



Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées

# Les journées Chimie

Du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées  
- 2 et 3 décembre 2009 - CETE de Lyon



## Traitement électrochimique de réalcalinisation pour la réparation du béton armé dégradé par carbonatation

(Travaux de thèse de Melle Yun Yun TONG)



Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées

Véronique BOUTEILLER



Elisabeth MARIE-VICTOIRE



Suzanne JOIRET

Partenaires

LR Lille

LREP Melun

LR Le Bourget

RENOFORS

FREYSSINET

# Plan

- ✓ **Introduction**

- 1) **Corrosion par carbonatation**

- 2) **Traitement électrochimique de réalcalinisation**

- ✓ **Résultats et conclusions**

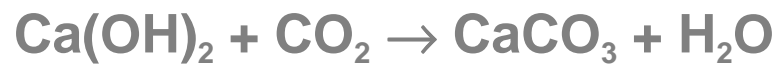
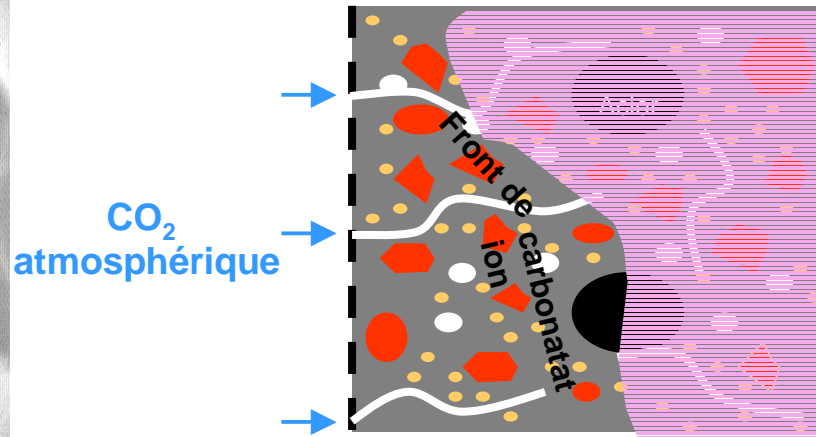
- 1) **Efficacité et durabilité de la réalcalinisation en maintenance**

- 2) **Evolution des produits de corrosion (micro-raman)**

- 3) **Suivi d'ouvrage**

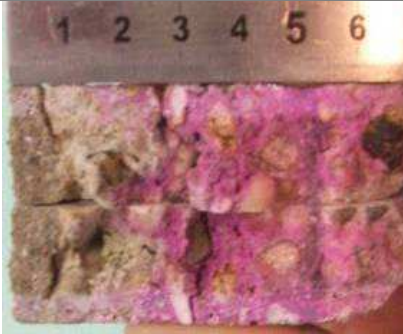
# La carbonatation du béton, une cause majeure de corrosion des armatures

