à traiter, sont exposés. Ces procédés regroupent de technologie dites « mécaniques » et utilisant la fluidisation. Ainsi, ces procédés utilisent aussi bien l'air que l'eau. Un bilan est aussi donné sur les différentes filières industrielles de tri. Ceci permet de montrer le potentiel d'activité qu'il pourrait être retiré de ce mimétisme aux granulats de béton concaissé. En fin pour terminer cette partie, des éléments prospectifs sont développés pour apprécier le potentiel d'activité issu du tri des déchets de construction et de déconstruction.

La seconde grande partie de ce rapport décrit trois campagnes expérimentales. Ces campagnes expérimentales avaient pour but d'objectiver des éléments pour établir la faisabilité de trier des matériaux-types présents dans les déchets de la construction et de la déconstruction. Les procédés de tri utilisés sont la jig à eau, les procédés de tri optique, de rayons infrarouges et de rayons X.

La campagne expérimentale mettant en jeu la jig à eau s'est effectuée dans le laboratoire GPEM de l'Ifsttar. Cette campagne s'est principalement focalisée sur les matériaux brique, plâtre et de béton concaissé.

Les procédés optiques et infrarouges (proches) ont été utilisés dans le cadre d'une prestation d'essais réalisée par un des laboratoires de l'Université d'Aix-la-Chapelle. Le panel de matériaux utilisé était cette fois-ci plus important puisqu'il intégrait les trois matériaux précédents associés à du verre, du métal, de la céramique et de l'enrobé bitumineux ainsi que des particules métalliques. Cette prestation d'essais a permis d'apprécier ces techniques dans une perspective d'application industrielle.

La troisième campagne expérimentale concerne une étude de faisabilité concernant le tri par des techniques optiques et rayons X. Les matériaux utilisés étaient similaires à ceux utilisés par le laboratoire allemand. Les résultats d'analyse ont permis d'établir une évaluation quant au développement de l'application de ces techniques au tri de ces matériaux

La troisième grande partie donne une conclusion générale du travail mené donnant une vue d'ensemble à l'action menée.

2 Étude bibliographique

2.1 Introduction

Cette étude bibliographique est constituée de trois parties. La première partie a pour objectif de présenter les méthodes de tri optiques. Cette présentation déclinera les méthodes utilisant les infra-rouges, celles utilisant le laser et ses propriétés, et celles s'appuyant sur la transmission des rayons X.

La seconde partie est dédiée aux méthodes de tri densimétrique. Elles utilisent, comme leur nom l'indique la densité comme critère de tri. Elles sont réalisées par voie sèche et humide. Une attention particulière est portée sur les procédés jig à air et jig à eau en raison notamment de leur praticité d'utilisation et de mise en place.

La troisième partie concerne les pratiques et procédés utilisés dans les différentes filières. Un développement spécifique est consacré aux procédés de tri dédiés aux granulats de béton concassé. Un bilan sur les procédés potentiellement applicables est aussi réalisé afin de fournir des éléments prospectifs dans ce domaine.

2.1.1 Contexte général du tri et de la valorisation

Le contexte réglementaire européen impose, à travers la directive européenne de juin 2008 sur les déchets, la récupération et le recyclage dans l'ensemble des pays membres. Ainsi, d'ici à 2012, l'objectif est le recyclage de 50 % de ces déchets [Usine nouvelle, 2009].

Au niveau national, le Grenelle de l'Environnement a fait du recyclage des déchets un enjeu national et une priorité dans la gestion de l'environnement. Cela se concrétise par l'article 46 de la loi de programmation du 3/08/2009, repris dans le Plan Déchets 2009-2012 [Ademe, 2010].

Les déchets ainsi récupérés pourront être utilisés en matières premières secondaires (diminution de la consommation de matière première) ou valorisés en utilisant leurs propriétés améliorées (pouvoir calorifique ou fraction fermentescible plus élevés par exemple).

Le tri est l'étape préalable indispensable au recyclage des matériaux. Il rend possible la transformation d'un flux de déchets mélangés et non directement valorisables en plusieurs fractions dont certaines se prêteront mieux au recyclage.

2.1.2 Contexte particulier du tri et de la valorisation des déchets du Bâtiment et Travaux Publics

Le dernier recensement national exhaustif (tableau 1) met en évidence la part des déchets du bâtiment et des travaux publics (BTP) sur la production totale annuelle française de déchets en millions de tonnes [Ademe, 2013].

Déchets de collectivités	Déchets de ménages	Déchets d'activités	Déchets de l'agriculture et de la sylviculture	Déchets du BTP
5,3 MT	31,9 MT	106 MT	374 MT	253 MT

Tableau 1 - Déchets générés en France en 2009 [Ademe, 2013].

Au regard des objectifs du Grenelle en matière de recyclage de déchets, certaines filières de recyclage « matière » doivent se développer en particulier les déchets du BTP [APESA, 2010]. En conséquence, le développement ou l'optimisation de ces filières

nécessiteront des sauts technologiques pour le tri (automatisation des procédés existants et amélioration des filières ...).

Le tri et la valorisation des déchets issus du BTP devront aussi tenir compte de leur composition, et donc du potentiel de réutilisation. Pour compléter, la composition moyenne d'agrégats issus des déchets du bâtiment, présentée dans le tableau 2, montre une potentielle réutilisation de la majorité des matériaux vers la fabrication de béton ou le terrassement. Cependant aujourd'hui, l'utilisation des granulats issus du recyclage reste limitée aux applications non structurelles comme les terrassements.

Composition	Béton	Briques	Asphalte	Bois	Gravier	Métal	Autres
Pourcentage (%)	41	29	20	2	2	1	5

Tableau 2- Compositions des déchets de construction et déconstruction [Ulsen, 2013].

Pour répondre aux objectifs cités plus tôt, les étapes de fabrication doivent être adaptées afin de permettre l'utilisation plus efficace de ces recyclés issus de la déconstruction. Ainsi, cela pourra aussi entraîner une valeur ajoutée aux matériaux traités. Dans cet objectif, l'utilisation de techniques de séparation innovantes est nécessaire.

2.2 Méthodes de tri optique

2.2.1 Introduction

Au-delà des questions de productivité, l'automatisation permet d'étendre le tri aux déchets qui ne peuvent pas être séparés par des méthodes manuelles. Un exemple est l'identification des plastiques par les techniques de tri optique.

Actuellement, dans la chaîne de tri des déchets, le tri optique est déjà couramment utilisé pour le tri de nombreux déchets en fonction de leur spectre visible (identification des couleurs par caméra ultrasensible) ou proche infrarouge ou infrarouge moyen (« capteur » intelligent pour détecter les densités des matériaux) ou fluorescence X [APESA, 2010].

Selon Raulf *et al.* [Raulf, 2012], le tri optique basé sur les technologies de captation d'images est de plus en plus utilisé par l'industrie minière. Il y a plusieurs raisons pour utiliser le tri optique, notamment la possibilité d'automatiser le procédé et la possibilité de réaliser des séparations impossibles pour l'être humain, donc obtenir une valeur ajoutée sur les produits vis-à-vis du procédé traditionnel de séparation.

Chaque type de procédé de tri optique se décompose en trois zones distinctes:

- Zone de préparation : mise en place des particules pour être illuminées et repérées par les caméras de captation ;
- Zone de détection : identification par une ou plusieurs caméras basée sur l'image spectrale dépendant de la nature du minerai ;
- Zone d'éjection : lecture sur toute la largeur du convoyeur d'accélération et contrôle du processus d'éjection.

Ainsi, chaque procédé présenté ci-après, se distingue par les méthodes de détection utilisée. Cette partie dédiée aux méthodes de tri optique décrira les procédés de tri basés sur les techniques infra-rouges, et les procédés de tri utilisant le laser et ceux s'appuyant sur la transmission des rayons X.

2.2.2 Spectrométrie proche infrarouge

2.2.2.1 Présentation générale de la spectrométrie proche infrarouge

La spectrométrie proche infrarouge ou appelée en anglais « Near InfraRed » (NIR) reconnaît les matériaux (polymères entre eux, papier, bois). Les capteurs NIR sont à la base du tri des plastiques. Ils permettent d'augmenter la sélectivité et le débit. Dans le recyclage, il est utilisé pour donner des fractions plus pures avec des plastiques bien spécifiques [Nienhaus, 2014]. Enfin, des progrès réguliers sont réalisés pour étendre le champ d'application du NIR au tri de nouveaux matériaux notamment le plâtre. Cette technique peut aussi être utilisée pour détecter l'humidité dans les produits alimentaires, le papier, le tabac, les produits pharmaceutiques.

La NIR est une mesure non destructive implémentée dans les installations de laboratoire et portables [Ademe, 2012]. Cette technique permet la détermination de la composition moléculaire de surface ou l'analyse quantitative des composés de mélange, et aussi de distinguer entre solide, liquide, gaz, organique inorganique, polymère [Nienhaus, 2014]. La spectrométrie proche infrarouge, dont la gamme de spectre (CCRS 07), est basée sur l'analyse d'un spectre de réflexion s'étendant de 0,7 μm à 3 μm . La signature à travers le spectre, révèle la structure des molécules. Elle est donc capable de reconnaître les matériaux.

Cette technique est couramment associée à un séparateur à courant de Foucault pour réaliser un tri complet sur des mélanges multi matériaux (par exemple des emballages). Par contre, le NIR ne « voit » pas les métaux, les retardateurs de flamme bromés, les objets sombres, noirs (en particulier les pièces contenant du noir de carbone) les liquides (bouteilles pleines) et les déchets ayant la forme de rubans.

2.2.2.1.1 Principe de la mesure

La mesure par la technique NIR peut être classée comme mesure passive ou active. Dans le cas passif, le rayonnement émis par un objet irradié, est détecté par une source de rayons infrarouges proches. Par contraste, les techniques actives NIR utilisent des sources pour irradier le matériau à analyser. Le rayonnement est réfléchi et transmis pour être détecté [Stuart, 2005].

Le principe de la spectroscopie NIR est basé sur l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et les structures moléculaires. Les photons absorbés causent une transition d'énergie entre 2 états, décrit dans l'équation de Bohr :

$$\Delta E \equiv E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (1)$$

avec ΔE égal à l'énergie émise ou absorbé, E_2 égal au niveau de départ, E_1 égal au niveau d'énergie excité, h la constante de Planck, et ν la fréquence. L'énergie absorbée génère une vibration moléculaire, dont la fréquence de vibration est égale à la fréquence du NIR [Gompel, 2009].

2.2.2.1.2 Types de spectromètre

Trois types de spectromètre proche infrarouge sont disponibles. Le premier est non-dispersif. Il est peu onéreux, mais avec une résolution spectrale basse. Il fonctionne avec des filtres, et il est utilisé dans des approches spécifiques où il y a peu de longueurs d'onde mesurées [Stuart, 2005] [Hsu, 1997].

Le second type est considéré dispersif. La source de rayonnement est polychromatique. Son utilisation est spécifique pour mesurer les échantillons rapidement mais avec une sensibilité basse.

Le troisième type de spectromètre est le spectromètre utilisant le rayonnement infrarouge associée avec une analyse basée sur l'utilisation de la transformée de Fourier (FTIR). Ce type de spectromètre est composé d'une source d'irradiation, d'un interféromètre, d'un détecteur, et d'une unité de calcul pour analyser les données issues du spectromètre NIR (figure 1).

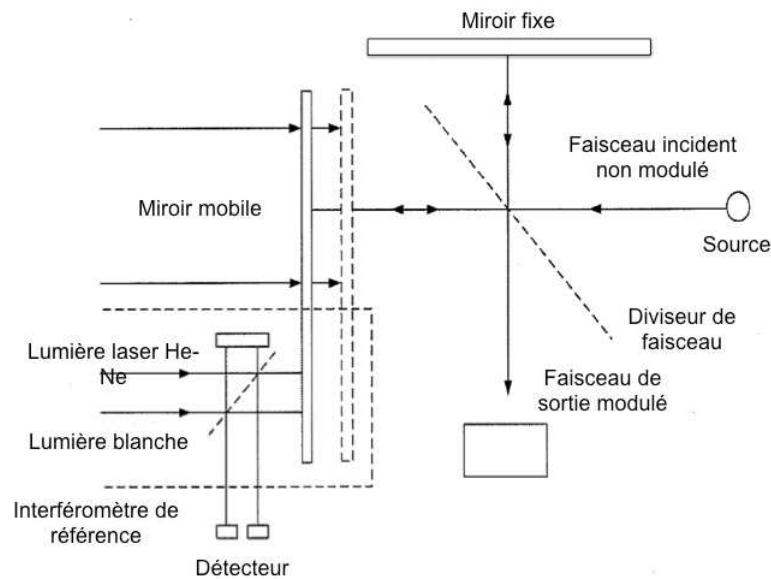


Figure 1 – Schéma d'un spectromètre infrarouge avec transformée de Fourier appelé interféromètre de Mickelson [Stuart, 2005].

2.2.3 Techniques de mesure utilisant le laser

Les techniques de mesure utilisant le laser se répartissent selon deux méthodes de détection : la fluorescence générée par laser et la spectrométrie générée par laser.

2.2.3.1 Fluorescence générée par laser

La fluorescence générée par laser ou autrement appelée « Laser Induced Fluorescence » (LIF), est une technique de détection en surface. Elle conduit à une mesure de la composition du matériau basée sur une analyse vibratoire moléculaire [Ademe, 2010]. La lumière de la source laser génère une excitation moléculaire induisant une fluorescence. Cette excitation caractérisée par un état vibratoire, produit une émission de lumière dont la durée de vie est en moyenne de 102 ns.

Ainsi, chaque matériau peut être caractérisé par une longueur d'onde spécifique. Cette propriété permet de calibrer le système de mesure sur la base d'échantillons connus.

Ses avantages sont principalement :

- Technique d'analyse non-destructive ;
- Technique insensible à la poussière et à l'humidité. Ainsi, elle convient, par exemple, pour l'industrie minière ;

Cependant, elle présente des inconvénients non négligeables :

- Elle est chère,
- Elle doit être adaptée à chaque installation. Par conséquent, la mise en œuvre en termes de conception, de conditions d'exploitation est complexe.

La LIF est pratiquée dans beaucoup de domaines pour déterminer la concentration des espèces dans les gaz et les liquides. Par exemple, on pourra citer la détection des molécules OH en génie de la combustion. De plus, elle est appliquée en médecine, neurochimie, pharmacologie, biochimie, biologie moléculaire, par exemple, pour la distinction des cancers dans les tissus [Nienhaus, 2014].

La LIF est aussi utilisée dans les projets de recherche dans l'industrie des matières premières (génie minier). Cependant, elle est rarement utilisée dans des applications industrielles.

2.2.3.1.1 Principe de la mesure par la LIF

Le processus de mesure avec la LIF est constitué de trois étapes [Vinzberg, 2008] (figure suivante).

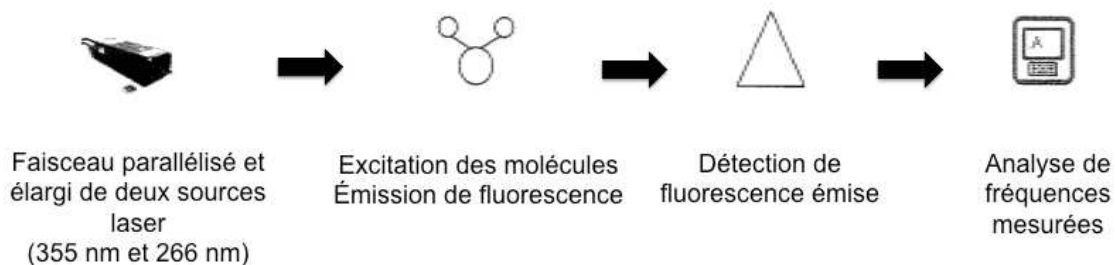


Figure 2 – Synoptique de l'analyse de mesure de la LIF.

En premier lieu, il y a excitation du matériau en utilisant la lumière laser générée par les sources laser. En second lieu, la fluorescence émise par le matériau est détectée par un photomultiplicateur de haute sensibilité.

Cette fluorescence a quatre principales caractéristiques. Tout d'abord, son absorption est liée au spectre d'excitation. Il représente la probabilité d'excitation des molécules avec une énergie de longueur d'onde émise. Les matériaux peuvent seulement être excités à certaines longueurs d'onde pour émettre de la lumière ou la fluorescence. Pour avoir des bons résultats, une attention particulière est portée à la longueur d'onde du laser utilisé [Bayer, 2004]. Après, l'émission représente l'intensité de la fluorescence. Elle indique les composants du matériau à étudier. Plusieurs pics sont obtenus, et ils sont appelés « centres illuminés ». Leur intensité dépend des paramètres du laser, c'est-à-dire la sensibilité du récepteur, le filtre et la calibration [Bayer, 2004]. Ensuite, l'efficacité quantique dépend de l'énergie d'émission et de l'énergie d'excitation. Cette valeur définit la capacité du matériau à absorber l'énergie et à la convertir en signaux de fluorescence [Bayer, 2004]. Enfin, la durée de vie du signal est la caractéristique du matériau. Elle dépend de l'intensité de l'excitation [Bayer, 2004].

Pour terminer, les signaux issus du photomultiplicateur sont analysés pour discriminer les différents constituants. Cette analyse respecte le séquençage suivant : acquisition de données, préprocessing, représentation des données, et l'élaboration de la décision. Les résultats issus de l'analyse sont le spectre de fréquence caractérisant le matériau. Ensuite, les spectres de mesure sont analysés pour classifier les matériaux.

2.2.3.1.2 Composants

La mesure se fait en associant trois composants (figure 3) [Vinzberg, 2008]:

- Unité d'émission qui produit deux pulses d'énergie UV laser (355 nm, 266 nm);
- Unité de réception composée d'un photomultiplicateur en tube (PMT), d'un filtre passe-bande et d'une unité de calcul;
- Composants auxiliaires comme des lentilles pour traiter le signal en réception dans une gamme de mesure 1,5 et 2m de longueur d'onde;

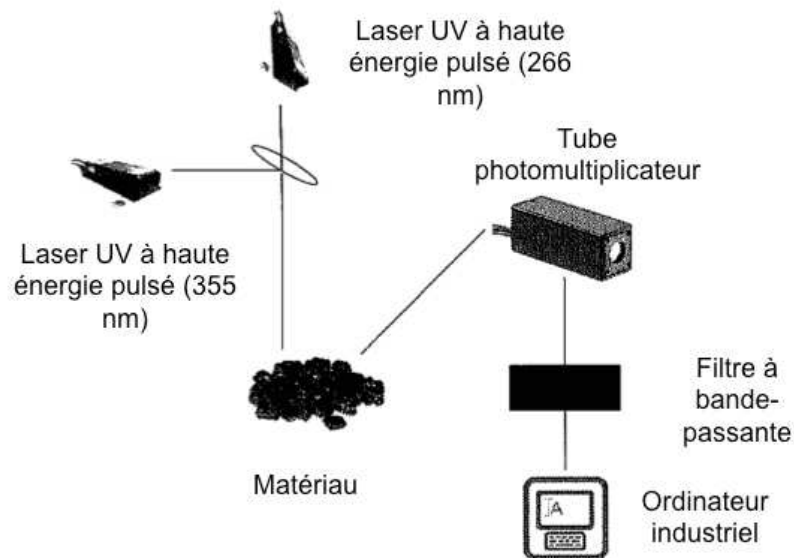


Figure 3 – Schéma présentant les composants de l'analyseur LIF.

2.2.3.2 Spectroscopie générée par laser

2.2.3.2.1 Présentation de la spectroscopie générée par laser

La spectroscopie par laser ou Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) est une technique d'analyse chimique rapide. Cette méthode analytique utilise la spectroscopie par émission atomique. Elle présente l'avantage de détecter les matières organiques et inorganiques. Un laser de courte impulsion crée un micro plasma à la surface du produit à analyser. Le rayonnement émis par ce gaz ionisé est analysé par spectroscopie optique. La LIBS fournit des informations très précises non seulement sur la nature du matériau mais également sur sa composition. Connue depuis près de 30 ans, la technologie LIBS était jusqu'à récemment confinée à des usages de laboratoire du fait de sa complexité et de son coût.

La LIBS est utilisable pour des métaux, semi-conducteurs, verres, tissus biologiques, matériaux isolants, plastiques. Par exemple, pour des déchets de bronze, elle permet de déterminer le degré de pureté du morceau étudié. La limite de détection de la LIBS pour les métaux lourds est de l'ordre du ppm. La LIBS est capable de reconnaître les atomes légers, de reconnaître les dérivés bromés (contrairement au NIR) et de différencier les différents types d'additifs bromés. Elle possède également des atouts par rapport à la fluorescence par rayons X, qui affiche certaines limites sur les éléments légers.

Il est à noter un point de controverse quant à la capacité de la LIBS à effectuer une analyse de l'intérieur du produit à trier (analyse stratigraphique d'un matériau).

Pour certains experts, la LIBS reste avant tout un capteur de surface. Sur la base de nombreux travaux de R&D récents, les axes d'amélioration portent principalement sur la réduction des temps d'analyse et de traitement des informations, l'augmentation des cadences de mesure, l'amélioration de la fiabilité des mesures, la réduction des coûts (des capteurs en particulier) et la miniaturisation. Le tri en ligne fait également partie des objectifs [Ademe, 2012].

Son développement depuis les années 60 et les années 80 a permis d'améliorer la compacité des composants, et donc l'élargissement des applications [Radziemski, 2002]. Par conséquent, la gamme d'application est grande. Elle va des applications médicales, à

l'archéologie, à la biologie, à la chimie, à la métallurgie, à la recherche spatiale. Elle concerne aussi l'industrie de la construction et du recyclage [Nienhaus, 2014].

2.2.3.2.2 Principe de fonctionnement

Cette méthode analytique non-destructive permet des analyses simultanées sans préparation d'échantillon.

L'objectif des mesures par LIBS est d'avoir un système représentatif pour la composition élémentaire de plasma entier. La mesure se base sur la réaction des éléments de la matière impactée par une émission de photons à équilibre thermique (émission spontanée, absorption et émission induite) des mécanismes décrits par Einstein. Le mécanisme le plus pertinent est l'émission spontanée [Raith, 1999].

S'il y a des électrons libres dans le laser, ils tombent à leur état d'énergie d'origine. L'énergie envoyée est régie par la loi de Planck :

$$\nu = \frac{\delta E}{h} \quad (2)$$

avec laquelle on a :

$$\sigma = \frac{\nu}{c} \quad (3) \text{ et } \lambda = \frac{1}{\sigma} \quad (4)$$

avec ν la fréquence, δE la différence d'énergie, σ le nombre d'onde, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de lumière.

Les systèmes permettant ce procédé consistent en un laser de haute énergie pulsée par ignition de plasma, des lentilles focalisant pour augmenter la concentration d'énergie, un spectromètre pour analyser la lumière émise, et un détecteur pour mesurer les intensités de la lumière émise. Le schéma suivant présente ces éléments et leur relation [Nienhaus, 2014] [Noll, 2006] [Sturm, 2007].

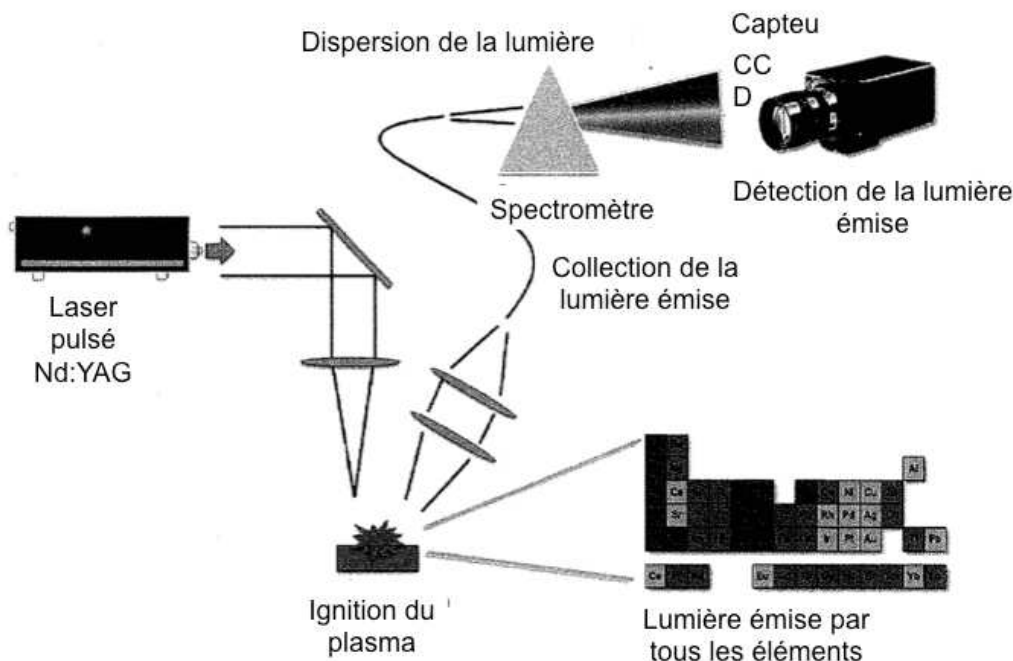


Figure 4 – Schéma de l'analyse par LIF [ARL 10].

Les résultats d'analyse donnent la décomposition par élément ainsi que leur concentration grâce à la décomposition spectrale (intensité). Les résultats d'analyse donnent une composition de la matière sous forme matricielle (N objets and M

caractéristiques (valeurs spectrales). Deux méthodes d'analyse peuvent être utilisées : la classification et la régression.

Avec la classification, les valeurs mesurées sont synthétisées. Le résultat n'est pas seulement de grouper les données, mais aussi de donner les causes de certains groupes.

2.2.3.2.3 Composants

Les composants principaux sont le laser et les détecteurs.

Le laser permet l'envoi de haute énergie pour l'excitation des éléments de la matière sans préparation spécifique. Les lasers convenables pour le LIBS doivent avoir certains critères : énergie de pulse, taux de répétition, poids et la taille et la qualité de faisceau. Les lasers utilisés sont des lasers Nd YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet). Ils ont plusieurs avantages d'être compactes (systèmes mobiles). Ils présentent la caractéristique d'avoir une longueur d'onde de 1064 nm (elle contient la plus haute densité d'énergie). Ils sont disponibles en 2 modes : flash et diode pumping.

Le spectromètre quant à lui, est choisi selon deux critères principaux que sont la résolution et son épaisseur spectrale. La première se définit par la distance minimale entre 2 ondes successives. La seconde est l'intégrale de la longueur d'onde émise (pour le LIBS entre 200 nm et 800 nm).

Le choix des détecteurs dépend de la méthode spectrale et des éléments de détection. Ceux qui sont utilisés, sont : les photomultiplicateurs tubes (PMT), les photodiode « arrays » (PDA), et les appareils couplés avec des charges (CCD). Ils peuvent être combinés selon les exigences d'analyse.

2.2.4 Les techniques utilisant les rayons X

Ces techniques regroupent la technique utilisant la transmission des rayons X et la technique s'appuyant sur l'analyse fluorescence générée par rayons X.

2.2.4.1 Transmission des rayons X

2.2.4.1.1 Présentation de la technique utilisant la transmission des rayons X

Le rayonnement des rayons X est un rayonnement électromagnétique dans la gamme de 10 à 100 nm. Donc ils sont capables d'ioniser.

Une déclinaison de cette technique est possible en utilisant deux niveaux d'énergie. Cette technique se nomme Dual Energy X-Ray Transmission (DE-XRT). Cette technique est aussi non-destructive. En combinant les mesures à 2 niveaux d'énergie simultanément, il est possible de différencier les particules selon leur densité atomique. Une haute résolution permet d'identifier les petites inclusions à l'intérieur des particules [Riedel, 2010].

Il faut veiller à deux contraintes. Premièrement, une attention particulière est à porter aux impuretés organiques et à la corrosion. En effet, celles-ci influencent les mesures. Deuxièmement, l'encapsulage du système est à prévoir pour des aspects de sécurité lors du développement et de l'utilisation de la machine de tri.

La transmission des rayons X ou plus communément appelé XRT pour « X Ray Transmission », utilise le principe de la radioscopie. Il permet de détecter la matière au niveau de l'atome. Le principe de fonctionnement est décrit par la figure 5.

