

# Soutenance de mémoire IDPE – Génie Civil

Balandier Jean-marc – 29 novembre 2013

## Fabrication d'un liant hydraulique routier à partir de déchets industriels : du laboratoire à l'échelle industrielle.

### Jury

#### Président

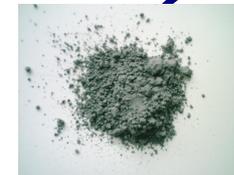
**Jean-Luc CAENEN**, Ingénieur divisionnaire de l'Industrie et des Mines,  
Responsable du Service Formation tout au long de la vie à l'École des Mines  
de Douai

#### Membres du Collège Enseignants

**Nor Edine Abriak**, Professeur des Écoles, École des Mines de Douai  
**Mahfoud Benzerzour**, Ingénieur de recherche, École des Mines de Douai  
**Rachid Zentar**, Maître assistant, École des Mines de Douai

#### Membres du Collège Ingénieurs IDPE

**Lionel Brehon**, Ingénieur D.P.E  
**Jean-Marie Villani**, Ingénieur D.P.E



## PRESENTATION :

*Le groupe ARF est spécialisé dans le traitement des déchets industriels.  
Le groupe emploie 150 salariés répartis sur 5 sites industriels.*



**ARFP à PASSEL (60400)**  
Collecte et recyclage des  
matières plastiques



**ARF à VENDEUIL (02800)**  
Unité d'incinération de DID



**DEM à CHAUNY (02300)**  
Traitement d'emballages par pyrolyse  
et traitement des bombes aérosols



**ARF à SAINT REMY DU NORD (59330)**  
Centre de prétraitement de déchets industriels



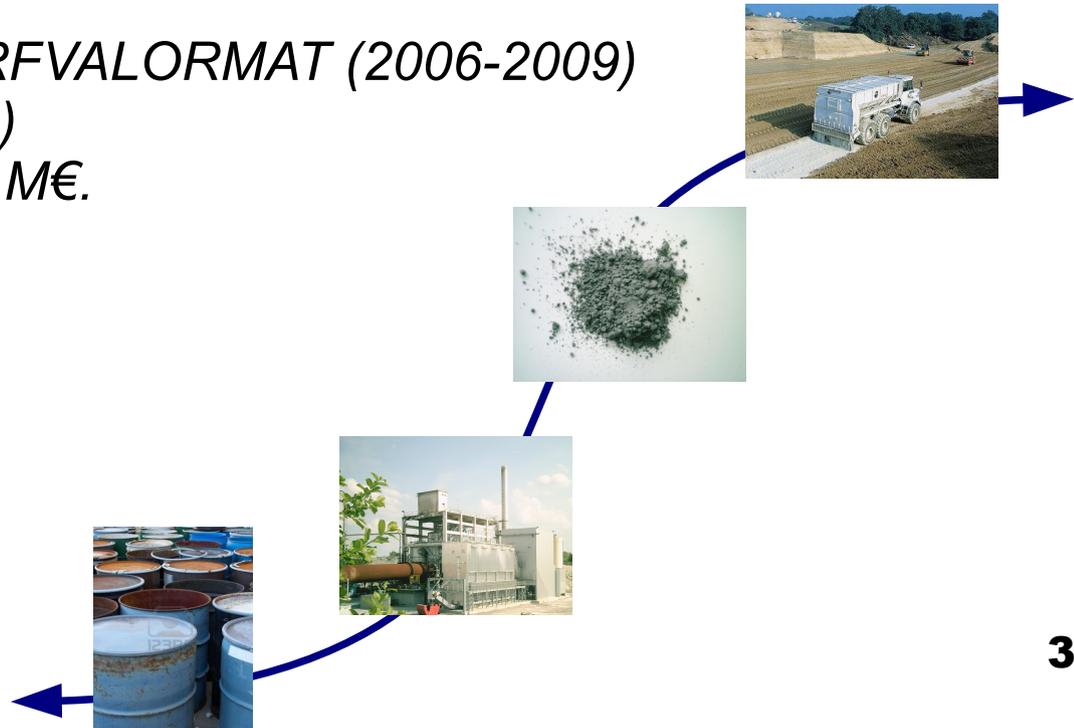
**SHL à GONDECOURT (59147)**  
Unité de traitement des  
eaux/hydrocarbures/huile

