



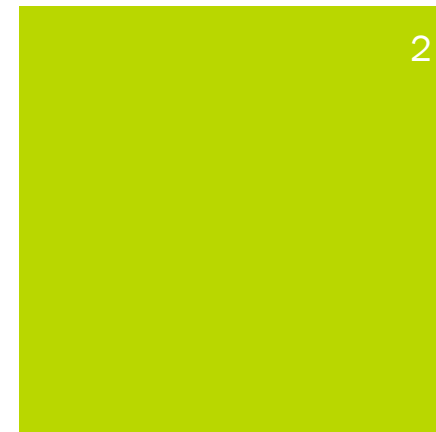
IMGC



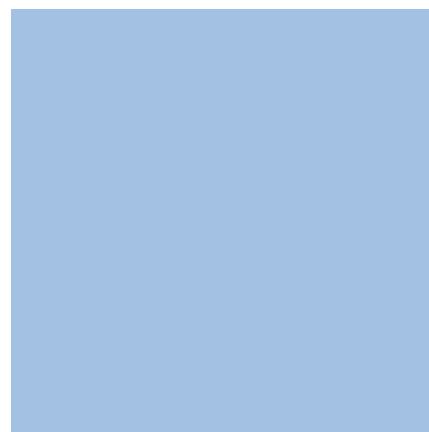
RAPPEL DES PRINCIPES DE CORROSION DES ARMATURES ET METHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC

Journée Technique AFGC Méditerranée
Mercredi 12 décembre 2018
Centre de Formation Emile Picot de Mallemort

La corrosion des armatures



2



Bernard QUENEE
Directeur Général Délégué



bernard.quenee@lerm.setec.fr

**LA PROTECTION CATHODIQUE DES
VRAGES EN BETON ARME :
/ DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX**

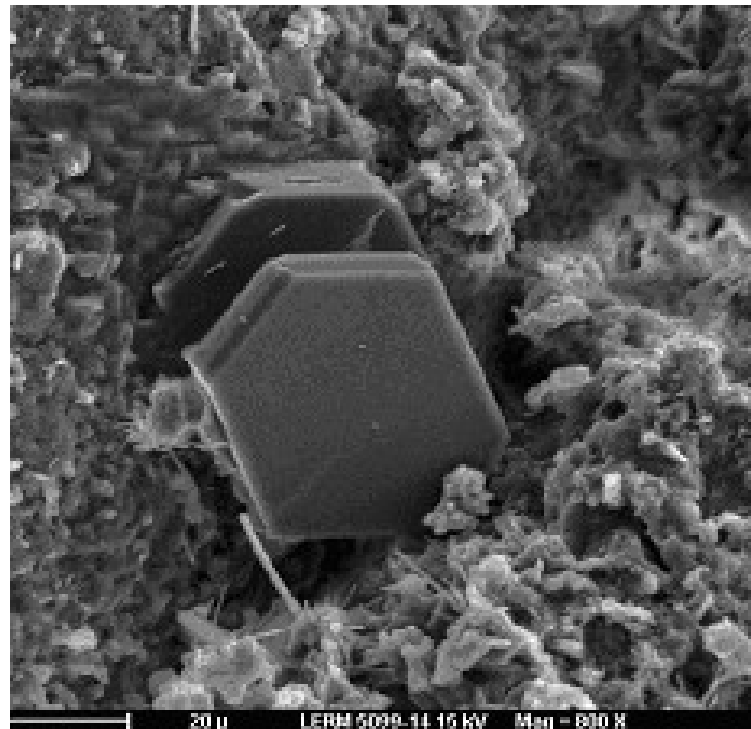
La corrosion des armatures



2 mécanismes induisent la corrosion des armatures dans le béton :

- la **carbonatation** du béton par pénétration d'un front de CO_2 de la surface vers le cœur du béton
- la **pénétration des ions chlorure** pour les ouvrages en milieu marin (immergés, en zone de marnage, soumis aux éclaboussures ou aux embruns...) ou exposés aux sels de déverglaçage dans les environnements présentant des risques de gel

La carbonatation



Mécanisme de la carbonatation : naturel



Chaux

gaz carbonique

calcite

eau

(ou portlandite)

