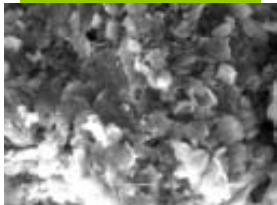


# Le projet européen SESAR



*D. François*

*LCPC – Centre de Nantes*

# StEel Slag roAd and enviRonment

Caractérisation, modélisation et validation de l'impact sur les eaux souterraines des laitiers sidérurgiques utilisés en construction routière

- **Projet de RTD du 5ème PCRD de la CE (07/2000-03/2004)**
- **Partenaires:**
  - Laboratoire d'Etude et de Contrôle de l'Environnement Sidérurgique (F)
  - Forschungsgemeinschaft EisenhüttenSchlacken (D)
  - Austrian Research Centers Siebersdorf (A)
  - **LCPC (+ LRPC de Nancy)**

## Problématique et Objectif

Méthodes

Résultats

Bilan



# Problématique

Laitiers utilisés couramment en construction routière:

- Guides techniques routiers
- Normes (NF, ...)

**Propriétés physiques connues, reconnues.**

**Effets sur l'environnement ?**

... Attention nouvelle portée aux conditions d'emploi de ces matériaux

**Absence de référentiel environnemental pour les laitiers sidérurgiques**



Améliorer la connaissance du potentiel polluant (lixiviable) des laitiers

Contribuer à la définition de conditions d'emploi intégrant la composante  
environnementale:

« Cible » : eaux de nappe

## Moyens

Variété de laitiers:

- L.H.F. cristallisé
- L.H.F. vitrifié
- L.A. classique
- L.A. électrique
- des mélanges

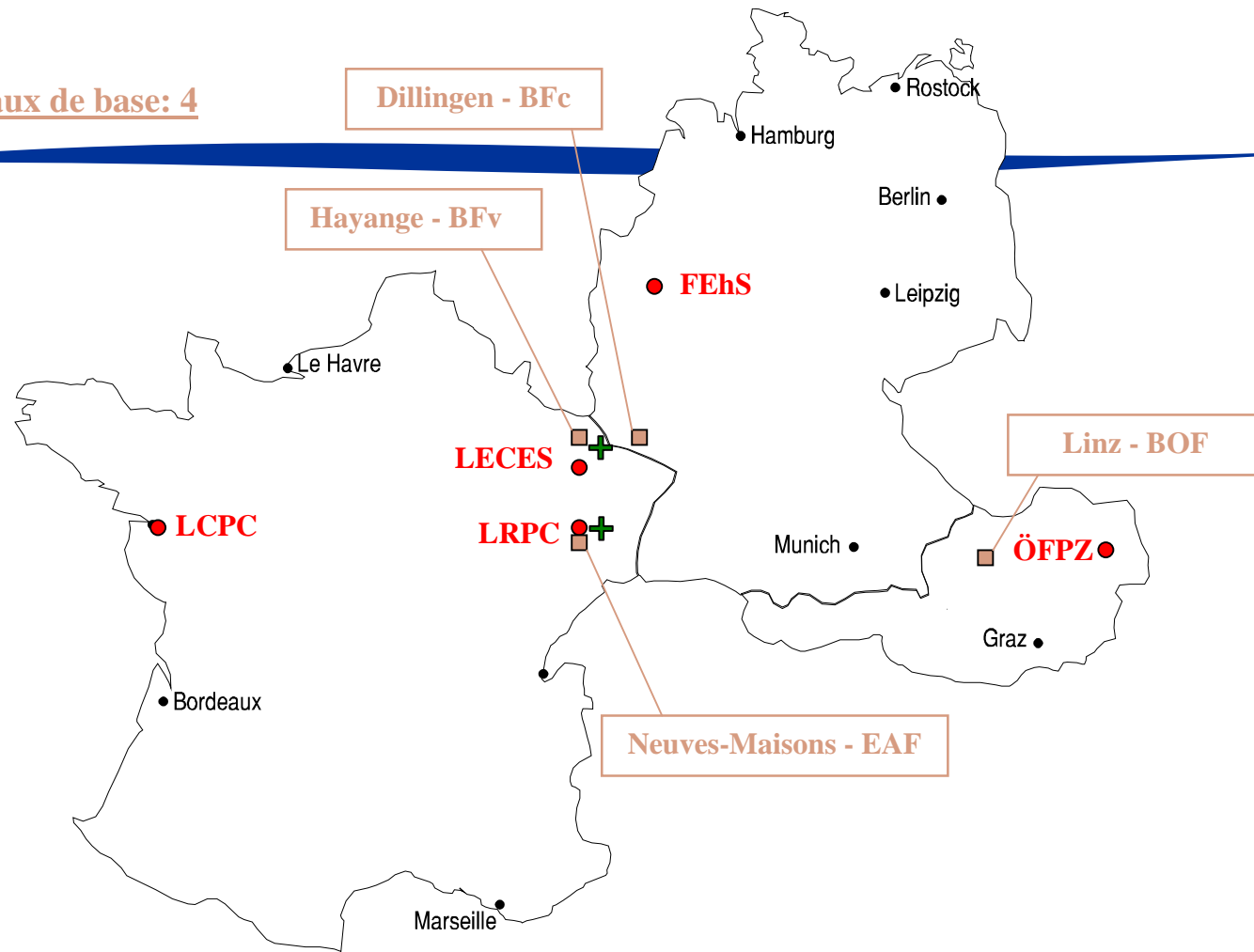
Variété d'approches des matériaux: protocoles de solubilisation, contraintes climatiques, hydrodynamique, échelle 1.

Complémentarité des partenaires...



# Origine et préparation des laitiers

## Matériaux de base: 4



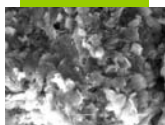
## Mélanges: 3

**M1 = 85 % BFc + 15 % BFv**

**M2 = 60 % BFc + 15 % BFv + 25 % BOF**

**M3 = 84 % BFc + 15 % BFv + 1 % CaO**

## Matériaux sur site: 2



# Préparation des laitiers

L'esprit de recherche au cœur des réseaux

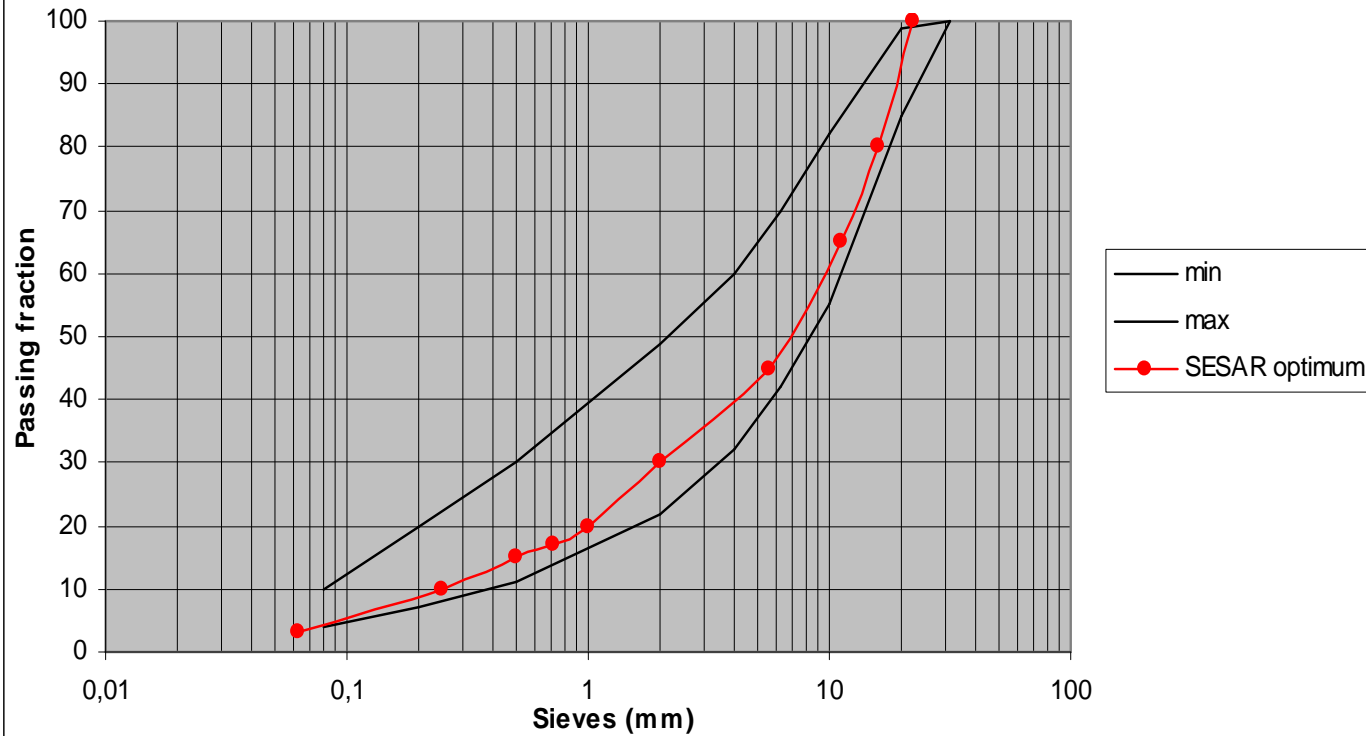
HFG: 0/4 mm

HFC: 0/22 mm

BOF: 0/22 mm

EAF: 0/22 mm

Particle size distribution - GNT 0/20 - Other than F aggregates - Grading envelop (NF P 98-129)