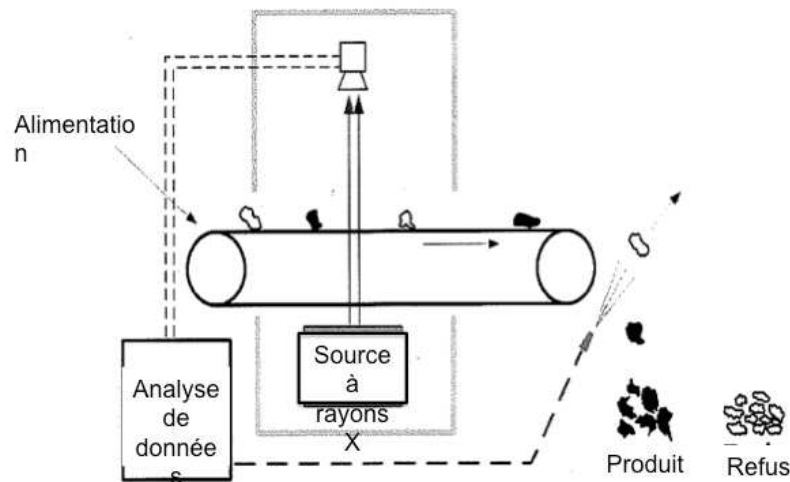


Figure 5 - Schéma de fonctionnement du tri type DE-XRT [Jong, 2007].

Cela convient particulièrement bien à la détection des métaux. La qualité du tri des métaux est d'autant meilleure qu'ils ont des masses atomiques éloignées. Cependant, les efforts de recherche et développement portent principalement sur le développement de détecteurs « multi-énergie » pour améliorer l'identification de métaux ayant des densités proches [Ademe, 2012].

Le XRT peut également reconnaître un matériau dont la molécule contient des atomes spécifiques (par exemple des atomes de brome, pour la détection des retardateurs de flamme). Par contre, le XRT ne détecte pas les bouteilles remplies d'eau et ne permet pas de différencier les différentes molécules d'additifs bromés [Ademe, 2012].

La technique est donc aussi utilisée pour l'industrie minière : cuivre, diamant, tungstène, or, charbon, avec des résultats prometteurs pour minerai de fer, calcaire, schiste bitumineux, minerai de manganèse, cobalt, nickel.

2.2.4.1.2 Principe de fonctionnement

L'analyse est issue de la séparation par densimétrie atomique. La séparation de la matière constituant le solide est générée par un échauffement provoquant une vapeur de la matière du solide.

Une source à rayons X émet vers l'échantillon. Cette radiation va générer une vapeur à analyser. L'intensité des rayons X arrivant sur chaque pixel est convertie en signal électrique. Le signal utilisé par le logiciel, crée des images sur une échelle de gris. L'image est reconvertie en couleur par translation des intervalles de gris sur une échelle de couleurs.

L'image de l'objet est transformée dans une image avec une échelle de gris plane où chaque pixel a une intensité fonction de l'épaisseur de l'objet. Quand elle est homogène, il n'y a pas de problème. Mais si elle est hétérogène, il y a un problème vis-à-vis de la position de l'objet : on ne peut pas distinguer la variation de type de matière.

Enfin, ces différentes classes sont définies manuellement [Steinert, 2012] [Kleine, 2010].

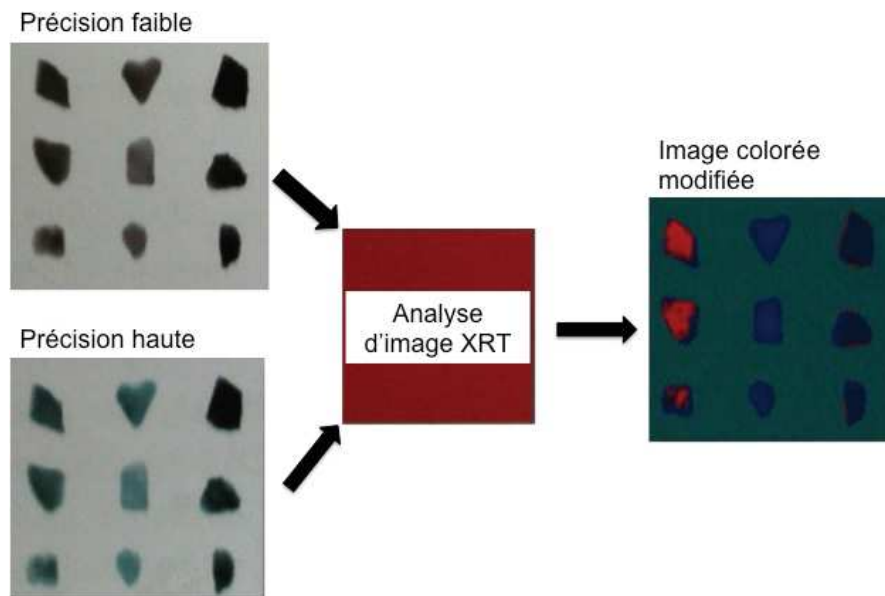


Figure 6 - Type d'images issues de l'analyse basée sur la conversion des images rayon X en une image de couleur [Ketelhodt, 2010].

L'analyse des données est réalisée à partir des signaux envoyés par les scintillateurs et les photodiodes. Leur combinaison permet la translation de l'intensité des rayons X en signal électronique.

2.2.4.1.3 Composants

Ce type de système est composé d'une source rayons X comme émetteur et d'un détecteur placé verticalement. Les matériaux sont transportés sur tapis-convoyeur. Le détecteur est connecté à un système d'analyse pour commander l'éjection des matériaux à mettre au rebut.

La source de rayons X est basée sur le concept de « bremsstrahlung », combinant une accélération des électrons suivie par une forte décélération. L'énergie est répartie en 99% énergie cinétique et 1% énergie radiative.

Les détecteurs sont des récepteurs optiques comme par exemple les photodiodes ou des photomultiplicateurs.

2.2.4.2 Analyse fluorescence rayons X

2.2.4.2.1 Présentation de la technique procédant par analyse fluorescence rayons X

L'analyse de fluorescence à rayons X (XRF) est une méthode analytique spectrale à rayons X basée sur la détection des rayons X émis de manière secondaire par n'importe quel matériel. L'analyse XRF permet la détermination de la composition élémentaire de beaucoup de matériaux. C'est une détection non-destructive utilisant des rayons X émis par l'excitation des atomes et des ions au moyen des électrons, rayons X et rayons gamma.

Elle détecte la composition atomique élémentaire et la concentration massique de chaque élément. Elle analyse finement la composition d'alliages métalliques et trie les alliages contenant des métaux avec des teneurs différentes [Ademe, 2010].

Le principe de la fluorescence consiste à envoyer des rayons X sur les déchets à analyser. Ces rayons X « primaires » excitent les atomes. Ensuite, un rayonnement X « secondaire », restitution de cette énergie sous forme de lumière à une autre longueur

d'onde, est analysé par un spectromètre. Ce spectre de réémission caractérise la composition atomique élémentaire de l'échantillon et de la concentration massique de chaque élément. Elle peut également reconnaître et mesurer d'autres atomes lourds comme le brome.

Par contre, le XRF ne permet pas de déterminer la proportion des différentes molécules présentes contenant un élément considéré. Les axes d'amélioration portent sur l'efficacité du tri et l'élargissement à de nouvelles applications. Le XRF est utilisable en laboratoire, en portatif et en continu [Ademe, 2012].

Cette analyse date du 19^{ème} siècle. L'industrialisation de cette analyse s'est faite par le développement technique. Cette technique, présente dans beaucoup d'industries, est utilisée pour le contrôle et l'optimisation. Selon les domaines d'application, les appareils sont disponibles en stationnaires ou en portatifs [Hahn, 1984].

Dans le domaine de l'industrie des matières premières et secondaires, cet outil est bien utilisé dans des applications dans les domaines de la géologie, de l'exploitation minière, et de la métallurgie.

La technique XRF est particulièrement utilisée pour le tri dans l'industrie des matières premières et secondaires. La plus grande différence entre les mesures XRF analytiques et les mesures XRF pour les procédés de tri est le temps de mesure. Celui-ci peut être inférieur à une seconde pour la détermination d'une particule individuelle. Cela est dû à la vitesse des particules dans la chambre.

2.2.4.2.2 Principe de fonctionnement

L'analyse spectrale à rayons X pour analyse chimique est basée sur l'interprétation des rayons X causés par le mouvement des électrons d'un état excité vers un état plus stable dans le nuage électronique de l'atome (figure 7). Le rayonnement émis est causé par les migrations des électrons à différents niveaux.

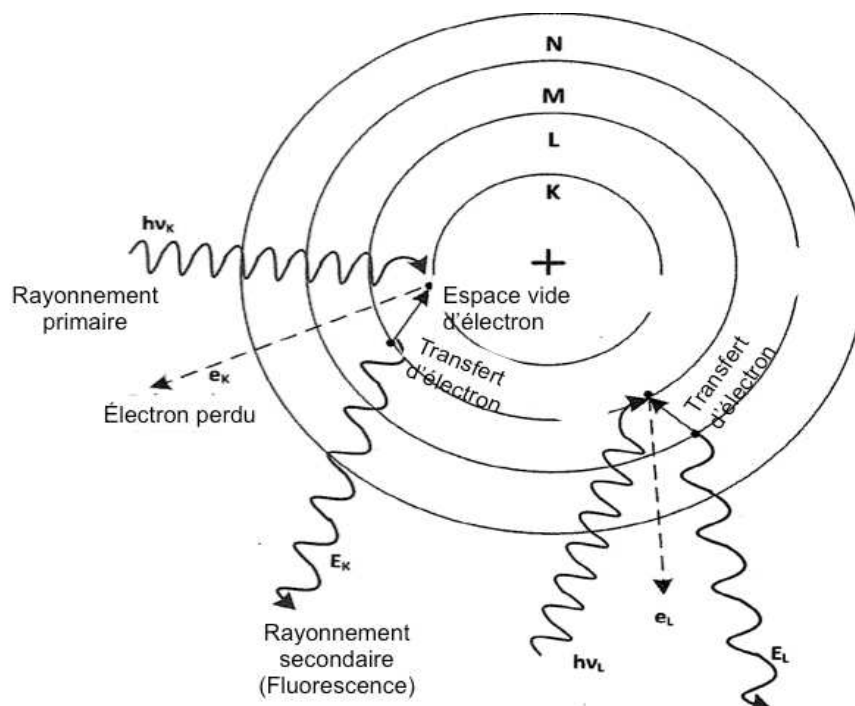


Figure 7 – Principe de la radiation fluorescence [Hahn, 1984].

Les mesures sont effectuées selon deux approches qui dépendent des éléments à trouver. Les approches sont : la dispersion de la longueur d'onde (WD-XRF) et la dispersion de l'énergie (ED-XRF). Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients de chacun des types de mesures.

	ED-XRF	WD-XRF
Gamme des éléments	Sodium (11) à uranium (92)	Béryllium (4) à uranium (92)
Limite de détection	Moins précis pour les éléments légers, convient pour les éléments lourds	Convient pour les éléments les plus lourds
Sensibilité	Sensibilité basse pour les éléments légers, haute sensibilité pour les éléments lourds	Sensibilité raisonnable pour les éléments légers, bonne sensibilité pour les éléments lourds
Résolution	Moins optimale pour les éléments légers, bonne résolution pour les éléments lourds	Bonne résolution pour les éléments légers et moins optimale pour les éléments lourds
Mesure		Séquentielle / simultanée
Éléments critiques	Aucun	Crystal

Tableau 3 – Avantages et inconvénients des méthodes WD-XRF et ED-XRF.

2.2.4.2.3 Composants

La liste des composants diffère selon le type de méthode qui régit le choix de la source à rayons X et des détecteurs [Nienhaus, 2014]. Pour l'analyse par longueur d'onde, un cristal est nécessaire pour séparer les rayonnements polychromatiques en monochromatiques, chacune dirigée vers un compteur à scintillation. Pour le ED-XRF, le détecteur utilisé est un semi-conducteur, capable de mesurer les différentes longueurs d'onde en même temps sans cristal.

Pour ce qui concerne la source à rayon X, la plus commune est le tube à rayons X composé d'une anode et d'une cathode dans une enveloppe de verre. La cathode en tungstène émet les électrons. Un disque fin large en tungstène. Un champ électrique accélère les électrons. Ils ne sortent que par une petite fenêtre du tube.

Les optiques sont des collimateurs en cristal pour WD-XRF. En revanche, pour la technique ED-XRF, il n'y a pas d'optiques.

Pour le WD-XRF, le détecteur est un compteur à scintillations, c'est-à-dire un cristal convertissant les rayonnements ionisants en lumière visible associé à un photomultiplicateur convertissant la lumière obtenue en signal électrique.

Le semi-conducteur distingue les différents états d'énergie. Il produit un signal électrique proportionnel à l'état d'énergie du photon de rayon X variant selon la longueur d'onde du rayonnement

2.3 Méthodes de tri densimétrique

2.3.1 Introduction

Les méthodes de tri densimétriques peuvent être classées de la manière suivante. Tout d'abord, les méthodes de tri densimétrique dites « mécaniques » utilisent un phénomène mécanique vibratoire ou rotatif pour trier. Elles se déclinent selon qu'elles sont utilisées sans eau ou avec.

Ensuite, nous retrouvons les méthodes de tri densimétriques dites « fluidisées ». Celles-ci s'appuient sur la génération d'un phénomène de fluidisation pour réaliser le tri des matériaux. Ces méthodes se retrouvent dans le procédé « jig à air » ou « jig à eau ».

2.3.2 Méthodes de tri densimétrique « mécanique » sec

2.3.2.1 La table vibrante

La table vibrante peut être aussi appelée crible plan. C'est une plaque perforée permettant un tri granulométrique, les objets les plus fins passant à travers les trous [APESA, 2010].

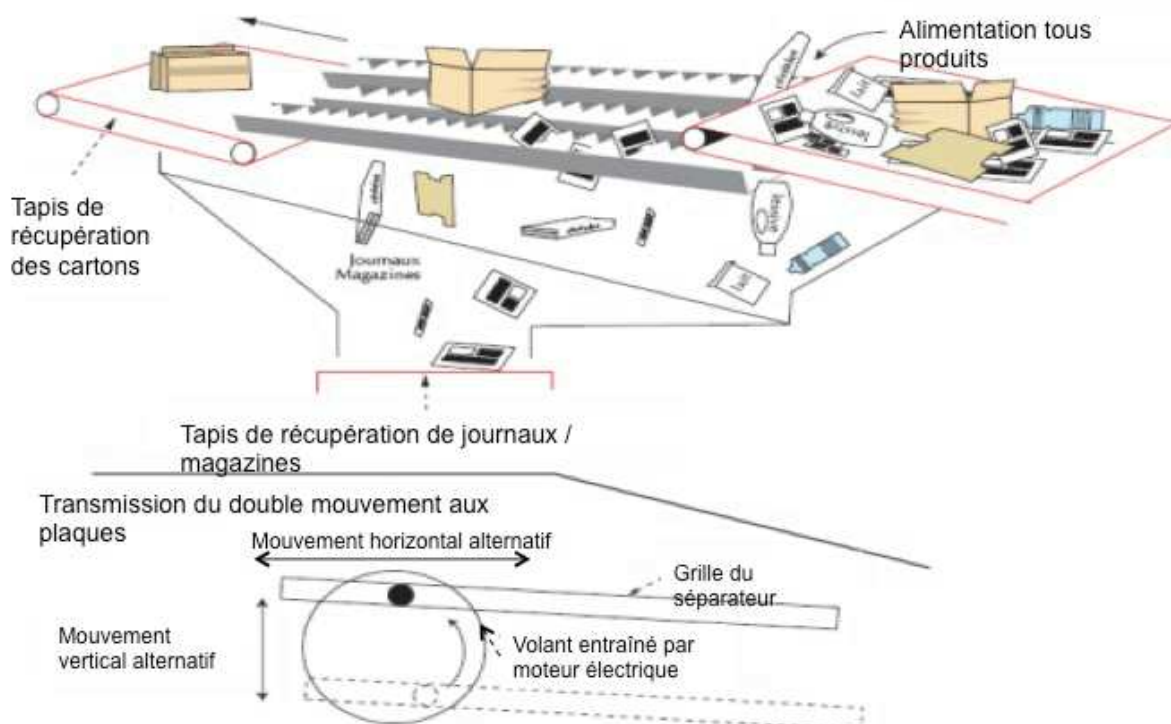


Figure 8 - Fonctionnement d'une table vibrante [APESA, 2010].

Elle sépare les produits lourds, des produits légers et ultra légers. Animée d'un mouvement vibratoire, elle est équipée d'une bande transporteuse et de chaînes en mouvement au-dessus de la bande. Un tube plastique ou métallique est fixé au bout d'une chaîne, à chaque maillon d'une chaîne. Les matériaux ont ainsi à franchir ces différents rideaux. Les objets lourds roulants traversent ces rideaux. Les objets légers

roulants sont freinés par le 2^{ème} rangée de chaînes et sont réceptionnés. Les plats sont transportés le long du premier rideau et ne le traversent pas [APESA, 2010]. Cette technique peut être adaptée au tri des granulats [Schnellert, 2010]. Ce tri peut se présenter de la manière suivante (figure 9).

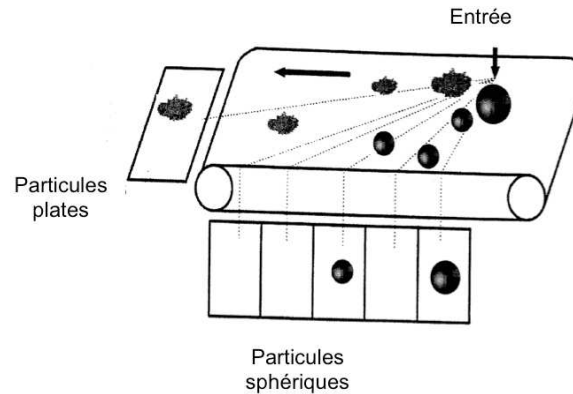


Figure 9 – Table vibrante utilisée pour le tri des granulats [Schnellert, 2010].

Les particules rugueuses et plates sont emmenées par un tapis-convoyeur à la table vibrante. Elles sont récupérées à la sortie dans un bac de stockage pour être valorisées par la suite. Et les particules sphériques tombent vers des voies de récupération selon leur sphéricité et leurs dimensions.

2.3.2.2 Table à secousse

La table de secousse est un procédé largement utilisé dans le domaine du minéral en particulier pour le traitement et l'épuration du charbon. C'est un processus à faible coût par tonne de débit, avec une faible puissance installée et avec un impact minimal sur l'environnement [Carvalho, 2007]. Il fait appel à plusieurs mécanismes. À ce titre, c'est un processus complexe nécessitant actuellement, une approche empirique pour sa compréhension.

La table de secousse humide est une des configurations utilisées pour la concentration par gravité appliquées aux minéraux en vrac (figures 10 et 11). La séparation résulte de l'action de la gravité, du mouvement de la table, et des forces issues de l'immersion des minéraux dans l'eau.



Figure 10 – Table à secousse à eau [Carvalho, 2007].

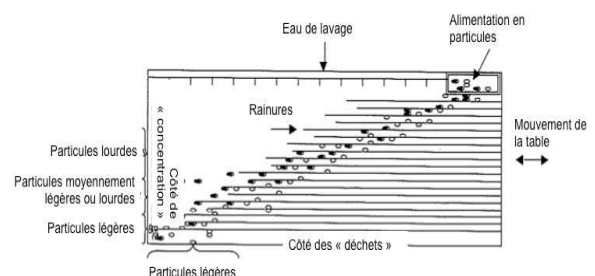


Figure 11 – Schéma descriptif d'une table à secousse à eau [Carvalho, 2007].

Une table typique avec une agitation humide (figure 10) est une plaque rectangulaire inclinée sur laquelle la nappe d'eau est en mouvement. Longitudinalement, le

mouvement vibrant généré par le mécanisme, superpose la course avant lente et un retour rapide. Cela provoque le déplacement des particules le long de la table.

L'alimentation en eau de lavage, arrive longitudinalement par le côté. La table peut avoir des radiers, généralement parallèles au mouvement de la table, pour générer la pulsation de particules entre elles (Burt, 1984). La séparation entre les particules est une conséquence des effets combinés de du mouvement asymétrique de la table, le mouvement de l'eau et de la turbulence entre les radiers. En raison de la force de gravité, la friction statique et la résistance à l'écoulement de l'eau, les particules se déplacent diagonalement sur la table, à partir du côté de l'alimentation. Ce processus peut séparer efficacement des particules similaires si les densités sont différentes. Dans ce cas, les particules les plus lourdes se rendront longitudinalement et les plus légères seront transportées par l'écoulement de l'eau de lavage.

La position des grains en sortie du procédé est fonction de leurs caractéristiques (densité, forme, taille). La performance de la table de secousse humide peut être influencé par un certain nombre de paramètres de la machine, tels que la fréquence et l'amplitude du mouvement de la table, la pente longitudinale et transversale de la table, le débit d'alimentation taux et la densité des particules. Les effets des caractéristiques des grains, tels que granulométrie des particules et la composition de la forme, sur les résultats de la séparation peuvent être importants.

2.3.2.3 Le tri par tambour rotatif ou trommel

Le matériel utilisé pour le tri est un tambour rotatif ou autrement appelé trommel. Il est faiblement incliné. Des auges ou releveurs équipent la face intérieure du tambour qui est également percé pour laisser sortir les matériaux lourds avant la sortie (figure 12).

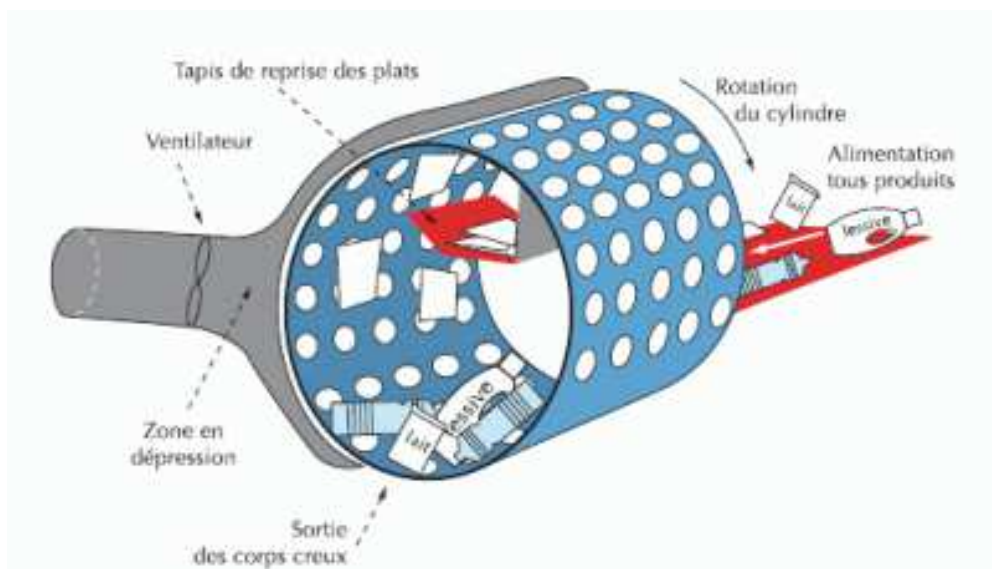


Figure 12 – Vue d'un trommel [APESEA, 2010].

C'est un crible cylindrique rotatif. Les matériaux sont brassés et convoyés de l'extrémité haute vers l'extrémité base du trommel. Les particules de dimensions inférieures à celles de perforations sont évacuées au fur et à mesure de leur avancement.

Le trommel aéraulique sépare les corps creux, des corps plats. C'est un tambour rotatif découpé en deux parties, une partie criblage des matériaux et une partie mise en

dépression dans laquelle s'opère la séparation des matériaux. Dans cette dernière partie les corps plats sont plaqués sur la surface intérieure du tambour. Ils retombent par gravité une fois la zone de dépression passée. Ils sont réceptionnés sur un convoyeur situé en partie haute du tambour. Les corps creux sont acheminés vers un autre convoyeur en partie basse [APESA, 2010].

2.3.3 Méthodes de tri densimétrique « mécanique avec de l'eau »

2.3.3.1 La séparation par couche mince : aquamoteur

L'aquamoteur se présente comme un tapis-convoyeur avec des rainures. Les matériaux à trier sont mis dans l'eau dans la direction opposée de la circulation du tapis. La séparation est générée par les jets d'eau et l'avancement du tapis. Les impuretés sont séparées du reste. Les matériaux propres sont déchargés dans un espace de stockage situé après le rouleau supérieur du tapis-convoyeur (figure 13).

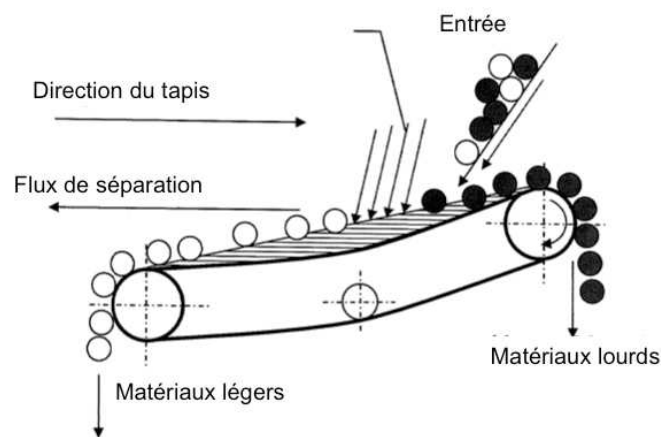


Figure 13 – Schéma de principe d'un aqua moteur [Schnellert, 2010].

Les plus lourds tombent sur le tapis convoyeur. Ils sont évacués grâce à la rotation ou l'avancement du tapis, opposé à la direction des jets d'eau.

2.3.3.2 Le tri par courant ascendant

Cette méthode de tri par voie humide peut se présenter selon deux configurations. Tout d'abord, nous avons le tri avec une vis à contre-courant (figure 14).

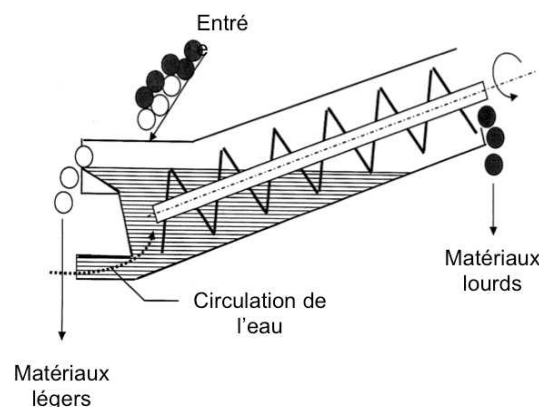


Figure 14 – Schéma de principe d'une vis à contre-courant [Schnellert, 2010].

Les matériaux à trier sont introduits à la fin de la vis dans un espace immergé. La vis mélange les matériaux et les trie. Les matériaux à rejeter sont transportés par les flux de l'eau. Les matériaux à récupérer sont emmenés par la vis et drainés simultanément. Ensuite, la seconde configuration est présentée à travers la figure 15. Cette méthode permet de séparer les produits légers.

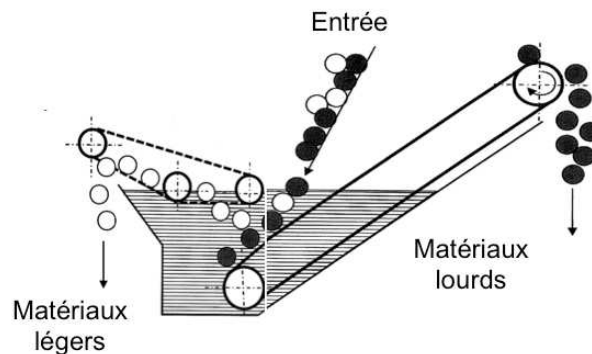


Figure 15 – Schéma de principe d'un séparateur de produits légers [Schnellert, 2010].

Les matériaux les plus légers flottent. Ils peuvent ainsi être emportés par le second tapis-convoyeur. Ainsi, ces particules plus légères peuvent être évacuées. Les matériaux à trier alimentent un container rempli d'eau. Les plus lourds tombent au fond vers un tapis-convoyeur. Les matériaux légers sont conduits par un tapis-convoyeur qui les extrait du container.

2.3.3.3 Hydrocyclones

Les hydrocyclones sont des procédés permettant le tri des particules fines voire des granulats. Le principe de fonctionnement est présenté à la figure suivante.

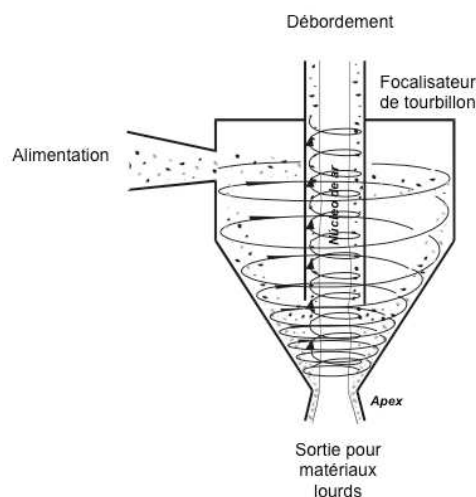


Figure 16 – Schéma descriptif de l'hydrocyclone.