Corrosion par carbonatation

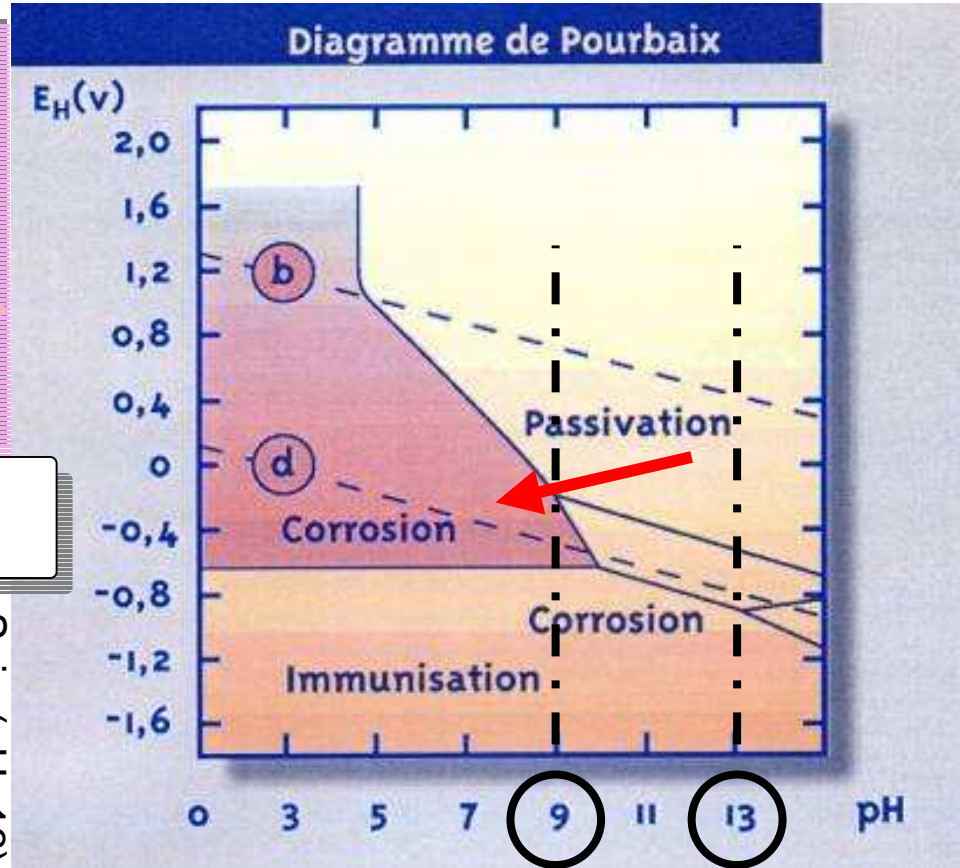


Phénolphtaléine

Carbonaté (pH=9)



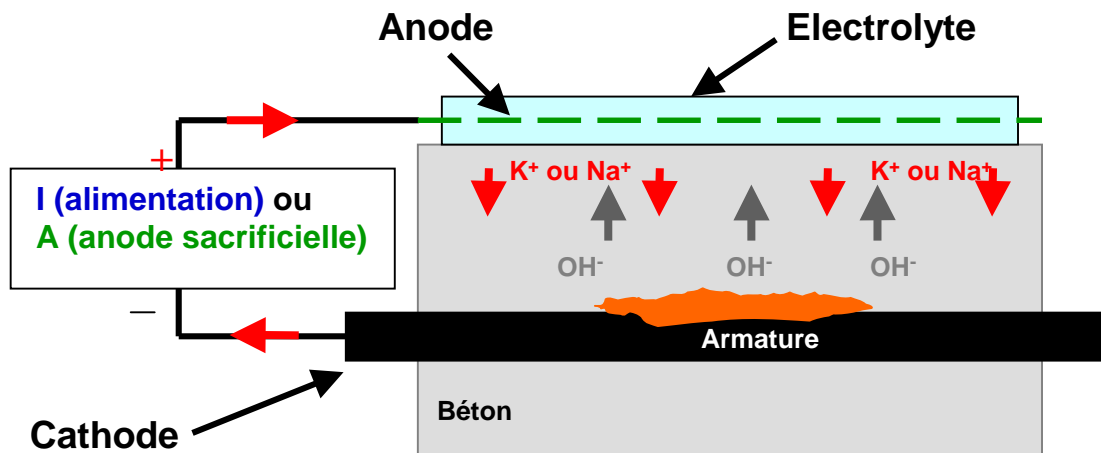
Sain (pH=13)



- Les armatures ne sont plus dans un environnement protecteur et la corrosion peut se produire
- Les produits de corrosion sont expansifs et conduisent à la fissuration du béton
- Risque structurel et
- Risque pour les usagers

# Traitement électrochimique de réalcalinisation

- **But** : redonner au béton d'enrobage un pH suffisamment basique et donc sa capacité à protéger les armatures
- **Principe et mécanismes mis en jeu lors du traitement de réalcalinisation**

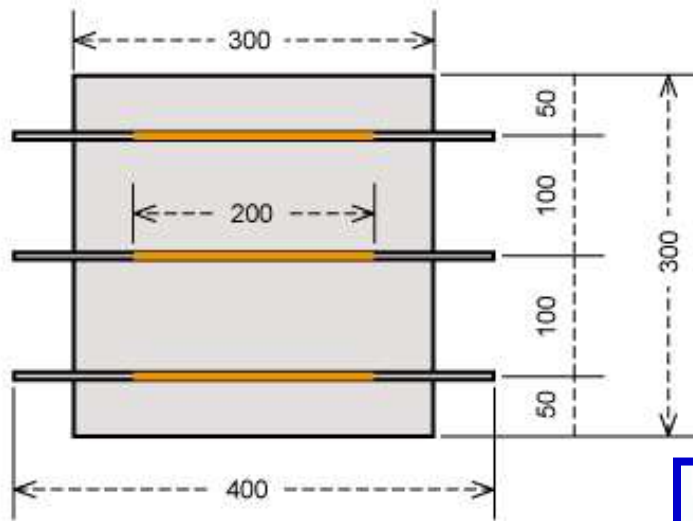


- ✓ Electrolyse de l'eau ( $H^+ \downarrow$ )
- ✓ Electromigration ( $Na^+$ ,  $K^+$  et  $OH^-$ )
- ✓ Electro-osmose
- ✓ Absorption capillaire
- ✓ Diffusion