Influence humidité relative, compacité

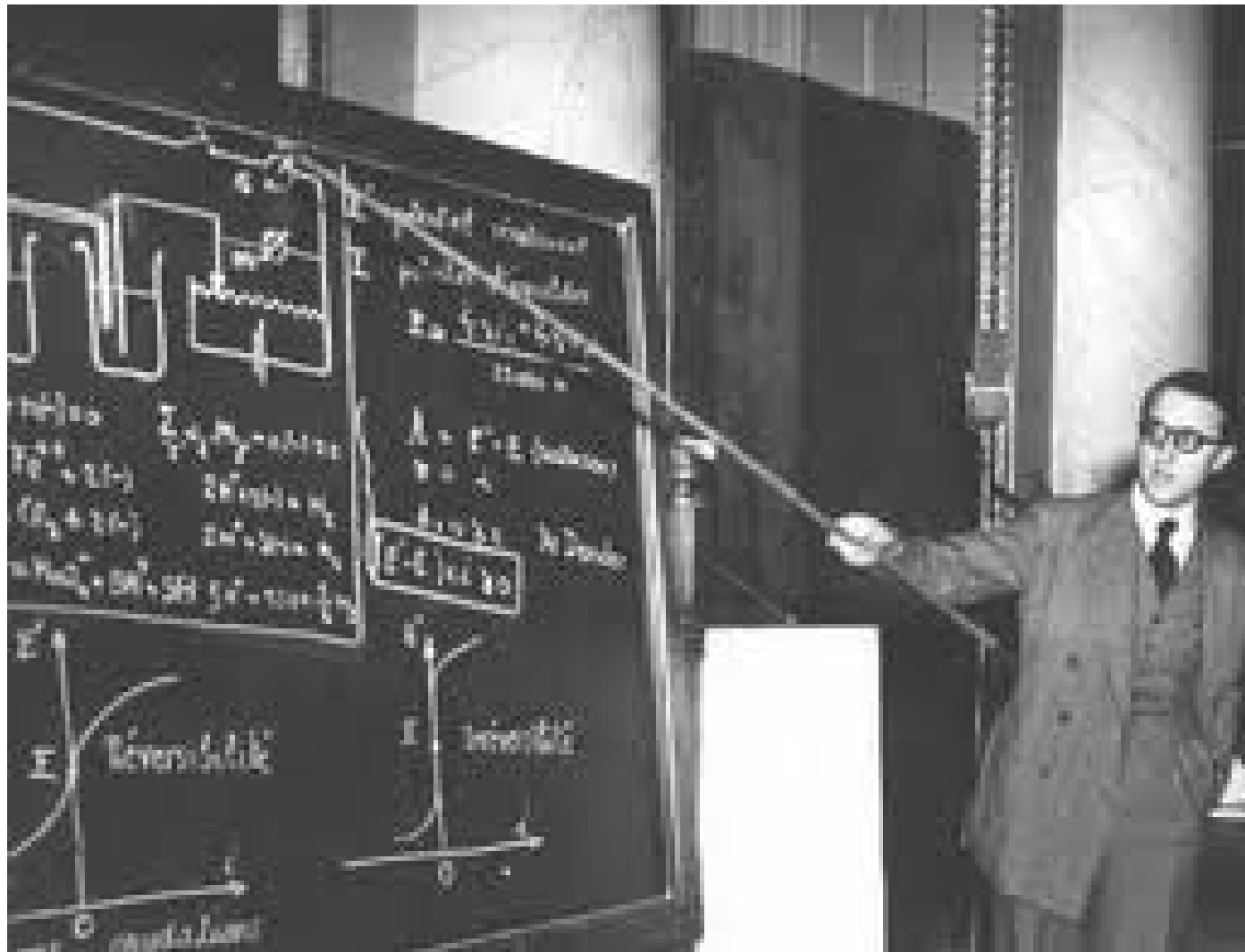
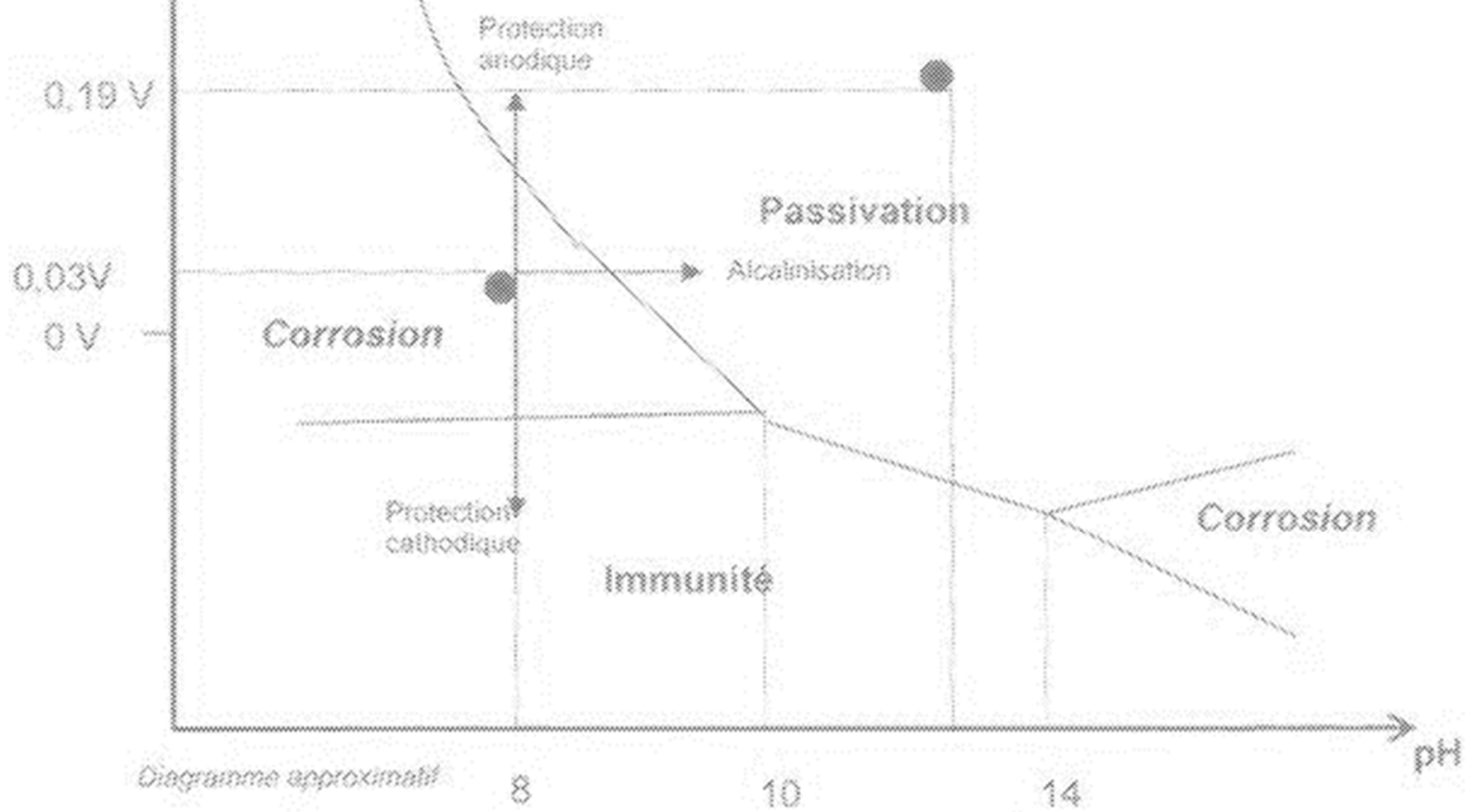
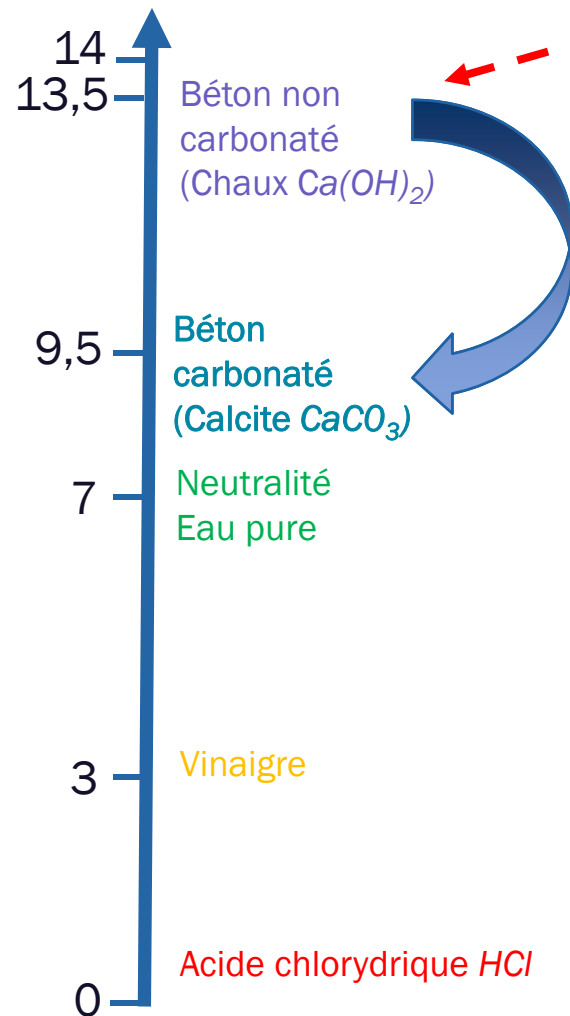