Les principales applications sont la pré-concentration pour le domaine minier (or, minerai de fer), l'élimination du charbon, la récupération secondaire de matériaux... Les principaux avantages de cyclones autogènes sont leur conception simple sans pièces mobiles, le besoin de peu d'entretien. Cependant, quelques ajustements sont nécessaires

pendant le fonctionnement. Ils fonctionnent uniquement avec de l'eau. Un système de récupération milieu dense n'est pas nécessaire. Ils nécessitent peu d'espace.

Leurs principaux inconvénients sont la grande consommation d'eau. Ils ne sont pas utilisés pour le traitement des minéraux avec beaucoup de matériaux. Enfin, les résidus et les concentras propres ne peuvent pas être obtenus simultanément dans une seule unité.

2.3.3.4 Spirales

Les spirales ont été développées dans les années 40 pour le traitement des minerais d'or. La première utilisation industrielle s'est produite dans une mine de chrome dans la mi- 40. Aujourd'hui, il y a des spirales de plusieurs formes, tailles, capacités (figure 17). Leur utilisation s'étend de la transformation de minéraux métalliques aux minéraux de charbons.

Ils se composent d'une hélice en forme d'auge ou en forme de spirale, qui sépare les particules légères et lourdes dans les différents flux de pâte.



Figure 17 – Exemples de spirales.

Le minerai sous forme de pulpe, est introduit dans la spirale. La pâte s'écoule le long de l'axe de la spirale. Il se produit alors la stratification. Cette stratification s'observe par le fait que les particules lourdes se placent dans les zones de basses vitesses (figure 18).

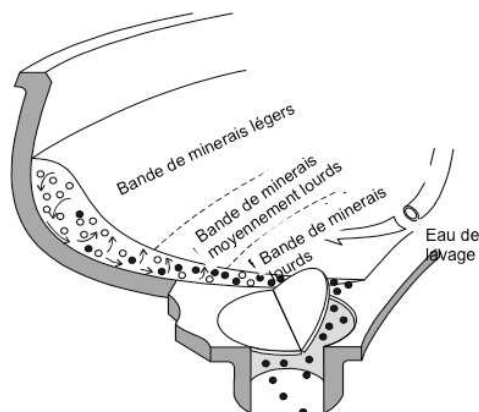


Figure 18 – Schéma descriptif du positionnement des particules de différentes densités.

2.3.4 Méthodes de tri densimétrique « fluidisé »

2.3.4.1 Critères d'analyse basés sur la densité ou la masse volumique

Le paramètre pour les procédés de tri densimétrique est la densité ou la masse volumique. Le critère d'analyse se définit alors de la manière suivante [Cazacliù, 2013] :

$$q = \frac{\rho_H - \rho_{Fl}}{\rho_L - \rho_{Fl}}$$

Avec ρ_H la masse volumique des composants les plus lourds, ρ_L la masse volumique pour les composants les plus légers, ρ_{Fl} la masse volumique du fluide.

Selon cette formule, il apparaît que la précision du tri augmente avec q .

A titre d'information, quand q est inférieur à 1,5, la séparation n'est pas possible. A contrario, quand q est supérieur à 1,5, la séparation est possible pour des particules avec une taille > 2 mm.

La forme des particules est aussi un facteur d'influence des mécanismes de séparation non négligeable.

Les substances solubles dans l'eau et les particules fines peuvent être réduites par séparation humide. La teneur en eau de production est d'environ 10%.

2.3.4.2 Présentation du procédé jig

Le procédé jig est un procédé de séparation qui utilise la fluidisation des particules pour assurer le tri de celles-ci. Son utilisation est très appréciée dans le domaine minier. Elles sont disponibles autant en version de laboratoire qu'à l'échelle industrielle (figure 19).



Figure 19 – Jig à air de laboratoire (gauche) [Boylu, 2014] et jig à air industrielle [Oder, 2003].

Ce procédé a pour objectif de séparer les particules granulaires. Ce phénomène de séparation s'appuie par des mouvements verticaux périodiques d'un fluide, généralement de l'air ou de l'eau. Ce phénomène est mis en œuvre par la répétition de l'expansion (ou dilatation ou fluidisation) et de la contraction (ou compression ou défluidisation) de ce lit de particules immergé dans un fluide. Cette séparation est caractérisée par une stratification du lit de particules. La stratification a la caractéristique de présenter une diminution de la densité avec la hauteur du lit (figure 20)

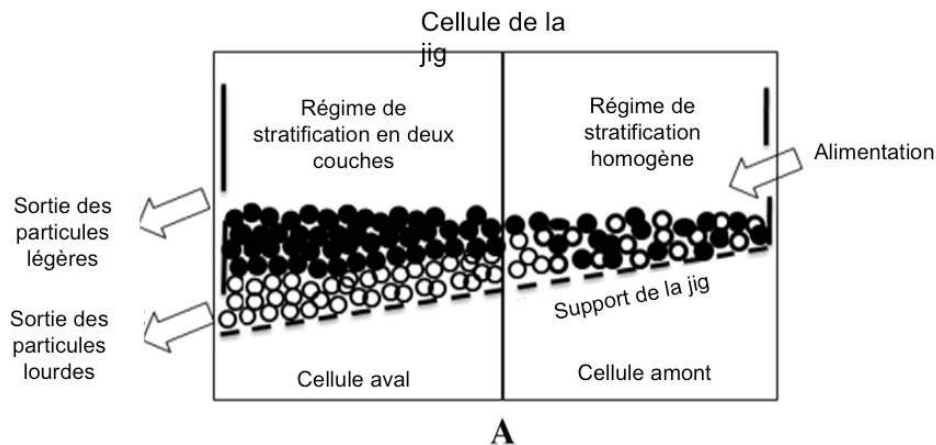


Figure 20 – Illustration de la stratification en deux couches [Boylu, 2014].

Dans une couche de matériaux, les grains lourds sont séparés des légers pendant qu'ils avancent dans le fluide pulsé. Une stratification selon la masse volumique se met en place. Les matériaux à trier sont conduits dans le lit de la jig. À la fin, les matériaux à haute densité sont concentrés dans le fond. La stratification est influencée par la densité du fluide et la densité des matériaux [Schnellert, 2010].

Ce procédé est un des plus vieux procédés utilisés pour la recherche des minéraux. Son principe de base était déjà bien connu dans l'Égypte ancienne [Lyman, 1992]. En effet, le procédé de jig à air a connu des développements significatifs depuis l'époque de Georgius Agricola [Agricola, 1556]. Les jigs pulsées manuelles et discontinues ont été utilisées jusqu'au 19^{ème} siècle. La demande de minéraux avec la révolution industrielle a induit des améliorations techniques de ce procédé. Le panier a été remplacé par une chambre équipée d'une grille sur laquelle les matériaux se déplaçaient. Ainsi, le procédé peut fonctionner de manière continue [Fellensiek, 1991]. Ces modifications ont été possibles avec la mise en place de la pulsation mécanique et l'utilisation des pistons [Burt, 1984].

Son utilisation a diminué en raison de la disponibilité de nouvelles technologies dans le domaine de la séparation par gravité, qui ont montré une meilleure efficacité de séparation [Mukherjee, 2006a]. Cependant, les avantages spécifiques d'une jig à eau restent le faible coût d'exploitation et la facilité d'utilisation. L'installation réalisant ce procédé est simple et offre un dispositif mécanique robuste. Elle peut traiter des matériaux de grande taille à des débits plus élevés.

Les jigs sont souvent utilisées pour leur coût peu élevé. En plus de présenter de faibles coûts opérationnels, elles sont robustes et ont une grande capacité. Elles sont faciles à mettre en place. Elles peuvent admettre une granulométrie de particules étendue ce qui simplifie le traitement des particules en entrée tout en étant performantes [Sampaio, 2008]. En général, l'air en tant que milieu de stratification est utilisé en l'absence d'eau dans la région, dans le cas où le matériau à traiter ne peut pas être humidifié et aussi en raison des coûts environnementaux élevés associés à l'utilisation de l'eau [Sampaio, 2005].

2.3.4.3 Principe de fonctionnement de la jig à air

Le procédé de jig à air stratifie les lits de particules sur des épaisseurs importantes. Il exploite les avantages de sédimentation sous confinement et la consolidation par compression. L'alimentation est introduite dans la jig à air à partir d'une trémie-tampon alimentant le système à vitesse variable. Cela permet le contrôle et la distribution sur

toute la largeur du tapis d'alimentation [Weinstein, 2007].

L'alimentation est conçue pour que le volume délivré soit contrôlé. L'air alimente la jig à air sous deux formes superposées : un flux continu et un flux d'air pulsé. Cela produit l'impulsion pour la stratification et la consolidation par compression.

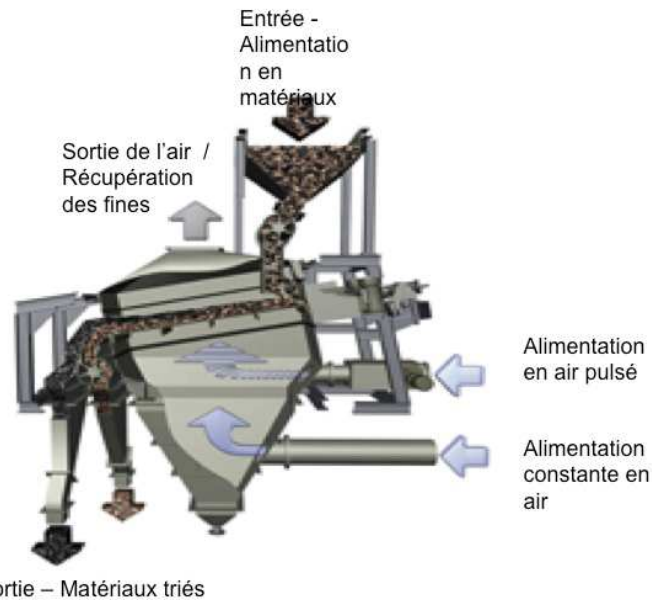


Figure 21 – Coupe d'une jig à air industrielle [Sampaio 2008].

Le lit de particules se déplace sur la grille de support grâce à un mouvement cyclique horizontal de celle-ci. À l'opposé de l'entrée des particules, les ouvertures permettent de guider les produits et les rejets en minimisant les pollutions. Ce système est analogue au fonctionnement d'une jig à eau. Mais, la densité de l'air étant très inférieure à l'eau, les forces gravitationnelles sont plus importantes dans une jig à air que dans une jig à eau.

Le rideau d'air a été conçu dans une structure fermée, qui distribue l'air de façon uniforme à travers un lit oscillant [Sampaio, 2008]. La grille de support du lit de particules permet de distribuer uniformément l'air à sous le lit, réduisant les points morts.

L'alimentation en air est conçue de sorte à contrôler indépendamment l'amplitude, la fréquence et l'accélération. Ainsi l'alimentation ascendante en air peut être modélisée par un débit volumique périodique associée à des pulsations. Ainsi, la stratification de la charge est augmentée.

Pour compléter, la poudre créée par la pulsation de l'air, est récupérée au moyen de cyclones pneumatiques et de filtres à manches. Le trop-plein est guidé à travers une porte à l'aide d'un radiomètre pour contrôler automatiquement le rejet. L'installation peut maintenir constante une couche de réserve de matière à haute densité près de la porte d'étoiles pour éviter la contamination du produit dans la dernière section du lit. Un lit de produit en contrebas fait une barrière à faible densité du matériau, qui reste au-dessus du lit stratifié. Ceci minimise les imperfections ou pollutions (mélanges de matériel lourd et léger) (voir figure précédente).

2.3.4.4 La jig à eau et ses développements

À l'image de la jig à air, le procédé de jig à eau est un processus de séparation par densité. Il est utilisé pour l'enrichissement des minerais ainsi que le lavage de charbon [Mukherjee, 2006b].

La dynamique du lit d'eau pulsé influence la ségrégation des particules [Jinnouchi, 1984]. La pulsation de l'eau dans la jig à eau provoque l'expansion de lit et permet ensuite réarrangement de lit de particules. Les différentes phases du phénomène de ségrégation sont présentées par la figure suivante (figure 22).

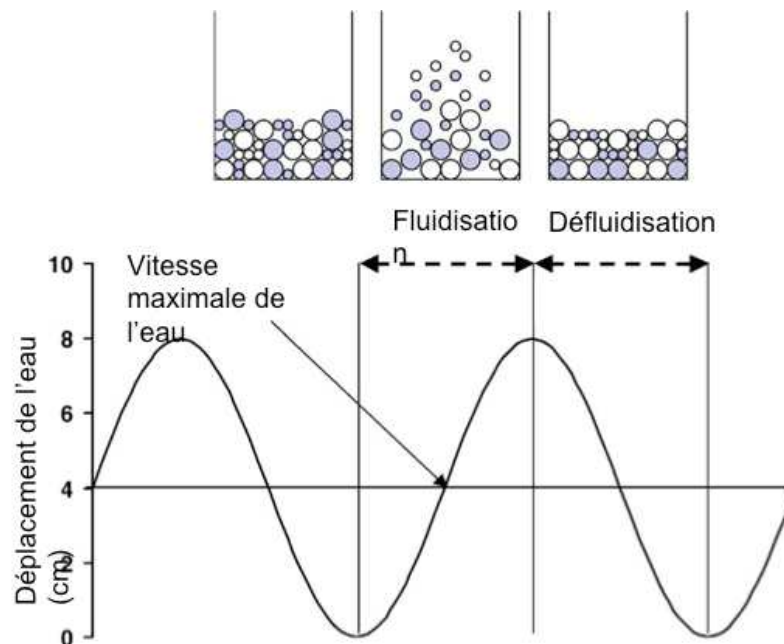


Figure 22 – Ségrégation des particules durant la fluidisation et la défluidisation : corrélation entre le mouvement du lit et le mouvement de l'eau [Mukherjee, 2006a].

Les mouvements verticaux de pulsation de l'eau génèrent une expansion et une compression de lit de particules. Lors de la pulsation, les particules se trouvent accélérées dans l'eau. Le lit de particules se dilate. Les mouvements périodiques du fluide provoquent une fluidisation et une défluidisation du lit particulaire.

Plus précisément dans l'état de défluidisation du lit de particules [Mukherjee, 2006a], la stratification est générée en fonction de la densité de chaque particule et de la position de chaque particule au début de chaque phase de défluidisation. Par conséquent, la stratification va se baser sur le critère de concentration des particules de même densité à chaque niveau de stratification.

De plus, la position relative entre les particules lourdes et légères au début de la phase de défluidisation est liée à la ségrégation des particules produite lors des précédentes phases de fluidisation. La phase de fluidisation pendant laquelle la ségrégation se fait, est un élément clé de l'efficacité du procédé de jig à eau.

Dans l'approche pour obtenir un cycle de jig optimal, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de l'alimentation. Plusieurs articles [Epstein, 1981] [Formisani, 1991] [Mohammad, 2002] [Epstein, 2005] expliquent le rôle des caractéristiques de la charge composée de deux de population de particules dans le contexte de la ségrégation des particules au cours de fluidisation. Il en résulte que les

paramètres caractérisant l'alimentation sont la taille et le rapport de densité, la fraction de volume, et la taille des particules.

La compréhension du fonctionnement du procédé demande finalement à s'intéresser, entre autres, à quatre éléments liés au procédé de jig à eau. Ces éléments sont la vitesse du fluide et le réglage des paramètres opérationnels comme la fréquence, l'amplitude et la vitesse du fluide, ainsi que la porosité du lit et l'hydrodynamique du fluide.

Tout d'abord [Mukherjee, 2006b], la phase de fluidisation implique que la vitesse du fluide joue un rôle clé. En effet, la ségrégation des particules dans les jigs à eau est principalement due à la pulsation de l'eau où la vitesse est contrôlée par l'amplitude et la fréquence de la pulsation [Jinnouchi, 1984].

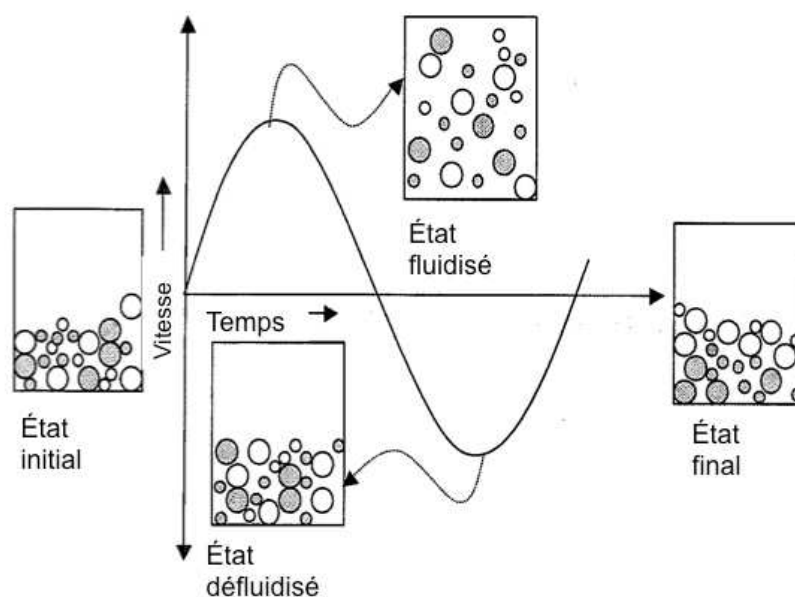


Figure 23 – Représentation de la stratification des particules [Mukherjee, 2006b].

Cela conduit à penser que l'énergie fournie par l'intermédiaire du fluide pour la stratification est une conséquence directe de la combinaison de l'amplitude et de la fréquence de pulsation. Ainsi en modélisant la stratification des particules en plusieurs étapes, la caractéristique cyclique inhérente au procédé est retrouvée. Dans la phase d'expansion, les particules sont fluidisées pour permettre la ségrégation. Dans la phase d'aspiration ou défluidisation, les particules se ségrègent dans des conditions de sédimentation confinée. Par conséquent, la vitesse maximale de l'eau au cours de chaque cycle contrôle le taux de variation de l'eau à travers le lit. Donc au cours de la phase de fluidisation, c'est la vitesse maximale de l'eau qui doit être aussi commandée.

Il en reste que le réglage de la fréquence et de l'amplitude de la pulsation demeure un critère important. En effet, malgré une tentative de corréler la cinétique du processus, le taux de ségrégation et les paramètres de la jig à eau [Karantzavelous, 1984] [Vetter, 1987], il s'avère que la fréquence et l'amplitude de la pulsation doivent avoir une valeur optimale pour assurer l'efficacité du procédé [Jinnouchi, 1984] [Rong, 1993]. Alors l'amplitude de la pulsation dans un certain intervalle peut être nuisible à la ségrégation des particules. Et de ce fait, l'optimisation du procédé se fait aujourd'hui encore principalement par tests.

Enfin, la porosité du lit de particules et l'hydrodynamique demeurent aussi des caractéristiques à ne pas négliger. Pour ce qui concerne la porosité, la force de traînée

sur les particules constituant le lit avec un faible taux de vide, sera plus importante par rapport à celles constituant un lit avec un taux de vide plus élevé, quelque soit la vitesse de l'eau [Mukherjee, 2006a]. Autrement dit, un lit de particules avec une porosité faible augmentera la vitesse de l'eau et permet la séparation de particules qui est principalement attribuable par le rapport de densité.

L'hydrodynamique du milieu liquide influence la stratification des particules. Plusieurs études [Vetter, 1987] [Rong, 1991] [Mukherjee, 2005b] présentent l'interdépendance des paramètres opérationnels. Le mouvement d'eau à travers le lit du crible permet aussi une meilleure stratification des particules. Une analyse du mouvement de l'eau dans un cycle classique de la pression et de la gravité pulsion induite par aspiration est en utilisant une jig à eau instrumentée. Son fonctionnement est donc limité à une gamme étroite de fréquences avec les interdépendances d'amplitude et de fréquence de la forme d'onde de l'eau.

2.3.4.5 Comparaison de ces deux procédés de tri fluidisés

La jig à air a une efficacité inférieure de face à la jig à eau, bien que ce constat peut dépendre de l'application. Mais de manière générale, l'efficacité de séparation des équipements utilisant de l'air est inférieure à l'efficacité de ceux qui utilisent l'eau [Sampaio, 2005]. Par exemple, la taille des particules de la matière à traiter dans la jig à air est légèrement supérieure à la taille des particules utilisées dans les jigs à eau. Toutefois, les jigs à air peuvent efficacement traiter les particules de taille supérieure à 4 mm [Aplan, 1985].

A contrario, par contraste avec de l'eau, l'écoulement intermittent de l'air vers le haut provoque des turbulences importantes lors du passage à travers une couche de particules de tailles différentes. Ces turbulences influencent la stratification des particules [Sampaio, 2005].

Compte tenu de leur plus faible efficacité, les jigs à air ont été utilisées à la place des jigs à eau uniquement lorsque l'eau manque près de la station de traitement ou lorsque le minerai ne pouvait pas être humide [Burt, 1984]. De nos jours, l'augmentation de restrictions environnementales sur l'eau utilise ainsi que le prix de l'eau, les équipements tels que les jigs à air sont de plus en plus installés.

2.4 Pratique du tri et procédés utilisés dans les différentes filières et appliquée aux granulats de béton recyclé

2.4.1 Introduction

Cette partie concerne la pratique du tri dans les différentes filières. Un premier point s'attache à broser les pratiques dans les filières dont le traitement n'est pas dédié aux granulats de béton recyclé. Selon le syndicat professionnel Federec [Federec, 2014], dix filières de tri de valorisation existent :

- La filière plastique
- La filière papiers cartons
- La filière métal
- La filière métaux non ferreux
- La filière véhicule hors d'usage
- La filière palettes et bois
- La filière solvant
- La filière textile
- La filière verre
- La filière plumes et duvets

La seconde partie de ce chapitre est consacrée plus particulièrement aux granulats de béton recyclé. Elle s'appuie sur la pratique actuelle dans les carrières de granulats et sur l'expérience dans l'industrie minière, considérée comme la plus proche en termes de transferts technologiques possible. Cette partie, présente, dans un premier temps, un bilan sur les procédés déjà utilisés sur la base des connaissances scientifiques et techniques disponibles. Dans un second temps, elle donne quelques perspectives à propos des procédés innovants ayant la capacité de trier ce type de matériau.

2.4.2 La filière plastique

Le plastique est une matière difficile à recycler car ce n'est pas un matériau unique. Les formules chimiques qui peuvent composer un produit sont extrêmement variées et rendent compliqué la récupération, le tri et le recyclage de ces déchets. Les plastiques recyclables sont le PP, PS, PVC, PEHD et le PEBD ainsi que les plastiques dits techniques. En 2012, les professionnels du plastique affichent une production de 800 000 tonnes. Près de 60% des matières plastiques produites par les entreprises du recyclage ont été commercialisées sur le territoire national, et le reste est exporté.

Une fois le tri à la source (par les consommateurs) et la collecte, les déchets plastiques sont séparés en trois catégories :

- Le PEHD opaque
- Le PET clair
- Le PET foncé

Une fois le tri effectué, ces différents plastiques sont mis en balle et expédiés aux centres de régénération qui se chargent d'assurer un second tri, ainsi qu'un pré-lavage et une séparation des matériaux en fonction de leur densité.

Le plastique est ensuite broyé en « paillettes » qui seront incorporées dans la fabrication de nouveaux produits. (Bouteilles, emballages plastiques, textiles, mobilier...)

Les actions actuelles des pouvoirs publics et de l'industrie sont focalisées sur l'emballage (de l'ordre de 20% parmi les 6 millions mis sur le marché). Or, d'autres flux méritent de faire l'objet d'actions pour la mise en place d'un recyclage.

En effet, de nombreuses filières possèdent un fort potentiel pour augmenter le taux de recyclage en paraît :

- Recyclage des plastiques issus des DEEE (écrans, PAM...)
- Recyclage des plastiques issus des VHU
- Recyclage des plastiques en fin de vie issus du BTP

Ces filières ont les clés en main pour mettre en place un système de soutien au recyclage. Grâce aux progrès réalisés ces dernières années, le procédé NIR est utilisé à grande échelle pour trier un nombre croissant de matériaux, en particulier [Ademe, 2012] :

- les polymères entre eux et les fibreux (papier, coton, textiles) entre eux
- les polymères, les fibreux et les inertes dans un flux mélangé. Elle permet en particulier de reconnaître le PVC et les autres chlorés.

Dans l'industrie du recyclage, la technique transmission par rayons X est utilisée pour les déchets électroniques [TOMRA, 2012].

2.4.3 La filière papier cartons

La préparation dépend de la nature des produits collectés et varie en fonction des pourcentages de mélange notamment des matériaux non recyclables contenus dans les produits collectés. Le recycleur prend en charge l'ensemble des opérations de traitement du produit (tri, conditionnement).

Plus le produit récupéré est homogène, plus l'aptitude au recyclage est élevée. Les papiers cartons sont collectés et triés selon des consignes de tri définies dans la norme européenne EN 643 et dans les recommandations interprofessionnelles FEDEREC / REVIPAP. La norme EN 643 a été établie par l'industrie européenne, sous forme de nomenclature. Elle liste les standards européens de papiers et cartons récupérés.

54 sortes de papiers cartons récupérés y sont regroupés en cinq grandes familles :

- Les sortes ordinaires et les sortes moyennes
- Les sortes supérieures
- Les sortes kraft
- Les sortes spéciales

2.4.4 La filière métal

Le tri par aimantation permet de d'isoler les métaux ferreux, alors que les métaux non ferreux sont séparés par courant de Foucault et tri optique (métaux cuivreux, aluminium). Les stériles contenant encore quelques métaux non ferreux passent dans des bains de flottation pour en extraire l'aluminium. Les PVS, plastiques, caoutchoucs et les mousses peuvent être utilisés comme combustible dans les fours de cimenterie.

La cisaille sert à réduire les dimensions des ferrailles et à la purifier de certains stériles afin de densifier les matières à destination des fours électriques.

2.4.5 La filière métaux non ferreux

Les métaux non ferreux désignent tous les métaux. Parmi les métaux non ferreux, on peut citer deux catégories particulières de métaux : les métaux précieux (or, argent,

platine et palladium) et les métaux rares et semi-précieux (titane, cobalt...). Ils se trouvent essentiellement dans les véhicules automobiles, mais aussi dans les câbles électriques (cuivre), le bâtiment (aluminium, zinc), les batteries (plomb et nickel), les équipements électroménagers (aluminium, zinc), les emballages (aluminium), ou encore les pièces de monnaie (nickel)...

Le nombre de ces déchets augmente, du fait de la Réglementation. Ces différentes catégories font l'objet de classements internationaux utilisés dans les transactions commerciales qui tiennent compte de la teneur en métal, de la composition chimique et des tolérances admises.

Le recyclage dans la filière métaux non ferreux concerne essentiellement le cuivre et l'aluminium, suivis par le plomb, le zinc et l'étain. L'aluminium est 100% recyclable (comme le verre), et ce à l'infini contrairement à l'acier. Les métaux non ferreux collectés pour être recyclés proviennent en grande partie des déchets municipaux, du tri sélectif et des mâchefers d'incinération. Les méthodes de tri sont:

- Le tri manuel assisté ou non d'un analyseur d'alliage
- Le tri magnétique par Overband qui sépare les métaux ferreux des métaux non ferreux
- Les unités de flottation qui sépare l'aluminium des autres métaux non ferreux
- Le tri optique qui permet de trier les métaux par leurs couleurs
- La table densimétrique
- Le tri des métaux par courant de Foucault qui sépare les métaux magnétiques des autres métaux

Dans l'industrie du recyclage, la technique transmission par rayons X est utilisée pour le tri d'aluminium [TOMRA, 2012].

Cette technologie est utilisée principalement pour l'analyse fine de la composition d'alliages métalliques et pour le tri d'alliages contenant des métaux avec des teneurs différentes. Elle permet d'effectuer une quantification de la masse totale de chacun des métaux contenus (plomb, mercure, cadmium, chrome VI) [Ademe, 2012].

2.4.6 La filière Bois palettes

Les différents types de déchets de bois sont collectés (benne, fond mouvant, semi remorque...), et acheminés sur des plateformes de préparation localisées sur l'ensemble du territoire national. Ces plateformes disposent de matériels permettant de trier, broyer et cribler, d'effectuer les contrôles qualité (mesures chimiques et physiques), de charger les camions et d'organiser la logistique pour transporter cette matière première nouvellement créée chez les industries consommatrices

Dans l'industrie du recyclage, la technique transmission par rayons X est utilisée pour les déchets de bois [TOMRA, 2012].