- **2 procédés** : **courant imposé « I »** et **anode sacrificielle « A »**
- **Réglementation** - Spécification technique CEN/TS 14038-1
  - ➔ Charge totale de courant minimum = 200 A.h/m<sup>2</sup> d'acier
  - ➔ Vérification par la phénolphthaléine

# Corps d'épreuve en béton armé – Dallettes « A3 »

## ➤ Fabrication



CEM I, 275 kg/m<sup>3</sup>, e/c=0,7  
Fe234, rond lisse, phi=6mm

## ➤ Carbonatation accélérée

1 mois de préconditionnement (45°C et 60%HR)

Suivi de 2 mois de carbonatation (22°C, 60%HR  
et 50%CO<sub>2</sub>)

## ➤ Etat de corrosion initiale



## ➔ Traitement de maintenance



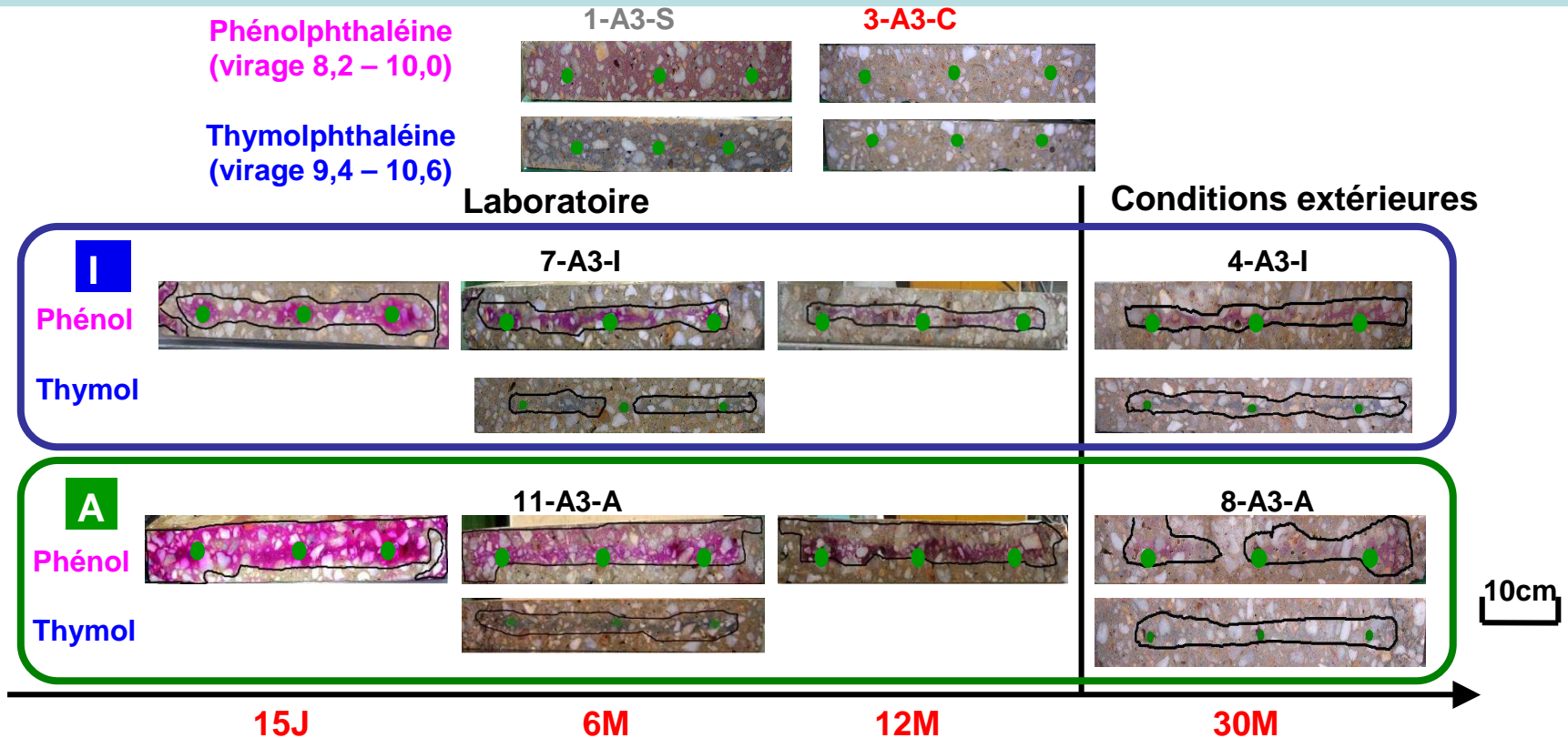
Durée du traitement : 8,5J pour I et 1M pour A