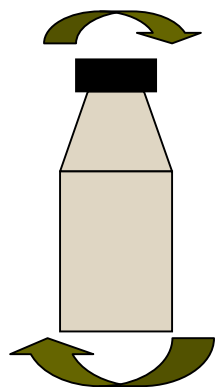


M1 = 15% HFG + 85% HFC

M2 = 15% HFG + 60% HFC + 25% BOF

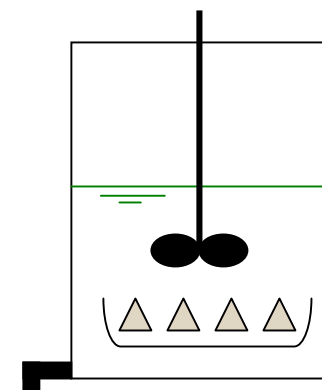
## Caractérisation du potentiel polluant

**Lixiviation - EN 12457-4: L/S = 10 l/kg; < 10 mm; pH nat; 24h – FEhS**



**0,1 kg / 1 l**

« Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues »  
DIN 384-S4; AFNOR X 31-210; NEN 7343; ÖNORM S 2072



**Eluat de granulats – EN 1744-3: L/S 10 l/kg; < 32 mm; 24 h - FEhS**

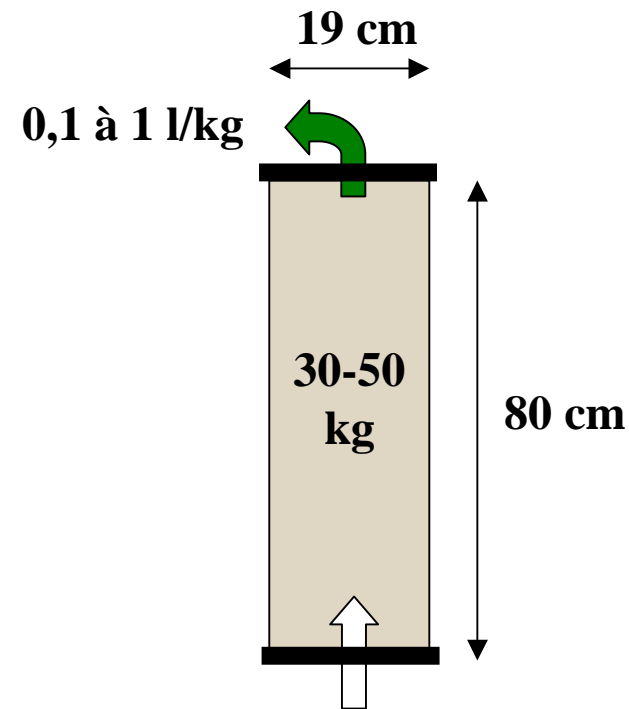
**2 kg / 20 l**

« Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats »  
CEN/TC 154 « Granulats »

# Caractérisation du potentiel polluant

**Percolation ascendante – CEN TC 292 WG6 – part 1: L/S < 1 l/kg; < 10 mm - LECES**

« Essai de comportement à la lixiviation »  
PR EN 14405; X30-465PR

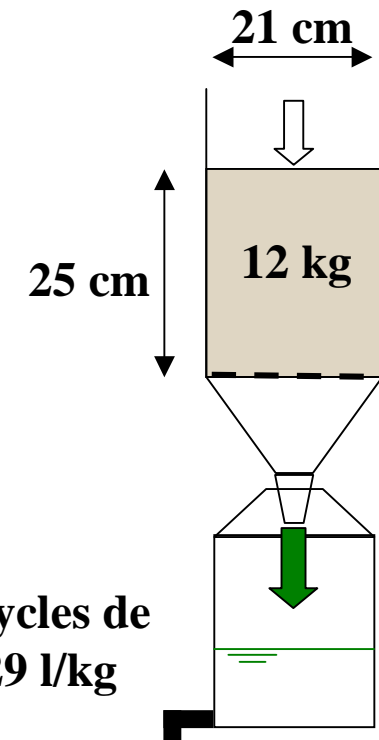




# Caractérisation du potentiel polluant

## Lysimètre de laboratoire - non normalisé – FEhS

« Essai de comportement à la lixiviation »  
PR EN 14405; X30-465PR



## Cases lysimétriques - non normalisé - LCPC

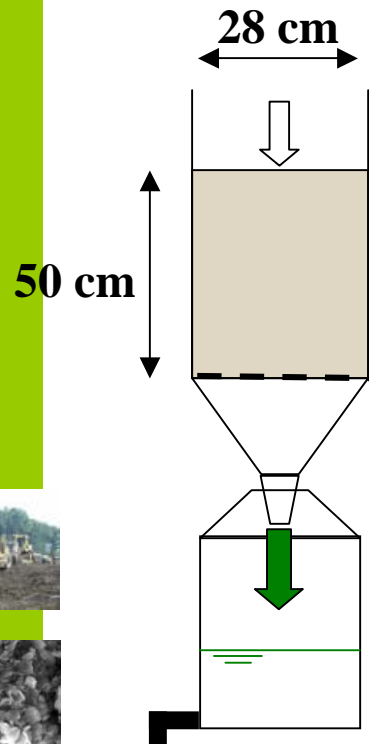


# Méthode: Effets des contraintes climatiques

L'esprit de recherche au cœur des réseaux

## Essai en chambre climatique (lysimètres) - non normalisé - ARCS

### Cylindre de percolation



**Matériau compacté**

### 1°) Cycles Humidification-Séchage

- 8 x 1,8 l (8 semaines)
- 3 mois secs
- 25 x 1,8 l (25 semaines)
- 5 mois secs
- 7 x 1,8 l (7 semaines)

### 2°) Cycles Gel-Dégel

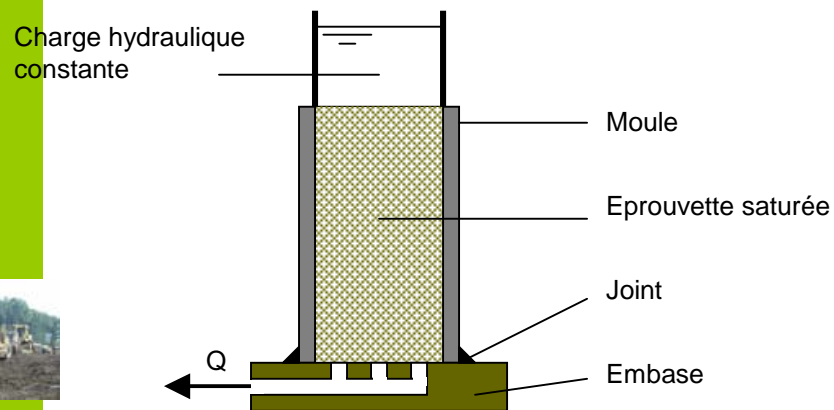
- 3 x (-20°C; 3 jours; + 20°C; 4 jours; + 0,6 l)

$\rho_s$	GBF	CBF	BOF	EAF	M1	M2	M3
ARCS	1,5	1,8	2,5	2,2	1,8	1,9	1,8
LRPC	1,6	1,9	2,7	2,5	1,9	2,1	-

# Méthode: Caractérisation hydrodynamique

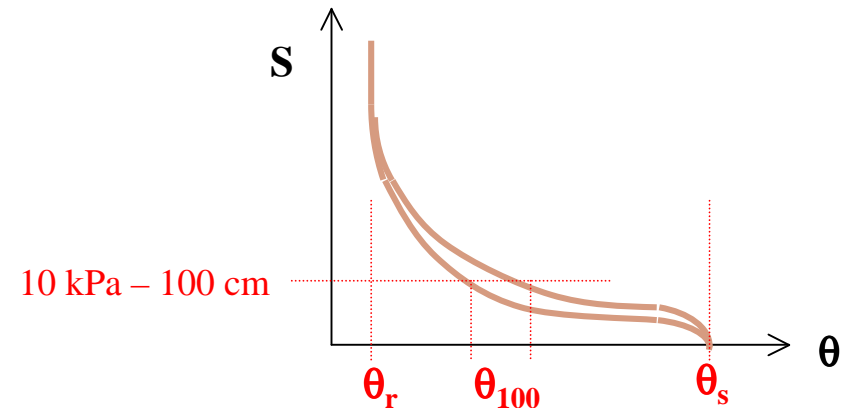
## Caractérisation hydrodynamique ( $K_s$ et rétention) - non normalisé - LCPC

### Perméabilité $K_{sat}$



$$K_{sat} = f(V, t, \phi)$$

### Courbe de rétention $S = f(\theta)$



**Matériau  
compacté**

## Méthode: Etudes sur ouvrages

### **Etude sur ouvrage ancien: – LCPC, LRPC, LECES**

- **Potentiel polluant du laitier après  $x$  années en place;**
- **Effet à long terme des laitiers sur la qualité du sol support;**
- **Effet des laitiers sur la qualité de l'eau de nappe.**

**➡ Recherche d'ouvrage**

### **Etude sur ouvrage récent : – LCPC, LRPC, LECES**

- **Suivi du relargage en condition réelle depuis  $t_0$ ;**
- **Effet à court terme des laitiers sur la qualité du sol support.**