2.4.7 La filière textile

Le textile d'habillement, le linge de maison et les chaussures (TLC) proviennent de différentes sources comme les ménages, l'hôtellerie ou bien encore les surplus ou invendus de l'industrie du textile et de la maroquinerie. La collecte, le tri et la valorisation des textiles représentent une source importante d'emplois avec plus de 5 000 emplois directs dont le tiers dans les entreprises d'insertion.

Une fois collectés, les déchets textiles sont triés manuellement. Les articles en bon état sont réemployés en Espagne ou dans d'autres pays (continent africains, Asie, Amérique du sud ou pays de l'est). L'autre partie de ces déchets part en effilochage ou en chiffons d'essuyage.

2.4.8 La filière verre

Le tri par couleur du verre est réalisé grâce aux technologies les plus évoluées du traitement d'image. Le traitement de base du verre consiste à éliminer toutes sortes d'indésirables tels que les infusibles (porcelaine, céramique, pierre, béton...), les métaux ferreux et non ferreux et les organiques (papiers, plastiques, bois...). Le démélange est une étape supplémentaire dans la chaîne de traitement du verre

Le tri basé sur les capteurs joue un rôle décisif dans l'industrie du recyclage du verre. En fait, la séparation du verre et de la céramique est réalisée par l'analyse chimique de la spectroscopie XRF [Hahn, 1948].

2.5 Technologies de tri et de détection potentiellement applicables aux granulats de béton recyclé

Pour rappel, les granulats de béton recyclé industriels proviennent généralement de structures de béton démolies. Cela contribue à une grande variabilité de composition, du à la fois à la variabilité des propriétés de béton d'origine qu'à la présence de grandes proportions de matières étrangères comme la brique, le verre, le plâtre et l'asphalte.

La séparation de mélange d'asphalte et de béton s'avère complexe. Cependant, ces constituants sont souvent présents en mélange, comme le reflètent les statistiques disponibles en France [Commissariat Général au Développement Durable, 2011] et en Espagne [Varela, 2011]. D'autre part, l'existence de ce mélange ne paraît pas le plus nocif, ni pour les applications visant la production des nouveaux bétons, ni pour les applications visant les matériaux routiers.

Les mélange de granulats recyclés regroupe du béton et de la brique [Azam, 2013] peuvent être utilisés comme substituts pour granulats naturels dans les matériaux pour les couches de base de chaussée [Aatheesan, 2008], voire même avec une quantité importante de brique [Arulrajah, 2012]. L'utilisation en tant que substitution lors de la production des bétons peut avoir un impact significatif sur la durabilité des structures [Etxeberria, 2007]. Néanmoins de proportions de 5 à 10% de brique sont tolérés y compris au niveaux normatif (voir la révision de la norme EN206-1) pour l'application au bétons.

La présence de mortier de ciment fixé à granulats naturels dans les granulats de béton recyclés [De Juan, 2009], la présence de particules d'argile de la brique [Yang, 2011] et la présence de contaminants comme calcin de verre de déchets ou de copeaux de bois [Poon, 2007] ont été identifiés comme des facteurs clés qui diminuent non seulement la qualité des granulats de béton recyclé, mais aussi augmenter leur variabilité. Or, la variabilité des propriétés du béton a un impact direct sur la consommation de ciment [Cazacliu, 2010], et par conséquent, sur l'environnement et sur l'équilibre financier du remplacement des gros granulats de béton recyclé en granulats.

L'effet de la présence du gypse et du verre est plus important. La présence de gypse, même en faible quantité produit l'expansion du matériau, aussi bien dans des applications routières que dans du béton, avec destruction des structures. La présence de faibles quantités de verre produit le potentiel d'alcali-réactions, avec effet néfaste sur les nouveaux bétons. Il est à remarquer que des quantités plus importantes de verre réduisent le risque de dégradation.

En conséquence, pour les granulats de béton recyclé, une composition globale admise pour la production de béton est limité par les normes pour les mélanges d'au moins 90 ou 95 % en poids de béton ou de pierre naturelle. À cela s'ajoute le respect d'un niveau de contaminant totale typiquement inférieur à 1 % de la masse en vrac. La limite de

contaminant est généralement plus stricte sur les pourcentages admissibles de gypse afin d'exclure les phénomènes de dilatation et d'endommagement de la microstructure dans les bétons produits.

Compte tenu de ces questions de limitations dans la composition, la difficulté à extraire certains éléments de la mise en œuvre de systèmes de séparation efficaces devient un élément clé dans la transformation des granulats de béton recyclé. De nos jours, la pratique industrielle est basée :

- sur la démolition sélective,
- sur certaines étapes de séparation (criblage d'éléments fins incluant les sols et autres pollutions organiques, séparation magnétique d'éléments ferreux, séparation par flottation ou pare des méthodes aérauliques des éléments légers,
- et, dans certains cas, sur le triage manuel pour éviter le mélange de différents matériaux [PN Recybéton 2011].

Les pratiques industrielles et les études de recherche dans le tri automatique des granulats de béton recyclé ne sont qu'embryonnaires, comme en témoigne l'utilisation marginale des granulats de béton recyclé dans le béton de construction.

Dans ce cadre, il apparaît qu'un transfert technologique à partir du traitement des minerais vers le recyclage de déchets de la construction et de la déconstruction est possible et nécessaire. Le potentiel de la technologie disponible souligne que ce transfert conduirait vers une utilisation plus rationnelle des granulats de béton recyclés avec des conditions favorables à l'environnement. Sans être exhaustif dans les propositions, certains travaux [Tomas, 2000] [Xing, 2006] suggèrent déjà l'utilisation des procédés décrits plus tôt dans ce rapport, pour trier les déchets de construction et de la déconstruction.

Des technologies plus sophistiquées doivent être prises en considération pour la brique, l'asphalte, le béton et le gypse comme indiqué par Schnellert et Mueller [Schnellert, 2010], qui ont réalisé des expériences à l'aide de la jig à eau associée au tri optique. Le verre est un autre éléments à prendre en considération.

Au meilleur de la connaissance des auteurs de ce rapport, aucune de ces méthodes n'a été décrite dans la littérature pour l'application sur le tri des granulats recyclés à l'échelle industrielle. Cependant, plusieurs auteurs ont suggéré que la jig peut être utilisée pour séparer des déchets C&D sur la base des densités des matériaux différents dans l'eau comme une alternative à la séparation manuelle sur une bande transporteuse [EuropeAid, 2007] [Hendriks, 2004a]. Dans ce sens, Coelho et de Brito [Coelho, 2013] ont proposé un plan de recyclage une plateforme C&D utilisant une jig à air pour deux étapes, d'abord à séparer la céramique et à séparer le gypse sur les granulats de béton recyclé de plus de 4 mm.

Cazacliu et al. [2013] démontrent en laboratoire le très bon potentiel de cette technique pour la séparation du gypse, mais aussi dans l'obtention d'une proportion acceptable de brique dans le produit séparé.

Hendriks et Xing [Hendriks, 2004b] utilisent la jig à eau en laboratoire pour séparer des particules de béton et de brique. Les résultats sont concluants. Cela confirme que cette technologie fonctionne bien, surtout pour les particules supérieures à 19 mm. Les fines particules (2 mm) nécessitent un contrôle minutieux des paramètres de fonctionnement pour obtenir de bons résultats.

Au contraire des travaux mentionnés précédemment, Müller et Weinke [Müller, 2004] n'obtiennent pas une séparation significative sur un mélange constitué de grosses particules de béton et de brique. Cependant, pour un mélange de plâtre et de béton, les

résultats sont plus prometteurs. Pour compléter, les travaux de Schnellert et al. [Schnellert, 2011] montrent une réduction de la teneur en gypse dans le matériau récupéré en sortie par rapport à la teneur initiale.

Les résultats issus de travaux similaires [Ulsen, 2013] [Angulo, 2013] laissent supposer que les techniques de tri basées sur le tri densimétrique, la séparation magnétique et le tri optique ont un réel potentiel dans l'application de tri des déchets de construction et déconstruction. En effet, avec des récupérations des produits propres à 80% pour le tri densimétrique sur des mélanges de brique et de béton recyclé, et 60% par le tri magnétique, le potentiel de ces techniques est prometteur. Le tri optique quant à lui, permet en plus d'une efficacité encourageante, d'avoir une consommation faible en eau et en énergie.

3 Étude expérimentale

3.1 Introduction

L'étude expérimentale se découpe en trois temps. Un premier temps concerne une étude dans le laboratoire de l'Ifsttar, évaluant la capacité du procédé « jig à eau » à trier basé principalement sur la masse volumique des matériaux. Les mélanges traités sont composés de granulats de béton recyclé, de brique et de plâtre. Des essais de masse volumique et d'absorption d'eau sont réalisés pour caractériser les matériaux réarrangés après le traitement par la jig.

Le second temps présente une campagne expérimentale réalisée dans un laboratoire de l'Université d'Aix-la-Chapelle compétent sur le tri. Cette campagne expérimentale a pour objectif d'évaluer la capacité de détection des technologies optiques et NIR appliquées au tri des matériaux de déconstruction. Ces essais de faisabilité concernent un échantillon de 30 particules regroupant le béton, l'enrobé bitumineux, la céramique, le plâtre, le verre, le métal et le mortier. Ces essais s'appuient sur la comparaison des signaux renvoyés par le matériau béton et ceux des autres matériaux. Les différences entre les signaux renvoyés permettent d'estimer la faisabilité d'un traitement industriel par ces procédés d'analyse.;

Des essais avec la technologie « rayons X » et de tri optique ont été effectués chez COMEX en Pologne. Pour ces tests, des particules de béton, de plâtre, de verre, de brique, de métal et de céramique ont été analysées pour objectiver la détection de ces matériaux par ces technologies.

3.2 Campagne expérimentale utilisant la jig à eau

Les essais réalisés dans un laboratoire de l'Ifsttar, se sont focalisés sur l'efficacité du principe de la jig à eau pour trier le béton, la brique et le plâtre.

Ont été testés différents mélanges granulaires (binaires et ternaires) variant en proportion volumique de chaque type de matériau. Après chaque essai de jig à eau, des mesures de masse volumique et d'absorption d'eau ont été réalisés sur les matériaux récupérés dans les tiroirs constituant le bac de la jig.

Ces mesures de masse volumique définissent un profil de densité dans le bac de la jig après l'essai. Le nouvel arrangement granulaire évalué par ce profil, permet d'estimer si l'arrangement granulaire obtenu respecte une décroissance de la densité selon la hauteur du bac de la jig.

3.2.1 Matériaux

Les matériaux utilisés sont des granulats de béton concassé de taille 4/20 et 10/20, de la brique concassée à la taille 4/20 et 10/20 et du plâtre concassé à la taille 4/20 et 10/20. Les mélanges utilisés pour cette campagne sont présentés à titre indicatif dans le tableau suivant. Ils seront rappelés pour chaque présentation des résultats à chaque essai.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 13	Essai 14
GBD 10/20	9	8	6	9	8	6	6	8
Plâtre 10/20	1	2	4				2	1
Brique 10/20				1	2	4	2	1
	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11	Essai 12		
GBD 4/20	9	8	6	9	8	6		
Plâtre 4/20	1	2	4					
Brique 4/20				1	2	4		

Tableau 4 – Tableau récapitulatif des mélanges de matériaux traités par la jig à eau de laboratoire.

Les matériaux utilisés sont de provenance différente. Les granulats de béton concassé sont fournis par le PN Recybeton via le GT 0.

Les « granulats » de brique et de plâtre sont fabriqués à partir de matériaux achetés dans le commerce. Les « granulats » de brique sont obtenus à partir de blocs de brique cuite qui sont passés dans un concasseur. Les granulats obtenus sont ensuite criblés pour obtenir les fractions désirées.

Pour ce qui concerne les granulats de plâtre, le procédé de fabrication est identique à celui décrit pour les granulats de brique.

3.2.2 Matériel

Le matériel utilisé pour cette campagne expérimentale est une jig à eau de laboratoire. Dans le domaine du tri, cet appareil est nommé « stratificateur » par les experts du domaine. La figure suivante présente la machine.

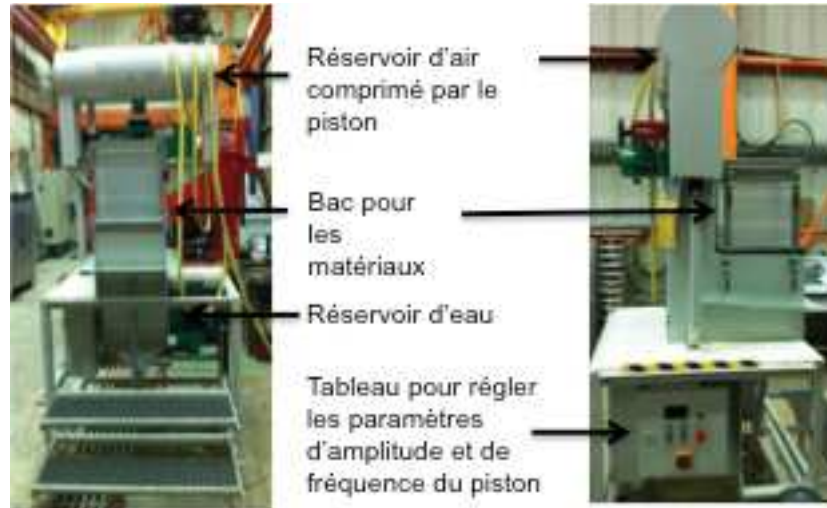


Figure 24 – Jig à eau de laboratoire ou stratificateur de marque Alljig.

Ce matériel est fabriqué par l'entreprise allemande Alljig. Ce matériel est dédié aux campagnes expérimentales en laboratoire. Comme le montre la figure précédente, il se compose de 4 principaux éléments :

- le bac pour les matériaux : les matériaux à tester sont placés dans ce bac constitué des ceintures carrées en plexiglass (appelés « tiroirs ») avec un fond amovible constitué par une plaque perforée laissant passer le fluide (ici de l'eau) ;
- le réservoir d'eau : il accueille l'eau nécessaire à l'utilisation de l'appareil et débouche sur le bac pour les matériaux. Il est aussi connecté au réservoir d'air ;
- le réservoir d'air : il est connecté à un piston. Sa compression par le piston permet de mouvoir l'eau dans le réservoir d'eau, puis dans le bac à matériaux ;
- le tableau électrique pour régler les paramètres opérationnels : ce tableau permet de régler l'amplitude et la fréquence des mouvements périodiques verticaux de l'eau dans le système ;

Son fonctionnement est très largement décrit dans le rapport bibliographique rédigé dans le cadre de cette réponse pour le PN Recybéton.

3.2.3 Mode opératoire

Le mode opératoire est le suivant.

Les matériaux sont mis dans le bac de la jig à eau en fonction de la composition des mélanges considérés. Ils sont mis en place couche par couche en fonction de leur densité : les matériaux les plus légers sont au fond du bac et les plus denses sont en haut. Ainsi, nous avons la configuration la plus défavorable au regard du résultat qui est obtenu au niveau industriel¹.

Le bac est mis en eau. Le niveau de l'eau est défini jusqu'au sommet du mélange granulaire installé dans le bac.

Le démarrage de l'appareil se fait en activant la fréquence puis l'amplitude.

L'essai dure 20 minutes selon les consignes du constructeur. Un état initial est photographié ainsi que l'état final.

¹ Dans les jigs industrielles, il est habituel d'obtenir un arrangement densimétrique décroissant avec la hauteur du lit granulaire (voir chapitre bibliographique).

Au bout des 20 minutes d'essai, l'appareil est arrêté. La récupération des matériaux se fait tiroir par tiroir. Les tiroirs sont les différents éléments composant le bac pour les matériaux.

Enfin, des essais de masse volumique et d'absorption d'eau sur les matériaux récupérés sur chaque tiroir, permettent d'évaluer l'évolution de la densité sur la hauteur du bac pour les matériaux.

3.2.4 Résultats.

Pour chaque essai, après un rappel de la composition du mélange, les états initial et final du mélange granulaire dans la jig à eau de laboratoire, sont présentés.

Ensuite, les profils verticaux de masse volumique et de coefficient d'absorption pour les matériaux de chaque tiroir obtenus à chaque essai, sont mis au regard de l'état final.

3.2.4.1 Essai 1

La composition du mélange granulaire est de 90 % de GBD² et 10 % de plâtre en volume. Les granulats de chaque population sont compris entre 10 et 20 mm.

Les figures 25 et 26 présentent l'état initial et final du mélange dans le bac de la jig à eau.



Figure 25 – État initial de l'essai 1.



Figure 26 – État final de l'essai 1.

Le point notable est le déplacement de la couche de granulats de plâtre. En effet, cette couche est située au fond du bac au début de l'essai. À la fin de l'essai, elle est passée au-dessus du volume de GBD. L'effet de tri de l'appareil a fonctionné comme il est possible de le prévoir.

Cette efficacité est notamment due à la différence de masse volumique entre les deux matériaux. Cette différence associée aux pulsations verticales périodiques de l'eau permet d'obtenir l'état final (figure 3).

La stratification obtenue est retrouvée à travers le profil vertical de masse volumique (figure 27).

² GBD : Granulats de Béton Démoli

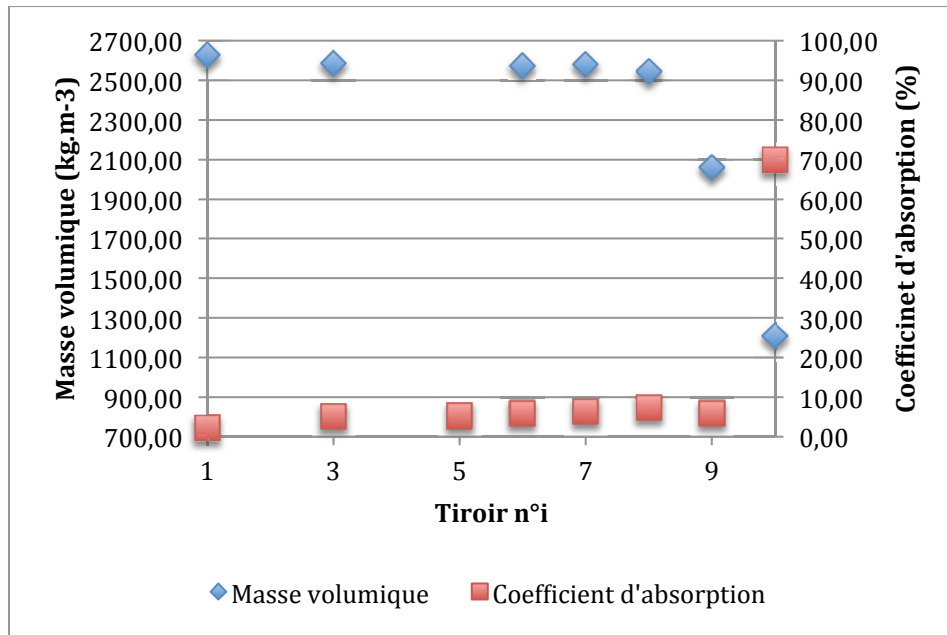


Figure 27 – Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 1.

Les mesures de masse volumique sur les matériaux de chaque tiroir corréleront l'observation visuelle de l'état final. En effet, le profil de masse volumique composé d'un plateau puis d'une chute, décrit correctement l'arrangement granulaire final.

Les valeurs de masse volumique selon la hauteur du bac de la jig restent stables jusqu'au tiroir n°9 à une valeur proche de 2585 kg.m⁻³. À partir du tiroir n°9, la masse volumique mesurée chute à une valeur de 2060,27 kg.m⁻³ jusqu'à une de 1209,32 kg.m⁻³ Au tiroir n°10. Ceci montre qu'il y a quelques particules dans le tiroir n°9 et que la composition du tiroir n°10 ne correspond qu'à du plâtre.

3.2.4.2 Essai 2

Pour cet essai, la taille des granulats de GBD et de plâtre est la même que précédemment. La variation est l'augmentation de la proportion de plâtre passant de 10 à 20 % en volume dans le bac de la jig. Les figures suivantes (figures 28 et 29) permettent l'observation de l'évolution de mélange granulaire après essai.



Figure 28 – État initial de l'essai 2.



Figure 29 – État final de l'essai 2.

Les observations émises dans le cas précédent sont valables aussi pour cet essai. Selon les figures 5 et 6, le volume du plâtre placé dans le bac de la jig est passé en totalité au-dessus. La flottabilité due à l'immersion dans l'eau agitée périodiquement et la différence de masse volumique entre le béton et le plâtre ont généré sur ce nouvel arrangement granulaire.

Les mesures de masse volumique permettant de construire le profil vertical (figure 30) vont dans le même sens.

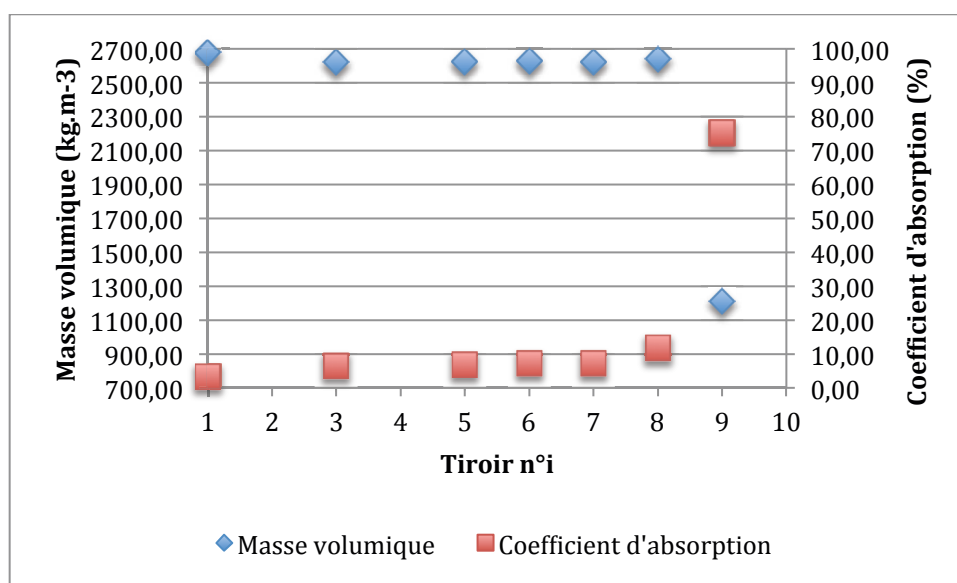


Figure 30 – Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 2.

Le profil vertical de masse volumique confirme l'observation précédente à partir des photos des figures 28 et 29. Ce profil fait le constat d'une stabilité de la masse volumique mesurée à une valeur proche de 2630 kg.m⁻³, représentant la valeur des granulats de béton concassé.

Ensuite, il y a une forte baisse de la masse volumique. La valeur obtenue de 1211,41 kg.m⁻³ pour les tiroirs n°9 et 10, est la valeur de masse volumique du plâtre confirmant la présence des granulats de plâtre.

3.2.4.3 Essai 3

La différence entre cet essai et l'essai 2 est encore l'augmentation de la part de granulats de plâtre. Elle passe ici à 40 % en volume. Les figures suivantes (figures 31 et 32) permettent l'observation de l'évolution de mélange granulaire après essai.



Figure 31 – État initial de l'essai 3.



Figure 32 – État final de l'essai 3.

Les observations émises dans le cas précédent sont valables aussi pour cet essai. Malgré une proportion presque équivalente entre les granulats de plâtre et de béton concassé, l'ensemble des granulats de plâtre est passé au-dessus des granulats de béton concassé. Ceci démontre la mise en œuvre des phénomènes physiques mentionnés pour l'essai précédent, même si la population de plâtre est très importante.

Les mesures de masse volumique permettant de construire le profil vertical (figure 33) vont dans le même sens.

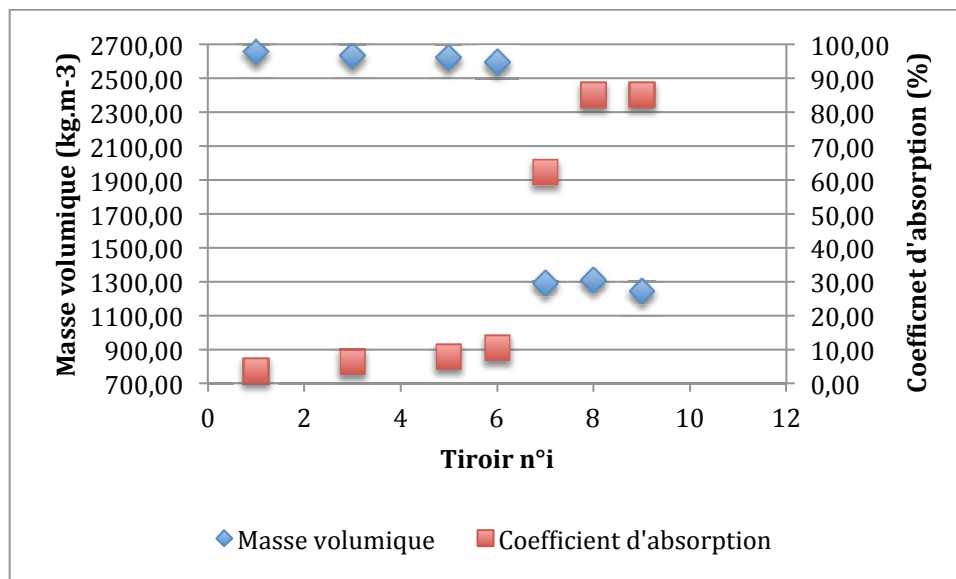


Figure 33 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 3.

Le profil de masse volumique confirme l'observation visuelle. En effet, la masse volumique mesurée est stable entre les tiroirs n°1 et 6, à une valeur proche de 2600 kg.m⁻³, valeur similaire à celles trouvées sur les deux essais précédents. Cette valeur est celle des granulats de béton concassé.

À partir du tiroir n°7, un second plateau apparaît. La masse volumique descend à 1300 kg.m⁻³ correspondant à celle du plâtre. Cela montre qu'il y a une chute de valeur à la masse volumique du plâtre sans qu'il y ait un mélange entre les deux matériaux.

Enfin, la forme générale du profil de masse volumique confirme l'observation visuelle obtenue à la figure 32.

3.2.4.4 Essai 4

L'essai 4 présente ici la capacité de la jig de faire remonter la population granulaire de brique dans le haut du bac.

La composition du mélange granulaire est de 90 % de GBD et 10 % de brique en volume. Les granulats de chaque population sont compris entre 10 et 20 mm.

Les figures suivantes (figure 34 et 35) présentent l'état initial et final de cet essai.



Figure 34 – État initial de l'essai 4.



Figure 35 – État final de l'essai 4.

L'observation permet de conclure que le constat fait avec le plâtre, ne peut pas être donné avec la brique. Il peut être constaté tout de même que la population granulaire de brique est plus forte en remontant sur la hauteur du mélange à minima sur les côtés du bac.

Les mesures de masse volumique réalisées sur les matériaux de chaque tiroir, vont dans ce sens (figure 36).

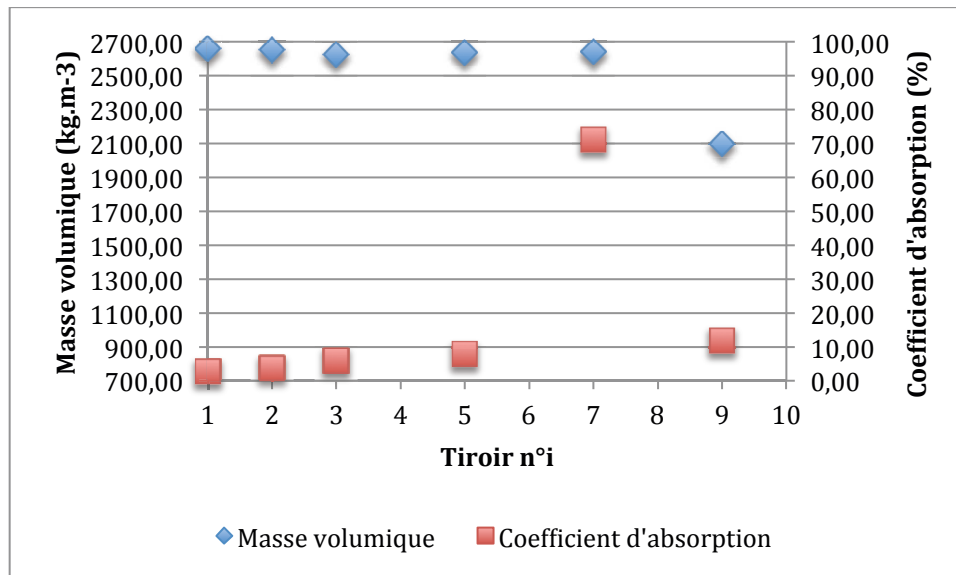


Figure 36 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 4.

Le profil vertical de masse volumique obtenu, corrobore le constat visuel donné plus tôt. Le profil décroît légèrement jusqu'au tiroir n°7 pour chuter aux tiroirs n°9 et 10.