Echéances de mesures : avant, 15J, 10S, 6M,  
12M, 24M, 30M après traitement.

Vieillessement naturel

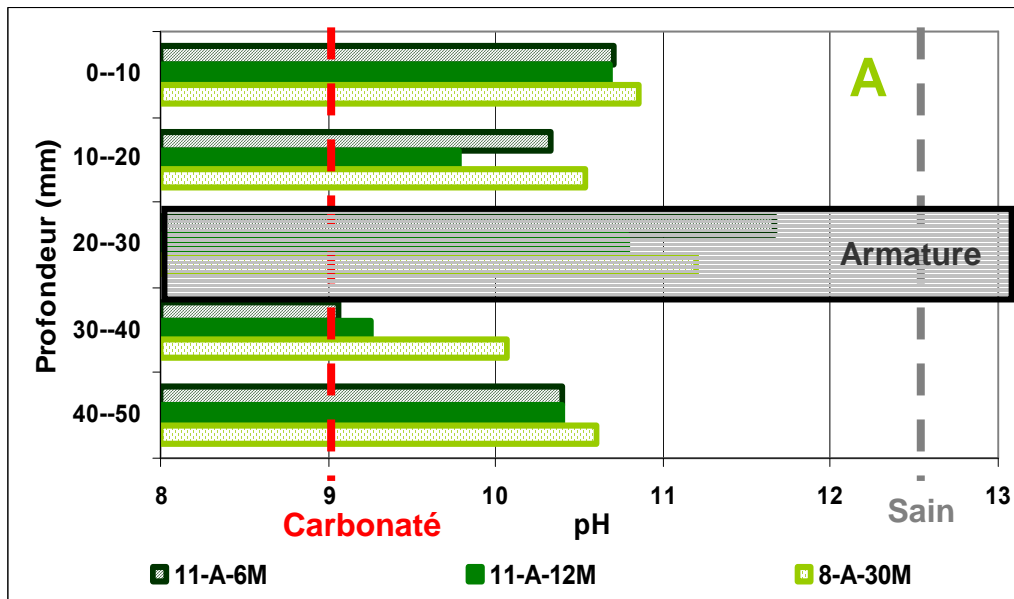
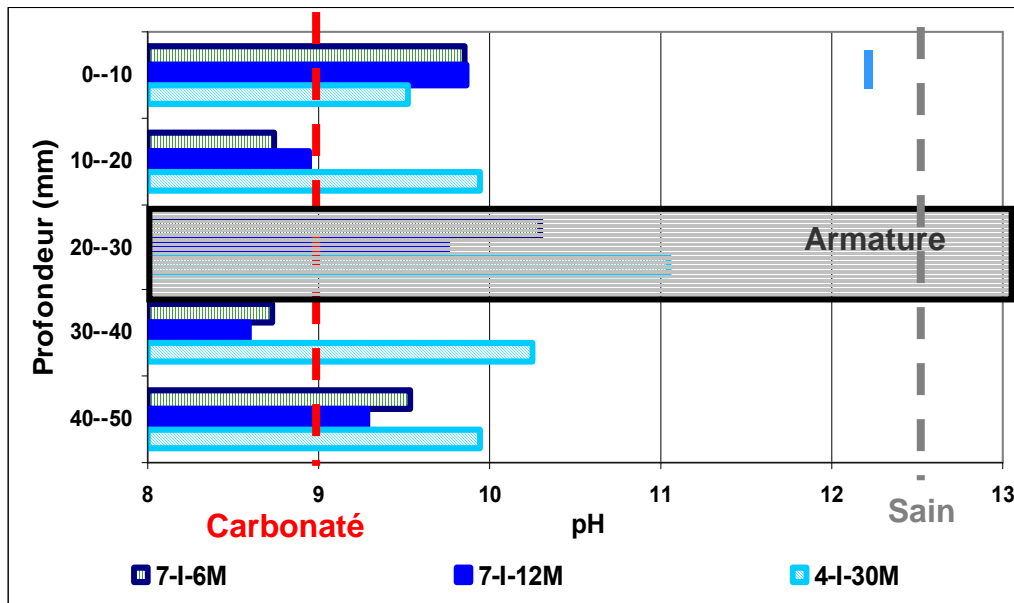
# Evolution de la basicité du béton - Indicateurs colorés