## INTRODUCTION :

*Contexte : Développer l'offre de service commerciale d'ARF, en proposant une valorisation matière des déchets à forte teneur minérale.*

*Enjeux : Produire un liant hydraulique routier à partir des éléments contenus dans les déchets minéraux tout en s'assurant de son innocuité environnemental.*

*Moyen : Programmes de recherche ARFVALORMAT (2006-2009) et ARFMINERVAL (2011-2014) dotés d'un financement de 1,6 M€.*



# METHODOLOGIE :



## Perspectives

- *impact environnemental*
- *classification LHR*
- *sortie du statut déchet*
- *autres produits...*



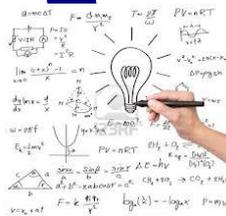
## Essais industriels

- *amélioration cuisson*
- *amélioration broyage*
- *ajout de gypse (?)*



## Développement

- *3 niveaux de formulation*
- *nouveaux gisements*
- *amélioration du LHR*



## Impact Environnemental

- *percolation/lixiviation*
- *scénario en plot expérimental*



**Création d'un base de données déchets**  
76 gisements analysés



**Formulation de LHR en laboratoire**  
24 formules testées



**Essais industriels**  
- 4 essais par voie humide  
- 2 essais par voie semi-sèche



**Caractérisation du LHR**  
- *géotechnique*  
- *physico-chimique*



# PRINCIPAUX RESULTATS : Formulations laboratoires

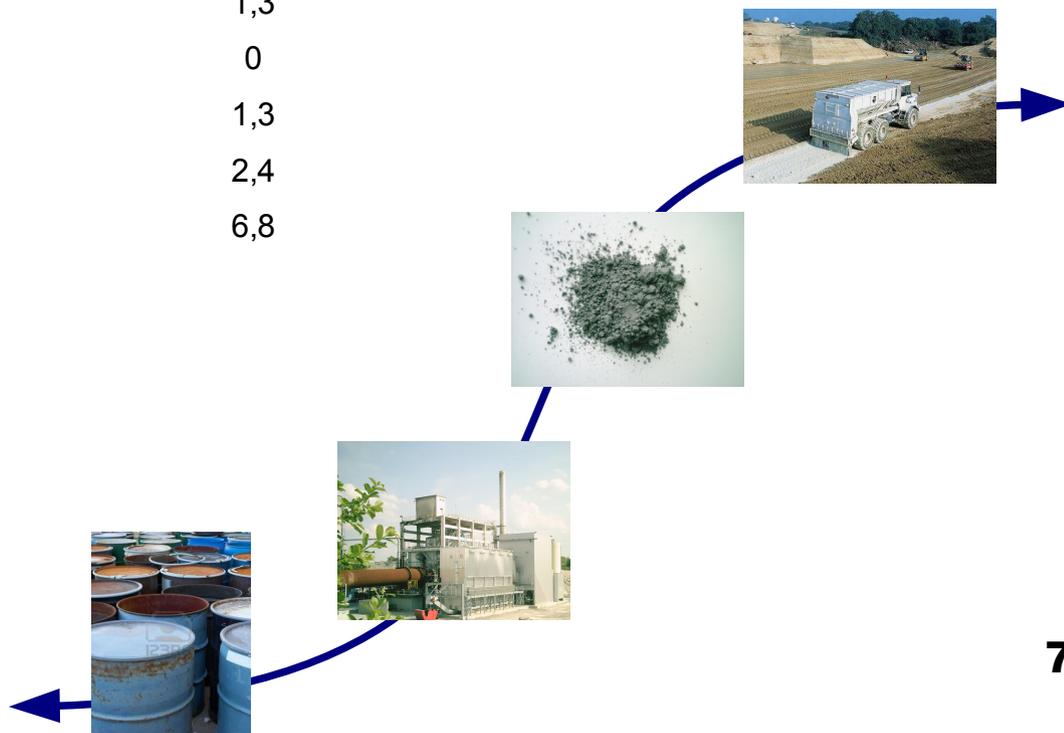
| Quantité exprimée en % massique  | EA003 | EA010 | EA011 | EA012 | EA013 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                                     | 0,3   |       | 11,1  |       |       |
| Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | 13,3  |       |       | 9     |       |
| $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> Larnite                              | 56,7  | 17,5  | 27,5  | 68,2  | 17,6  |
| $\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite                                       |       | 2,1   | 5,4   | 1,1   |       |
| CaCO <sub>3</sub> Calcite  |       |       |       |       |       |
| CaO Chaux  |       | 25,0  |       | 2,2   | 27,5  |
| Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite  | 0,9   | 2,2   | 1,9   | 0,8   |       |
| $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz  |       | 6,8   | 2,2   | 0,1   | 0,6   |
| SiO <sub>2</sub> Cristobalite  |       | 1     |       | 7,4   |       |
| CaSO <sub>4</sub> Anhydrite  | 2,4   | 7,2   | 7,4   | 0,2   | 2,1   |
| Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Brownmillerite | 0,5   |       |       | 4,8   | 8,3   |
| Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite                     | 19,2  | 6,8   | 12,6  |       |       |
| Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> Mayenite                     |       | 3,6   | 2,6   |       | 3     |
| Estimation phase amorphe   |       | 26,5  | 7,3   | 0,2   | 11,3  |