En fait, le profil de masse volumique décrit une tendance baissière de 2658,11 kg.m⁻³ au tiroir n°1, jusqu'à 2641,13 kg.m⁻³ au tiroir n°7.

Finally, the volumetric mass ends by reaching 2098,05 kg.m⁻³ at the 9th drawer. This evolution of the volumetric mass supports the fact that the difference in volumetric mass between concrete and brick has made the brick rise. But this difference is not very important, this rise is only partial. This has generated a dispersion of brick granules that can be evaluated by an increase in their concentration with the height of the jig.

3.2.4.5 Essai 5

L'essai 5 est effectué avec une part plus importante de brique se montant à 20 % en volume. L'évolution du mélange granulaire est donnée par les figures 37 et 38.



Figure 37 – État initial de l'essai 5.



Figure 38 – État final de l'essai 5.

Les observations données précédemment sont aussi valables ici. De plus, nous remarquons qu'avec l'augmentation de la part de granulats de brique, la couche supérieure est constituée majoritairement de granulats de brique. Cela est confirmé par la figure suivante (figure 39).

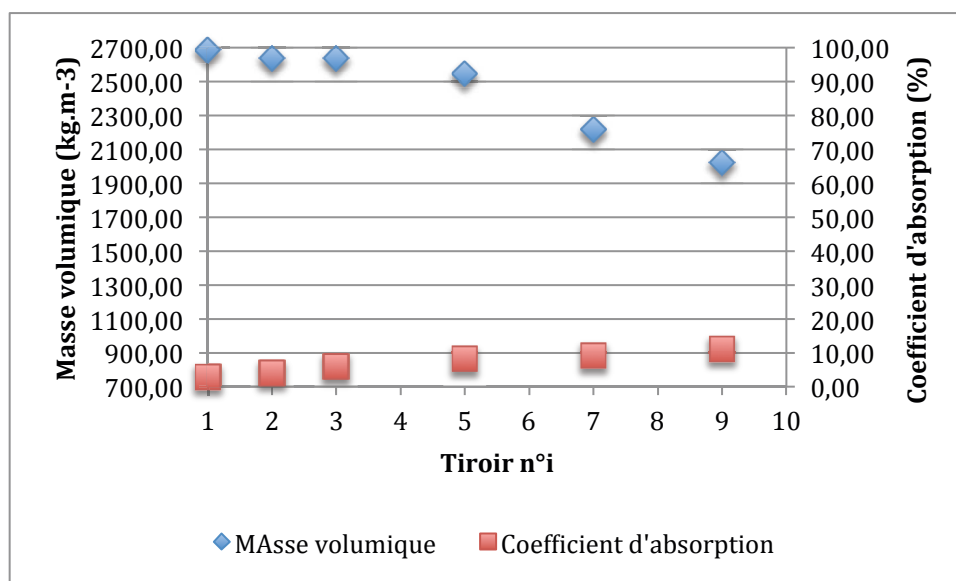


Figure 39 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 5.

Même si les granulats de brique se sont dispersés dans le mélange, le profil de masse volumique par sa baisse sur les tiroirs 7 à 10, montre une concentration de la brique sur le haut du mélange de granulats.

La proportion plus importante de la brique que pour l'essai précédent (de 10% à 20%) fait baisser plus rapidement le profil de masse volumique. En supposant que la concentration de granulats de brique augmente avec la hauteur, nous obtenons un profil de masse volumique tendant vers la masse volumique de la brique aux environs de 1900 kg.m⁻³. Cela est confirmé par la dernière valeur mesurée de masse volumique dans le tiroir n°9 égale à 2021 kg.m⁻³.

3.2.4.6 Essai 6

L'essai 6 est effectué avec une part plus importante de brique se montant à 20 % en volume. L'évolution du mélange granulaire est donnée par les figures 40 et 41.



Figure 40 – État initial de l'essai 6.



Figure 41 – État final de l'essai 6.

Les observations données précédemment sont aussi valables ici. De plus, nous remarquons qu'avec l'augmentation de la part de granulats de brique, la couche supérieure est constituée majoritairement de granulats de brique. Cela est confirmé par la figure suivante (figure 42).

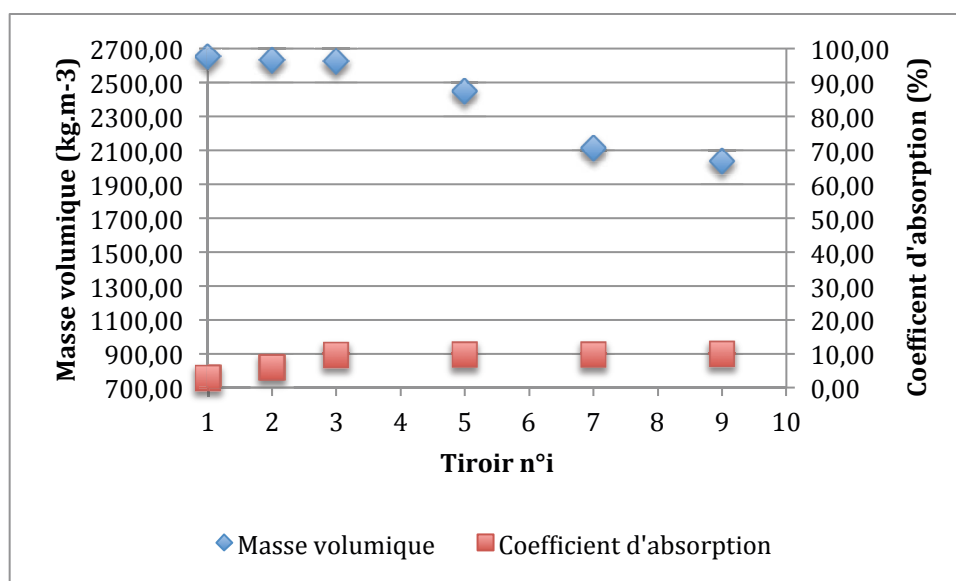


Figure 42 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 6.

Même si les granulats de brique se sont dispersés dans le mélange, le profil de masse volumique par sa baisse sur les tiroirs 5 à 10, montre une concentration plus importante de la brique sur le haut du mélange de granulats.

En passant à 40 % de granulats de brique, la baisse de la masse volumique mesurée est accentuée. Nous obtenons un décrochage plus rapide de la masse volumique au tiroir n°3. Ce décrochage est poursuivi par une baisse de la masse volumique de $2447,19 \text{ kg.m}^{-3}$ (tiroir n°5) à $2034,28 \text{ kg.m}^{-3}$ (tiroir n°9). Cela confirme que nous avons une augmentation de la concentration de granulats de brique selon la hauteur du bac de la jig. L'aspect tri de la jig avec du béton et de la brique est un peu moins efficace qu'entre le béton et le plâtre.

Pour le premier cas, la différence de masse volumique entre le plâtre (1900 kg.m^{-3}) et le béton (2500 kg.m^{-3}) est plus importante que celle entre la brique et le béton. Ainsi, le tri entre la brique et le béton génère une dispersion des granulats avec la caractéristique d'une augmentation de la concentration de ces granulats « rouges ». Alors, la perspective au niveau industriel serait d'établir un niveau de coupure pour obtenir de flux de sortie : un premier composé de béton et le second composé d'un mélange de béton et de brique.

3.2.4.7 Essai 7

La composition du mélange granulaire est de 90 % de GBD et 10 % de plâtre en volume. Les granulats de chaque population sont compris entre 4 et 20 mm.

Les figures 43 et 44 présentent l'état initial et final du mélange dans le bac de la jig à eau.



Figure 43 – État initial de l'essai 7.



Figure 44 – État final de l'essai 7.

Les observations émises pour l'essai 1 sont valables pour cet essai. Le profil de masse volumique va dans le sens de ces observations (figure 45).

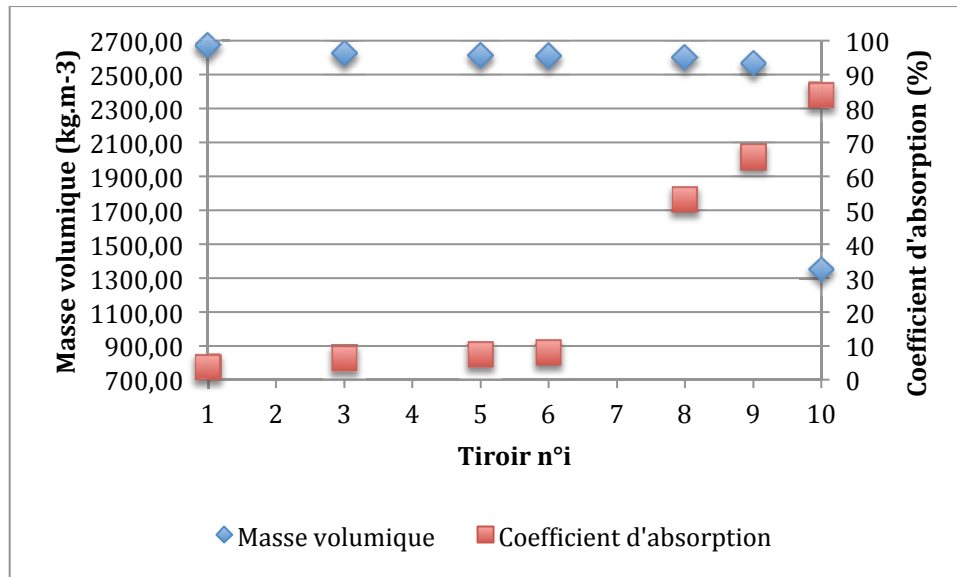


Figure 45 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 7.

Les mesures de masse volumique sur les matériaux de chaque tiroir corréleront l'observation visuelle de l'état final. En effet, le profil de masse volumique composé d'un plateau puis d'une chute décrit correctement l'arrangement granulaire final.

Nous retrouvons des valeurs proches à celles obtenues pour l'essai n°1. Ainsi, dans cette configuration de composition de matériaux, la dimension des granulats n'influence pas le nouvel arrangement granulaire.

3.2.4.8 Essai 8

Pour cet essai, la taille des granulats de GBD et de plâtre est la même que précédemment. La variation est l'augmentation de la proportion de plâtre passant de 10 à 20 % en volume dans le bac de la jig. Les figures suivantes (figures 46 et 47) permettent l'observation de l'évolution de mélange granulaire après essai.



Figure 46 – État initial de l'essai 8.



Figure 47 – État final de l'essai 8.

Les effets de tri de la jig sont encore plus remarquables. Les mesures de masse volumique confirment le constat visuel (figure 48).

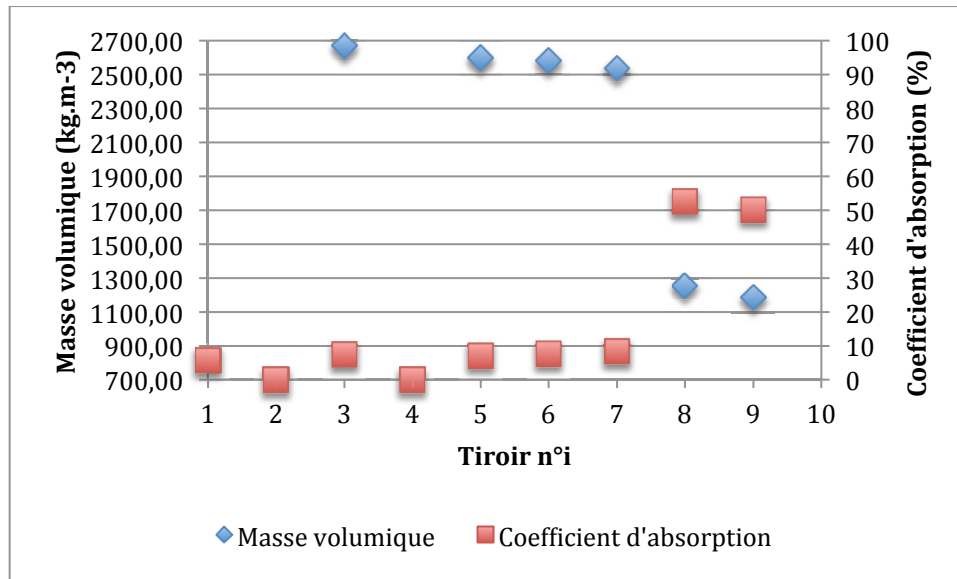


Figure 48 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 8.

L'augmentation de la proportion de plâtre fait apparaître plus rapidement la marche entre les deux plateaux (le premier correspondant à la zone où sont présents les granulats de béton concassé et le second correspondant à la zone des granulats de plâtre).

De manière similaire à l'essai précédent, la granulométrie ne semble pas influencer le tri en comparaison avec l'essai n°2.

3.2.4.9 Essai 9

La différence entre cet essai et l'essai 8 est encore l'augmentation de la part de granulats de plâtre. Elle passe ici à 40 % en volume. Les figures suivantes (figures 49 et 50) permettent l'observation de l'évolution de mélange granulaire après essai.



Figure 49 – État initial de l'essai 9.



Figure 50 – État final de l'essai 9.

Les observations émises dans le cas précédent sont valables aussi pour cet essai. Les mesures de masse volumique permettant de construire le profil vertical (figure 51) vont dans le même sens.

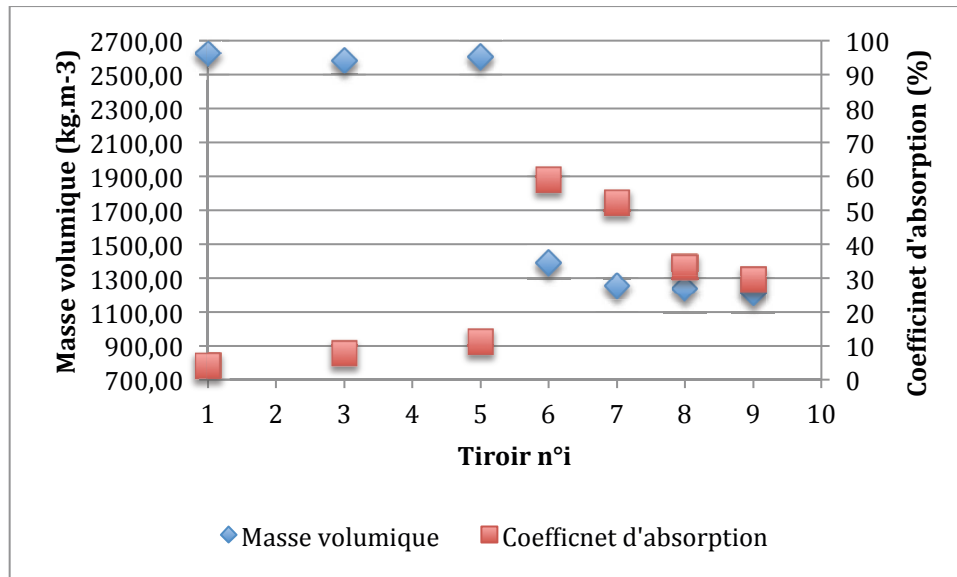


Figure 51 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 9.

Pour cet essai, il est possible de faire les mêmes observations que pour l'essai n°8. La différence est que la « marche » entre les deux plateaux apparaît plus rapidement : au tiroir n°6 ici, alors que c'était le tiroir n°8 précédemment. Ceci est causé par l'augmentation de 20 % à 40 % de la proportion de plâtre.

3.2.4.10 Essai 10

L'essai 10 présente ici la capacité de la jig de faire remonter la population granulaire de brique dans le haut du bac.

La composition du mélange granulaire est de 90 % de GBD et 10 % de brique en volume. Les granulats de chaque population sont compris entre 10 et 20 mm.

Les figures suivantes (figure 52 et 53) présentent l'état initial et final de cet essai.



Figure 52– État initial de l'essai 10.



Figure 53 – État final de l'essai 10.

Même si les vues des côtés ne permettent pas de se faire une idée précise sur l'arrangement des granulats à la fin de l'essai, la figure 54 confirme une évolution décroissante de la densité sur la hauteur du bac de la jig.

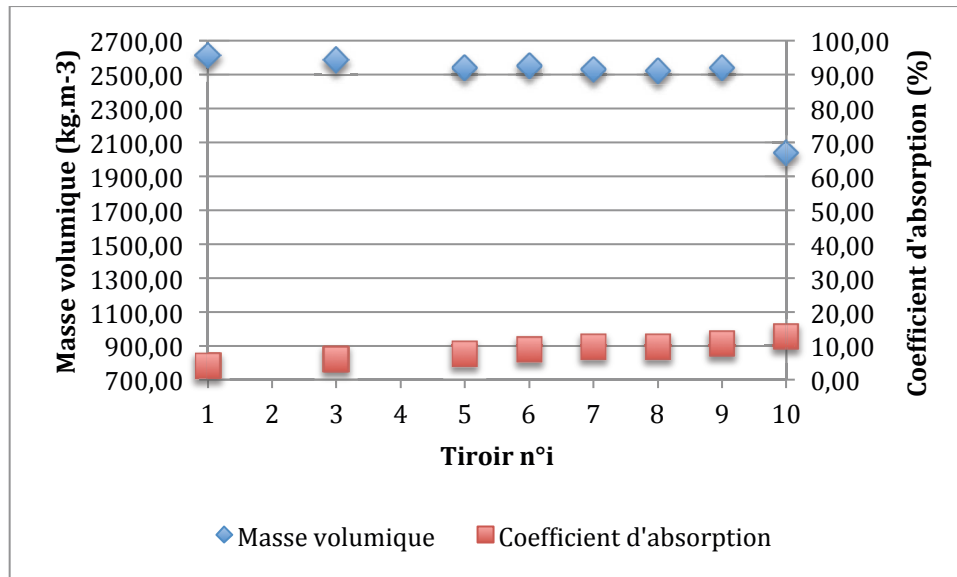


Figure 54 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 10.

Sur cet essai, le profil de la masse volumique marque une tendance baissière du tiroir n°1 au tiroir n°9. La masse volumique mesurée varie de 2615,05 kg.m⁻³ à 2540,38 kg.m⁻³. Puis, au tiroir n°10, la masse volumique chute à la valeur de 2039,92 kg.m⁻³.

Ici, il est possible d'estimer que la jig est une efficacité certaine sur le tri de GBD et de brique.

3.2.4.11 Essai 11

L'essai 11 est effectué avec une part plus importante de brique se montant à 20 % en volume. L'évolution du mélange granulaire est donnée par les figures 55 et 56.



Figure 55 – État initial de l'essai 11.

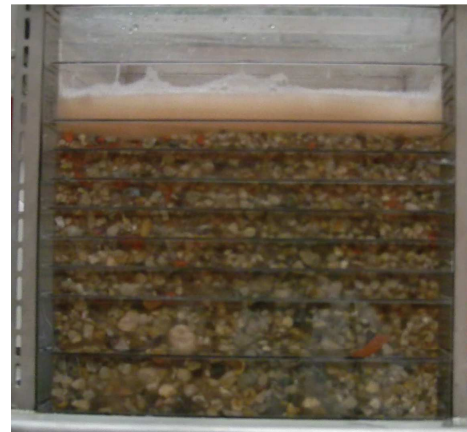


Figure 56 – État final de l'essai 11.

L'observation est similaire à celle faite plus tôt. La figure 57 nous donne plus de détail sur la répartition des granulats de GBD et de brique sur la hauteur du bac de la jig.

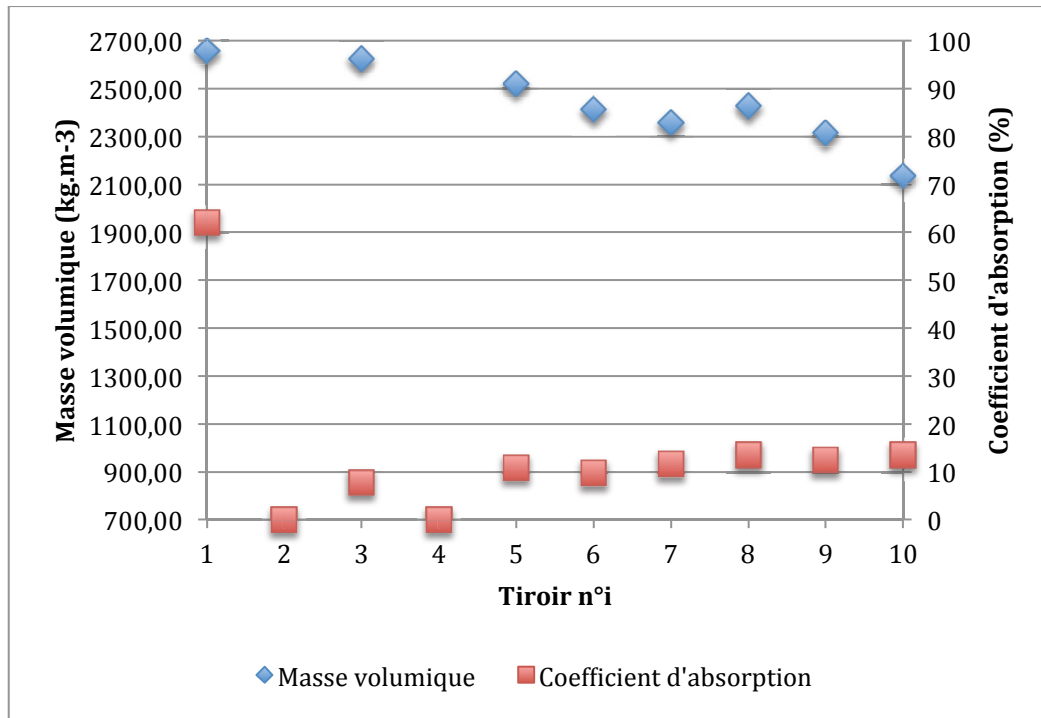


Figure 57 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 11.

Nous retrouvons bien une évolution décroissante sur la hauteur du bac. En effet, l'action de tri de la jig paraît significative sur cet essai.

Sur cet essai, le profil de la masse volumique a une baisse plus marquée que précédemment. La masse volumique varie de 2656,52 kg.m⁻³ au tiroir n°1 à 2135,18 kg.m⁻³ au tiroir n°10.

3.2.4.12 Essai 12

L'essai 12 est effectué avec une part plus importante de brique se montant à 20 % en volume. L'évolution du mélange granulaire est donnée par les figures 58 et 59.



Figure 58 – État initial de l'essai 12.

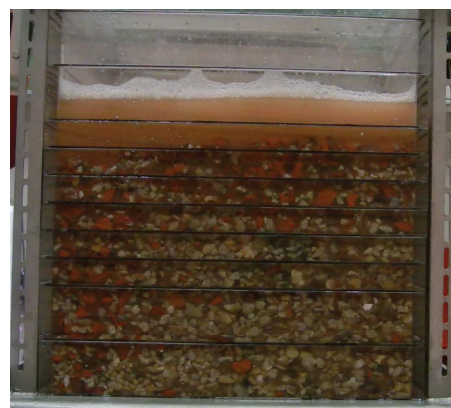


Figure 59 – État final de l'essai 12.

Les figures ci-dessus permettent d'observer une répartition des granulats de brique sur la partie supérieure du bac de la jig. Le profil vertical densimétrique (figure 60) nous donne un peu plus de détail quant à la répartition des deux matériaux.

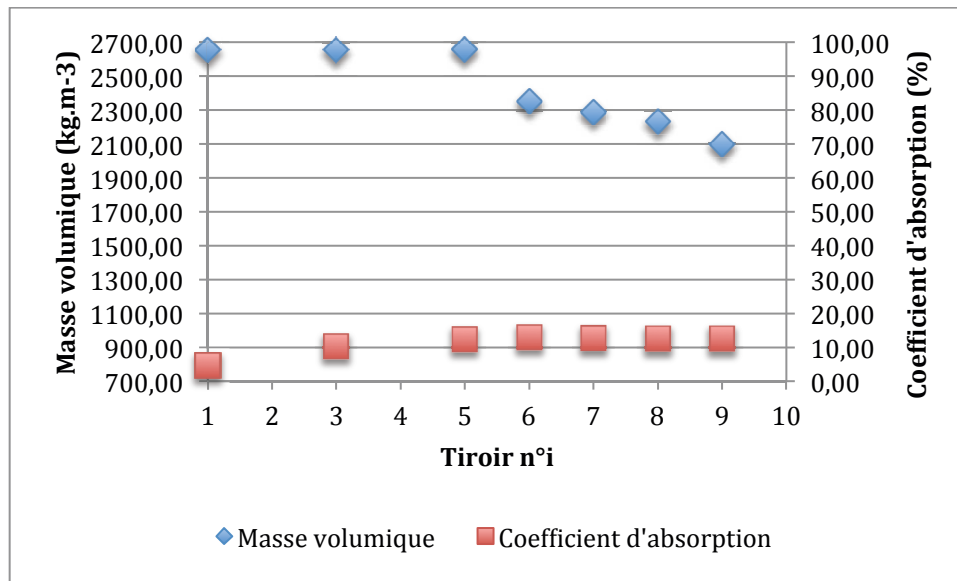


Figure 60 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 12.

Même si le profil ne présente pas une réelle chute de masse volumique, une décroissance est remarquable. En effet, la masse volumique passe de 2660,70 kg.m⁻³ à 2351,83 kg.m⁻³ entre les tiroirs n°5 et n°6. Ensuite, la masse volumique continue à présenter une évolution à la baisse. Cela confirme l'augmentation de la concentration de brique vers le haut du bac de la jig. Ceci conduit à confirmer la capacité de la jig à trier entre les granulats de brique et de GBD.

3.2.4.13 Essai 13

Cet essai a la particularité d'utiliser trois matériaux : le béton, la brique et le plâtre. Pour cet essai, la composition du mélange granulaire en volume est de 60 % de GBD, 20 % de brique et 20 % de plâtre. Les figures suivantes présentent l'état initial et final de l'essai.



Figure 61 – État initial de l'essai 13.



Figure 62 – État final de l'essai 13.

Une modification de l'ordre des différentes couches est observable avant et après l'essai. Les granulats de plâtre sont dans la couche supérieure. Les granulats de brique se sont dispersés dans le volume médian du bac. Les granulats de béton concassé sont

concentrés dans la couche inférieure du bac. Le profil densimétrique présenté par la figure 63 confirme ces observations.

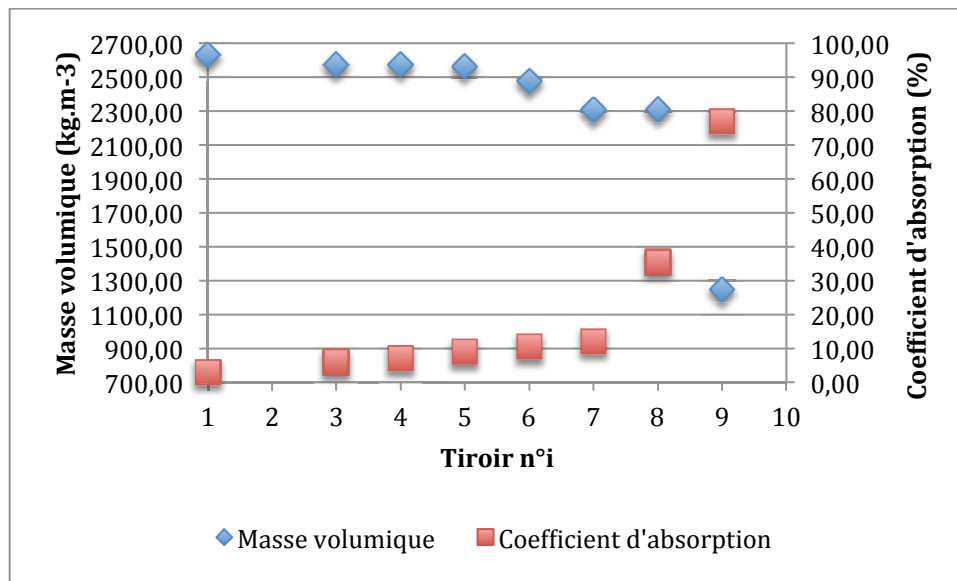


Figure 63 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 13.

En effet, nous obtenons bien une évolution décroissante de la masse volumique selon la hauteur du bac de la jig. Une baisse sur les tiroirs 9 et 10 confirme la présence de plâtre sur la couche supérieure.

Cet essai combine les observations qui ont été faites sur les essais n°1 et n°4. À quelques pourcents près, nous retrouvons la part de plâtre, de brique et de béton. Le profil de masse volumique présente donc une tendance baissière de 2633,96 kg.m⁻³ à 2312,81 kg.m⁻³ entre les tiroirs n°1 à 8. Puis, au tiroir n°9, la masse volumique chute à 1247,14 kg.m⁻³ correspondant à la masse volumique du plâtre occupant complètement les tiroirs n°9 et 10.