**➡ Recherche de chantier**



## Méthode: Etudes sur ouvrages

### Site ancien: Critères:

- sol support fin (argileux, limoneux)
- zone non saturée de faible épaisseur (aquifère proche)
- aquifère lent (dispersion faible)
- pas d'interférence avec d'autres laitiers (ambiance)

### Site expérimental:

#### Critères:

- sol support fin (argileux, limoneux)
- pas d'interférence avec d'autres laitiers ou eaux de ruissellement (ambiance)



## Résultats: Analyse chimique totale

L'esprit de recherche au cœur des réseaux

Majeurs	LHF c	LHF g	LHF bib	BOF	BOF bib	AEF	AEF bib
CaO (%)	39,6	43,7	40 - 48	42,5	40 - 45	27,8	24 - 29
SiO <sub>2</sub> (%)	33,9	34,8	32 - 41	12,3	10 - 15	<b>19,0</b>	6 - 16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	11,0	10,3	9 - 18	2,1	1 - 2	<b>9,6</b>	12 - 14
MgO (%)	7,6	8,8	1 - 9	4,8	2 - 8	2,9	2,9 – 3,4
MnO (%)	0,4	0,2	0,4 – 0,7	6,0	5 - 7	3,6	5 - 16
Fe tot (%)	0,8	0,4	0,2 - 1	20,4	20 - 25	19	27 – 35*
S tot (%)	1,0	0,7	0,6 – 1,5	<b>0,07</b>	0,05	0,3	-

\* FeO

Traces	LHF c	LHF g	LHF bib	BOF	BOF bib	AEF	AEF bib
Cd (ppm)	0,2	< 0,1	< 0,4	< 0,1	0,45	1,3	-
Cr (ppm)	<b>54</b>	32	34,6	<b>1895</b>	7760	<b>7480</b>	3956
Cu (ppm)	<b>38</b>	< 10	5,7	15	166	227	-
Pb (ppm)	< 20	<b>32</b>	< 0,4	< 20	21,5	<b>48</b>	2042
Zn (ppm)	<b>42</b>	<b>56</b>	< 6	55	244	858	-

# Paramètres chimiques suivis

L'esprit de recherche au cœur des réseaux

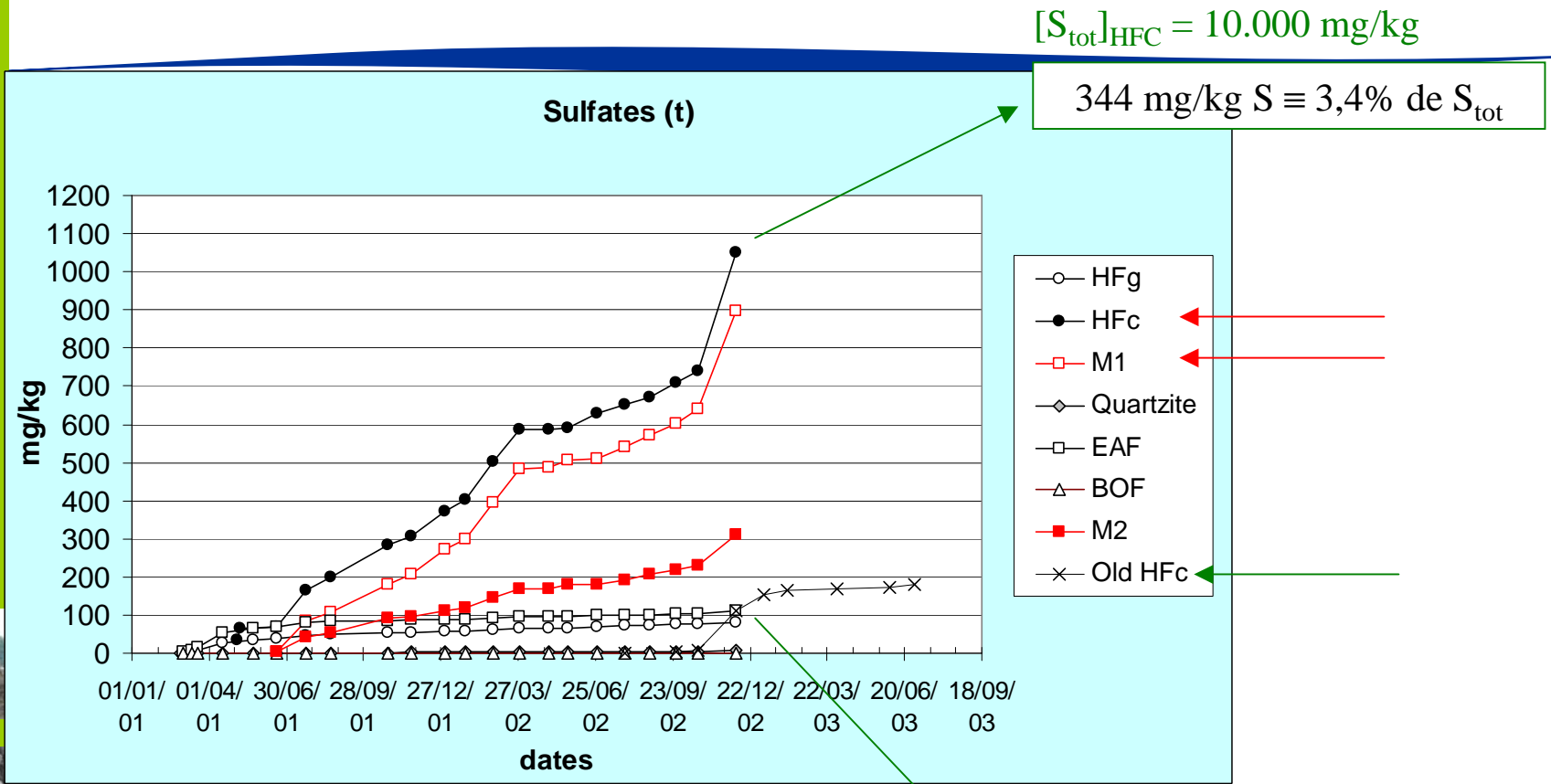
Parameters	Materials						
	GBF slag	CBF slag	BOF slag	EAF slag	Mixture M1	Mixture M2	Quartzite
pH	+	+	+	+	+	+	+
Elec. Cond.	+	+	+	+	+	+	+
COD	+	+	+	+	+	+	+
Chlorides	+	+			+	+	+
Sulphates	+	+			+	+	+
Thiosulphates	+	+			+	+	
Fluorine			+	+	+	+	+
Phenols	+	+			+	+	
Calcium			+	+	+	+	+
Copper			+	+	+	+	+
Cadmium			+	+	+	+	+
Chromium tot.			+	+	+	+	+
Nickel			+	+	+	+	+







# Résultats: Cases lysimétriques - Sulfates



$[S_{tot}]_{HFC} = 10.000 \text{ mg/kg}$

344 mg/kg S  $\equiv$  3,4% de  $S_{tot}$

$[S_{tot}]_{EAF} = 3.000 \text{ mg/kg}$

33 mg/kg S  $\equiv$  1,1% de  $S_{tot}$

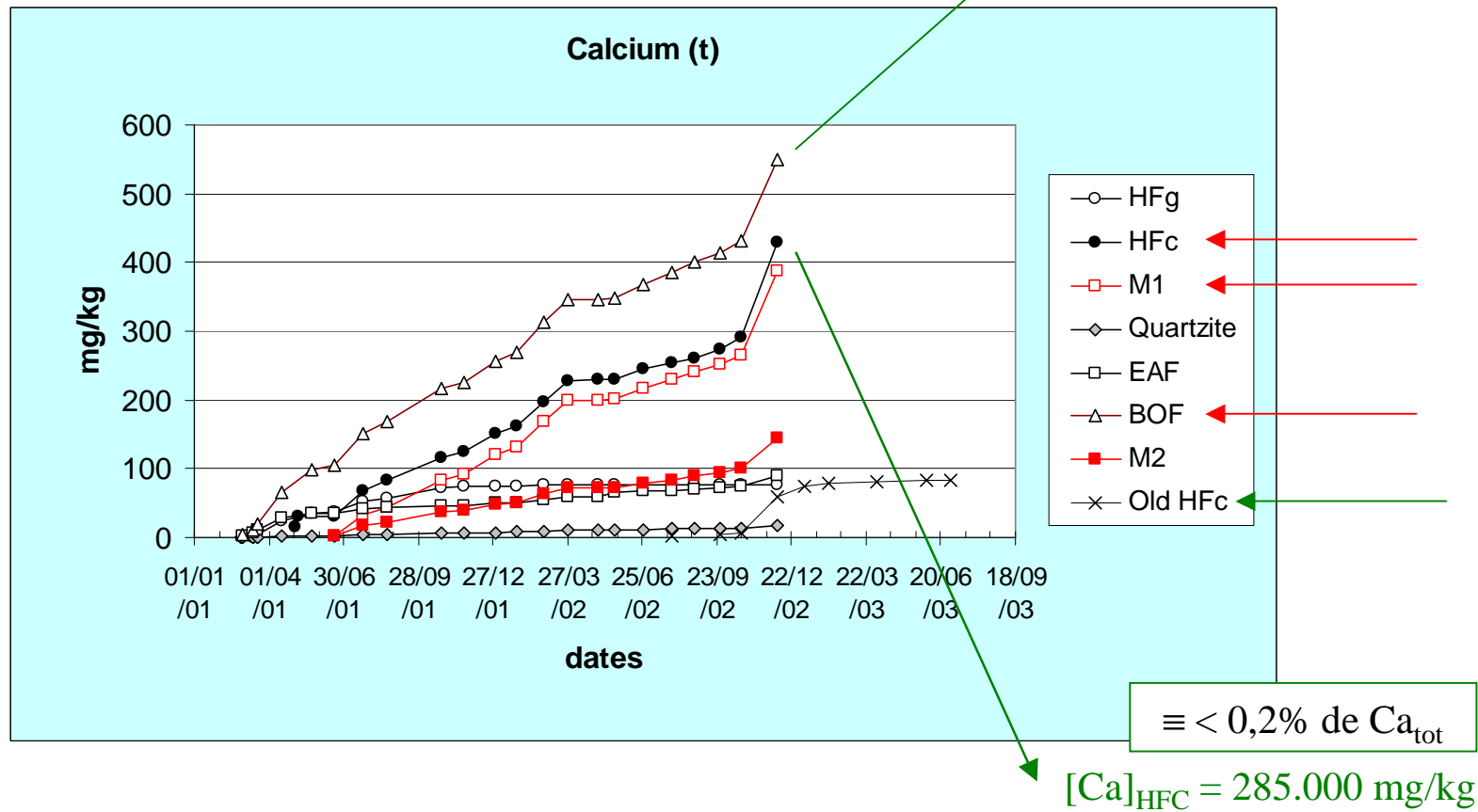
(M1 = 15% HFG + 85% HFC)