Résultats – Maintenance



- Témoin sain : rose et bleu
- **Témoin carbonaté : incolore**
- **I** → Réalcalinisation autour des armatures
- **A** → Réalcalinisation autour des armatures et sur le parement
- 30M après traitement, la couleur est moins soutenue et la zone est réduite  
 → pérennité ??? → besoin de mesures de pH quantitatif

# Evolution de la basicité du béton - pH quantitatif



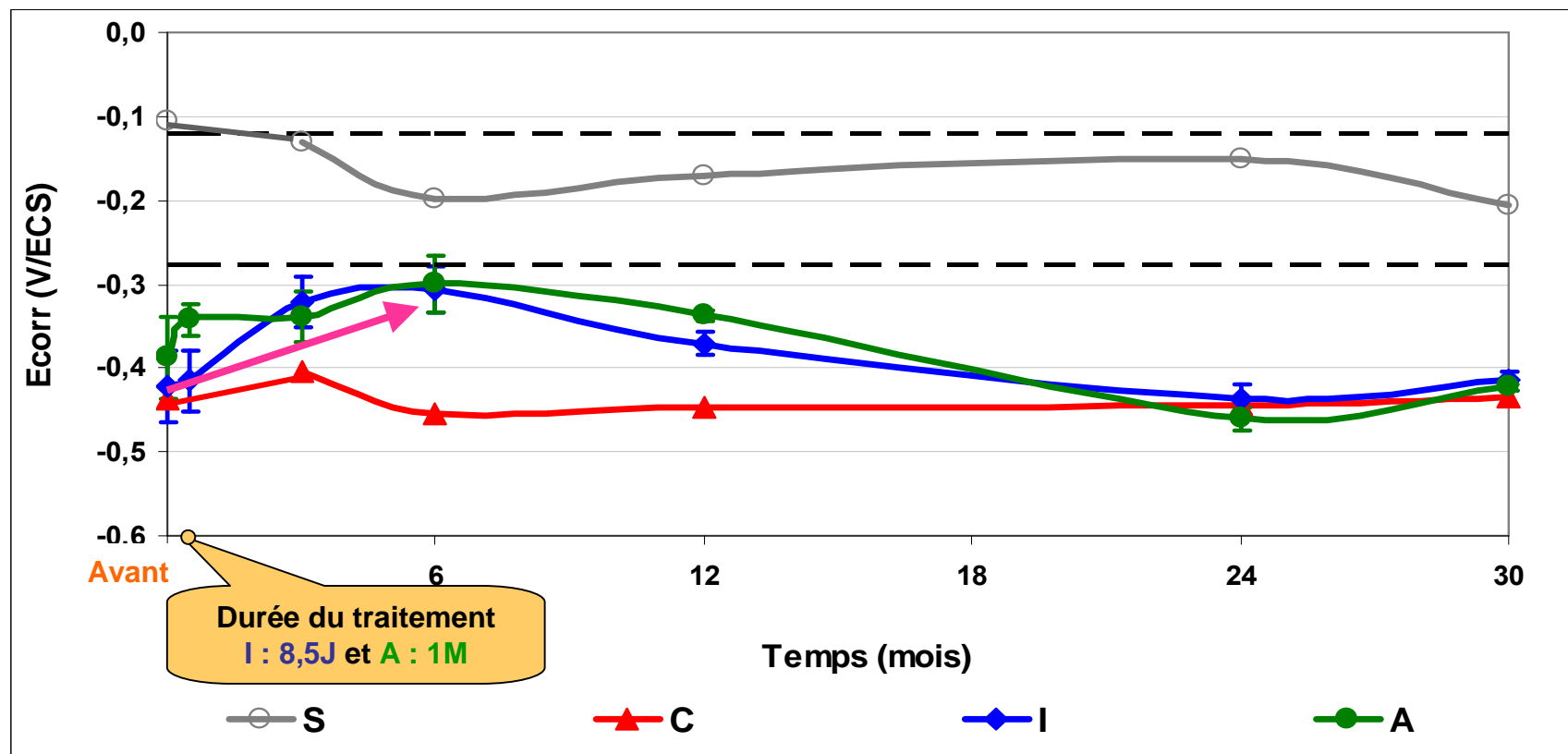