Diagramme de POURBAIX





zone de passivation des armatures

Baisse du pH du béton carbonaté :
13,5 (chaux) à 9 (calcite)

= dépassivation des armatures

Echelle de pH

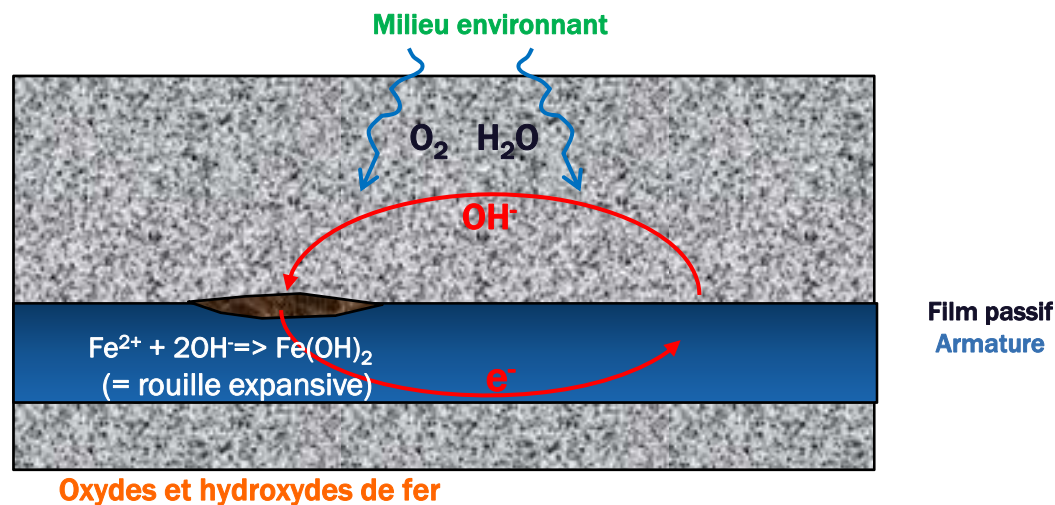
Actions sur le béton positives et négatives...



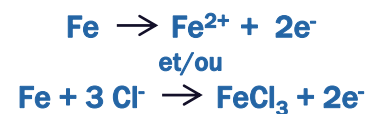
- **Positives** : compacité, résistance chimique
- **Négatives** : corrosion des aciers, efflorescences

Mécanisme de la corrosion électrochimique par la carbonatation du béton

pile électrochimique : eau, oxygène, anode, cathode



Anode (dissolution du fer)

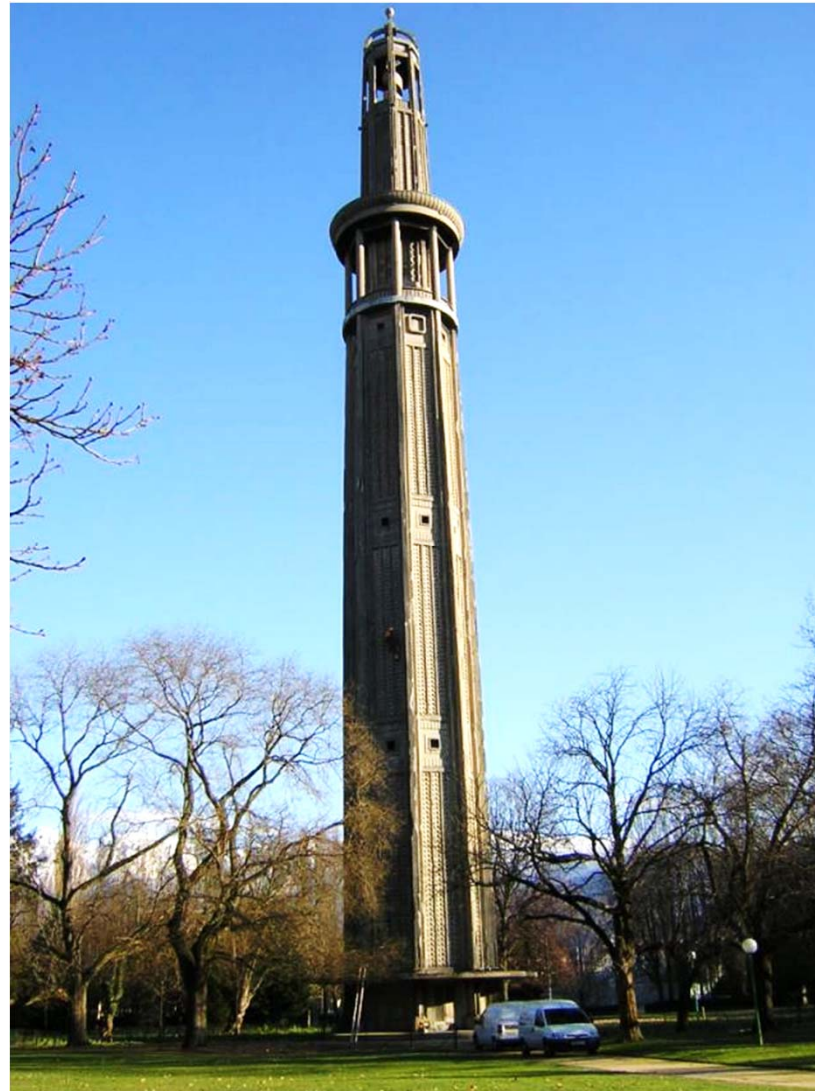


Cathode (réduction de l'oxygène)