# PRINCIPAUX RESULTATS : Essais Industriels

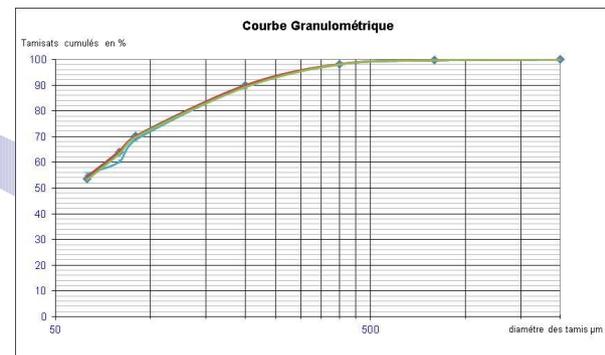
| ESSAI 1  |       |            | ESSAI 2  |       |            | ESSAI 3  |       |            | ESSAI 4  |       |            |
|--|-------|------------|--|-------|------------|--|-------|------------|--|-------|------------|
| ANALYSE FX   | ESSAI | ESSAI      | ANALYSE FX   | ESSAI | ESSAI      | ANALYSE FX   | ESSAI | ESSAI      | ANALYSE FX   | ESSAI | ESSAI      |
| %  | LABO  | INDUSTRIEL | %  | LABO  | INDUSTRIEL | %  | LABO  | INDUSTRIEL | %  | LABO  | INDUSTRIEL |
| CaO Chaux  | 2,5   | 18,0       | CaO Chaux  | 27,5  | 12,7       | CaO Chaux  | 13    | 12,7       | CaO Chaux  |       | 35,8       |
| $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz                          | 12,0  | 15,7       | $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz  | 0,6   | 14,9       | $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz  | 0,7   | 14,9       | $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz  |       | 6,9        |
| $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite          | 40,3  | 13,7       | $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite                              | 17,6  | 13,3       | $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite  | 18,8  | 13,3       | $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite                              | 56,7  | 0          |
| Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite | 18,0  | 11,6       | Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite                     |       | 10,4       | Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite                                       | 2,4   | 10,4       | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | 13,6  |            |
| Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>           |       | 10,5       | Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>                               |       | 10,3       | Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>   |       | 10,3       | Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite                     | 19,2  | 6,7        |
| $\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite                   | 19,3  | 9,7        | $\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite                                       |       | 11,6       | $\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite   | 5,4   | 11,6       | Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>                               |       | 17,8       |
| CaCO <sub>3</sub> Calcite                                  |       | 4,5        | CaCO <sub>3</sub> Calcite  |       | 4,7        | CaCO <sub>3</sub> Calcite  |       | 4,7        | CaCO <sub>3</sub> Calcite  |       | 7,3        |
| TiO <sub>2</sub> Rutile                                    |       | 2,5        | TiO <sub>2</sub> Rutile  |       | 2,4        | TiO <sub>2</sub> Rutile  |       | 2,4        | TiO <sub>2</sub> Rutile  |       | 2,9        |
| MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite           | 0,3   | 2,3        | MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite                               |       | 3,0        | MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite   | 0,6   | 3          | MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite                               |       | 2,5        |
| CaSO <sub>4</sub> Anhydrite                                | 1,3   | 1,7        | CaSO <sub>4</sub> Anhydrite  | 2,1   | 1,3        | CaSO <sub>4</sub> Anhydrite  | 8,3   | 1,3        | CaSO <sub>4</sub> Anhydrite  | 2,4   | 5,7        |
| MgO Periclase  |       | 1,0        | MgO Periclase  | 15,3  | 6,4        | MgO Periclase  |       | 6,4        | KAISi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Microcline                                   | 6,4   |            |
| Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite                            | 4,2   | 1,0        | Ca <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) Ternesite  | 14,3  | 1,0        | Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> Fayalite  | 3,4   |            | Mg <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>16</sub>                | 0,3   |            |
| SiO <sub>2</sub> Cristobalite                              | 1,8   | 0,8        | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Brownmillerite | 8,3   | 0,8        | Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite  | 2,3   | Trace      | Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite  | 0,9   | 2,1        |
| Estimation phase amorphe                                   | 0,3   | 7,0        | SiO <sub>2</sub> Cristobalite  |       | 1,3        | SiO <sub>2</sub> Cristobalite  | 2,4   | 1,3        | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Brownmillerite | 0,5   |            |
|  |       |            | Estimation phase amorphe   | 11,3  | 7,7        | Ca <sub>10</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub> | 16,9  |            | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Anorthite                     |       | 1,3        |
|  |       |            |  |       |            | Ca <sub>18</sub> Mg <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>14</sub> Whitlockite     | 13    |            | Estimation phase amorphe   |       | 10,9       |
|  |       |            |  |       |            | Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>9</sub> Srebrodolskite                                    | 5,8   |            |  |       |            |
|  |       |            |  |       |            | Estimation phase amorphe   | 5,1   | 7,7        |  |       |            |