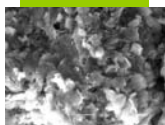
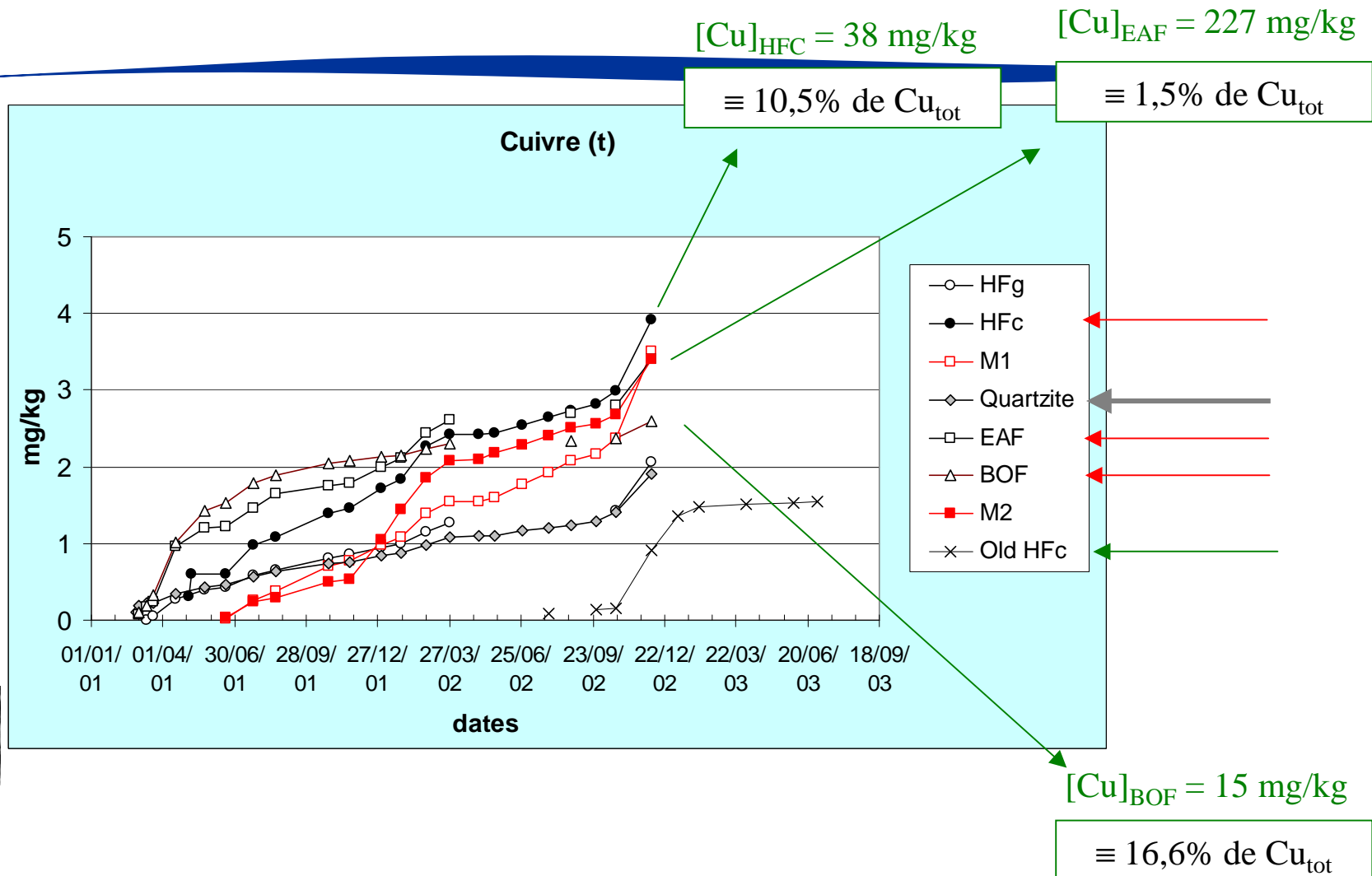
# Résultats: Cases lysimétriques - Calcium