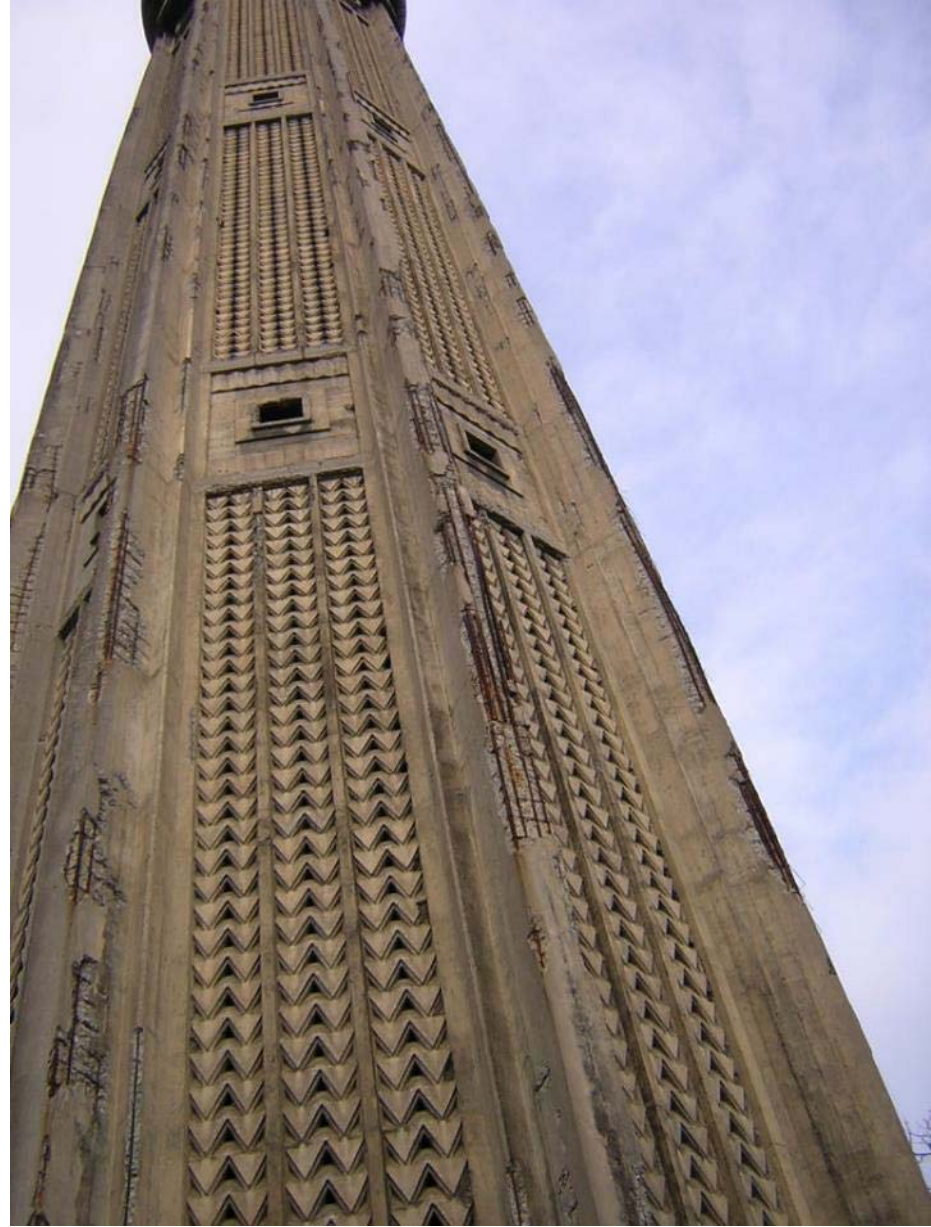
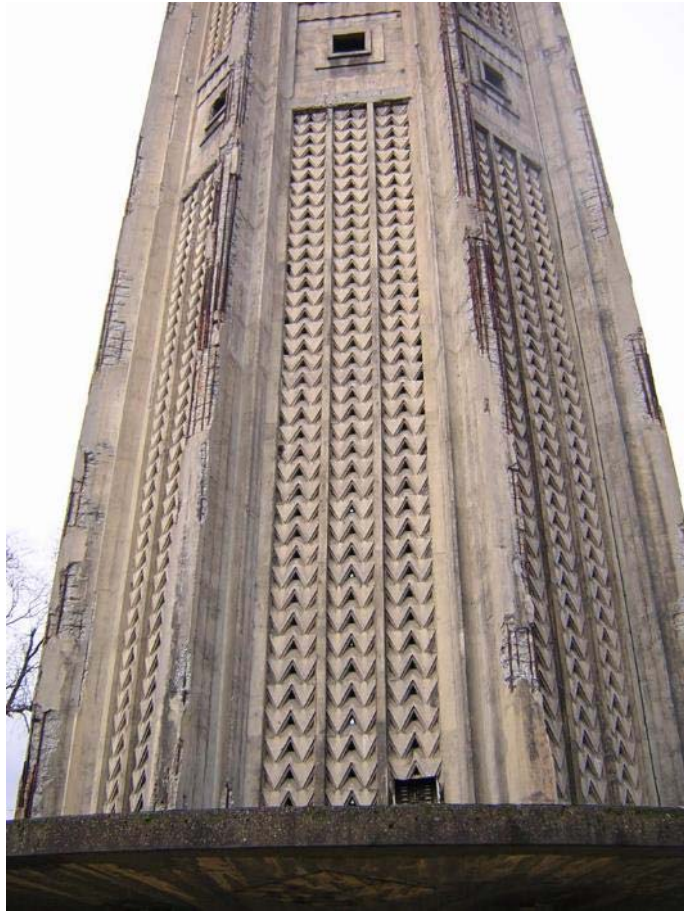


dépassement couche superficielle par dissolution couche passive

Tour Perret (Grenoble)



**Eclatement du béton avec mise à nu des armatures corrodées
(épaufures) en milieu urbain humide**







La corrosion par les ions Cl^-



La pénétration des ions chlorure dans le béton requiert la présence d'une **phase liquide**.