# PRINCIPAUX RESULTATS : Essais Industriels Complémentaires

| DRX<br>Phase minéralogique                                 | EA.021<br>% | ESSAI INDUSTRIEL<br>% |
|--|-------------|-----------------------|
| CaO Chaux  | 77,1        | 54,1                  |
| $\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> Larnite          | 4,6         | 14,4                  |
| CaTiO <sub>3</sub> Perovskite                              | 1,8         | 9,2                   |
| MgO Periclase  | 11,6        | 6,1                   |
| Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite                            | 0,3         | 2                     |
| Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite | 0,7         | 2,4                   |
| CaSO <sub>4</sub> Anhydrite                                | 3,6         | 1,3                   |
| SiO <sub>2</sub> Cristobalite                              | 0,2         | 0                     |
| $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz                          | 0,1         | 1,3                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Hématite                    | 0           | 2,4                   |
| Calcite  | 0           | 6,8                   |



# PRINCIPAUX RESULTATS : Caractérisation du LHR



| Paramètre :      | unité | LIANT ARF |
|------------------|-------|-----------|
| Atote total      | %     | <0.01     |
| Dioxines-Furanes |       |           |
| I-TEQ nd=0       | pg/g  | 1,7       |
| I-TEQ nd=Iod     | pg/g  | 1,7       |
| COT              | mg/kg | <3        |
| Soufre total     | mg/kg | 4600      |
| Chlore total     | mg/kg | 510       |
| Fluor            | mg/kg | <20       |
| Antimoine        | mg/kg | <0.1      |
| Cadmium          | mg/kg | <1        |
| Arsenic          | mg/kg | 1,7       |
| Nickel           | mg/kg | 120       |
| Molybdène        | mg/kg | 77        |
| Chrome           | mg/kg | 770       |

