

# *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



**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



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



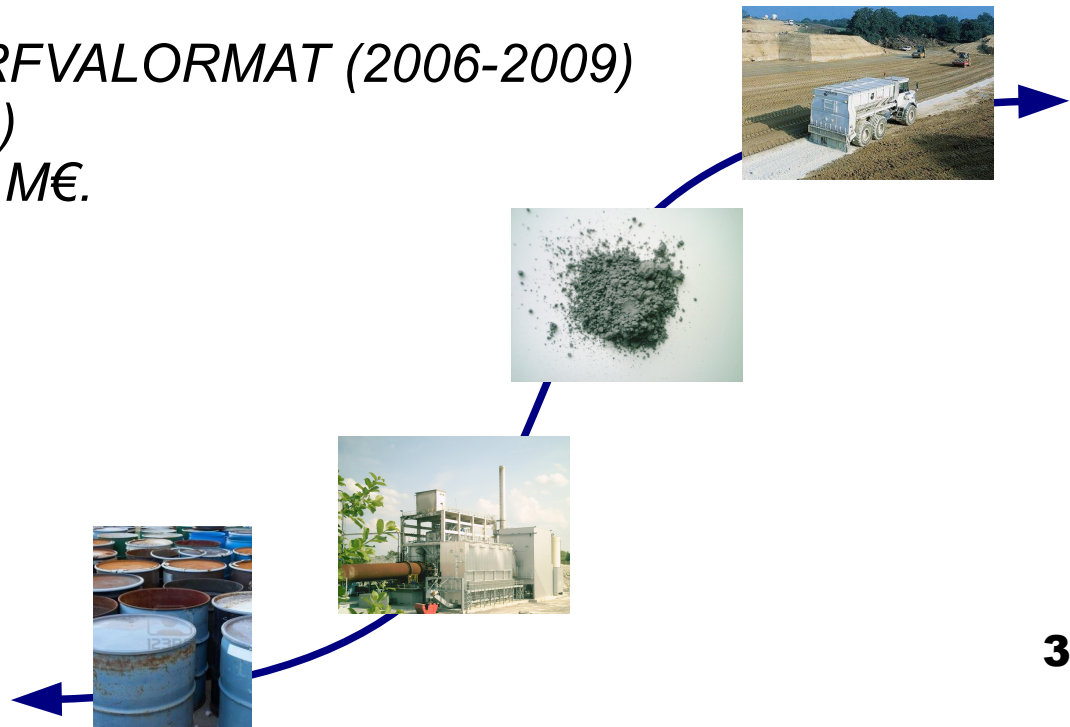
**SHL à GONDECOURT (59147)**  
Unité de traitement des  
eaux/hydrocarbures/huile

## ● 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 environnementale.*

*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*



**ARF**  
**valormat**



**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*

**ARF**  
**MINERVAL**

# 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

ANALYSE FX	ESSAI	ESSAI
%	LABO	INDUSTRIEL
CaO Chaux	2,5	18,0
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz	12,0	15,7
$\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite	40,3	13,7
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite	18,0	11,6
Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>		10,5
$\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite	19,3	9,7
CaCO <sub>3</sub> Calcite		4,5
TiO <sub>2</sub> Rutile		2,5
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite	0,3	2,3
CaSO <sub>4</sub> Anhydrite	1,3	1,7
MgO Periclase		1,0
Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite	4,2	1,0
SiO <sub>2</sub> Cristobalite	1,8	0,8
Estimation phase amorphe	0,3	7,0

ESSAI 2

ANALYSE FX	ESSAI	ESSAI
%	LABO	INDUSTRIEL
CaO Chaux	27,5	12,7
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz	0,6	14,9
$\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite	17,6	13,3
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite		10,4
Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>		10,3
$\beta$ -CaSiO <sub>3</sub> Wollastonite		11,6
CaCO <sub>3</sub> Calcite		4,7
TiO <sub>2</sub> Rutile		2,4
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite		3,0
CaSO <sub>4</sub> Anhydrite	2,1	1,3
MgO Periclase	15,3	6,4
Ca <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) Ternesite	14,3	1,0
Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Brownmillerite	8,3	0,8
SiO <sub>2</sub> Cristobalite		1,3
Estimation phase amorphe	11,3	7,7