En milieu **saturé** (par ex. structures immergées en eau de mer), les ions chlorure pénètrent dans le béton par **diffusion**, sous gradient de concentration.

La pénétration des chlorures dépend donc des caractéristiques du matériau et des cycles d'humidification / séchage qu'il subit (durée, conditions climatiques)...

... d'où l'existence de classes d'exposition dans la norme EN 206-1 (XS1, XS2 et XS3 ou XD1, XD2 et XD3).

NF EN-206/CN

18 classes d'environnement

Tableau n° 1 : classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1		
Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton armé
	XC1 Sec ou humide en permanence	
	XC2 Humide, rarement sec	
	XC3 Humidité modérée	
XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton armé
	XC4 Alternance d'humidité et de sécheresse	
	XD1 Humidité modérée	
	XD2 Humide, rarement sec	
XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton armé
	XD3 Alternance d'humidité et de sécheresse	
	XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
	XS2 Immergé en permanence	
XF	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	
	XF1 Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2 Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3 Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
XA	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	Attaques chimiques	
	KA1 Environnement à faible agressivité chimique	
	KA2 Environnement d'agressivité chimique	

- CLASSE XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque
- CLASSE XC : corrosion induite par carbonatation
- CLASSE XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
- CLASSE XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- CLASSE XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
- CLASSE XA : attaques chimiques

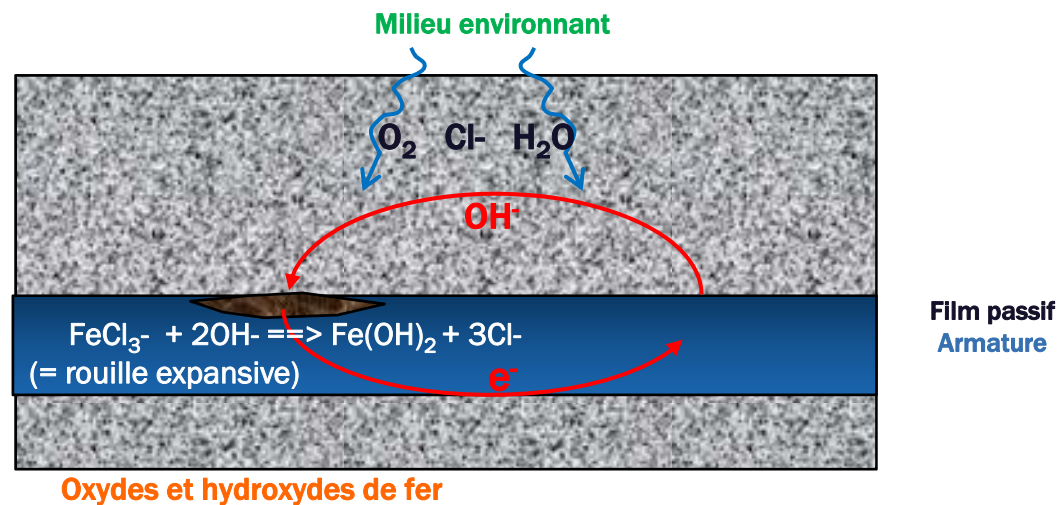
Origine des chlorures

- Sel marin, embruns...
- Sels de déverglaçage
- Pollution atmosphérique industrielle
- Effluents industriels, saumures
- Adjuvants chlorés CaCl_2



Mécanisme de la corrosion électrochimique par les chlorures

pile électrochimique : eau, oxygène, anode, cathode avec Cl^- catalyseur de la réaction (diminution résistivité solution électrochimique)



Anode (dissolution du fer)



Cathode (réduction de l'oxygène)



dépassivation couche superficielle par dissolution couche passive

Conséquences



- **Formation des oxydes et hydroxydes de fer (rouille) :**
 - Augmentation de volume par rapport au métal de base
 - Contraintes internes
 - Fissuration, coulures de rouille
 - Epaufrures
- **Réduction section aciers :**
 - Diminution capacité portante
 - Dégâts structuraux importants (fissuration ...)

Corrosion liée à des infiltrations d'eau chargée en sels au droit de joints de chaussée