## ➤ pH quantitatif

- Le pH d'un béton réalcalinisé n'atteint jamais un béton sain (12,5)!
- I : Réalcalinisation autour des aciers (10,3) et sur le parement (9,9)
- A : Réalcalinisation autour des aciers (11,7) et sur le parement (10,7)
- pH (A) > pH (I)
- 12M et 30M après : la basicité persiste → **pérennité oui**

## ➤ Cohérence avec pH qualitatif ?

- I → Non
- A → Oui

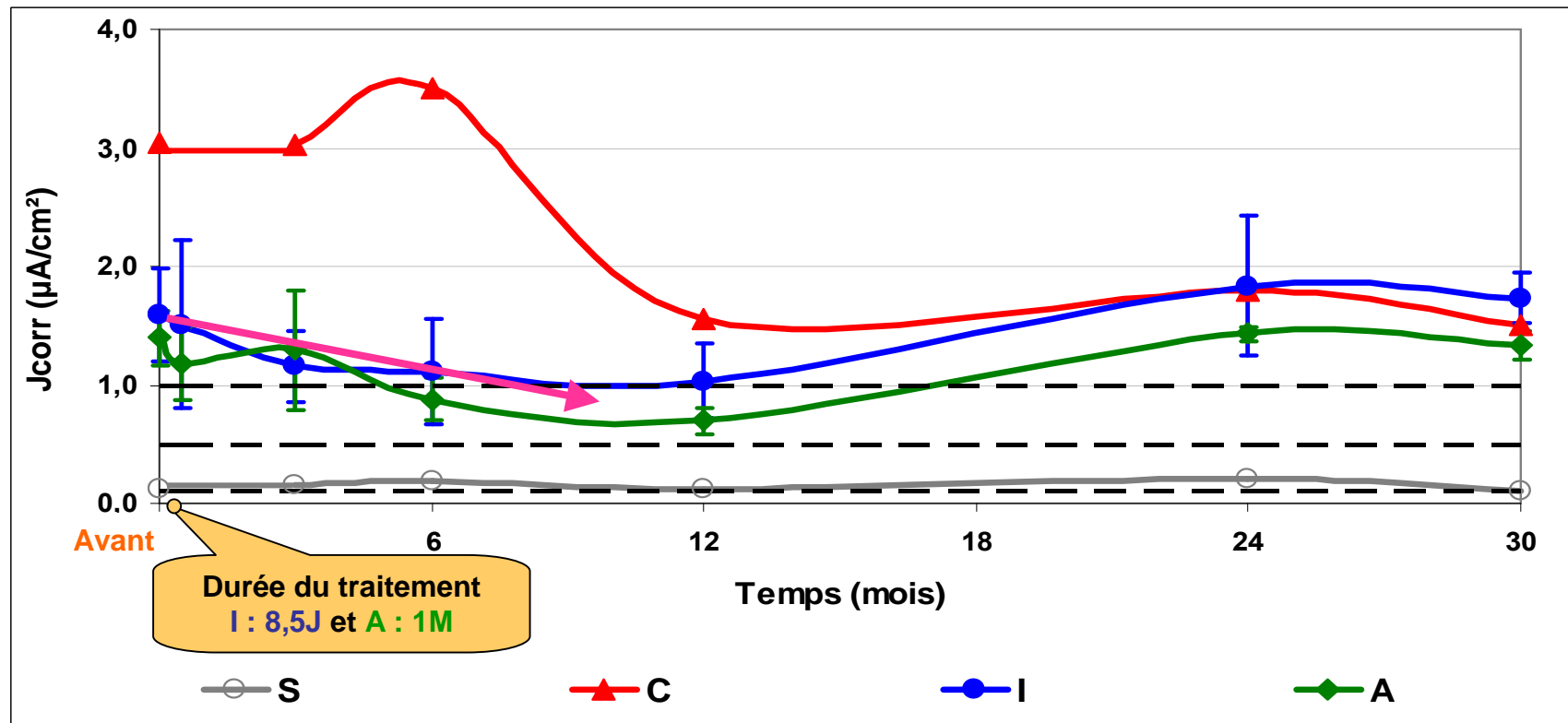
## Evolution de l'activité de corrosion – Ecorr