3.2.4.14 Essai 14

Cet essai est aussi réalisé avec un mélange granulaire composé de trois matériaux. Ici, la composition est la suivante : 80 % de GBD, 10 % de brique et 10 % de plâtre.

Les figures suivantes présentent l'état initial et final de l'essai.



Figure 64 – État initial de l'essai 14.



Figure 65 – État final de l'essai 14.

Nous retrouvons toujours les granulats de plâtre sur le haut du mélange granulaire. Les granulats de brique sont quant à eux présents dans le volume médian du bac avec l'omniprésence des granulats de béton concassé en partie inférieure du bac. L'évolution densimétrique (figure 66) corrobore ces observations.

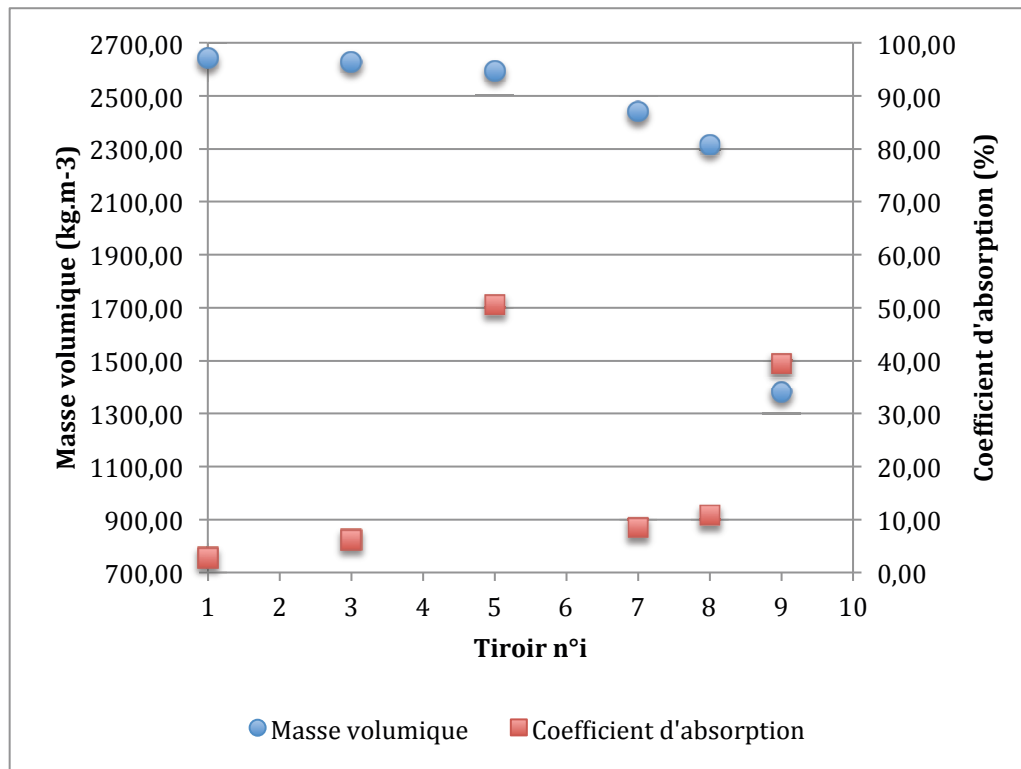


Figure 66 - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 14.

Ici, encore, pour cet essai, nous retrouvons l'effet combiné des phénomènes d'arrangement granulaire observé précédemment. Le béton occupe le volume inférieur du bac avec une concentration de granulats de brique augmentant sur la hauteur. En effet, la masse volumique mesurée varie entre 2643,49 kg.m⁻³ sur le tiroir n°1 à 2442,11 kg.m⁻³ au tiroir n°7.

Comme la masse volumique du plâtre est très différente de celles du béton et de la brique, les granulats de plâtre se placent au-dessus des granulats de béton et de brique à l'issue de l'essai. Nous constatons bien ce nouvel arrangement des matériaux par les valeurs de masse volumique mesurées. Le profil de masse volumique à partir du tiroir n°8 marque une chute en passant de 2315,57 kg.m⁻³ au tiroir n°8 à 1382,77 kg.m⁻³ au tiroir n°9, valeur proche de la masse volumique du plâtre.

3.2.5 Conclusion

D'un point de vue général, ces quatorze essais démontrent la capacité de tri de la jig à eau appliqué aux matériaux de type béton, brique et plâtre. L'efficacité de ce procédé de tri est valable aussi bien pour les mélanges binaires que pour les mélanges ternaires.

Il apparaît aussi que le matériau plâtre est trié de manière reproductible dans les mélanges où il est présent. Ce phénomène est remarquable que le mélange soit composé de deux ou trois matériaux. Ceci s'explique par une grande différence de masse volumique entre le plâtre et les deux autres matériaux (brique et béton concassé).

Pour ce qui concerne la brique, ce matériau apparaît plus difficile à extraire dans un mélange avec des granulats de béton concassé. Cela est dû à une faible différence de masse volumique entre la brique et le béton concassé notamment. Il est possible d'améliorer le tri avec une part importante de brique (voir les essais avec 40 % de granulats de brique).

En définitif, le procédé « jig à eau » semble un procédé pertinent pour le tri des matériaux de type béton, brique et plâtre. L'efficacité de tri paraît correcte jusqu'à des niveaux assez faibles de matériaux « indésirables » (environ 10 %). Il semble aussi pertinent d'intégrer ce procédé avec d'autres procédés, comme les procédés NIR par exemple, pour affiner le tri en fin de chaîne, surtout pour assurer la qualité du tri entre le béton et la brique.

3.3 Campagne expérimentale utilisant le tri optique et le procédé NIR

3.3.1 Présentation de la campagne expérimentale

Cette campagne expérimentale s'est déroulée dans le laboratoire de l'université d'Aix-la-Chapelle. Les matériaux de démolition à traiter contiennent les matériaux suivants :

- granulats de béton concassé
- mortier
- brique
- céramique
- agrégat d'enrobé bitumineux
- plâtre
- verre
- métal.

Pour recycler les matériaux, les différentes fractions doivent être séparés. Pour connaître la faisabilité de ce tri, différents types de capteur doivent être testés.

Par conséquent, la première étape consiste à savoir quel type de capteur est capable de différencier entre les granulats de béton concassé et les autres types de matériaux.

En raison des différences optiques, les choix vont vers un capteur optique et un capteur NIR. Ces deux capteurs ont l'avantage d'être combinés dans un système de tri.

3.3.2 Matériaux

Les matériaux utilisés sont composés de grains dont la taille varie de 10 à 30mm. Ils regroupent les différents matériaux mentionnés au paragraphe précédent.

Au total, 45 particules ont été testées

3.3.3 Protocole

Le protocole se décline de la manière suivante.

45 particules sont récupérées de l'échantillon contenant les 8 fractions.

Pour les tests optiques, les différents types de granulat seront photographiés (humide et sec). Ces photographies sont ensuite traitées par un programme de séparation optique. Avec ce programme, il est possible de déterminer si une séparation optique est théoriquement possible.

Les mêmes particules sèches cette fois-ci, seront analysées par un spectromètre NIR. En comparant les spectres NIR des différentes fractions, il est possible de présumer si le procédé NIR peut être un procédé de tri prometteur.

Avec les résultats de cette pré-étude, il peut être décidé si la poursuite des travaux d'essai avec d'autres capteurs est nécessaire ou si le travail d'essai peut être poursuivi sur une machine de tri industriel à un fabricant.

3.3.4 Matériels utilisés

Pour le travail de test optique, une table de tir de photo est utilisée (figure 67) avec un kit d'éclairage composé de deux unités d'éclairage pour obtenir une uniformité d'éclairage.

L'appareil photo, un Nikon D200 SLR, peut se configurer manuellement afin que chaque photo soit prise dans les mêmes conditions.



Figure 67 – Montage pour visualiser les particules à analyser.

Les images sont chargées dans un programme de tri appelé PACT développé par le fabricant de machine de tri Tomra.

L'algorithme de tri est construit pour permettre à identifier les couleurs spécifiques de certaines particules. Avec ces informations sur les couleurs, les classes de couleurs peuvent être configurés dans l'algorithme de tri. Cet algorithme traite ainsi les images obtenues sur la base de ces données d'entrée.

Le dispositif d'analyse pour le travail de test NIR est le Spectromètre FTIR Spotlight 400 par Perkin Elmer (figure 68).



Figure 68 – Spectromètre FTIR Spotlight 400 par Perkin Elmer.

L'appareil est configuré pour mesurer la réflexion entre les longueurs d'onde de 1000nm à 2468nm. C'est un domaine de longueur d'onde commune pour les systèmes industriels de tri NIR.

La zone de mesure est un endroit avec un diamètre de 14mm. Les données recueillies sont converties en une feuille Microsoft Excel pour afficher les diagrammes pour une évaluation simple.

3.3.5 Résultats du test optique

Pour le travail de test optique, chaque particule ramassée est photographiée dans les mêmes conditions sur un fond bleu.

Ces images sont réunies et chargées dans un programme de tri qui est également utilisé sur les machines de tri industrielles.

L'algorithme de tri programmé différencie le béton des autres matériaux. Dans les tests suivants, le béton est comparé à chaque autre fraction (enrobé bitumineux, verre, métal, etc ...). Sur chaque image, les 6 premières particules sont toujours les mêmes particules de béton. Les six autres particules sur les photos représentent le matériau à qui l'on les compare.

La première série d'essais est réalisée avec des particules sèches (sections 3.1.5.1 et 3.1.5.2), la seconde avec des particules humides (section 3.1.5.3 à la section 3.1.5.7).

Les photos de gauche sont les photos réelles, et l'interprétation du programme de tri, composé de trois couleurs est représentée sur la droite:

- Noir: Contexte
- Jaune: schéma de couleur typique du béton
- Violet / Bleu: contenant toutes les couleurs du reste.

3.3.5.1 Test avec des granulats de béton concassé et des agrégats d'enrobés bitumineux

Les figures suivantes (figure 69) représentent le test de comparaison entre les granulats de béton concassé et les agrégats d'enrobé bitumineux (secs).

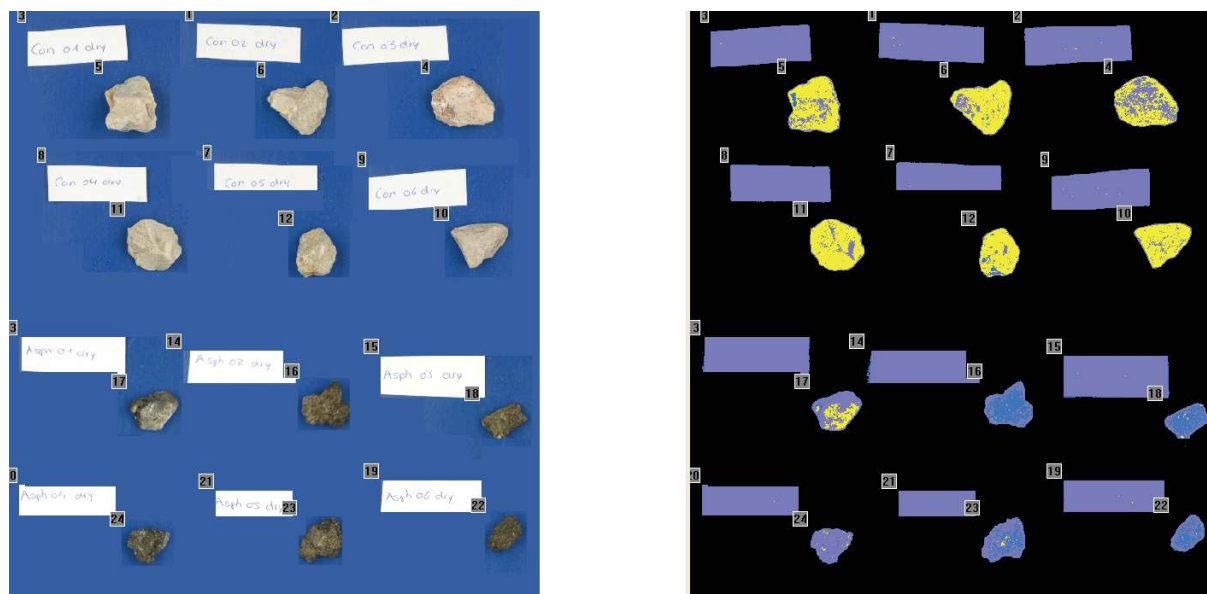


Figure 69 – Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les agrégats d'enrobé bitumineux (6 dernières particules).

Toutes les particules de béton 1-6 sont principalement jaunes. Les agrégats d'enrobé bitumineux sont généralement plus foncés. Seule la première particule d'enrobé bitumineux a une réflexion lumineuse, que le programme interprète en partie comme en béton. Néanmoins, le pourcentage de points jaunes est suffisamment faible pour que la différenciation entre les particules de béton fonctionne bien avec ces particules testées.

3.3.5.2 Test entre les granulats de béton concassé et la brique

Les figures suivantes (figure 70) donnent les images issues du test de comparaison entre les granulats de béton concassé et la brique.

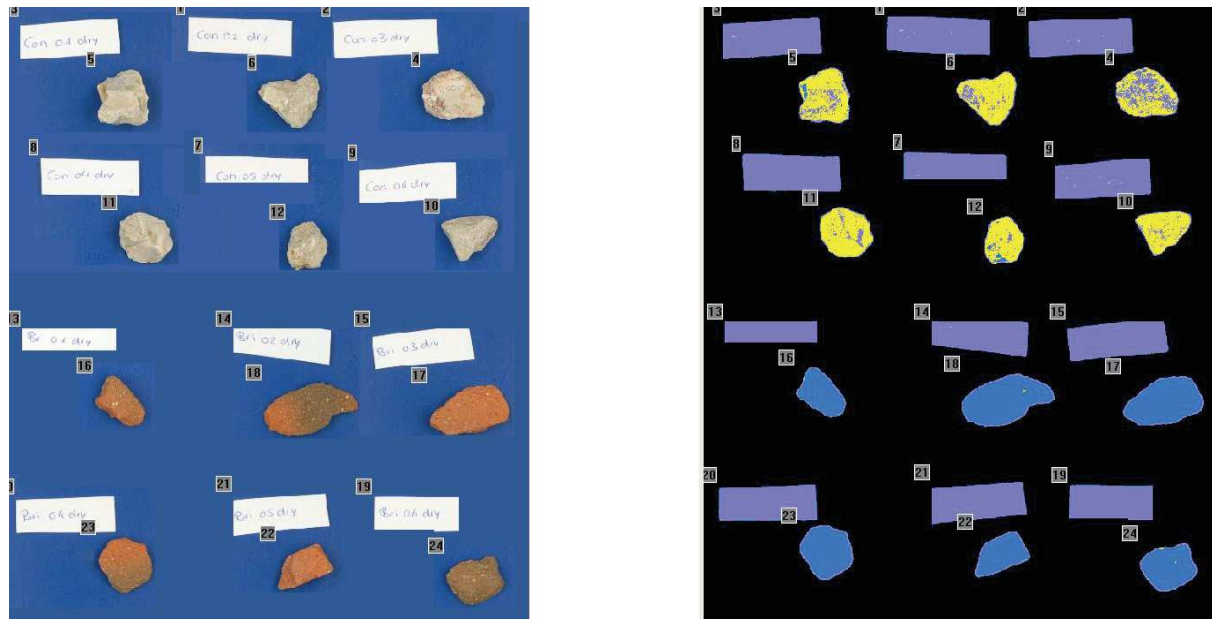


Figure 70 - Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les granulats de brique (6 dernières particules).

Les briques colorées en rouge sont clairement différenciées des granulats de béton concassé. Le tri optique est bien adapté pour différencier les briques et les granulats de béton concassé.

3.3.5.3 Test entre les granulats de béton concassé et la céramique (humide)

Les figures suivantes (figure 71) représentent les résultats de la comparaison entre les granulats de béton concassé et la céramique.

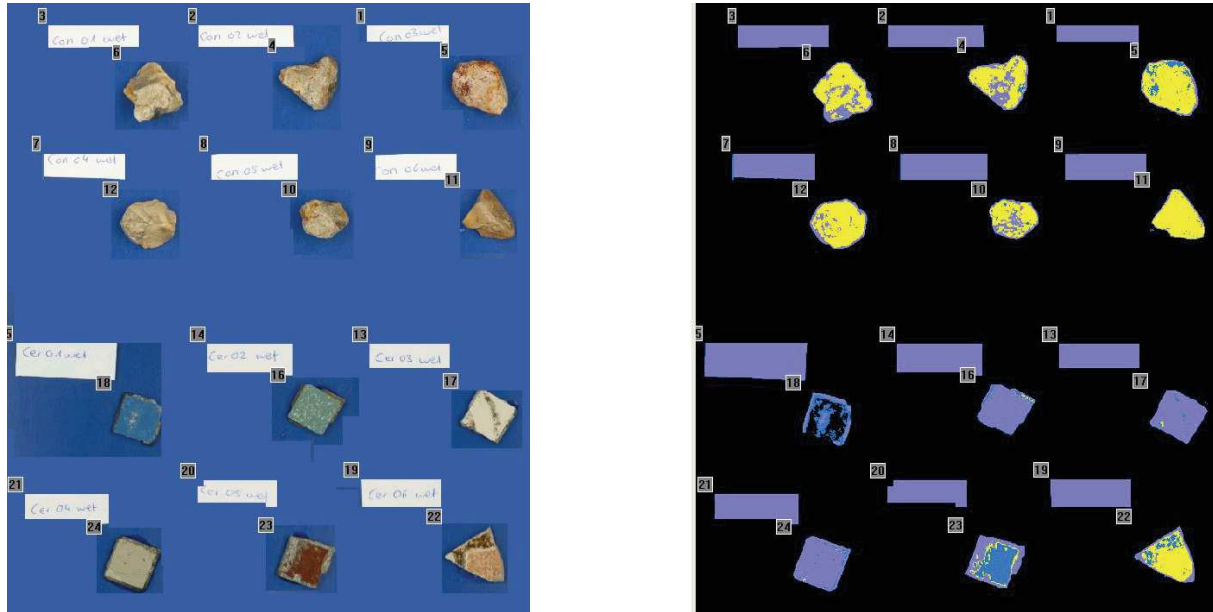


Figure 71- Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les particules de céramique (6 dernières particules).

Avec des conditions humides pour la céramique, nous pouvons obtenir de meilleurs résultats. Seule une particule montre des couleurs similaires au béton. Cette première analyse montre que ce type de tri peut très bien fonctionner sur une trieuse industrielle en fonction de la reprise exigée.

3.3.5.4 Test entre les granulats de béton concassé et le verre (humide)

Les figures suivantes (figure 72) représentent le test de comparaison entre les granulats de béton concassé et le verre.

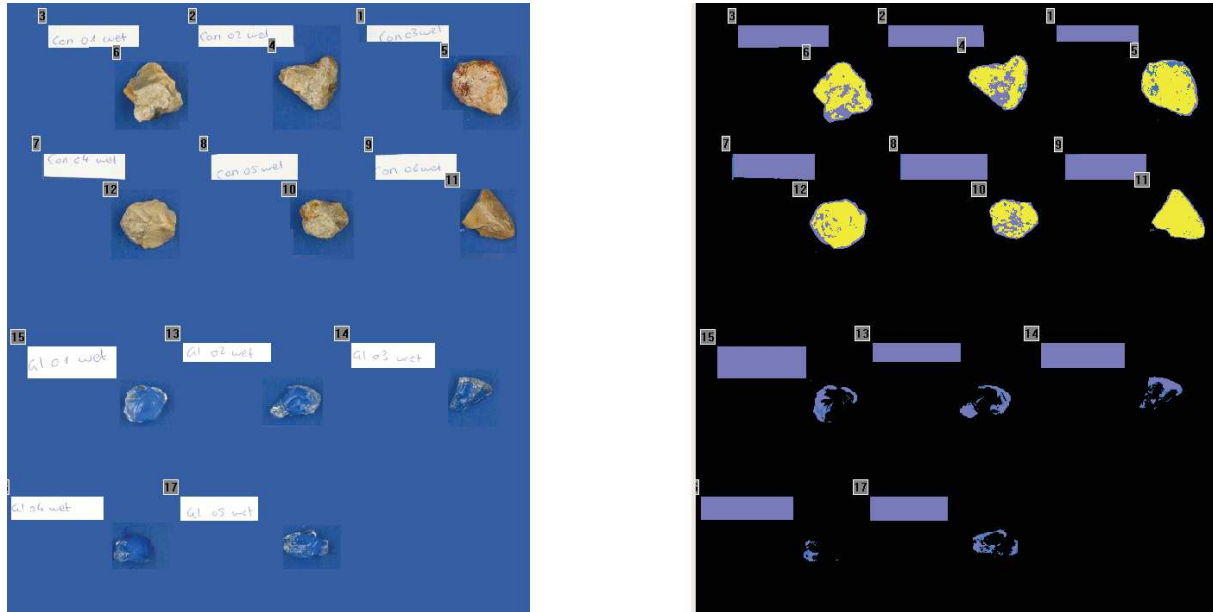


Figure 72 - Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les particules de verre (6 dernières particules).

Étant donné que le verre est transparent, il se adapte partiellement à la couleur de fond, en particulier à l'état humide. Cela se traduit par un objet bleu et blanc (à partir des réflexions) coloré. D'une part, il pourrait être difficile de programmer une caractéristique pour identifier le verre. Mais d'autre part il est possible de différencier entre les particules de béton.

Il n'est pas sûr que le verre soit reconnu par la machine, mais le tri avec le béton montre des résultats prometteurs.

3.3.5.5 Test entre les granulats de béton concassé et le plâtre (humide)

Les résultats des tests avec un capteur optique sont donnés en figure 73. Ceux-ci permettent la comparaison d'analyse du capteur entre les granulats de béton concassé et les granulats de plâtre.

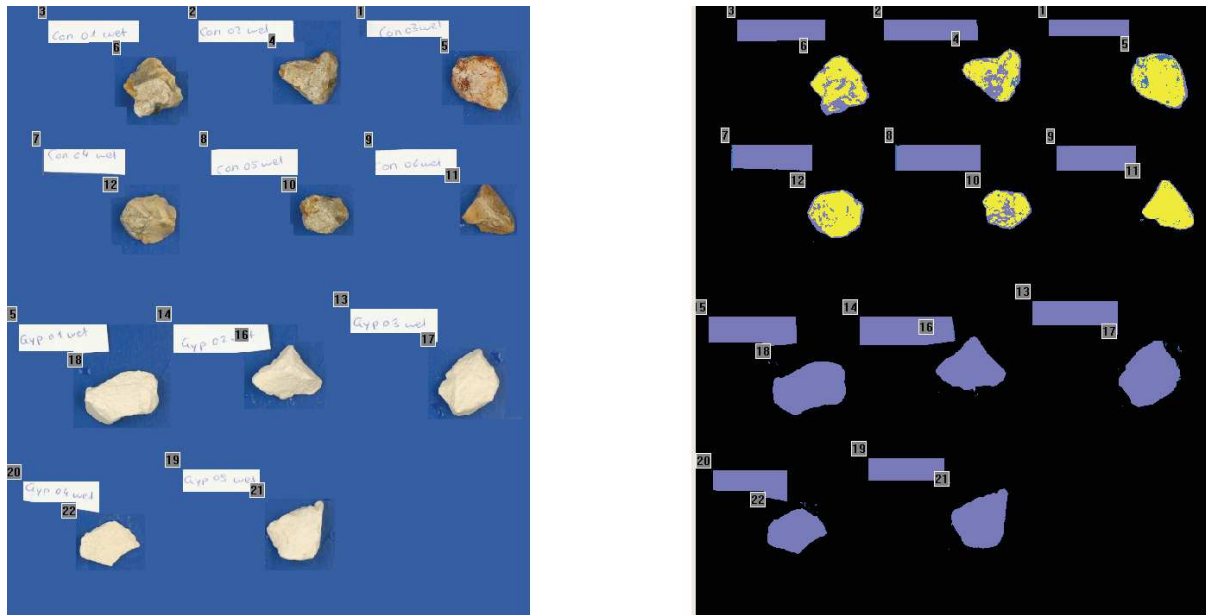


Figure 73 - Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les particules de plâtre (6 dernières particules).

Les particules de plâtre sont de couleur unie. Elles sont donc nettement plus lumineuses que les particules de béton. Le tri optique par voie humide est bien adapté pour ce cas précis.

3.3.5.6 Test entre les granulats de béton concassé et le métal (humide)

Cette série de test présente l'analyse du capteur optique des granulats de béton concassé et les morceaux de métal. Le résultat de cette analyse est en figure 74.

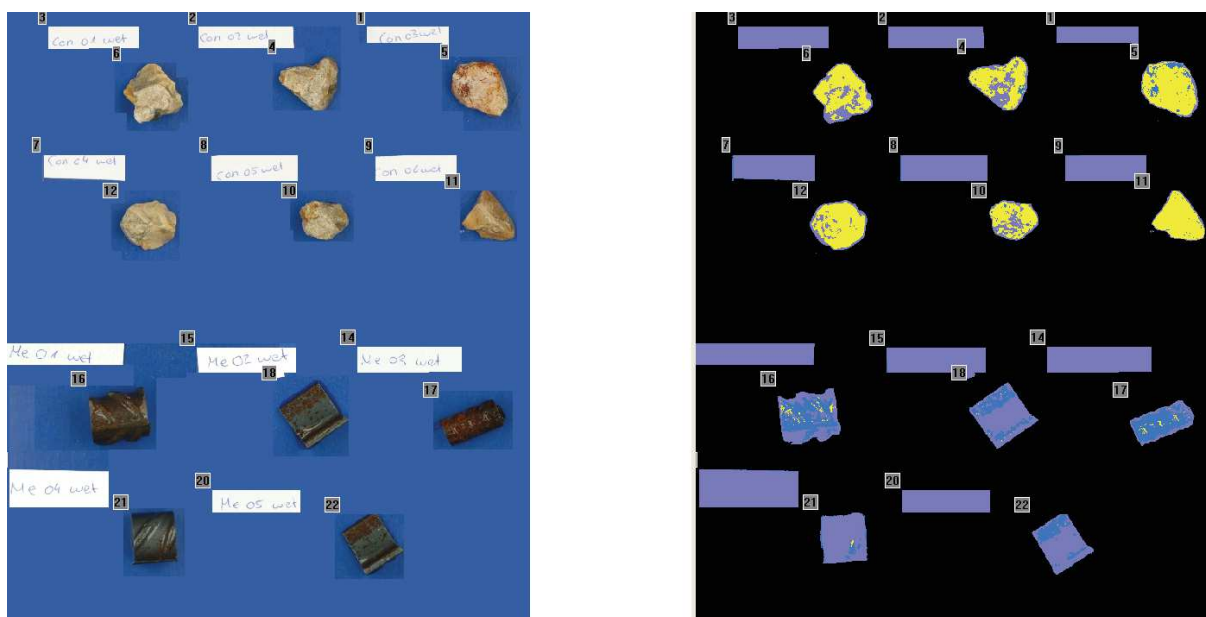


Figure 74 - Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les morceaux de métal (6 dernières particules).

Bien que, pour cette tâche, le capteur est un capteur d'habitude d'induction (détecteur de métal), pour terminer le travail de métal d'essai est également testé. Les pièces métalliques sont généralement plus foncée que le béton. En cas de corrosion, il a une couleur rouge brunâtre. Toutes ces variantes ne sont pas en corrélation avec la couleur du béton. Métal et le béton sont bien adaptés pour les capteurs optiques.

3.3.5.7 Test entre les granulats de béton concassé et le mortier (humide)

Une dernière série de test est présentée en figure 75 pour comparer la détection entre les granulats de béton concassé et les granulats de mortier.