Corrosion d'armatures en milieu marin



Corrosion d'appontements en milieu marin



Corrosion d'armatures en milieu marin

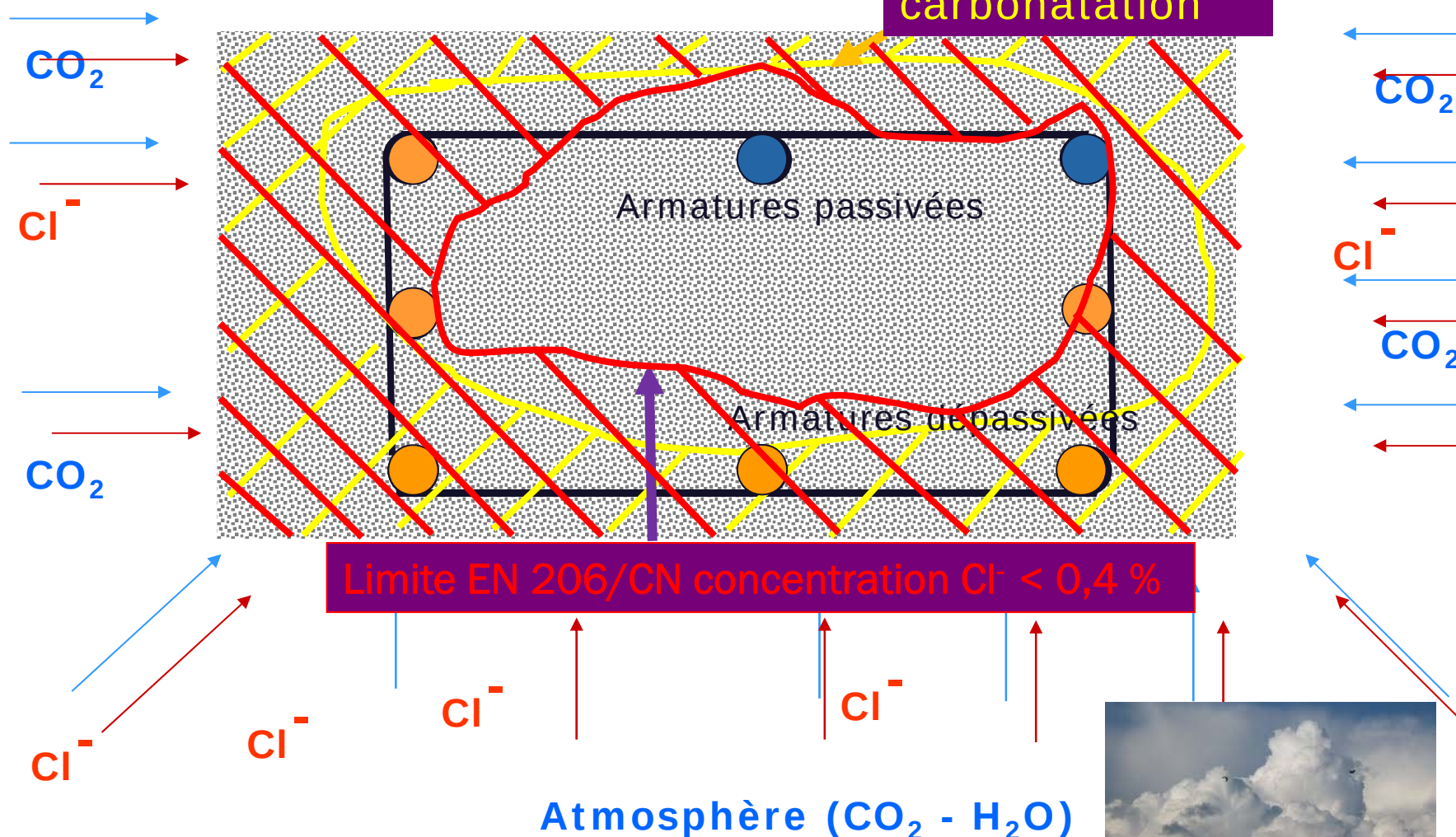




Vieillesse d'une structure en béton armé : carbonatation et pollution par des ions chlorures

Embruns marins, sels de déverglaçage

Front de
carbonatation

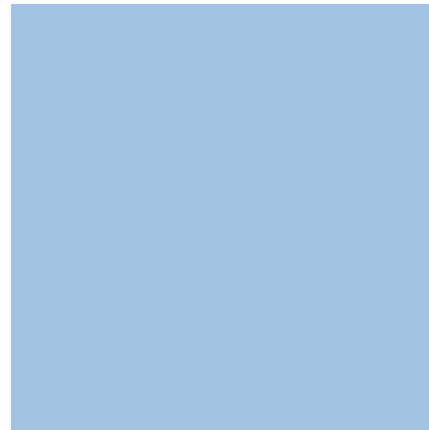




Méthodologie de diagnostic



25



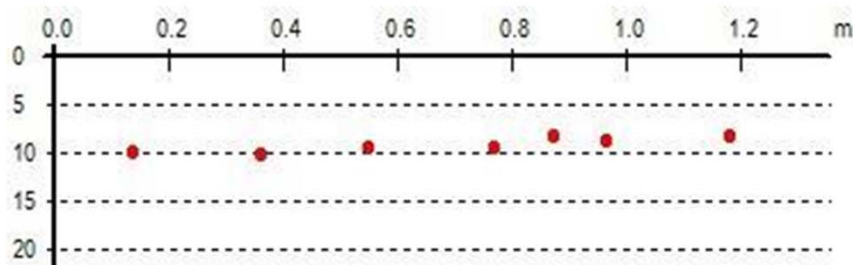
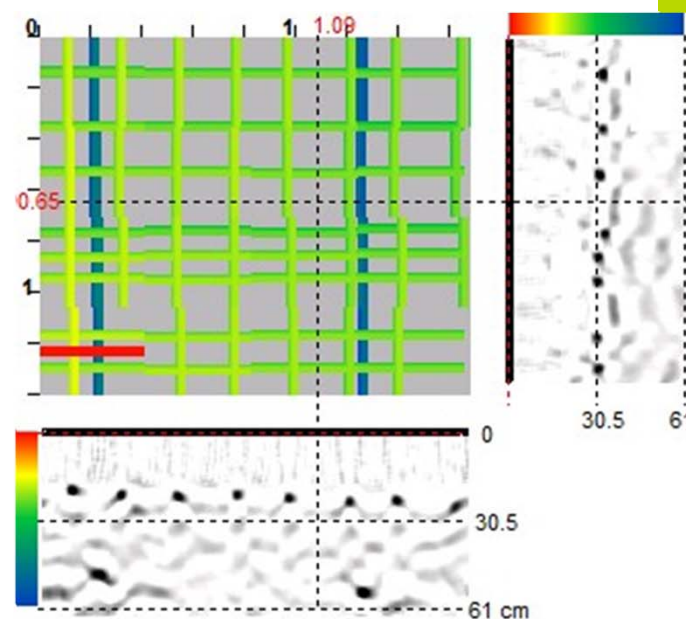
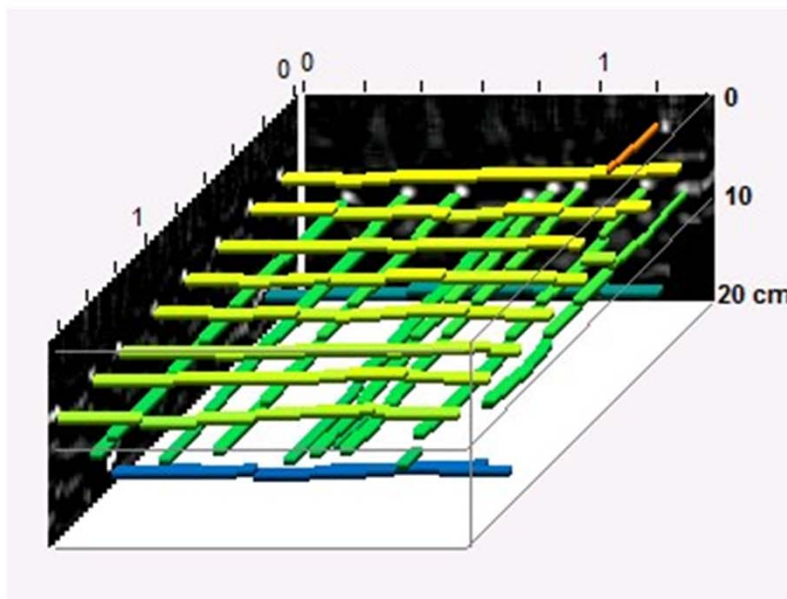
**LA PROTECTION CATHODIQUE DES
OUVRAGES EN BETON ARME :
*DU DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX***