$\equiv < 0,2\%$  de  $Ca_{tot}$

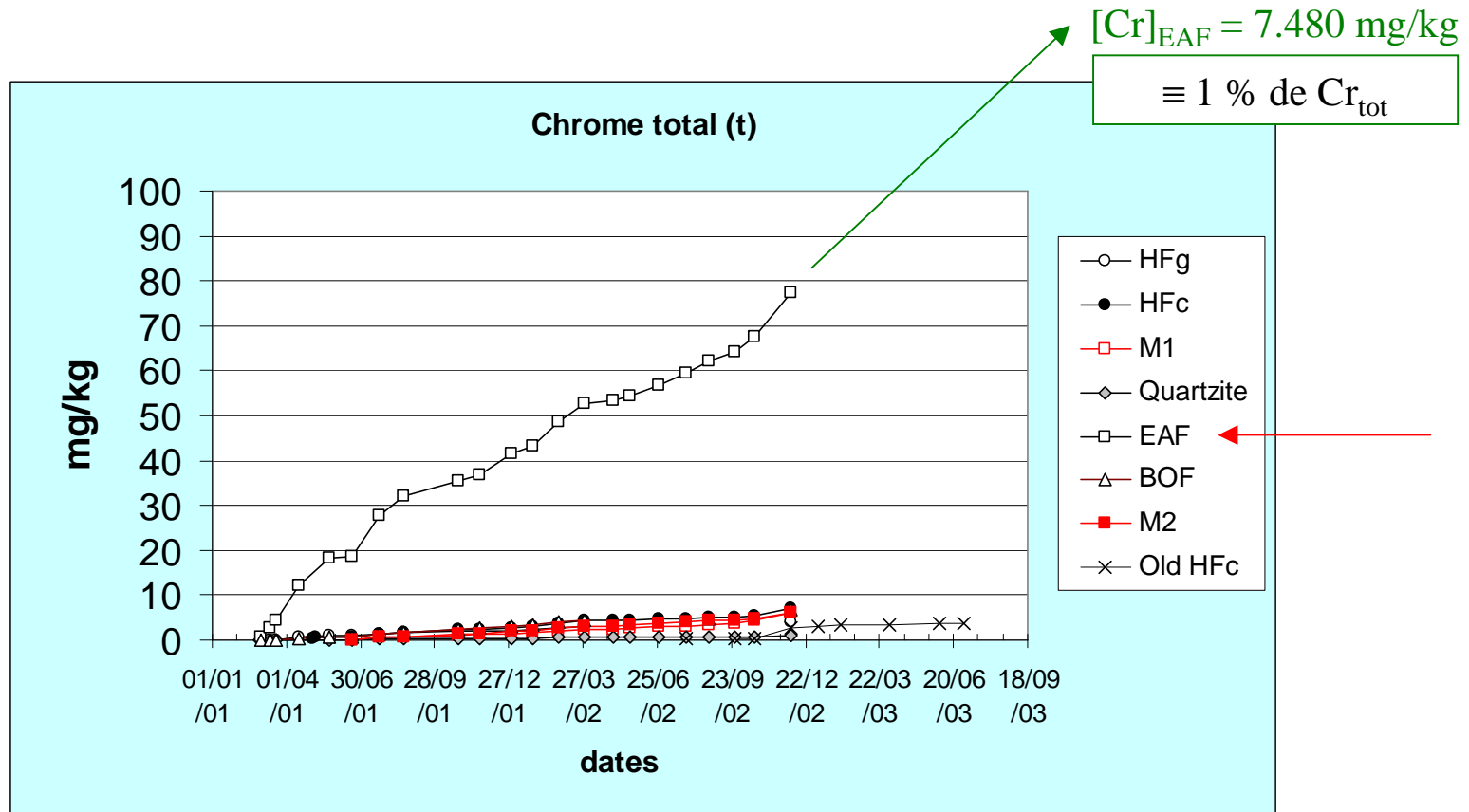
$[Ca]_{BOF} = 305.000 \text{ mg/kg}$



# Résultats: Cases lysimétriques - Cuivre

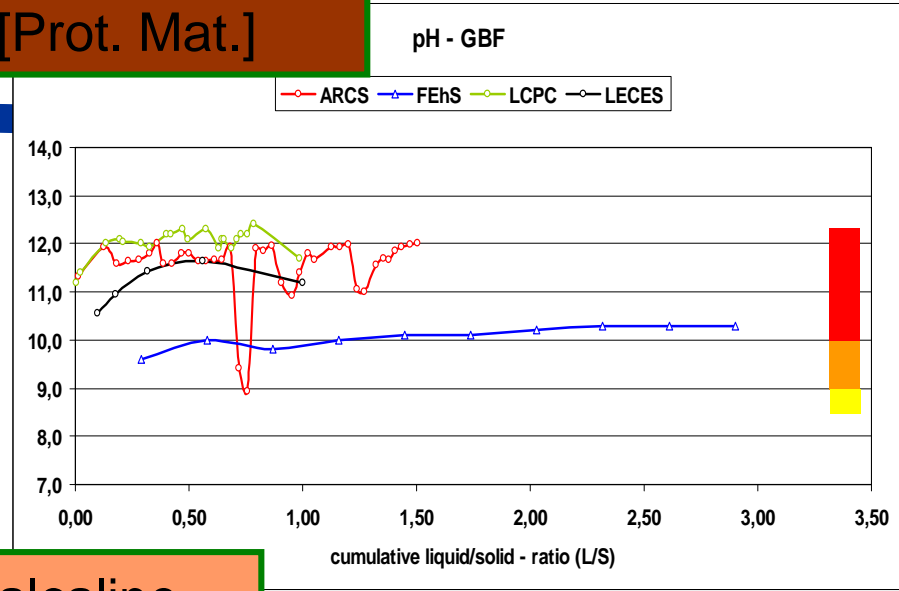
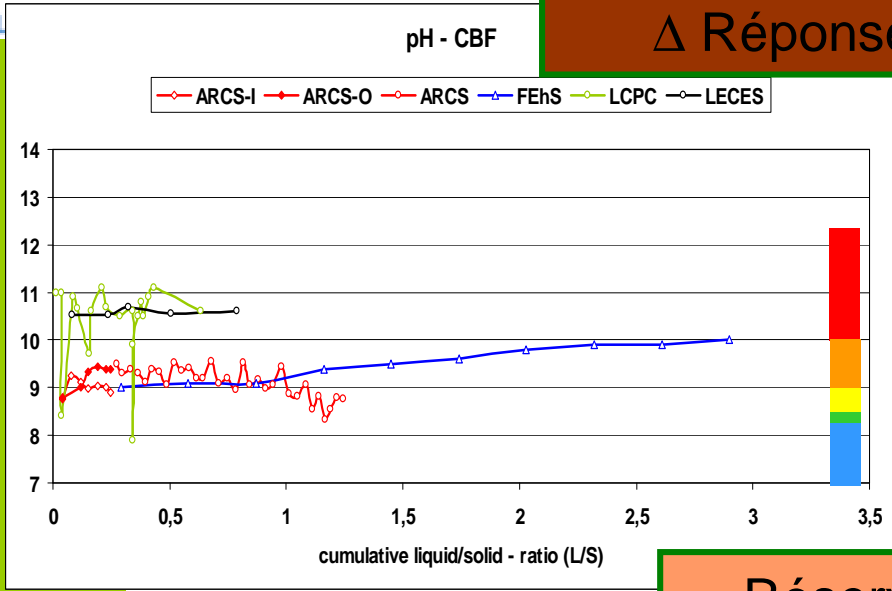


# Résultats: Cases lysimétriques – Chrome total

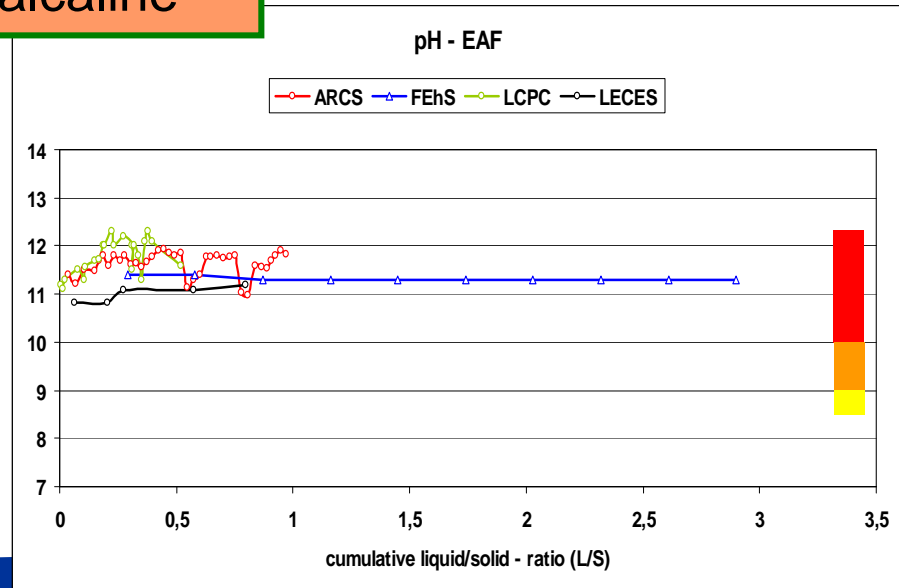
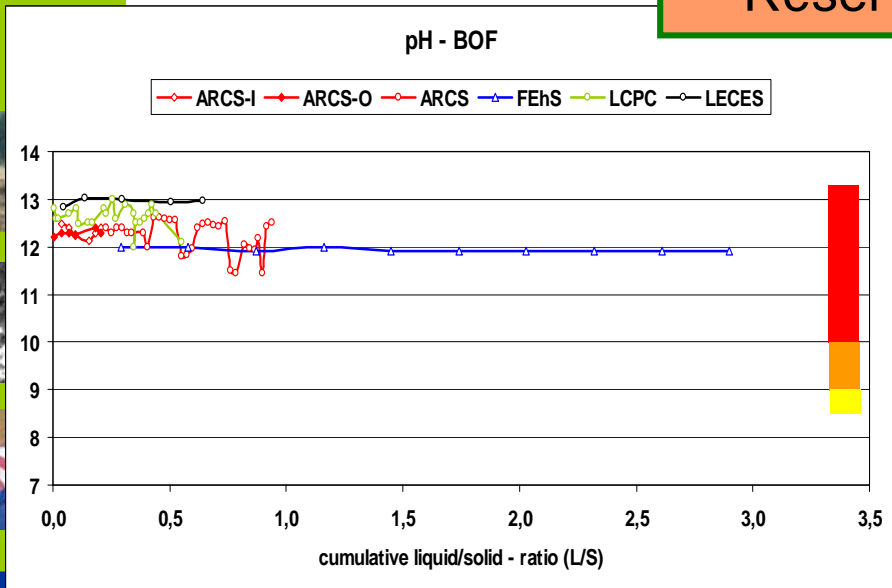