- S : Ecorr > - 200 mV → probabilité de corrosion incertaine
- C : Ecorr ~ - 450 mV → probabilité de corrosion certaine
- Efficacité I et A : Ecorr avant - 450 mV ; 6M après - 300 mV
- Durabilité I et A : 30M après, retour à la valeur initiale



## Evolution de l'activité de corrosion – Jcorr



- S :  $J_{corr} \sim 0,1 \mu A/cm^2$  → niveau de corrosion faible
- C :  $J_{corr} > 1,5 \mu A/cm^2$  → niveau de corrosion élevé
- Efficacité I et A :  $J_{corr}$  avant  $1,3 \mu A/cm^2$  ; 6-12M après  $< 1,0 \mu A/cm^2$
- Durabilité I et A : 30M après, retour à la valeur initiale

Dispersion des mesures et faible gain → incertitude sur l'efficacité

## Conclusion – discussion

- Les résultats de pH qualitatif et quantitatif démontrent l'efficacité du traitement avec une augmentation de la basicité du béton autour des armatures quel que soit le procédé (I et A); Durabilité ? Oui
- Les mesures électrochimiques indiquent une diminution de l'activité de corrosion 6-12M après traitement. Cependant 30M après traitement (dont 12M de vieillissement naturel) l'activité de corrosion retourne à l'état initial;

Deux hypothèses pourraient expliquer la contradiction entre les résultats de pH et ceux de l'électrochimie obtenus à long terme :

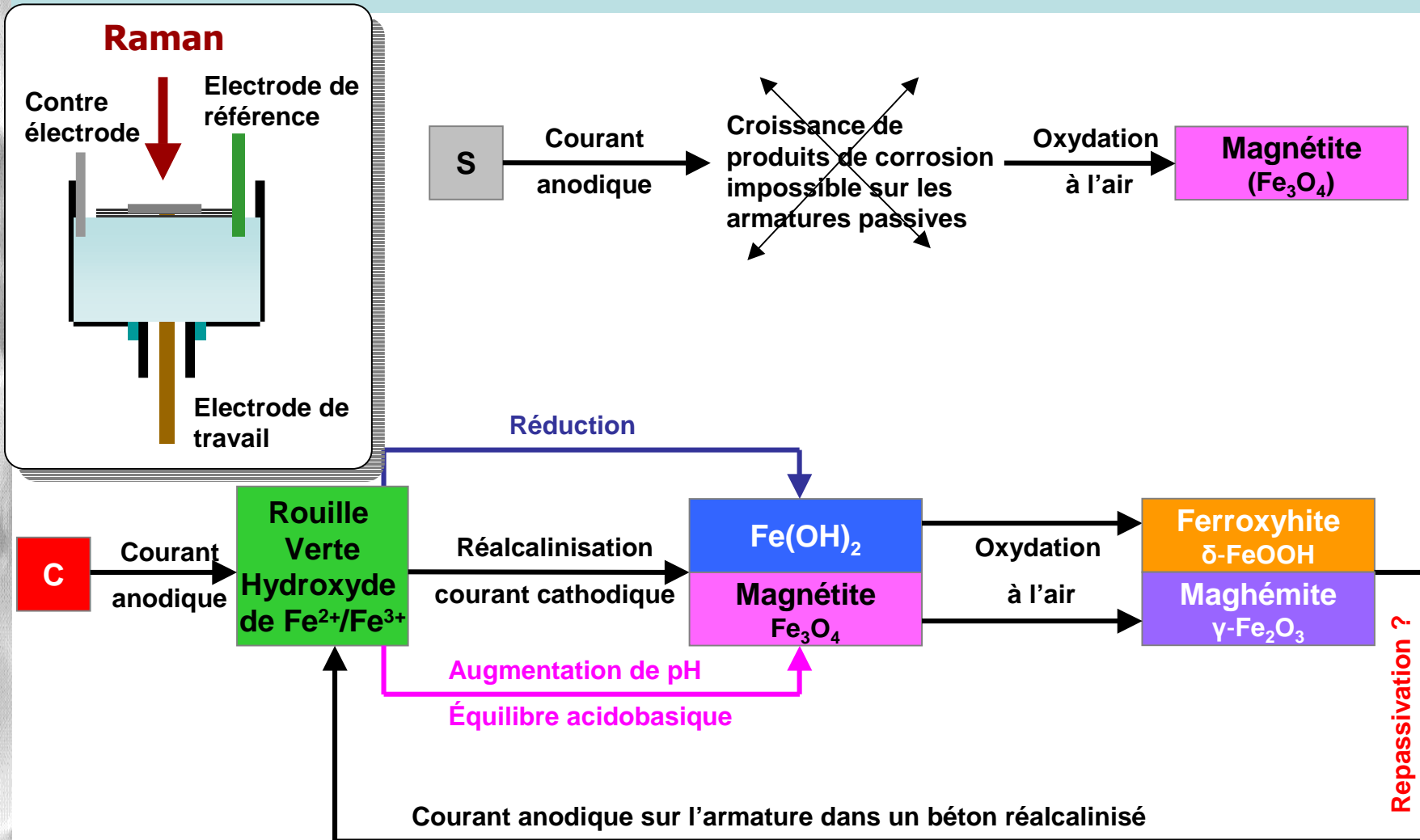
1. Un béton réalkalinisé avec une valeur de pH entre 10 et 11 ne pourrait diminuer l'activité de corrosion que pendant une courte période (de l'ordre de 12 mois);
2. Le niveau de corrosion des armatures des dallettes « A3 », avant traitement, n'était pas assez élevé pour que les caractérisations électrochimiques puissent mettre en évidence l'efficacité du traitement.