| Paramètre : | unité | LIANT ARF |
|-------------|-------|-----------|
| Manganèse   | mg/kg | 530       |
| Fer         | mg/kg | 22000     |
| Sélénium    | mg/kg | 0,1       |
| Plomb       | mg/kg | 160       |
| Cuivre      | mg/kg | 960       |
| Zinc        | mg/kg | 2800      |
| Baryum      | mg/kg | 3900      |
| Etain       | mg/kg | 74        |
| Vanadium    | mg/kg | 100       |
| Cobalt      | mg/kg | 120       |
| Titane      | mg/kg | 44000     |
| Aluminium   | mg/kg | 4800      |
| Magnésium   | %     | 2,2       |
| Calcium     | %     | 50,64     |
| Mercure     | mg/kg | 0,7       |
| Phosphore   | mg/kg | 410       |
| Bore        | mg/kg | 350       |
| Silicium    | mg/kg | 45000     |

| référence éprouvette | Charge de rupture en kN | Résistance à la compression en M Pa | Moyenne Rc en M Pa |
|----------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| <b>Série 1</b>       | 2,866                   | 1,79                                | <b>1,89</b>        |
|                      | 2,994                   | 1,87                                |                    |
|                      | 3,057                   | 1,91                                |                    |
|                      | 2,624                   | 1,64                                |                    |
|                      | 3,165                   | 1,98                                |                    |
| <b>Série 2</b>       | 3,463                   | 2,16                                | <b>1,62</b>        |
|                      | 2,166                   | 1,35                                |                    |
|                      | 2,269                   | 1,42                                |                    |
|                      | 2,918                   | 1,82                                |                    |
|                      | 2,859                   | 1,79                                |                    |
|                      | 2,745                   | 1,72                                |                    |
|                      | 2,945                   | 1,84                                |                    |



# PRINCIPAUX RESULTATS : Impact Environnemental

- Référence au Guide Sétra : Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.

Caractérisation environnementale de niveau 1  
Analyses sur contenu total et sur lixiviation (NF EN 12457-2)

| Paramètre :      | unité | LIANT ARF | Valeur d'acceptabilité |
|------------------|-------|-----------|------------------------|
| Dioxines-Furanes |       |           |                        |
| I-TEQ nd=0       | pg/g  | 1,7       | 10000                  |
| I-TEQ nd=lod     | pg/g  | 1,7       | 10000                  |
| COT              | mg/kg | <3        |                        |
| BTEX             |       |           | 6                      |
| PCB (7 cong.)    |       |           | 1                      |
| HCT C10 à C40    |       |           | 500                    |
| HAP              |       |           | 50                     |

| Paramètre         | LIANT ARF | SEUIL D' ACCEPTABILITÉ |
|-------------------|-----------|------------------------|
| As                | <0,01     | 2                      |
| Ba                | 34        | 100                    |
| Cd                | <0,04     | 1                      |
| Cr total          | 0,59      | 10                     |
| Cu                | 0,19      | 50                     |
| Hg                | <0,01     | 0,2                    |
| Mo                | 2,91      | 10                     |
| Ni                | <0,15     | 10                     |
| Pb                | 1,33      | 10                     |
| Sb                | <0,01     | 0,7                    |
| Se                | 0,01      | 0,5                    |
| Zn                | 0,4       | 50                     |
| fluorures         | 5,3       | 150                    |
| chlorures*        | 480       | 15000                  |
| sulfates*         | 180       | 20000                  |
| fraction soluble* | 29000     | 60000                  |

Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total et en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière (extrait du guide).

## PRINCIPAUX RESULTATS : Impact Environnemental

- Référence au Guide Sétra : Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.

*Caractérisation environnementale de niveau 1  
Lixiviation sur contenu total (NF EN 12457-2)*

| Paramètre         | LIANT ARF | SEUIL NIV 1 |
|-------------------|-----------|-------------|
| As                | <0,01     | 1,5         |
| Ba                | 34        | 60          |
| Cd                | <0,04     | 0,12        |
| Cr total          | 0,59      | 1,5         |
| Cu                | 0,19      | 6           |
| Hg                | <0,01     | 0,03        |
| Mo                | 2,91      | 1,5         |
| Ni                | <0,15     | 1,2         |
| Pb                | 1,33      | 1,5         |
| Sb                | <0,01     | 0,18        |
| Se                | 0,01      | 0,3         |
| Zn                | 0,4       | 12          |
| fluorures         | 5,3       | 30          |
| chlorures*        | 480       | 2400        |
| sulfates*         | 180       | 3000        |
| fraction soluble* | 29000     | 12000       |

*Valeurs limites en lixiviation (mg/kg) permettant de justifier toutes les utilisations visées par le guide Sétra.*

## PRINCIPAUX RESULTATS : Impact Environnemental

- Référence au Guide Sétra : Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.