# Résultats: Différents protocoles – pH

## Δ Réponses [Prot. Mat.]

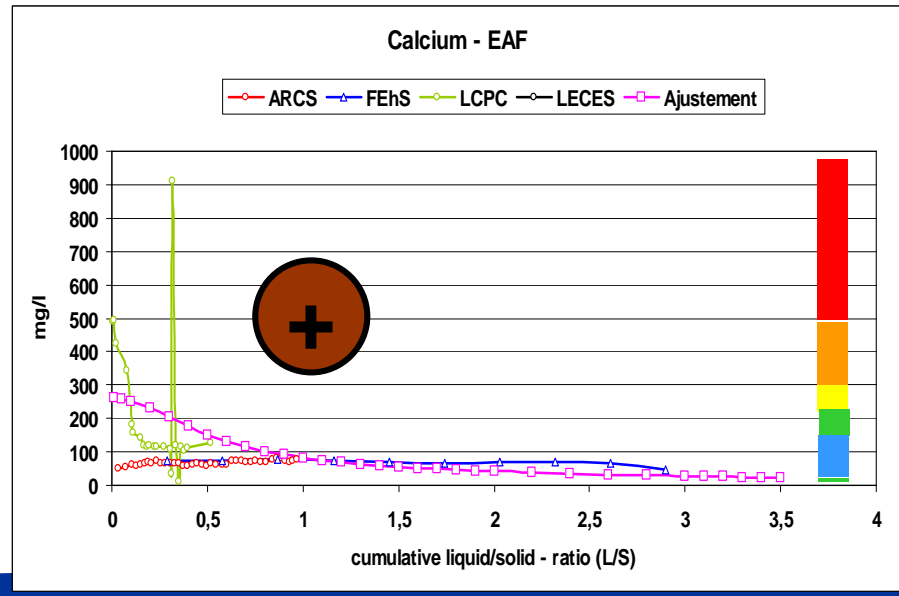
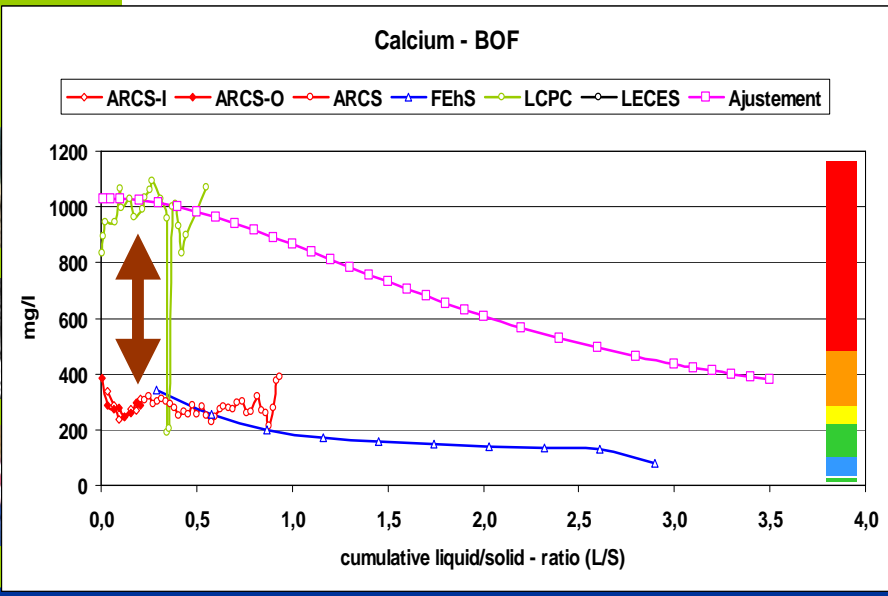
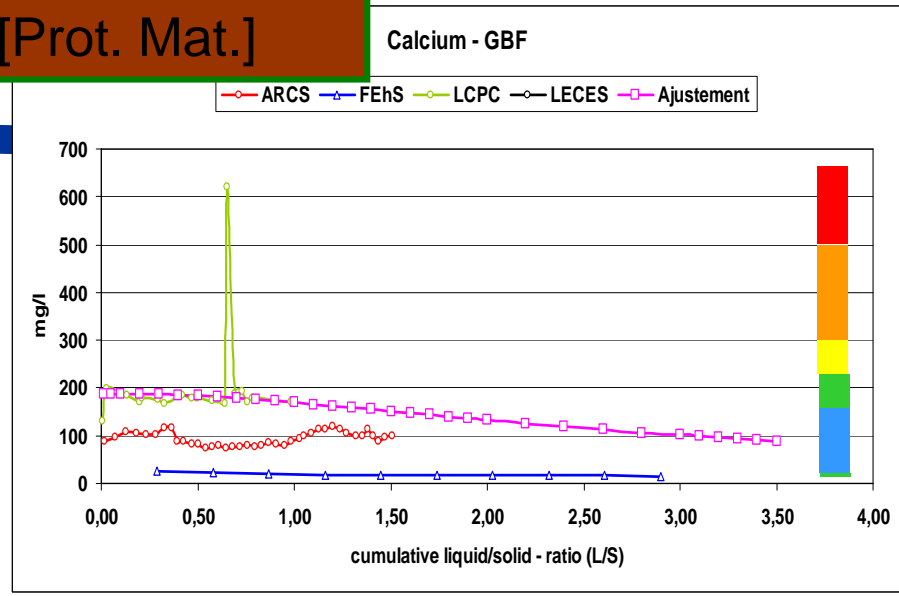
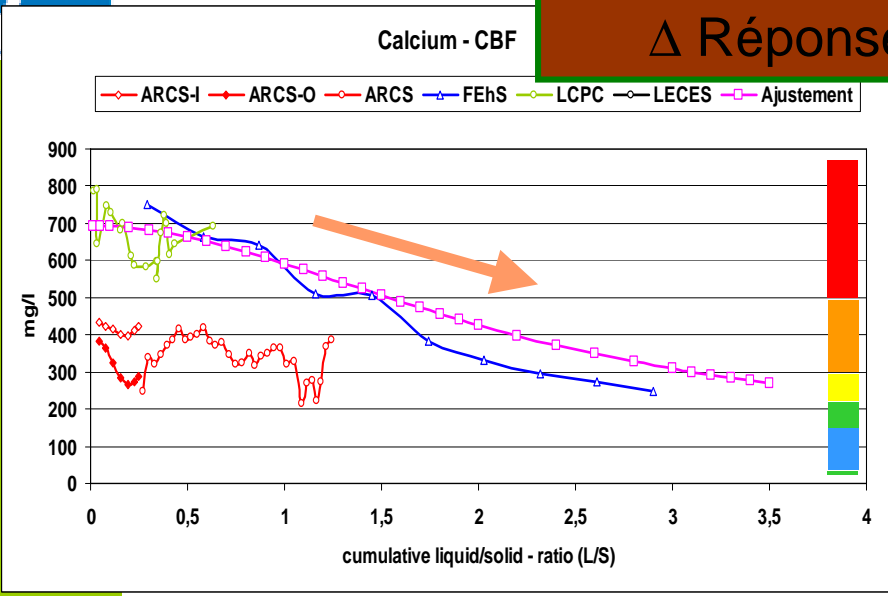


## Réserve alcaline

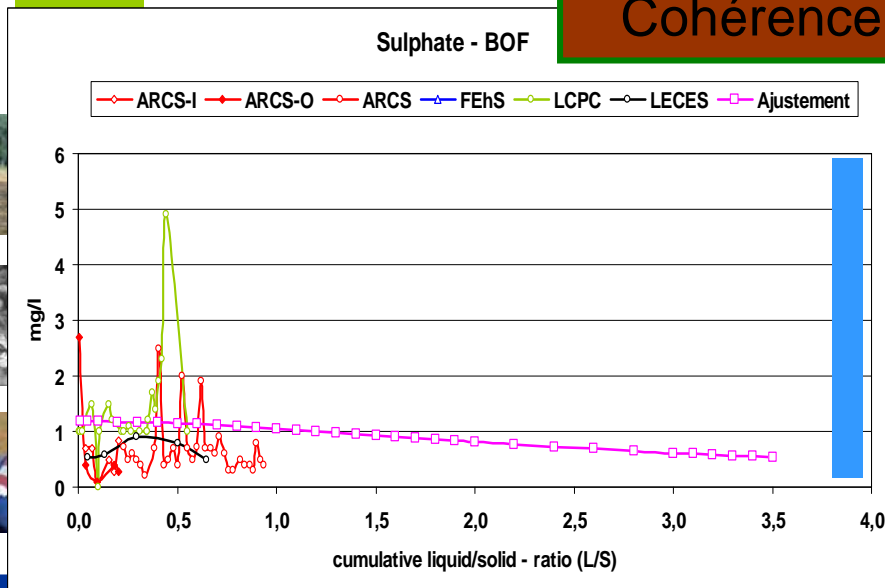
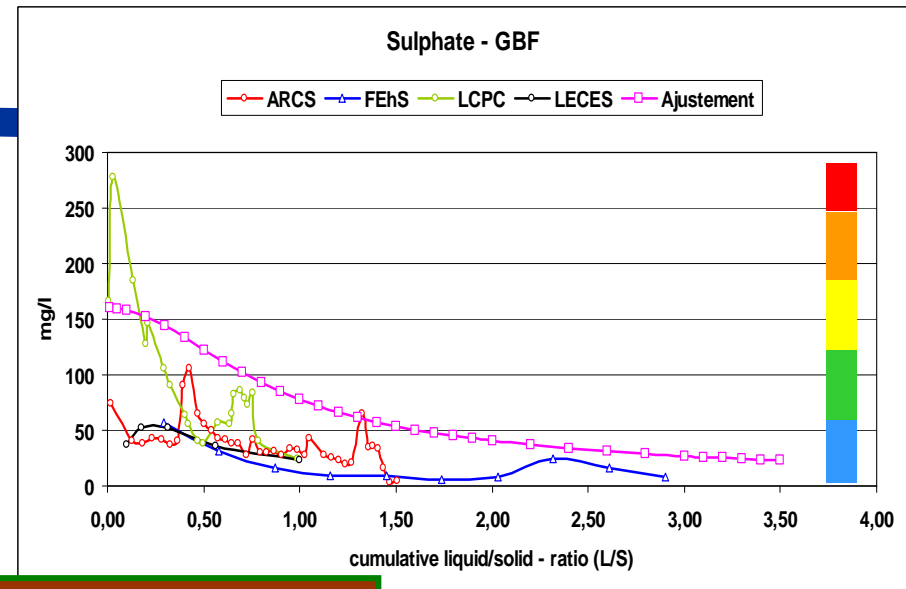
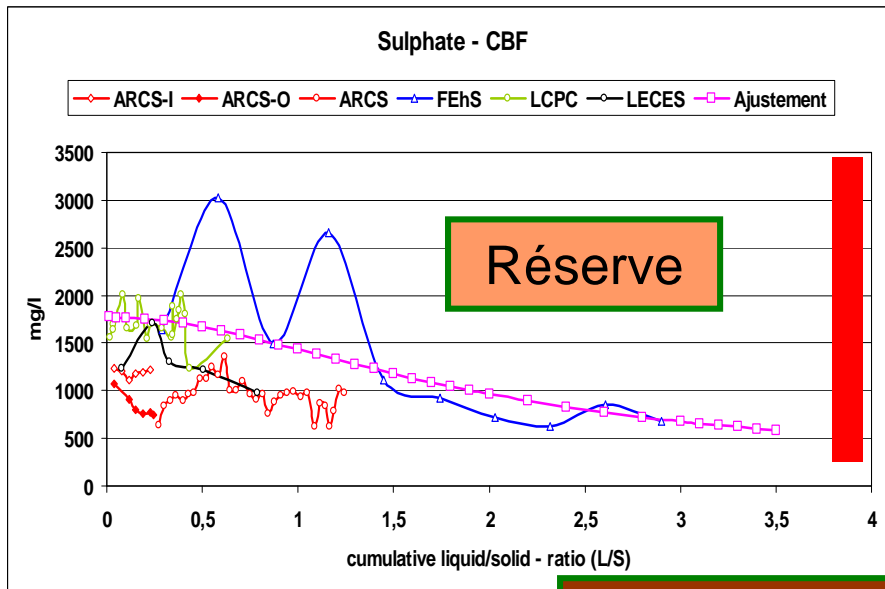