➔ Etude sur des dallettes « A6 » dont les armatures ont un niveau de corrosion plus élevé



# Analyse in-situ de la nature des produits de corrosion

Résultats : évolution des produits de corrosion

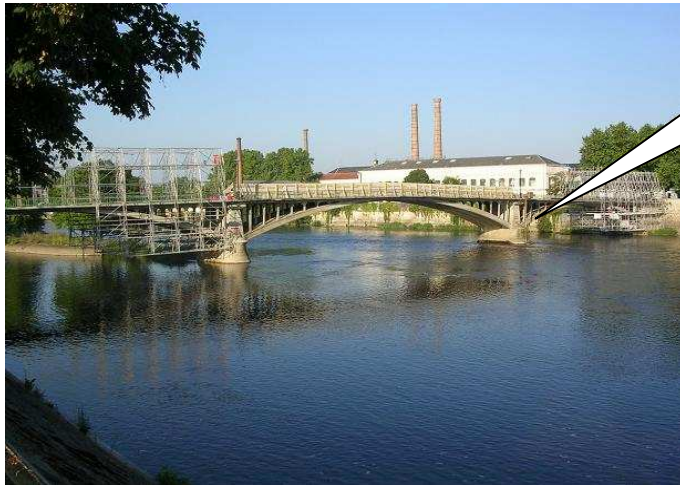


Après traitement par réalcalinisation, les produits de corrosion sur les armatures montrent la réalcalinisation du milieu par la présence de magnétite et de maghémite mais les armatures ne sont pas repassivées.

# Pont Camille de Hogues à Châtelleraut (86)

Résultats : essais sur site

- 1<sup>er</sup> pont en béton armé de France, construit en 1900 par F. Hennebique
- Classé Monument Historique en 2002
- Corrosion due à la carbonatation
- Réalcalinisation par courant imposé (Rénofors)



- Échéances de suivi
  - Avant, tout de suite après, 2M et 12M après traitement
- Caractérisations
  - Indicateurs colorés
  - Cartographie de potentiels, résistivité et vitesse de corrosion

## ➤ Indicateurs colorés

- Efficacité juste après traitement,
- Durabilité?

## ➤ Appareils électrochimiques de terrain : difficultés de mesure

- Géométrie inhabituelle des armatures
- Impact des conditions climatiques (température, vent, humidité...)



**Lors des journées du Réseau Génie Civil et Urbain (23 juin 2009),  
un poster des travaux issus de cette thèse a reçu  
le 3<sup>ème</sup> prix ex aequo de la Fédération Nationale des Travaux Publics**

**YunYun TONG a soutenue sa thèse le 21 septembre 2009,  
une édition ERLPC est en cours**

**Merci de votre attention**