Diagnostic corrosion

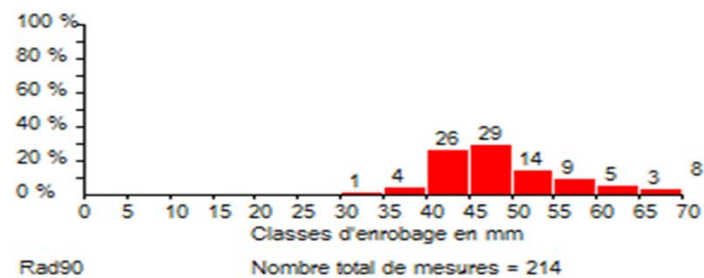
5 conditions à réunir :

- ➡ épaisseurs d'enrobage des armatures
- ➡ profondeur de carbonatation
- ➡ dosage des ions Cl^- à plusieurs profondeurs (Cl^- libres et liés)
- ➡ dosage en ciment (en kg/m^3 de béton)
- ➡ vitesse de corrosion, potentiel d'électrode et résistivité

Mesure statistique des profondeurs d'enrobage des armatures



Analyse statistique des enrobages



Mise en évidence de la profondeur de carbonatation par une solution alcoolique de phénolphtaléine



Béton carbonaté

Béton non carbonaté

Les différentes formes de chlorures



Chlorures...

- totaux
- libres
- ou liés ?

Formes de chlorures



Il existe 2 formes de chlorures dans les bétons :

- chlorures libres (NaCl) : *adsorbés en surface des C-S-H*
- chlorures liés (chloro-aluminates de calcium hydratés ou sel de Friedel, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) : *liés dans la matrice cimentaire*

L'ensemble constitue les chlorures totaux.



Chlorures totaux = extraits après solubilisation par attaque acide

Chlorures libres = extraits par extraction aqueuse

=> Chlorures liés (ou fixés) = différence des deux

La fixation des ions chlorure dépend fortement de la nature du ciment utilisé et principalement de sa teneur en C3A mais l'alumino-ferrite de calcium C4AF ainsi que les sulfates jouent également un rôle.

Dosage des ions chlorures



- o Mesure réalisée selon le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM (teneurs en chlorures libres et totaux)
- o Mesures selon profil de plusieurs points en fonction de la profondeur, afin d'apprécier la profondeur de pénétration des chlorures.
- o Les profondeurs de mesure seront en général : 0/10mm, 10/20 mm, 20/30 mm, 30/40 mm, 40/50 mm...

Préparation de la carotte de béton



Préparation de la carotte de béton



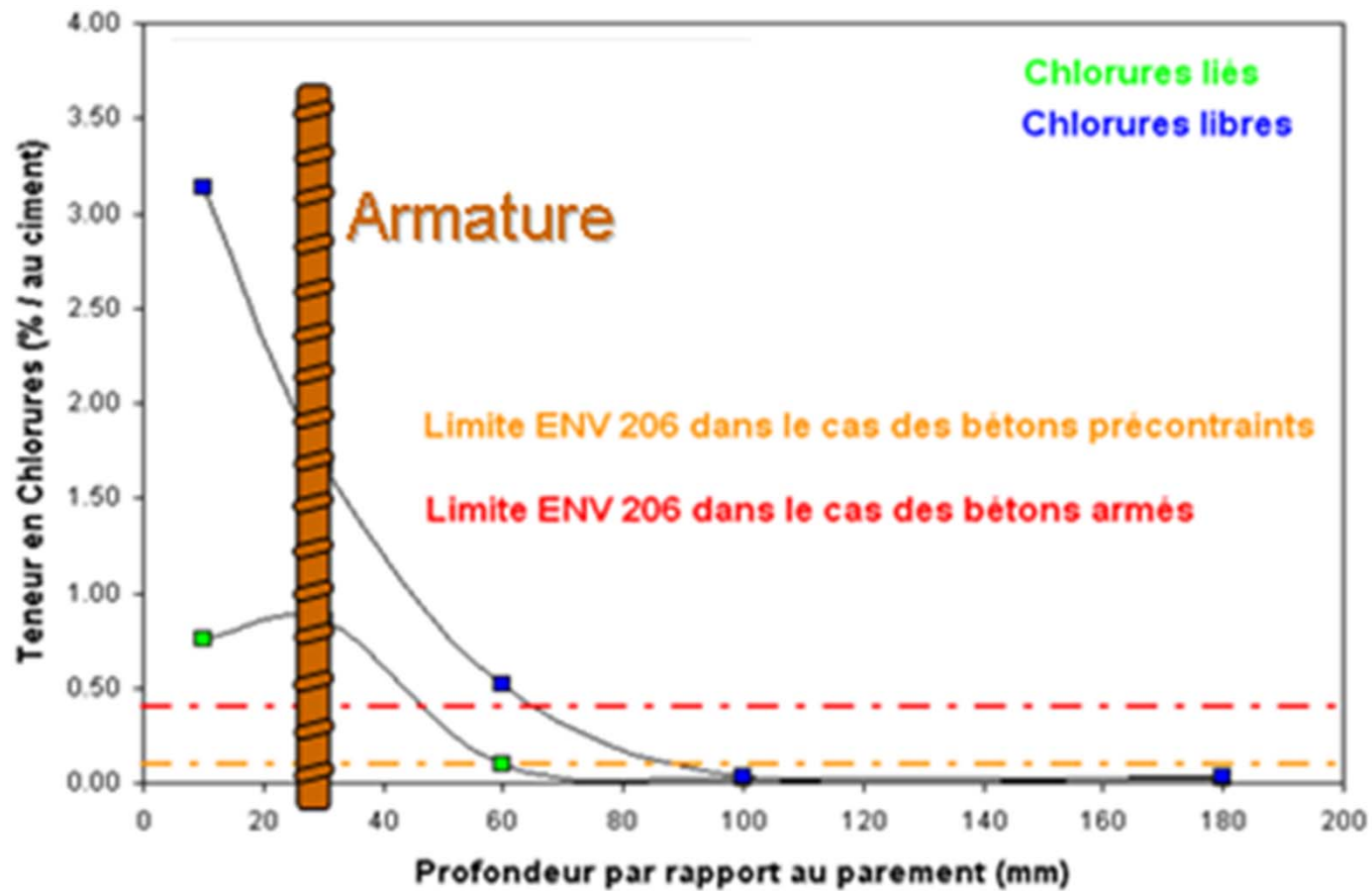
Prélèvements de poudres pour dosage des Cl-