# Résultats: Différents protocoles – [Calcium]

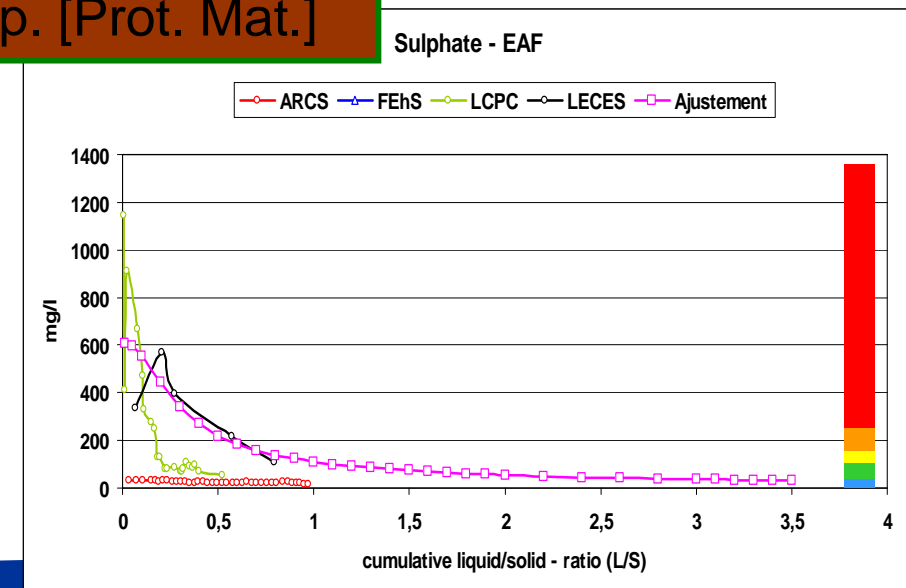
$\Delta$  Réponses [Prot. Mat.]



# Résultats: Différents protocoles – [Sulfates]

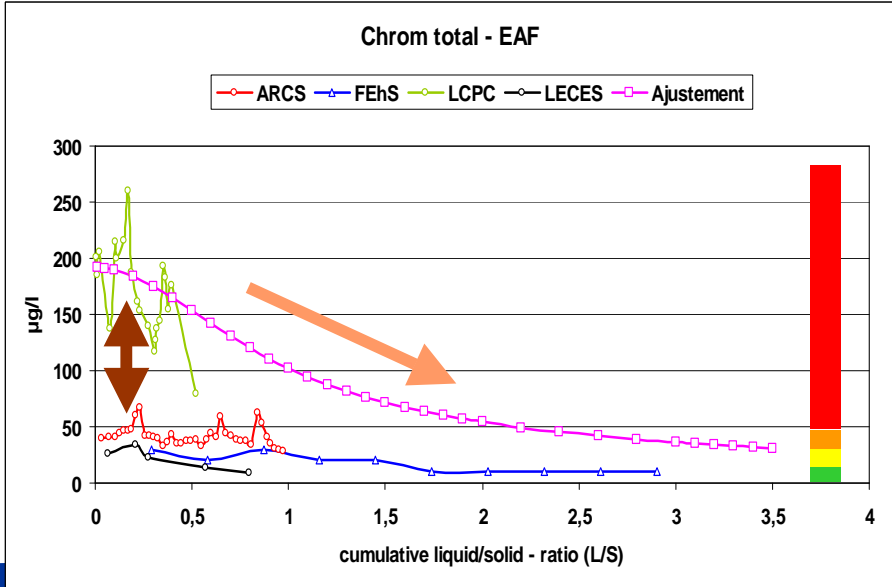
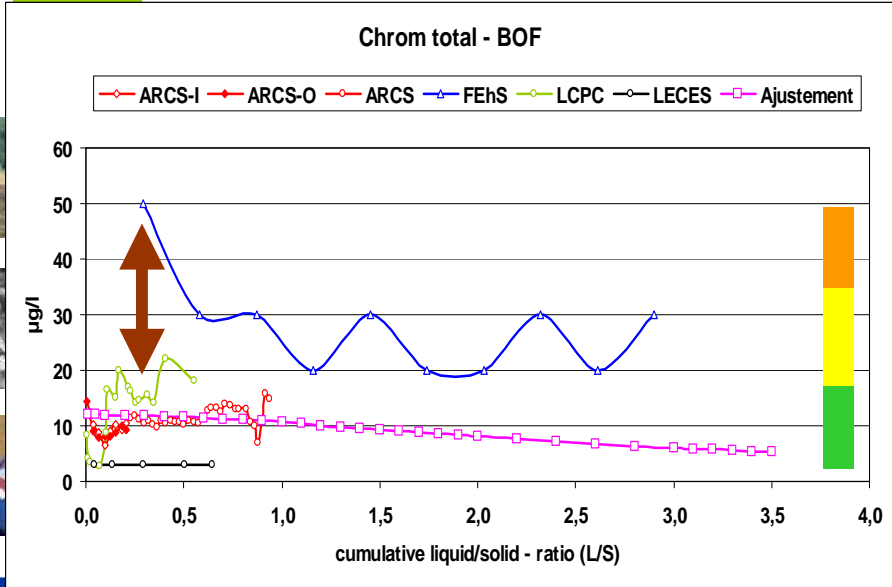
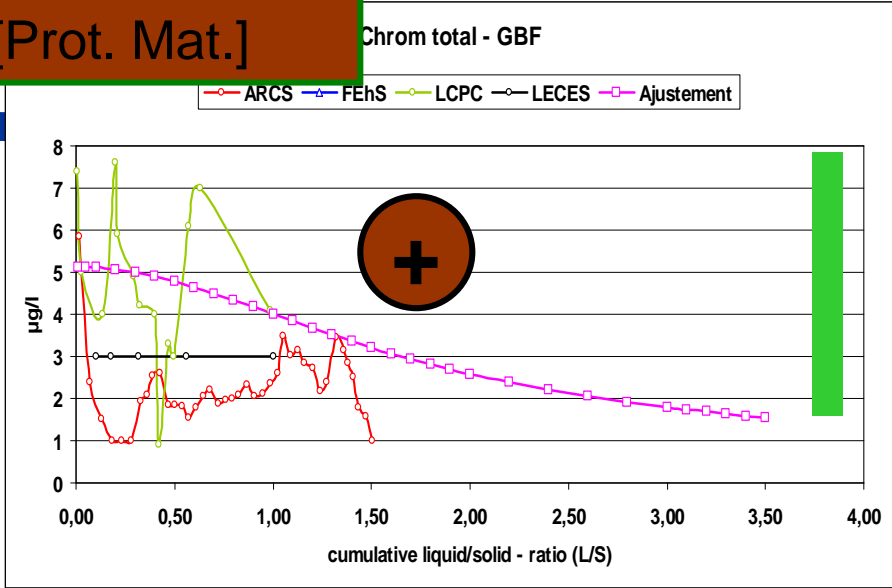
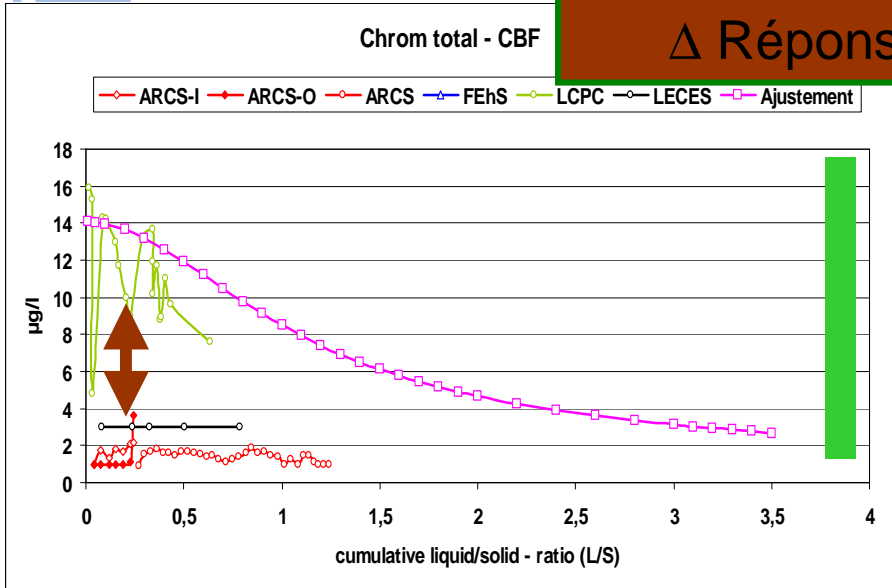