Caractérisation environnementale de niveau 2  
Quantité relarguée cumulée à L/S 10 (NF CEN/TS 14405)

| Paramètre | LIANT ARF | SEUIL NIV 2 |         |
|-----------|-----------|-------------|---------|
|           |           | USAGE 1     | USAGE 2 |
| As        | <0,01     | 0,8         | 0,5     |
| Ba        | 34,7      | 56          | 28      |
| Cd        | <0,01     | 0,32        | 0,16    |
| Cr total  | 0,651     | 4           | 2       |
| Cu        | <0,05     | 50          | 50      |
| Hg        | <0,0005   | 0,08        | 0,04    |
| Mo        | 1,85      | 5,6         | 2,8     |
| Ni        | <0,0498   | 1,6         | 0,8     |
| Pb        | 0,3       | 0,8         | 0,5     |
| Sb        | <0,01     | 0,4         | 0,2     |
| Se        | <0,001    | 0,5         | 0,4     |
| Zn        | 1,46      | 50          | 50      |
| fluorures | 1,55      | 60          | 30      |
| chlorures | 456       | 10000       | 5000    |
| sulfates  | 160       | 10000       | 5000    |

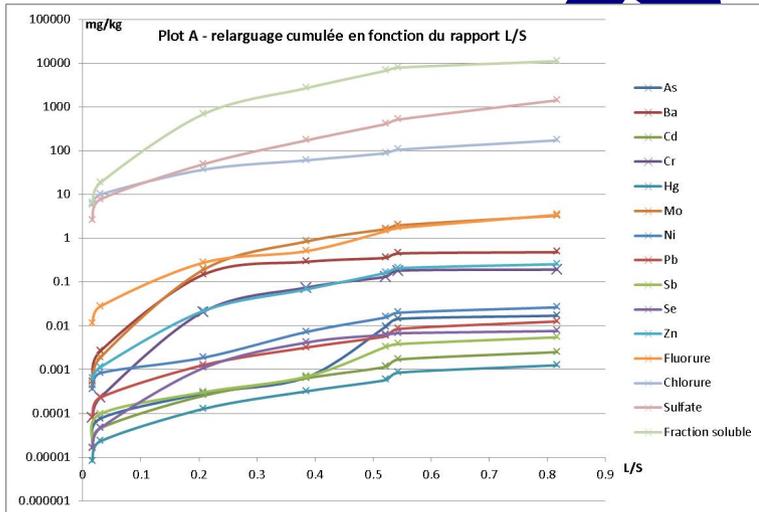
Usage 1: sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtus »

Usage 2 : remblai technique ou accotement recouverts »

Valeurs limites (mg/kg) en percolation permettant de justifier certaines utilisations visées par le guide Sétra.

# PRINCIPAUX RESULTATS : Impact Environnemental

- Référence à la norme NF EN 12920 – Scénario de Plot expérimental



LHR utilisé à 10% en traitement d'une grave.

- Plot A couvert enrobé bitumeux

- Plot B non couvert



# PRINCIPAUX AXES D'AMELIORATION :

## - DÉVELOPPEMENT DE FORMULATION DE TYPE CIMENT BELTIQUE

*Amélioration des résistances mécaniques*

|       | Rc (MPa) |         |          |          |          |
|-------|----------|---------|----------|----------|----------|
|       | 1 jour   | 7 jours | 14 jours | 28 jours | 56 jours |
| B5-3a | 3.7      | 4.6     | 5.9      | 20.3     |          |