ESSAI 3

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

ESSAI 4

ANALYSE FX	ESSAI	ESSAI
%	LABO	INDUSTRIEL
CaO Chaux		35,8
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub> Quartz		6,9
$\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnite	56,7	0
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	13,6	
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> Gehlenite	19,2	6,7
Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>8</sub>		17,8
CaCO <sub>3</sub> Calcite		7,3
TiO <sub>2</sub> Rutile		2,9
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Magnesioferrite		2,5
CaSO <sub>4</sub> Anhydrite	2,4	5,7
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Microcline	6,4	
Mg <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>18</sub>	0,3	
Ca(OH) <sub>2</sub> Portlandite	0,9	2,1
Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Brownmillerite	0,5	
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Anorthite		1,3
Estimation phase amorphe		10,9



# PRINCIPAUX RESULTATS : Essais Industriels Complémentaires

DRX Phase minéralogique	EA.021 %	ESSAI INDUSTRIEL %
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
Atome 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
Mercur	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=Iod	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

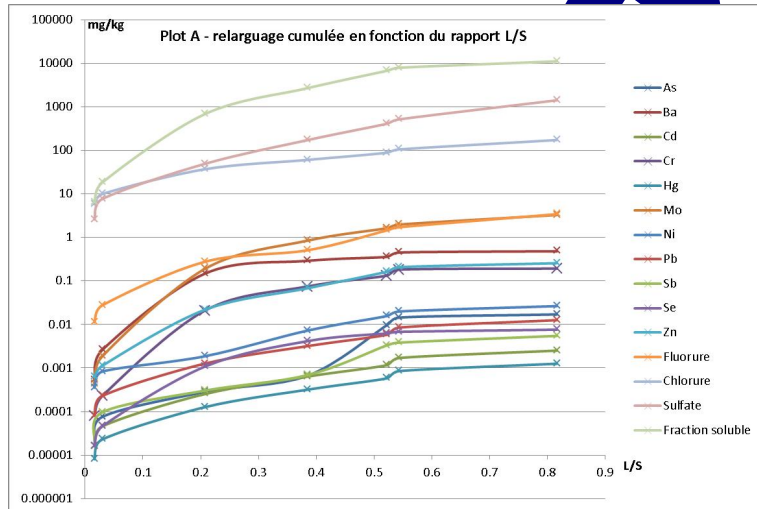
*Usage 1:sous-couche de  
chaussée ou d'accotement  
revêtus »*