**Cohérence Rép. [Prot. Mat.]**



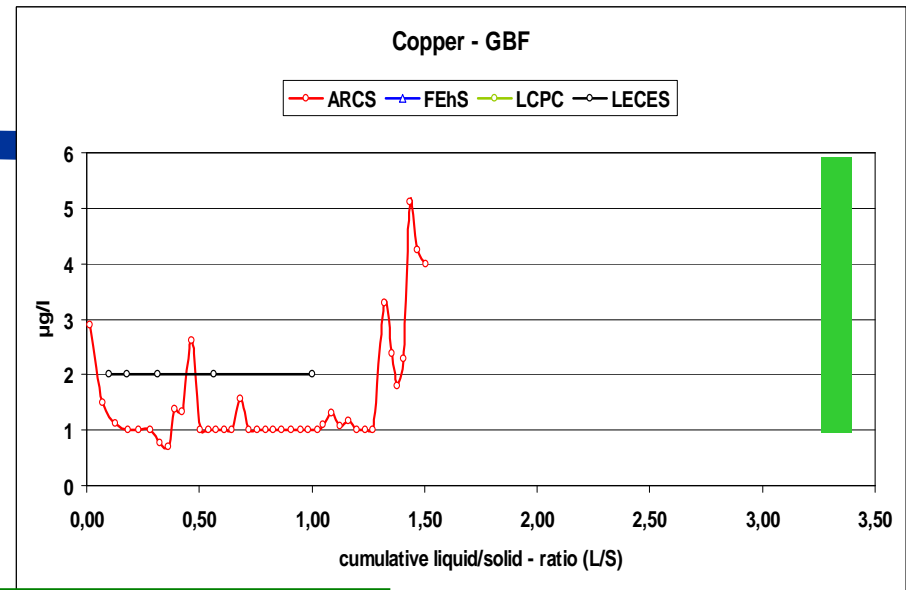
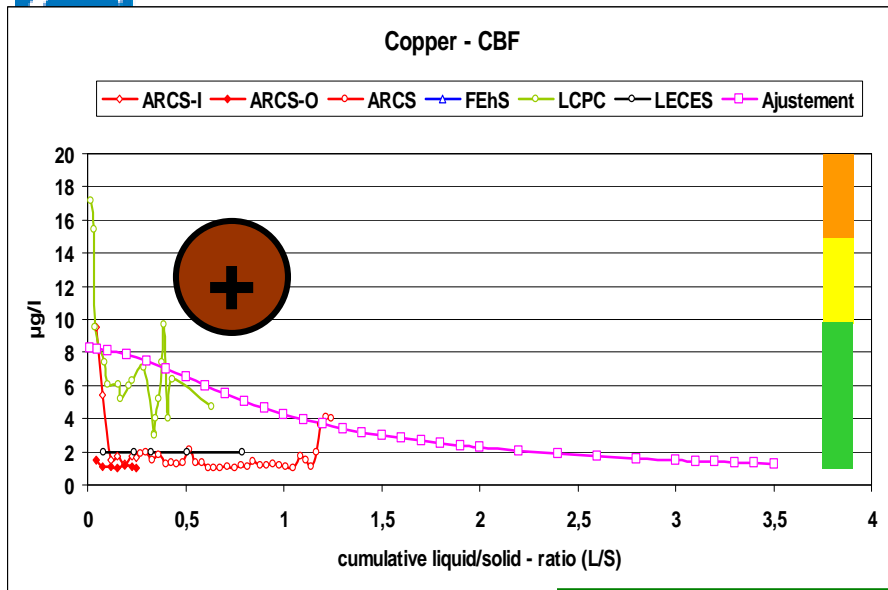
# Résultats: Différents protocoles – [Chrome]

$\Delta$  Réponses [Prot. Mat.]

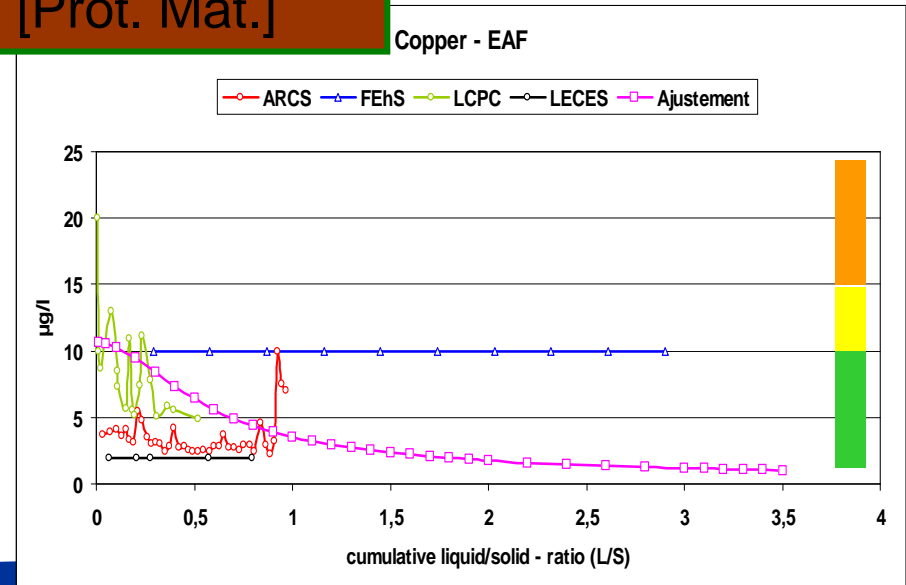
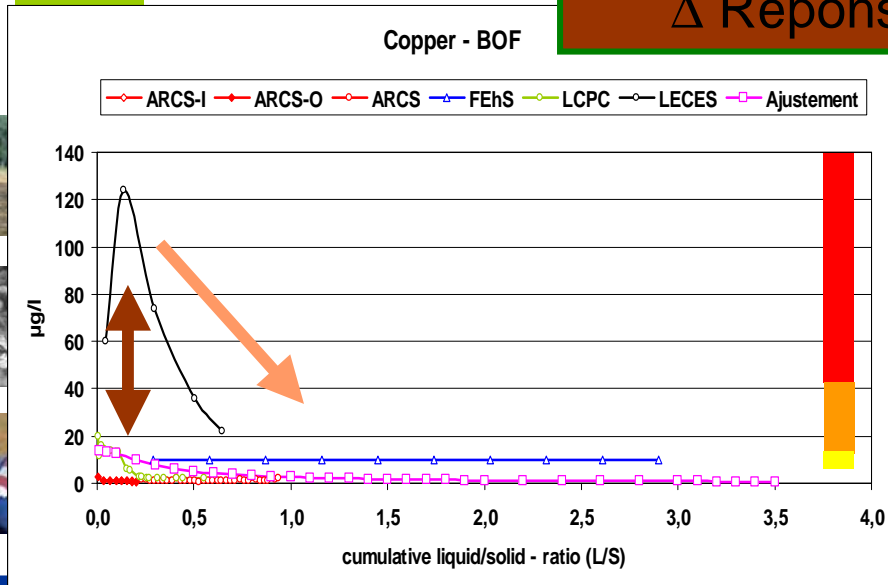




# Résultats: Différents protocoles – [Cuivre]



**Δ Réponses [Prot. Mat.]**



## Résultats: Solubilisation – Paramètres caractéristiques

Laitiers HFC	pH, Ca, $\text{SO}_4^{2-}$
Laitiers HFG	pH, Ca, $\text{SO}_4^{2-}$
Laitiers BOF	pH, Ca, Cu, (Cr)
Laitiers EAF	pH, (Ca), (Cu), Cr



**Alcalinité** des laitiers de fraîche production (connue) – en particulier des **BOF** (pH 12 à 13, jusqu'à L/S = 3 l/kg). **Perte de l'alcalinité** du **vieux HFC**

**Calcium**, solubilisé à partir de **BOF, HFC et M1**.

**Sulfates**, essentiellement dans **HFC et M1** (85% HFC):  $S_{\text{tot}}$  abondant et relativement soluble, notamment par rapport à EAF. **Fortes concentrations** (1.000–2.000 mg/l), **décroissance lente** du flux (1.000 mg/kg à L/S = 0,6 l/kg)



**Calcium**, solubilisé à partir de **BOF, HFC et M1**. Peu de  $Ca^{++}$  pour vieux HFC (pH aussi plus faible)



**Cd, Cu et Ni**: faibles



**Cr**: faible, sauf pour **EAF**

## Réponse des matériaux à **différentes conditions d'essai**:

- **L/S** (lessivage, temps);
- **saturation, aération**;
- **gel-dégel**;
- **humidification-séchage**;

→ Variété des corrélations matériaux-protocoles

→ Bonne conformité pour les sulfates

## **Paramètres caractéristiques:**

- HFC et HFG: **pH, Ca, sulfates**
- BOF: **pH, Ca, Cu**
- EAF: **pH, Cr**



**EAF et HFG** sensibles aux **périodes sèches** (pour Cr et Cl<sup>-</sup> respectivement)

**Gel-dégel**: augmentation des [C] qui atteignent les [C] initiales. Pas pour EAF et HFG

A l'OPM,  $10^{-4} < \mathbf{K}_{\text{sat}} < 10^{-6}$  m/s