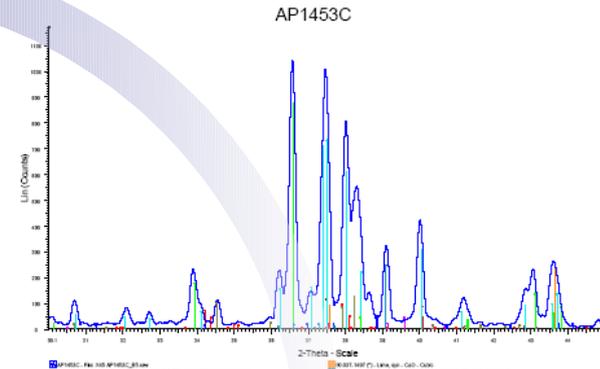
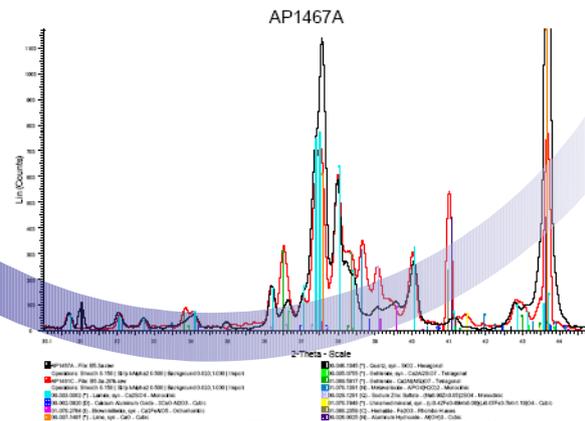


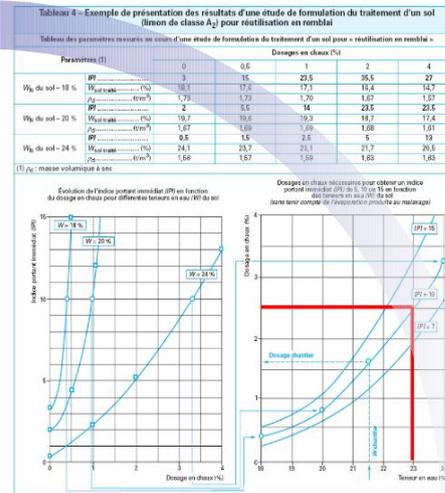
Figure 3: Diffractogramme du clinker de B5.

## - ETUDE DE L'IMPACT DES CENDRES ISSUES DES COMBUSTIBLES SUR LA MINERALOGIE DU CLINKER

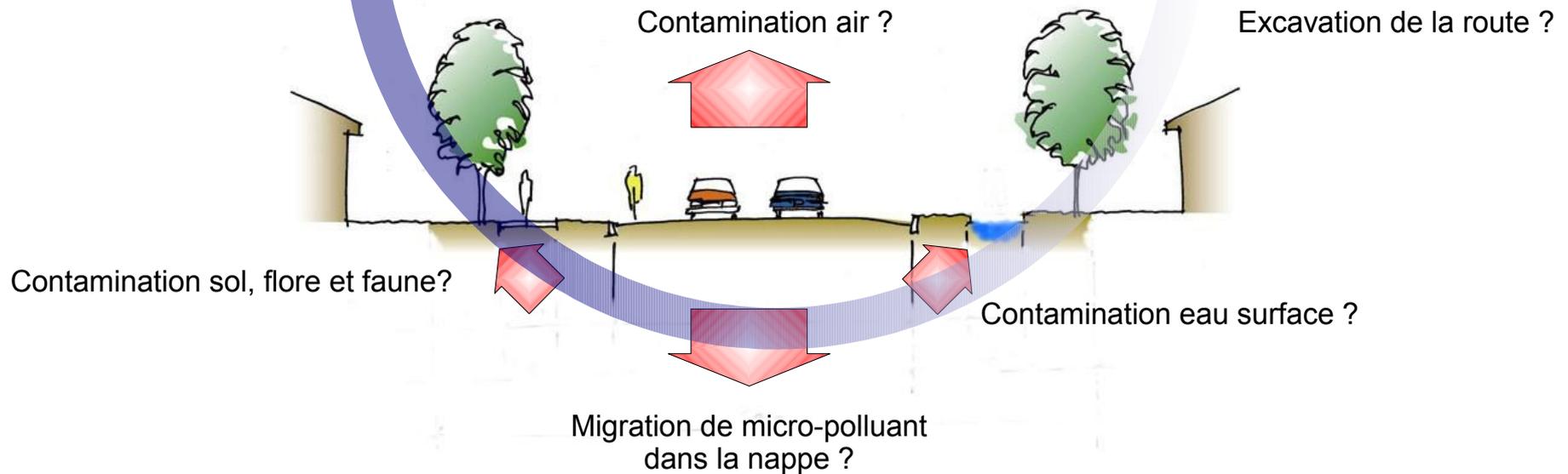


# PRINCIPAUX AXES D'AMELIORATION :

- ETUDE DE FORMULATION POUR LE TRAITEMENT DES SOLS EN REMBLAIS OU COUCHE DE FORME (GTS)