*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

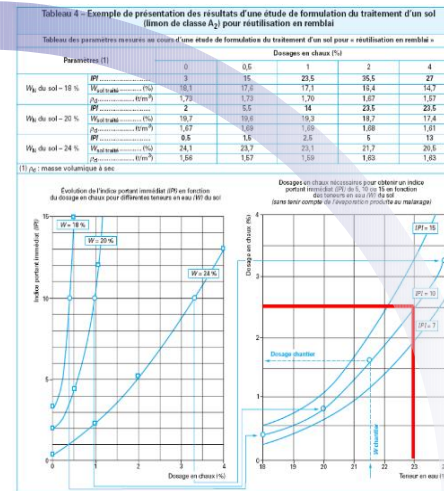
- Plot B non couvert



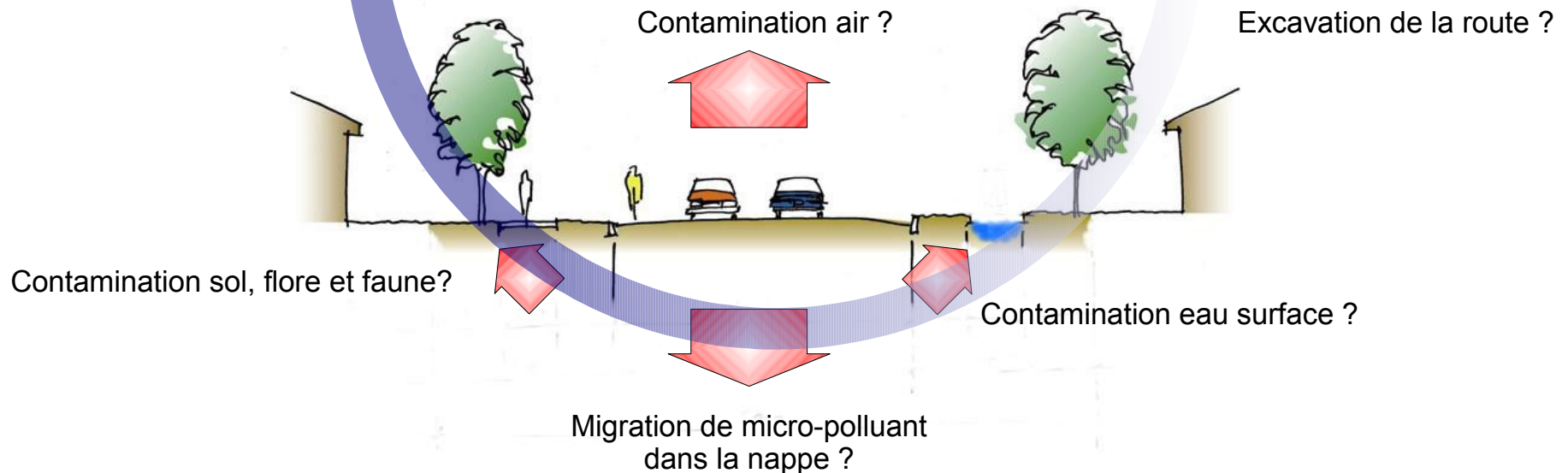


# PRINCIPAUX AXES D'AMELIORATION :

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



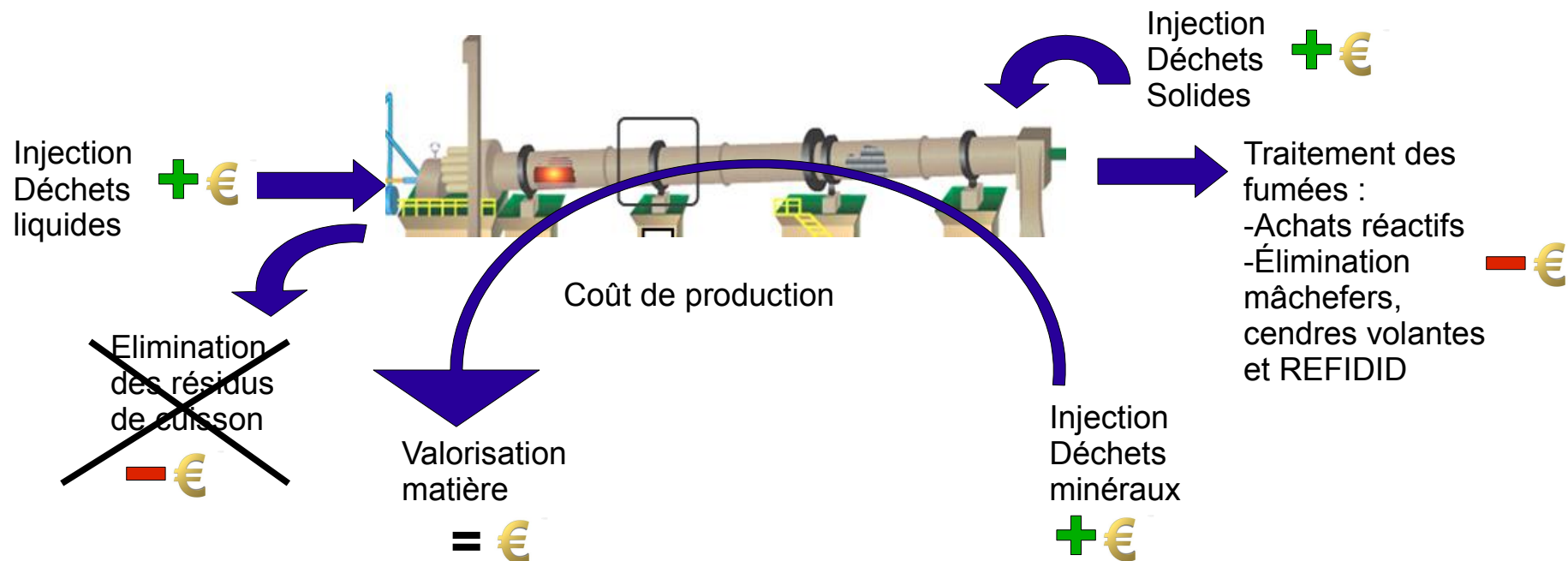
- ASSURANCE DE L'INNOCUITÉ ENVIRONNEMENTALE





## ● 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***