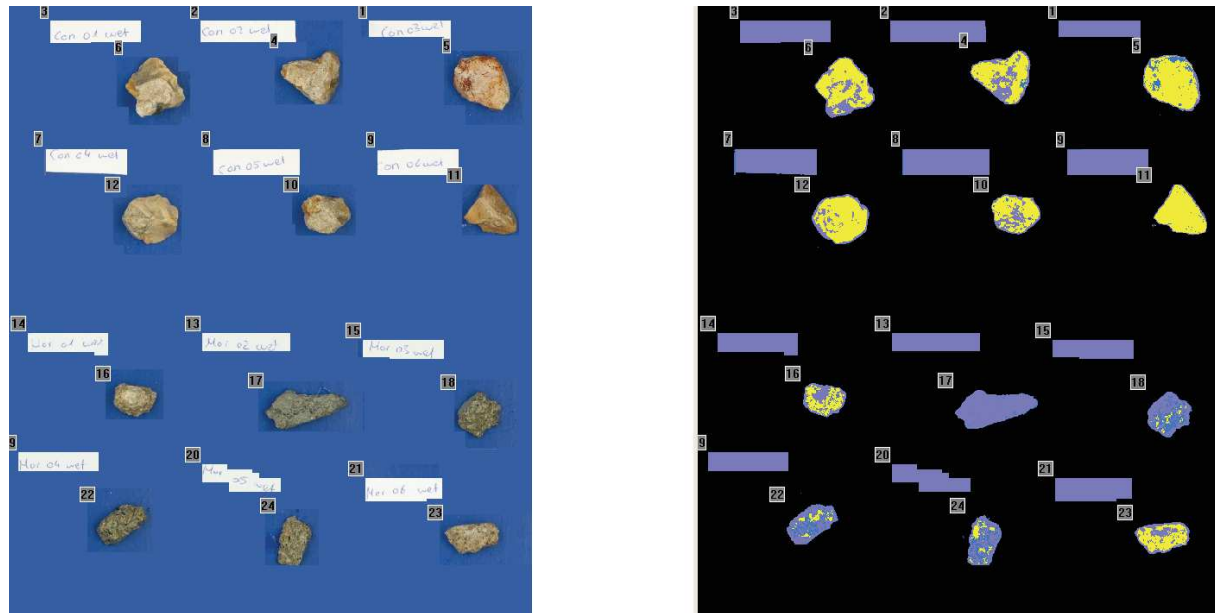


Figure 75 - Photographies réelle (à gauche) et résultant du logiciel de tri (à droite) entre les granulats de béton concassé (6 premières particules) et les granulats de mortier (6 dernières particules).

Comme le montre la simulation dans des conditions humides de la différenciation entre le béton et le mortier est beaucoup mieux, même si deux particules partielles ont toujours le même schéma de couleurs que le béton. Ce est un test de laboratoire, donc peut-être un test industriel ne atteint pas ces bons résultats, parce que les couleurs sont toujours similaires. Mais néanmoins le tri dans des conditions humides est généralement recommandé pour cette tâche.

3.3.6 Résultats des tests effectués selon le procédé NIR

La spectroscopie proche infra-rouge, ou autrement appelée « NIR » (appellation utilisée dans la suite du document) utilise les caractéristiques de réflexion / adsorption des différents minéraux à différentes longueurs d'onde.

Les mesures en NIR sont effectuées entre les longueurs d'onde de 1000 à 2500 nm, qui est un spectre NIR commune des systèmes industriels de tri.

Les résultats des mesures NIR sont présentés dans un système de coordonnées x-axe représentant la longueur d'onde (nm), l'axe y de la réflexion (R en %).

Comme dans le tri optique, les graphiques suivants comparent le matériau béton avec un matériau.

3.3.6.1 Comparaison entre les granulats de béton concassé et les agrégats d'enrobé bitumineux

La figure suivante présente les spectromètres de granulats de béton concassé et les agrégats d'enrobé bitumineux (figure 76).

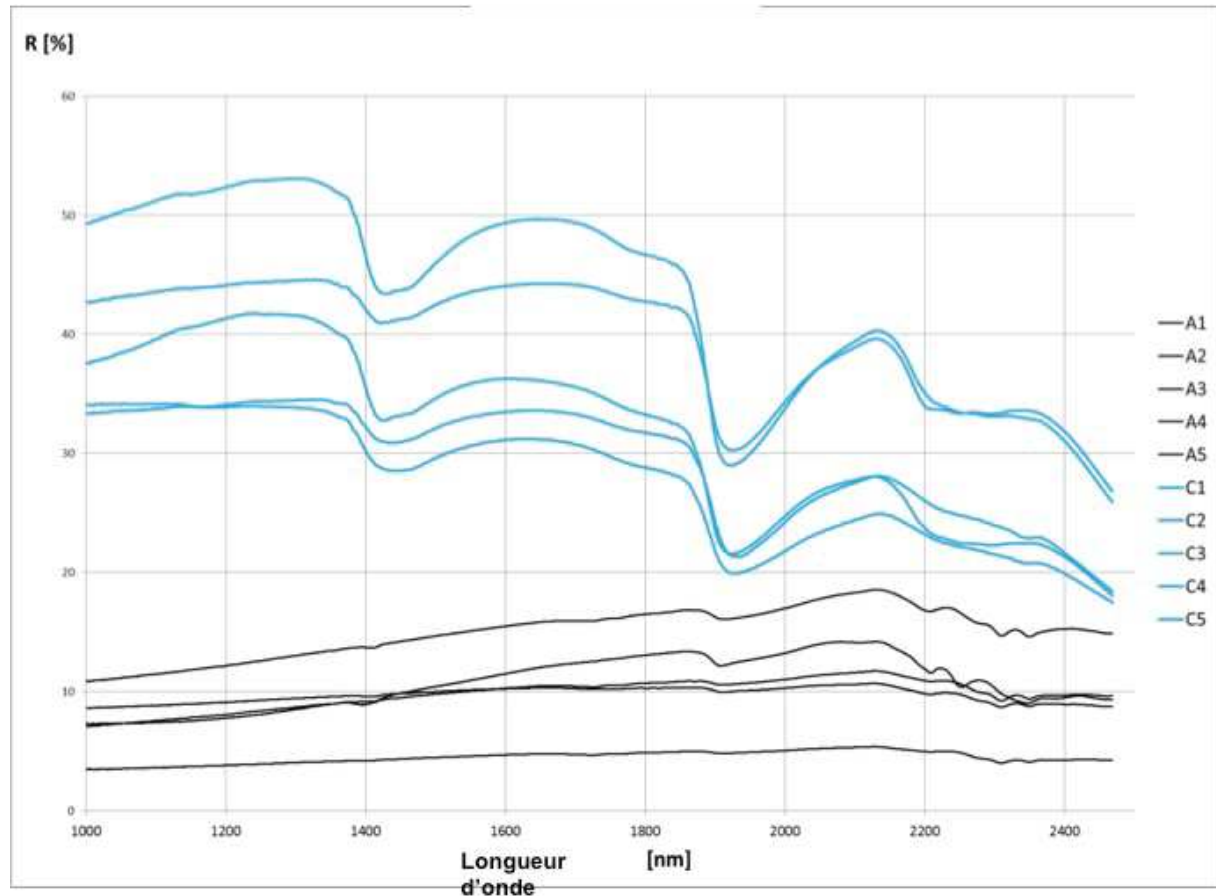


Figure 76 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et d'agrégats d'enrobé bitumineux (noir).

Les graphiques du béton montrent des réflexions claires à 1440nm, 1940nm et 2150nm. Les agrégats d'enrobé bitumineux donnent des réflexions généralement plus faibles, avec de petits pics voire pas.

Donc, la différenciation entre le béton et l'enrobé bitumineux avec un capteur NIR est un moyen approprié.

3.3.6.2 Comparaison entre les granulats de béton concassé et la brique

La série de test suivante permet la comparaison des spectromètres des granulats de béton concassé et de brique (figure 77).

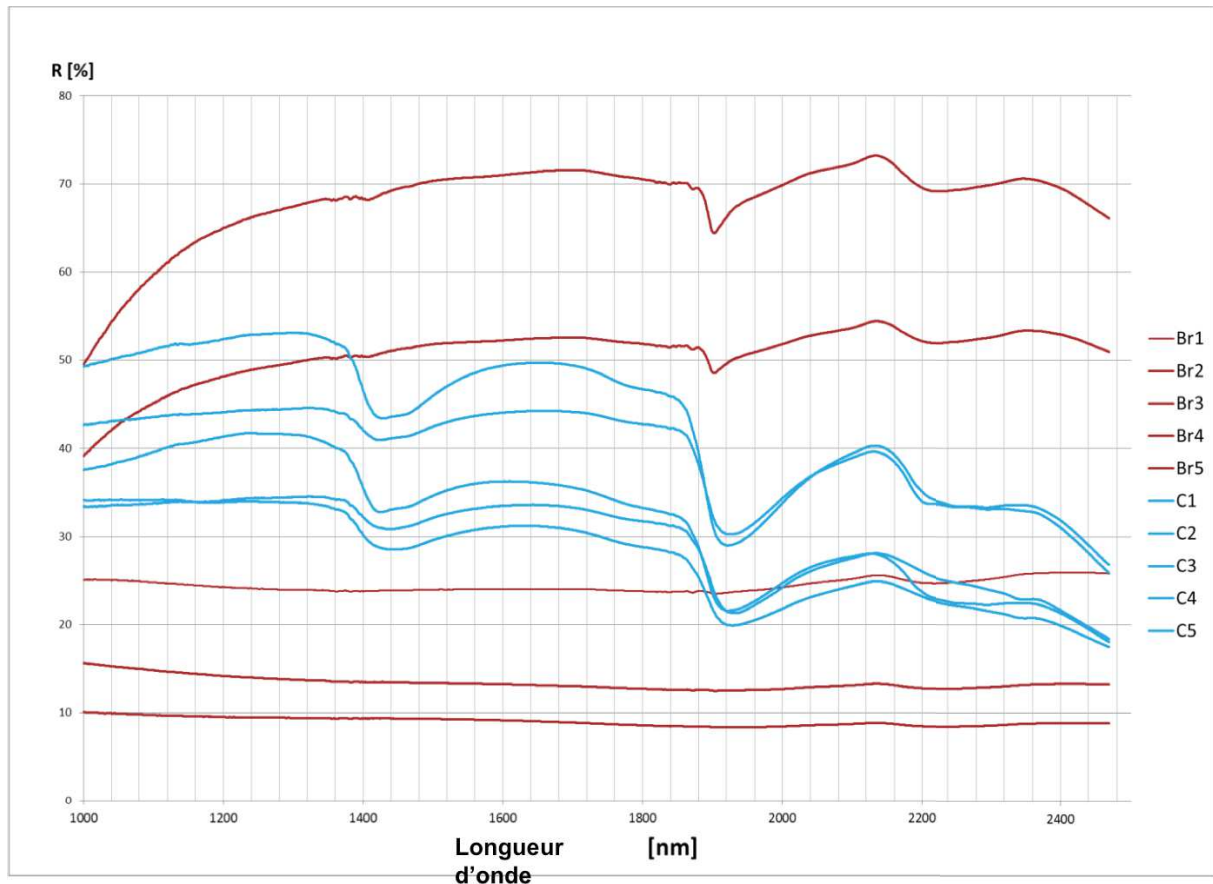


Figure 77 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et de particules de brique (rouge).

Les granulats de brique montrent soit des pics ou une réflexion générale à faible ou une haute réflexion avec un pic clair à 1900nm.

Les graphiques de la brique diffèrent nettement des courbes obtenues pour le béton. Ces mesures indiquent que le tri NIR pour trier le béton de la brique est une opération possible.

3.3.6.3 Comparaison entre les granulats de béton concassé et la céramique

La figure 78 donne les résultats de test de comparaison avec le capteur NIR entre le béton et la céramique.

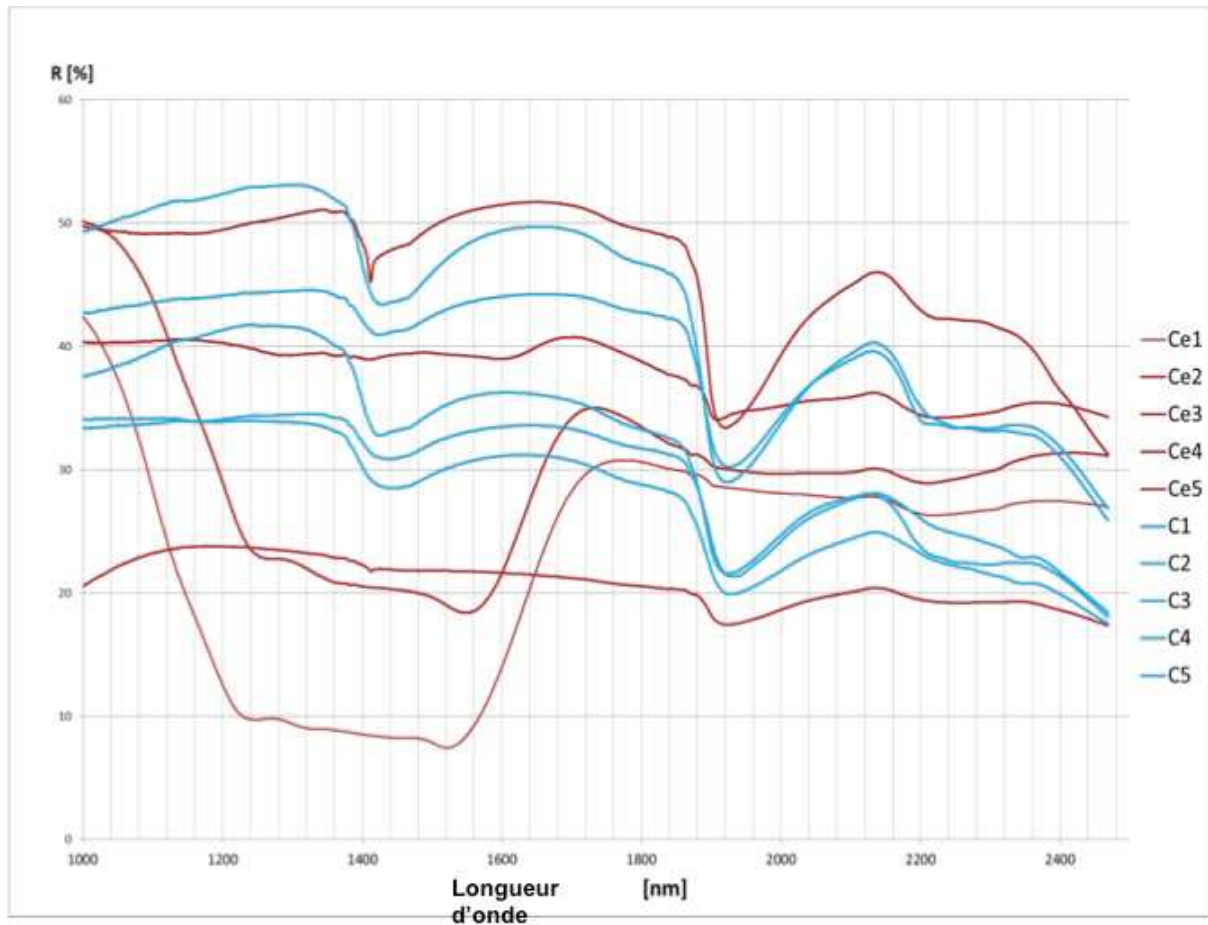


Figure 78 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et de particules de céramique (rouge).

Tous les graphiques obtenus pour la céramique sont différents de ceux obtenus pour le béton.

Seul le graphe rouge en haut dans la figure ci-dessus, à partir de 50% de réflectance est similaire au graphique pour le béton. Mais le premier pic à 1400nm est différent de la crête de béton qui est à 1440nm.

Toutes ces particules de céramique peuvent être différenciées des particules de béton avec un capteur NIR.

3.3.6.4 Comparaison entre les granulats de béton concassé et le verre

La figure suivante présente les spectromètres d'analyse des granulats de béton concassé et des morceaux de verre.

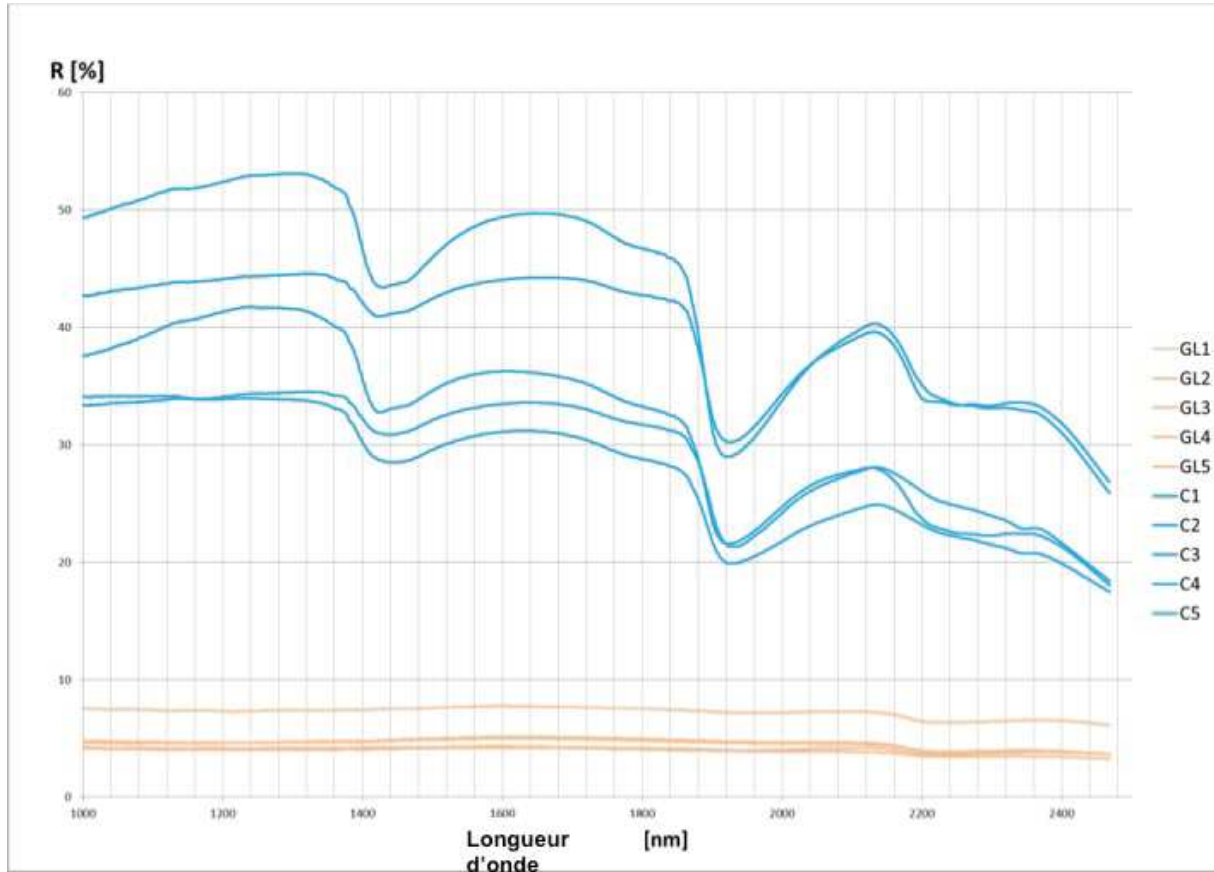


Figure 79 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et de morceaux de verre (orange).

Comme le verre est transparent, il ne montre aucune caractéristique. Par conséquent, il diffère facilement des spectromètres de granulats de béton concassé.

3.3.6.5 Comparaison entre les granulats de béton concassé et le plâtre

Les spectromètres d'analyse des granulats de béton concassé et des morceaux de plâtre sont à la figure 80.

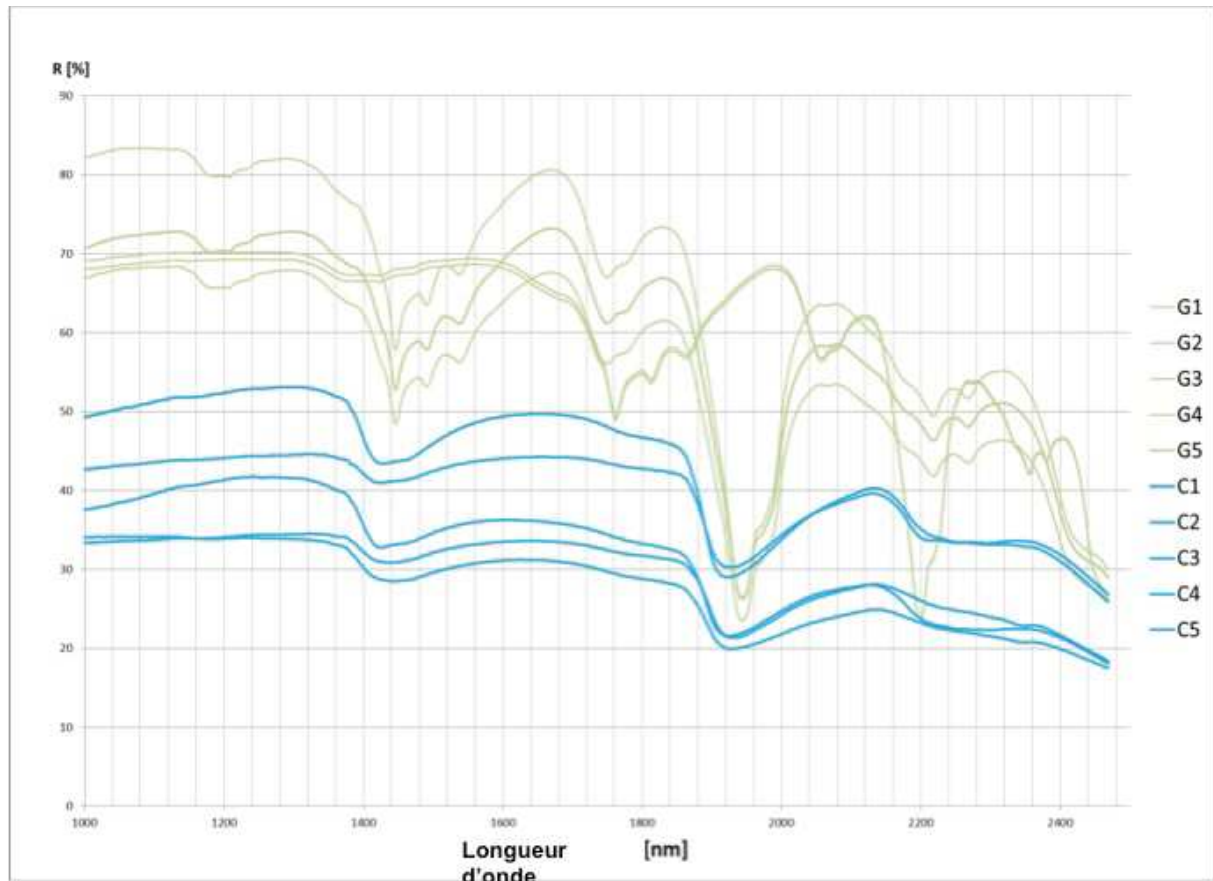


Figure 80 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et de granulats de plâtre (vert).

Le plâtre est généralement plus lumineux que le béton.
Les reflets sont jusqu'à 85% à 1100nm. Les pics sont très intenses, surtout le pic à 1780nm présentant une identification claire pour le plâtre.
Cette tâche est donc adaptée pour le tri NIR.

3.3.6.6 Comparaison entre les granulats de béton concassé et le métal

La figure suivante présente les résultats de test NIR entre les granulats de béton concassé et les morceaux de métal.

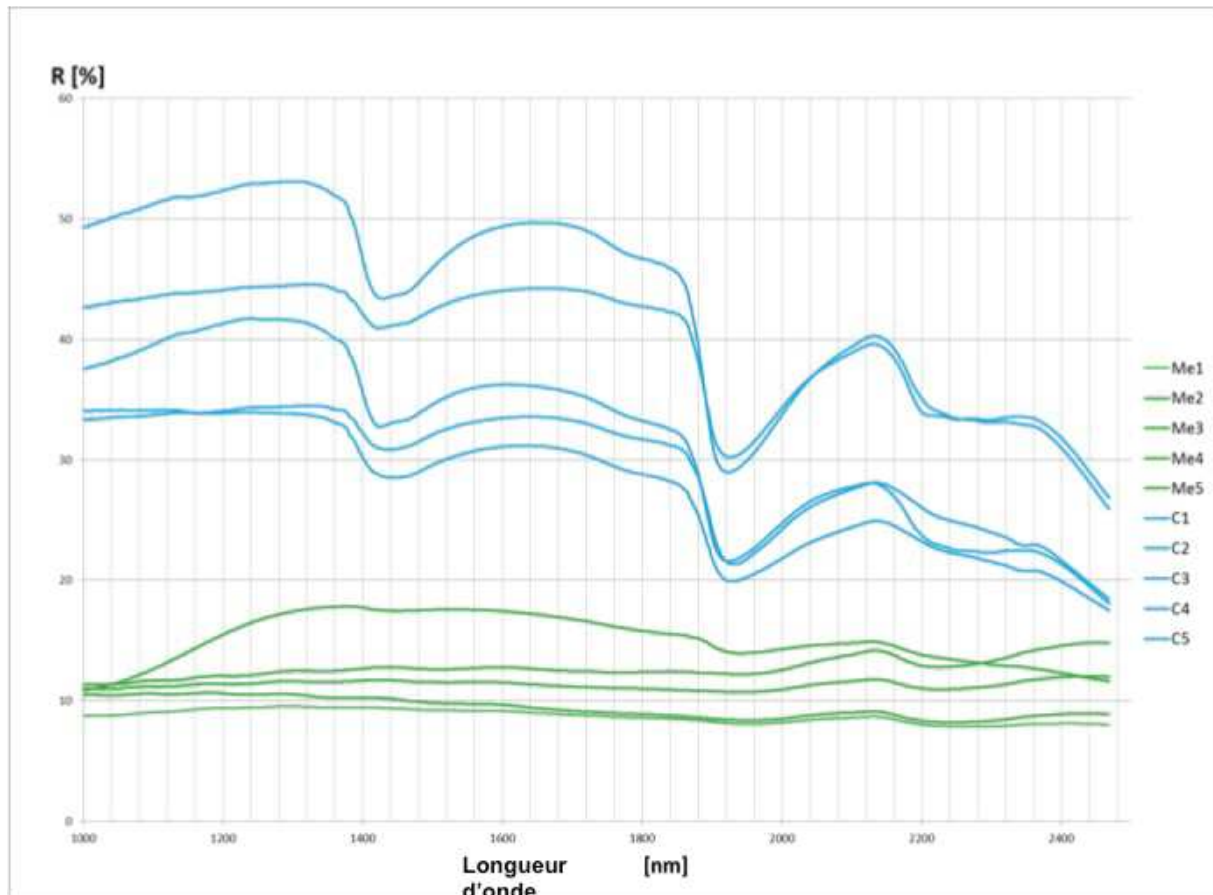


Figure 81 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et de morceaux de métal (vert).

Le métal ne montre pas de caractéristiques à basse réflexion (environ 10%). Ainsi, il peut être facilement distingué des granulats de béton concassé.

3.3.6.7 Comparaison entre les granulats de béton concassé et le mortier

La figure 82 présente les spectromètres des granulats de béton concassé et ceux de mortier.

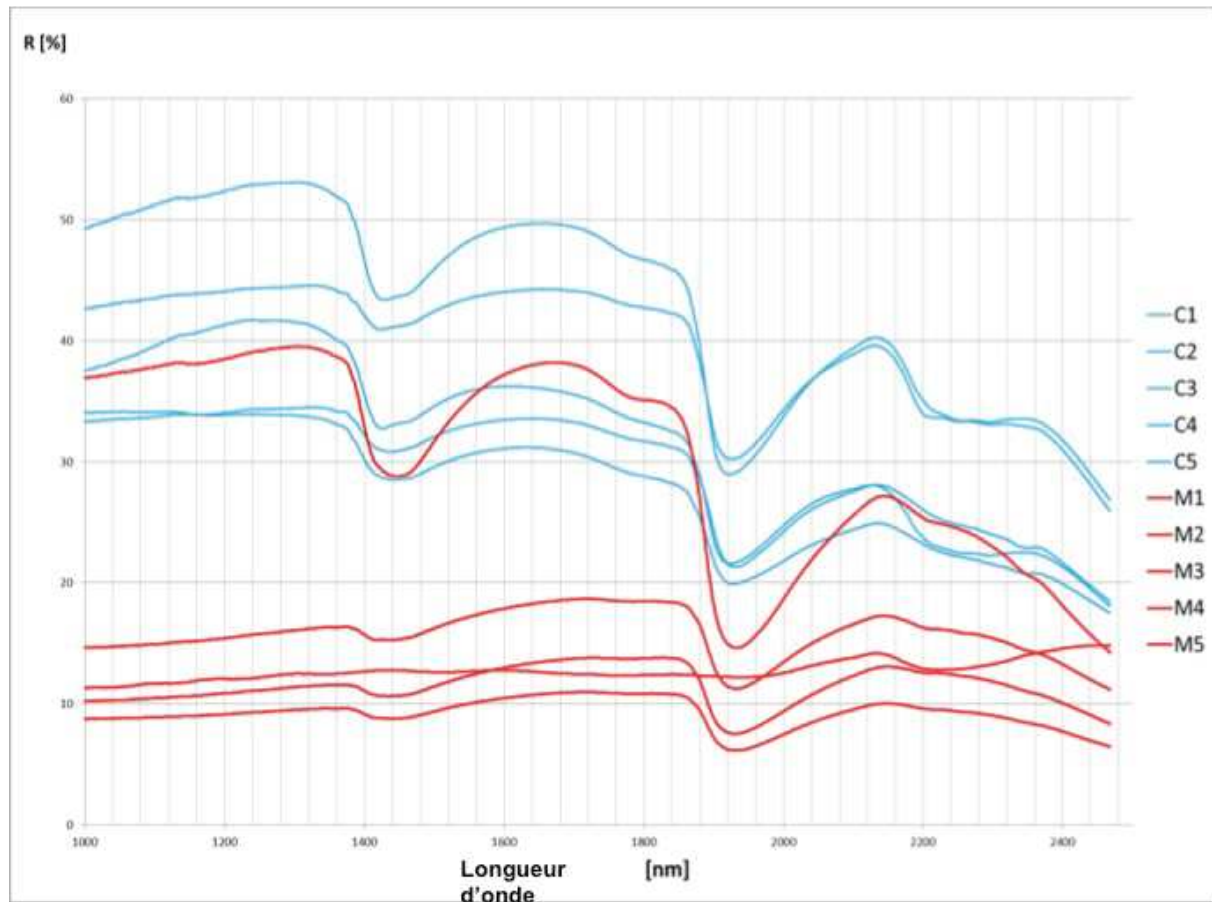


Figure 82 - Spectromètres de granulats de béton concassé (bleu) et des granules de mortier (rouge).