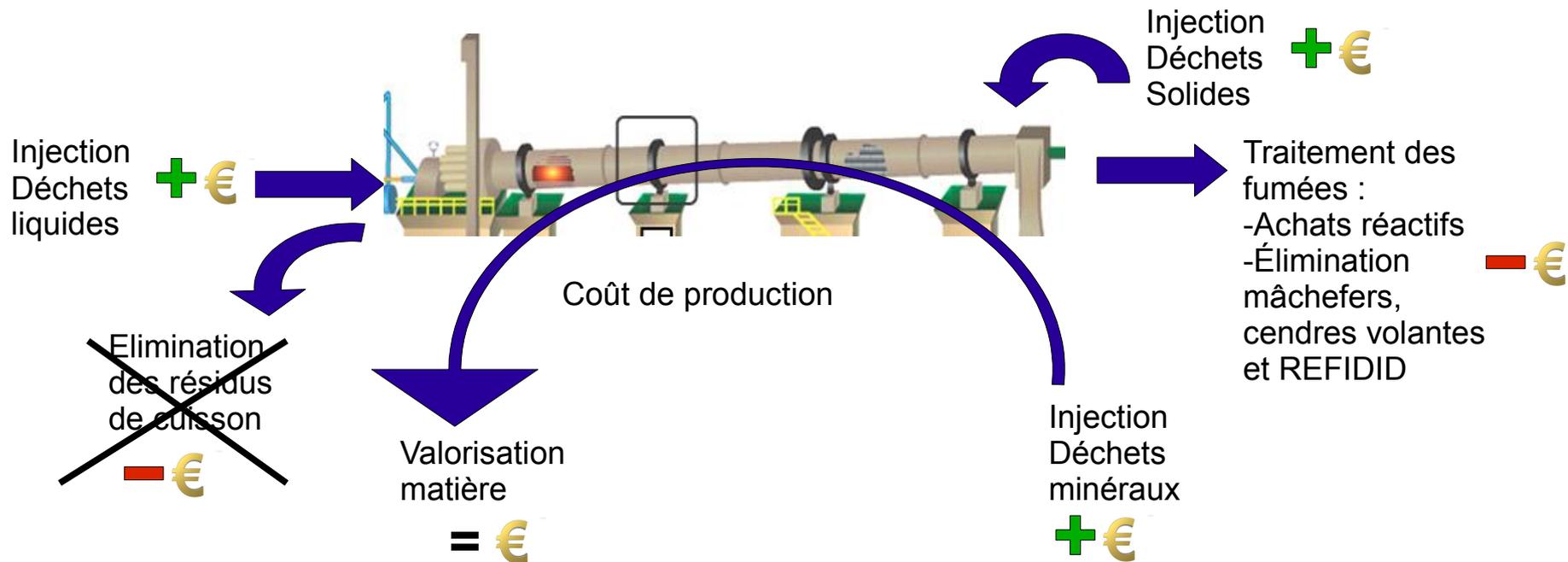


- ASSURANCE DE L'INNOCUITÉ ENVIRONNEMENTALE



## PERSPECTIVES ECONOMIQUES: Qu'est ce que ce projet apporte à ARF ?

- Un défi culturel, nécessaire pour sa crédibilité vis à vis des institutions et de ses concurrents.
- Une valeur ajoutée dans la valorisation matière (gamme peu développée chez ARF).
- Un nouveau modèle économique par rapport aux autres centres d'incinération de déchets. Ce qui permet de se différencier et de pérenniser l'activité.



# Soutenance de mémoire IDPE -Génie Civil

Balandier Jean-marc – 29 novembre 2013

**Merci de votre attention.**

**« L'imagination est plus importante que la connaissance. La connaissance est limitée alors que l'imagination englobe le monde entier, stimule le progrès, suscite l'évolution » - Albert Einstein**