Le mortier est une tâche plus difficile. Une particule présente des caractéristiques très semblables à du béton. Les quatre autres courbes sont différentes à 1400nm. De même, le mortier peut être généralement un matériau qui peut être trié avec un capteur NIR.

3.3.7 Conclusion

Les trois séries de tests ont donné des résultats prometteurs. Pour ces tests, les matériaux sont identifiés de la manière suivante. La brique est rouge, le gypse est blanc, l'enrobé bitumineux est sombre, le verre est transparent, et le métal est gris foncé. En ce qui concerne le capteur optique, la simulation de tri peut clairement différencier ces particules aux particules de béton.

Le tri du mortier et de la céramique pourrait être plus difficile. La céramique apparaît dans de nombreuses couleurs différentes, de sorte que certaines particules peuvent avoir un schéma de couleur similaire par rapport aux particules de béton.

Le mortier a généralement un système de couleur semblable à celui du béton. Mais dans des conditions humides, ces petites différences peuvent être augmentées, de sorte que la simulation permet d'obtenir un produit propre dans des conditions humides.

En général, la simulation de tri optique des particules humides atteint de meilleurs résultats que le tri à sec, en particulier en ce qui concerne le matériau de type mortier. Néanmoins, le système de couleur du mortier n'a pas toujours de grandes différences avec celui du béton. Un test sur un système industriel de tri est nécessaire pour montrer

si les différences sont assez grandes pour trier le mortier avec une récupération significative.

Les mesures NIR montrent également la faisabilité de distinguer les 7 matériaux du matériau béton. En particulier pour le mortier et la céramique, cette technologie peut être une bonne combinaison avec le tri optique.

Pour les prochaines étapes, il est recommandé de tester le matériel sur un système industriel de tri combinant la technologie NIR et un capteur optique.

Un capteur d'induction supplémentaire est capable de trier un produit métallique pour détecter des autres fractions. En raison de ces résultats, d'autres tests avec d'autres techniques à base de capteurs différents ne semblent pas être nécessaires.

3.4 Campagne expérimentale utilisant les rayons X et le tri optique

Cette partie se base sur une prestation d'essais accompagnée d'un rapport d'essai. Cette prestation a été réalisée en Pologne chez Comex. Les essais prévus consistaient à tester l'efficacité du tri avec des procédés de rayons X et optiques. Les matériaux à trier regroupaient du béton, du plâtre, du verre, de la brique, du métal.

3.4.1 Tri par rayons X

3.4.1.1 Particules analysées

Les différentes particules sont testées comme présentées sur la figure suivante.



Figure 83 – Mise en place des particules de matériaux traitées par Comex.

3.4.1.2 Procédure mise en œuvre

Les particules de chaque type sont placées sur un support de façon à les avoir dispersé sur ce support.

Ensuite, elles sont passées à l'analyseur rayons X. Cet appareil produit des images interprétées par son logiciel à partir de l'observation des particules. L'analyse différentielle entre les particules s'appuie sur les images générées.

3.4.1.3 Résultats d'analyse

L'analyse par rayon X des particules donne des résultats a priori peu probants selon l'observation du prestataire. La figure suivante montre les images générées par le système rayons X utilisé. Ces résultats sont placés dans le même ordre que la figure précédente pour les images des matériaux avant le passage dans le système de tri.

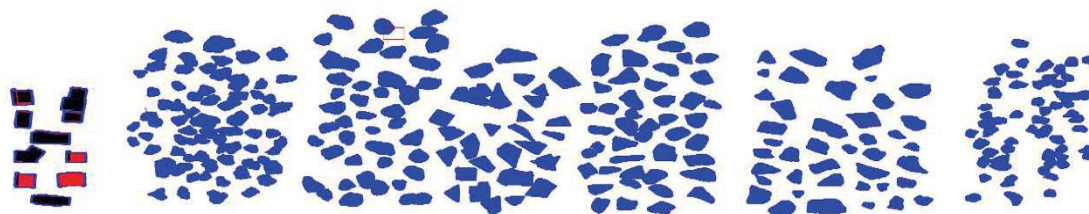


Figure 84 – Images résultant du système d'analyse rayons X.

Comme le montre la figure 84, à part les particules de métal, les autres types de particules ne peuvent être différenciées par le système d'analyse rayons X.

3.4.2 Tri optique

3.4.2.1 Préparation des particules

Les particules à traiter doivent être humidifiées pour obtenir une analyse. Les particules métalliques doivent être séparés des échantillons des autres fractions avec la machine. Dans la mise en œuvre de leur tri, cela peut être fait par les rayons X. Ensuite, la séparation optique est basée sur la couleur des particules : du rouge sombre au blanc brillant (figure 85).

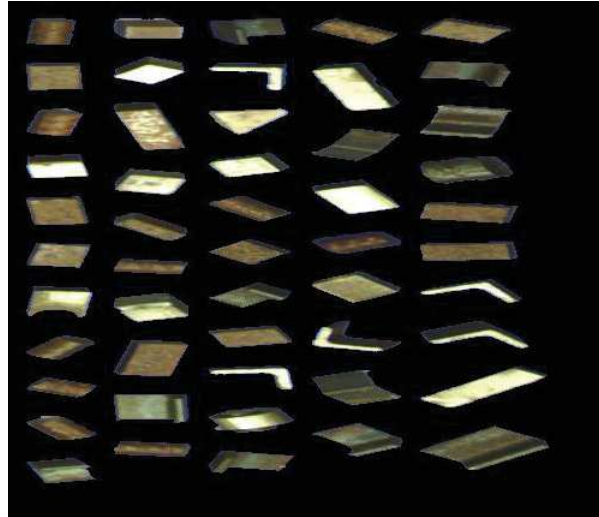


Figure 85 - Préparation des particules à traiter par le système d'analyse optique.

Une attention particulière est portée aux particules céramiques. En effet, les particules céramiques pourraient être problématiques en raison de leur couleur. Elle pourrait être confondue avec celle du béton, du plâtre ou de la brique

3.4.2.2 Procédure mise en œuvre

À l'exclusion des particules métalliques, les particules d'enrobé bitumineux, de brique, de céramique, de béton, de plâtre et de verre sont utilisées. Ces particules sont donc traitées par l'appareil pour identifier chaque passage les particules d'un matériau en particulier à retirer.

Cette procédure de tri est réalisée en deux étapes :

- Une première étape concernant seulement l'enrobé bitumineux, la brique et le plâtre ;
- La seconde étape concernant tous les matériaux.

Les figures suivantes (figures 86 et 87) présentent le synoptique de chaque étape.

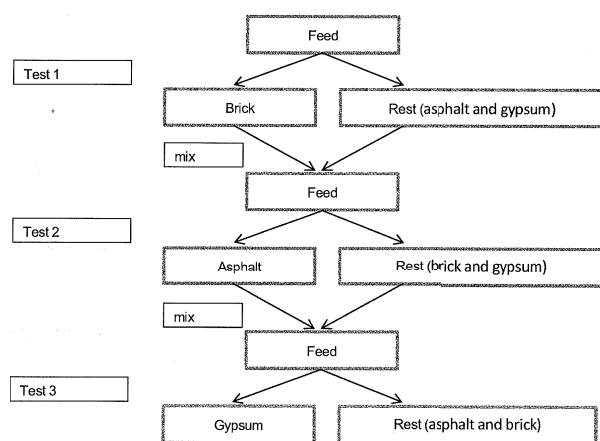


Figure 86 – Synoptique de la procédure pour trier des particules de brique, d'enrobé bitumineux et de plâtre.

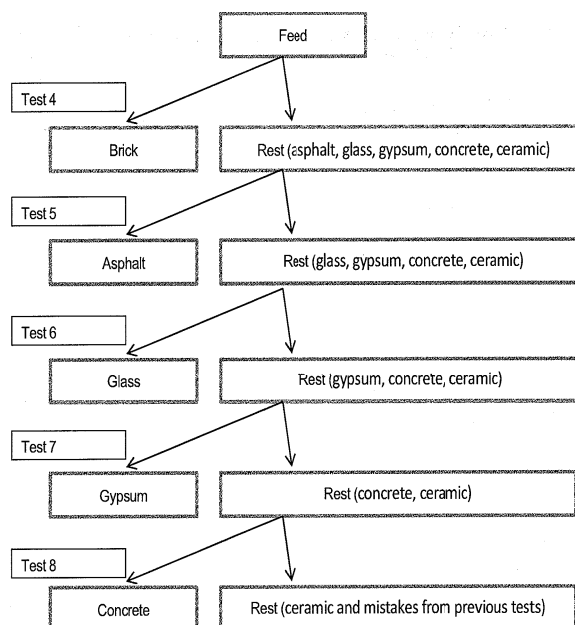


Figure 87 – Synoptique de la procédure pour trier des particules de brique, d'enrobé bitumineux, de verre, de plâtre, de béton et de céramique.

3.4.3 Résultats d'analyse

La procédure d'analyse exige un certain nombre d'étapes. Elles doivent être au nombre de 6 selon le prestataire. En effet, chaque étape permet de retirer chaque type de particule aux matériaux présentés pour le tri.

Ce schéma d'analyse permet d'obtenir un tri de chaque type de matériaux avec une contamination résiduelle. Celle-ci varie entre 10% et 30%. Les résultats des tests 4, 5, 6, 7, et 8 permettent d'obtenir six fractions : de la brique, de l'enrobé bitumineux, du verre, du plâtre, du béton et de la céramique. La procédure mise en place n'a pas permis d'obtenir des flux de sortie complètement purs.

En détail, il est possible de remarquer les éléments suivants. Le matériau brique issu de cette procédure de tri est « contaminé » avec du béton et de la céramique à hauteur de 10 %. Pour ce qui concerne l'enrobé bitumineux, il est à peu près propre avec quelques erreurs du système. Le verre à l'issue du tri contient tout de même environ 20 % de béton. Le matériau identifié comme du plâtre à la sortie du tri, contient environ 10 % de particules de céramique. Le flux de sortie considéré comme du béton est pollué par environ 30 % de particules de céramique. Le flux de sortie considéré comme le reste du tri contient à peu près 50 % de particules de céramiques.

3.4.4 Conclusion

Sur la base de ces résultats, le prestataire reste assez perplexe à trier avec les rayons X et la technique optique, les matériaux de déconstruction et de construction.

Selon leur avis, même après lavage de ces particules, il restera difficile de faire le tri des particules de béton concassé. En effet, la distinction entre ces particules après lavage n'est pas évidente.

4 Conclusion

L'étude bibliographique a permis de dresser un panel de techniques de tri basées sur des analyses chimiques ou physiques. Ces méthodes peuvent être classifiées selon le vocable suivant : les méthodes de tri optique ; les méthodes de tri densimétrique. Il apparaît que ces techniques peuvent être adaptées au tri des matériaux de construction et de déconstruction. Le bilan des filières industrielles de tri concernant le plastique, les cartons, le métal, les métaux non ferreux, le bois, le textile ainsi que le verre, met en perspective l'intérêt de développer ce type de filière pour les matériaux du BTP. Les premiers travaux de recherche produisent des résultats favorables au développement de certains procédés comme la jig à l'application au tri des C&DW.

Les campagnes expérimentales vont aussi dans ce sens. Ainsi, la campagne concernant la jig à eau, a démontré la capacité de tri de la jig à eau appliqué aux matériaux de type béton, brique et plâtre. L'efficacité de ce procédé de tri est valable aussi bien pour les mélanges binaires que pour les mélanges ternaires. En définitif, le procédé « jig à eau » semble un procédé pertinent pour le tri des matériaux de type béton, brique et plâtre. L'efficacité de tri paraît correcte jusqu'à des niveaux assez faibles de matériaux « indésirables » (environ 10 %).

La seconde campagne expérimentale utilisant le tri optique et le tri par infrarouges proches donne des résultats encourageants pour le développement de techniques à un niveau industriel. En ce qui concerne le capteur optique, la simulation de tri peut clairement différencier ces particules aux particules de béton. En général, la simulation de tri optique des particules humides atteint de meilleurs résultats que le tri à sec, en particulier en ce qui concerne le matériau de type mortier. Les mesures NIR montrent également la faisabilité de distinguer les 6 matériaux (enrobé bitumineux, céramique, verre, brique, plâtre, métal) du matériau béton. En particulier pour le mortier et la céramique, cette technologie peut être une bonne combinaison avec le tri optique.

La troisième campagne a été moins convaincante en terme de résultats. En effet, le prestataire reste assez perplexe à trier avec les rayons X et la technique optique, les matériaux de déconstruction et de construction.

Selon leur avis, même après lavage de ces particules, il restera difficile de faire le tri des particules de béton concassé. En effet, la distinction entre ces particules après lavage n'est pas évidente.

5 Références bibliographiques

- [Aatheesan, 2008] Aatheesan, T., Arulrajah, A., Wilson, J., Bo, M.W., 2008. Beneficial use of brick rubble as pavement sub-base material. In: Ellis, E., Yu, H.S., McDowell, G., Dawson, A., Thom, N. (Eds.), *Advances in Transportation Geotechnics*, 695e699 (Nottingham, England).
- [Ademe, 2010] État de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets, 2010.
- [Ademe, 2012] État de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets, rapport révisé, Septembre 2012.
- [Ademe, 2013] Etude de prefiguration du plan national de prevention des déchets en France – Phase 2 du rapport final, Juillet 2013.
- [Agricola, 1556] Agricola G., 1556, *DE DE Metallica*. Traduit par H.C. Hoover et L.H. Hoover, Dover Publications (1950).
- [APESEA, 2010] Le tri des déchets : la voie de l'automatisation, dossiers thématiques de l'APESA, septembre 2010
- [Aplan, 1985] Aplan F.F., 1985, *SME: Mineral Processing Handbook* (N.L. Weiss, ed.) SME, Littleton.
- [Arulrajah, 2012] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M., Bo, M.W., 2012. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *J. Mater. Civil Eng. ASCE* 25 (8), 1077-1088.
- [ARL, 2010] U.S.A.R. Laboratory. Web page, December 2010.
- [Azam, 2013] Azam, A.M., Cameron, D., 2013. Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction. *J. Mater. Civil Eng.* 25 (6), 788-798.
- [Bayer, 2004] A.K. Bayer. Grenzsichterkennung mittels laserinduzierter Fluoreszenz in mineralischen Lagerstätten am Beispiel der Braunkohlegewinnung. PhD thesis, RWTH Aachen University, BGMR, 2004.
- [Blengini, 2010] Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *J. Cleaner Prod.* 18 (10e11), 1021-1030.
- [Blengini, 2011] Blengini, G.A., Garbarino, E., June 1st, 2011. Synthesis Report of Baseline Study Reports (BSR-r) of SARMa Model Sites Activity 3.3 (Recycling). Regione Emilia- Romagna, Italy, p. 138.
- [Boylu, 2014] Boylu F., Tali E., Çetinel T., Çelik M.S. , 2014, Effect of fluidizing characteristics on upgrading of lignitic coals in gravity based air jig, , *International Journal of Mineral Processing*, 129, 27–35.
- [Buck, 1973] Buck, A.D., 1973. Recycled concrete. In: *Highway Research Record*, vol. 430, 1-8.
- [Burt, 1984] Burt, R., 1984. Gravity concentration technology. In: Fuerstenau, D.W. (Ed.), *Developments in Mineral Processing*, vol. 5, Elsevier Science, Amsterdam, Holland, p. 605.
- [Carvalho, 2007] Carvalho M. T., Agante E., Durao, 2007, Recovery of PET from packaging plastics mixtures by wet shaking table, *Waste Management*, 27, 1747-1754
- [Cazacliu, 2010] Cazacliu, B., Ventura, A., 2010. Technical and environmental effects of concrete manufacturing: dry batch versus central mixed plant. *J. Cleaner Prod.* 18 (13), 1320-1327.
- [Cazacliu, 2013] Cazacliù B., Sampaio C.H., Miltzarek G., Petter C., Le Guen L., Paranhos R., Huchet F., Kirchheim A. P., 2013, The potential of using air jigging to sort recycled aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 66, 46-53.

- [CCRS, 2007] Canada Center for Remote Sensing « Fundamentals of Remote Sensing ». Tutorial, Natural Resources Canada, 2007.
- [CGDD, 2011] Commissariat Général au Développement Durable, 2011. Les déchets gérés par les entreprises du BTP : quantités et méthodes en 2008. Chiffres et statistiques n. 231 Juillet 2011. Ministère de l'Ecologie du Développement Durable des Transports et du Logement, France, p. 5 (in French).
- [Coelho, 2013] Coelho, A., de Brito, J., 2013. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. *J. Cleaner Prod.* 39, 338-352.
- [De Juan, 2009] De Juan, M.S., Gutierrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23 (2), 872-877.
- [De Larrard, 1999] De Larrard, F., 1999. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. In: *Modern Concrete Technology (Book 9)*. CRC Press, Taylor & Francis, p. 448.
- [EN 12620, 2011] EN 12620, 2011. Aggregates for Concrete. European Committee for Standardization. Ref. No. FprEN 12620:2011:E. Environment Protection and Heritage Council, 2010. Resource recovery and waste management in Australia today. In: *National Waste Report 2010*. Australian Government, pp. 19-140.
- [Epstein, 1981] Epstein N., Leclair B.P., Pruden B.B., 1981, Liquid fluidization of binary particles mixtures – I, *Chemical Engineering Science*, 36, 1803-1809.
- [Epstein, 2005] Epstein, N., 2005. Teetering. *Powder Technol.* 151, 2-14.
- [Escudié, 2006] Escudié, R., Epstein, N., Grace, J.R., Bi, H.T., 2006. Effect of particle shape on liquid fluidized beds of binary (and ternary) solids mixtures: segregation vs mixing. *Chem. Eng. Sci.* 61 (5), 1528-1539.
- [Etxeberria, 2007] Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A., Barra, M., 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement Concr. Res.* 37, 735-742.
- [EuropeAid, 2007] EuropeAid, 2007. Key Factors in Technology Identification and Selection. Report, EUASIA PRO ECO II B Post-Tsunami Programme, Demonstrating ESTs for Building waste Reduction in Indonesia, p. 86 (Malaya).
- [ECS, 2012] European Committee for Standardization, September 19, 2012. Use of Aggregates in Concrete. TC104-SC1-TG19, Sixth Draft Text for EN 206.
- [Fellesiek, 1991] Fellesiek E., Erdmann W., 1991. Jigging – historical and technical development. *Aufbereitungs-Technik*, 32, 599-607.
- [Formisani, 1991] Formisani B., 1991, Packing and fluidization properties of binary mixtures of spherical particles, *Powder Technology*, 66, 259-264.
- [Gompel, 2009] J. V. Gompel. « The Fundamentals of Infrared Spectroscopy ». Tech. Rep., Midac Corporation, 2009.
- [Hahn, 1984] P. Hahn-Weinheimer. *Grundlagen und praktische Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)*. Vieweg, Braunschweig, 1984.
- [Hendriks, 2004a] Hendriks, C.F., Xing, W., 2004a. Quality improvement of granular wastes by separation techniques. In: Vázquez, E., Hendriks, Ch.F., Janssen, G.M.T. (Eds.), *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. RILEM Publications SARL, pp. 142-149.
- [Hendriks, 2004b] Hendriks, C., Xing, W., 2004b. Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste (CDW). In: Vázquez, E., Hendriks, Ch. F., Janssen, G.M.T. (Eds.), *Proceedings of the*

- International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. RILEM Publications SARL, pp. 166-172.
- [Hsu, 1997] C. –P. S. Hsu. Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry, Chap. 15 Infrared Spectroscopy, pp. 247-283. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1997.
- [Jinnouchi, 1984] Jinnouchi Y., Kita S., Toucka M., Sawada Y., 1984, New trends in theory and technology of the pulsated jigs in Japan, Mineral Processing, 76-81.
- [Jong, 2003] Jong & Dalmijn, dual energy X-ray transmission imaging : application in metal processing, EPD congress, M.E. Schlesinger, 2003
- [Jong, 2007] T. de Jong and T. Dalmijn. « DEXRT imaging for automatic particle sorting ». In : light Metals 2007, Orlando, Florida, 2007.
- [Karantzavelous, 1984] Karantzavelous G.E., Frangiscos A.Z., 1984, Contribution to the modelling of the jigging process, Control84, 97-105 (Chapter 12).
- [Ketelhodt, 2010] V. Ketelhodt and C. Bergmann. 2010. Dual energy X-Ray transmission sorting of coal. The journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 371-378.
- [Kleine, 2010] C. Kleine »Deshaling of Rom coal using XRT-sorting ». Tech. Rep., AMR, RWTH Aachen University, 2010.
- [Mohammed, 2002] Mohammed A., Ibrahim A.A., 2002, Minimum fluidization velocity and defluidization behaviour of binary-solid liquid-fluidized beds, Powder Technology, 126, 241-254.
- [Miziolek, 2006] A. Miziolek, V. Palleschi, and I. Schlecter. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Fundamentals and Application. University Press, Cambridge, 2006.
- [Mukherjee, 2005] Mukherjee A.K., Dwivedi V.K., Mishra B.K., 2005, Analysis of a laboratory jigging system for improved performance, Minerals Engineering, 18, 1037-1044.
- [Mukherjee, 2006a] Mukherjee A.K., Mishra B.K., 2006, An integral assessment of the role of critical process parameters on jigging, International journal of Mineral Processing, 81, 187-200.
- [Mukherjee, 2006b] Mukherjee A.K., Bhattacharjee D., Mishra B.K., 2006, Role of water velocity for efficient jigging of iron ore, Minerals Engineering, 19, 952-959.
- [Müller, 2004] Müller, A., Wienke, L., 2004. Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jigging. In: Vázquez, E., Hendriks, Ch. F., Janssen, G.M.T. (Eds.), Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. RILEM Publications SARL, pp. 115-122.
- [Nienhaus, 2014] K. Nienhaus, T. Pretz, and H. Wotruba Sensor Technologies : Impulses for the Raw Materials Industry, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2014.
- [Noll, 2006] R. Noll, V. Sturm, M. Stepputat, A. Whitehouse, J. Oung, and P. Evans. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications, pp. 400-439. University Press, Cambridge, UK, 2006.
- [Oder, 2003] Oder R. R., Weinstein R. S., Snoby R. J., 2003, Combined air jig and dry magnetic separator for cleaning coal, Twentieth Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, 15-19 September 2003
- [Poon, 2007] Poon, C.-S., Chan, D., 2007. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. Constr. Build. Mater. 21 (1), 164-175.
- [PN Recybeton, 2001] PN Recybeton, Mai 2011. Recyclage complet du béton. Rapport de Faisabilité. PN Recybeton, France, p. 51 (in French).
- [Radziemski, 2002] L. Radziemski. 2002, From Laser to LIBS, the path of the technology

- development . Spectrochimica Acta Part B, Vol. 57, pp. 1109-1114.
- [Raith, 1999] W. Raith. Elektromagnetismus. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 8 Ed. 1999.
- [Raulf, 2012] Raulf K., Pretz T., Wotruba H., 2012, Potential of sensor technologies in the raw materials of industry. Sensor base sorting. Aachen Germany.
- [Riedel, 2010a] Riedel, Dehler, 2010. Recovery of unliberated diamonds by X-ray transmission sorting, diamonds – source to use 2010, the southern african institute of mining and metallurgy, 193-200
- [Riedel, 2010b] F. riedel and M. Dehler. « Recovery of unliberated Diamonds by X-Ray Transmission Sorting ». In : Diamonds – Source to Use 2010, pp. 193-200, The Southern African Institute of
- [Rony, 1993] Rony R.X., Lyman G.J., 1993, Anew energy dissipation theory of jig bed stratification, Part II : A key energy parameter determining bed stratification, International Journal of Mineral Processing, 37, 189-207.
- [Sampaio, 2005] Sampaio, C.H., Tavares, L.M.M., 2005. Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade, vol. 1. Editora UFRGS, Porto Alegre, Brazil, p. 603.
- [Sampaio, 2008] Sampaio, C.H., Aliaga, W., Pacheco, E.T., Petter, E.A., Wotruba, H., 2008. Coal beneficiation of Candiota mine by dry jiggling. Fuel Process. Technol. 89 (2), 198-202.
- [Schnellert, 2010] Schnellert, T., Mueller, A., 22 November 2010. Separation Techniques for CDWeBest Practice. www.abw-recycling.de/de/barcelona.html (accessed on 25.05.2013).
- [Schnellert, 2011] Schnellert, T., Kehr, K., Müller, A., 2011. Development of a separation process for gypsum-contaminated concrete aggregates. In: John, V.M., Vazquez, E., Angulo, S.C., Ulsen, C. (Eds.), Proceedings of the Second International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment. RILEM Publications SARL, pp. 477-482
- [Southwick, 2000] Southwick, D.L., Jouseau, M., Meyer, G.N., Mossier, J.H., Wahl, T.E., 2000. Aggregate resources inventory of the seven-county metropolitan area. In: Information Circular, vol. 46. Minnesota Geological Survey, Minnesota, US, p. 91.
- [Steiner, 2012] Steiner, T. Elektromagnet GmbH. « Röntgen-Sortiersystem XSS ». 2012.
- [Stoval, 1986] Stoval, T., de Larrard, F., Bull, M., 1986. Linear packing density model of grain mixtures. Powder Technol. 48, 1-12.
- [Stuart, 2005] B. H. Stuart . Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications. ANTS (Analytical Techniques in the Science), Wiley, 2005.
- [Sturm, 2007] V. Sturm, A. Brysch, and R. Noll. 2007. Online multi-element Analysis of the Top Gas of a Blast Furnace by Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Berg- and Hüttenmanische Monatshefte, No.1, pp. 28-32.
- [Tomas, 2000] Tomas, J., Gröger, T., 2000. Assessment of multistage turbulent cross-flow aereoseparation of building rubble. Dev. Miner. Process. 13 pp. C7-C34-C7-C43.
- [TOMRA, 2012] TOMRA Sorting AS. « TITECH Innovation in global Recycling ». 2012. Minig and Metallurgy, Gabarone, Bontswana, 2010.
- [Ulsen, 2013] Ulsen, C., Kahn, H., Hawlitschek, G., Masini, E., Angulo, S., 2013. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. Waste Manage. 33, 656-662.
- [Usine nouvelle, 2009] L'optique affine le tri des recycles, 3/09/2009, Usine Nouvelle.

- 2009]
- [Varela, 2011] Varela, E., Vazquez, E., Güell, A., Barra, M., Girbés, I., López, F., Martínez, M.I., Romero, A., Serna, P., Tirado, A., 2011. Gear project – diagnosis of the current recycling situation in Spain. In: John, V.M., Vazquez, E., Angulo, S.C., Ulsen, C. (Eds.), Proceedings of the Second International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment. RILEM Publications SARL, pp. 29-38.
- [Vettel, 1987] Vetter D.A., Brouckaert C.J., Wright D.W., 1987, A dispersion model of particle separation with specific application to the batch jiggling of particles, Proceedings of Twentieth Symposium on application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Johannesburg, vol. 2, 127-139.
- [Vinzelberg, 2008] G. Vinzelberg. Laserinduced Fluorescence as Sensor for Mining. Ph D thesis, RWTH Aachen University, BGMR, 2008.
- [Weinstein, 2007] Weinstein, Snoby, 200è, advances in dry jiggling improves coal quality, Mining engineering, january 2007.
- [Xing, 2006] Xing, W., Hendriks, C.F., 2006. Decontamination of granular wastes by mining separation techniques. J. Cleaner Prod. 14 (8), 748-753.
- [Yang, 2011] Yang, J., Qiang, D., Yiwang, B., 2011. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. Constr. Build. Mater. 25 (4), 1935-1945.