Titrateur potentiométrique avec passeur d'échantillons



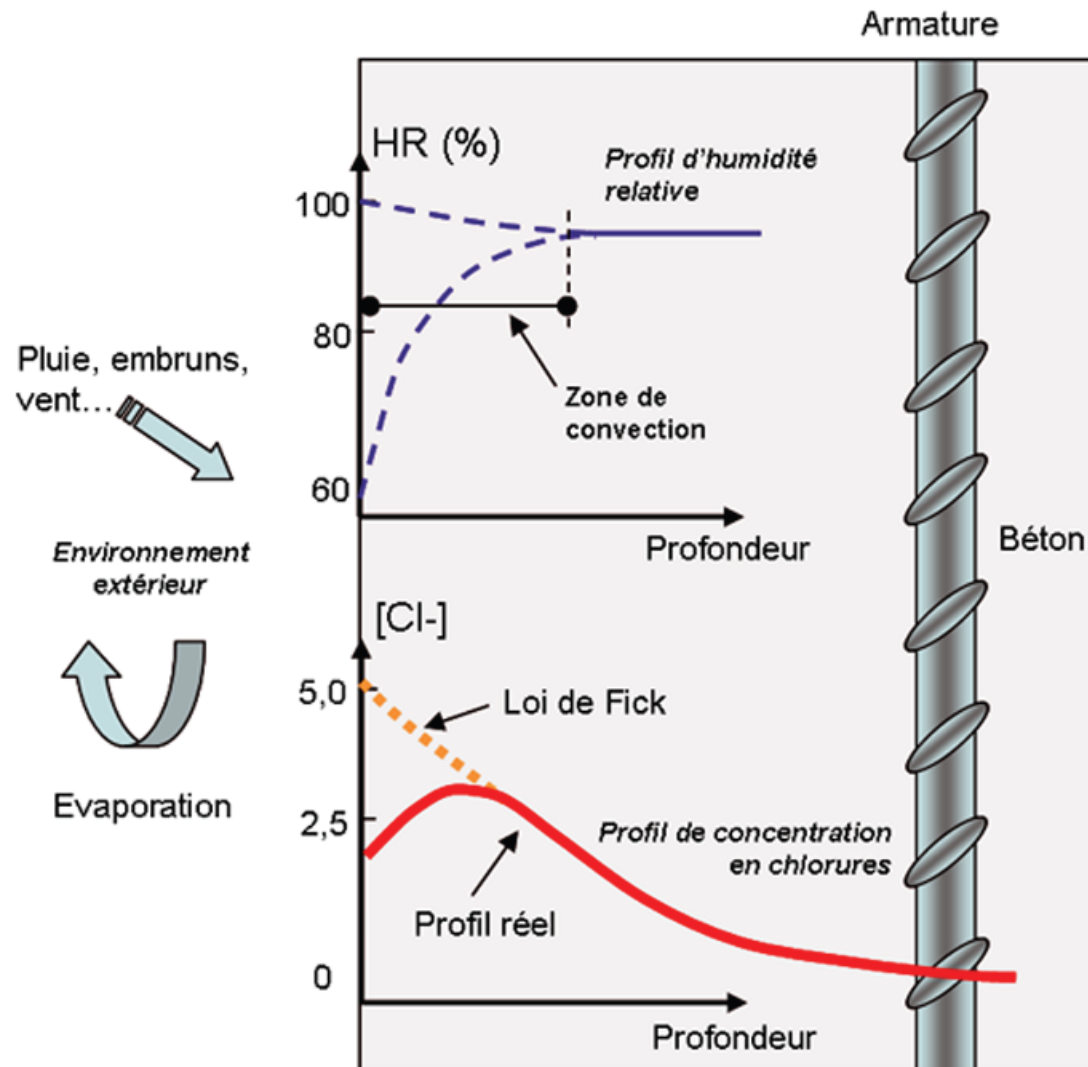
Profil profondeur – concentration en Cl^-



Mouvements des chlorures en surface des bétons



Illustration de la zone de convection dans une structure en béton armé soumise à des transferts hydriques et de chlorures (d'après La durabilité des bétons)



Expression du résultat



La connaissance du **dosage en ciment** permet :

- de ramener précisément les teneurs en chlorures au poids de ciment (et non au poids de béton)
- de comparer ce paramètre par rapport aux spécifications actuelles (NF EN 206-1)

Teneur critique en chlorures



Rapport $[Cl^- \text{ libres}] / [OH^-]$ au droit des armatures = stabilité de la couche de passivation. Conditionne amorçage de la corrosion (plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de corrosion sera grande).

On peut donc déduire de ce critère la valeur de la concentration « critique » en chlorures, connaissant le pH de la solution interstitielle.

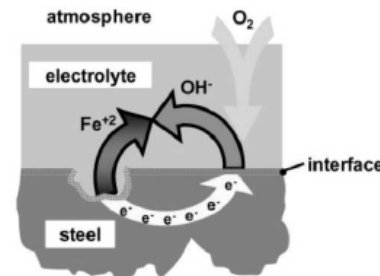
Un rapport $[Cl^-]/[OH^-]$ compris entre **0,6 et 1** conduit généralement à une concentration « critique » en ions chlorures de l'ordre de **0,4 %** par rapport à la masse de ciment pour un BA (norme NF EN 206/CN), pour un béton non carbonaté (et donc à des concentrations « critiques » comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton, suivant la formulation).

L'état hydrique du béton reste un paramètre déterminant vis-à-vis de la corrosion des armatures.

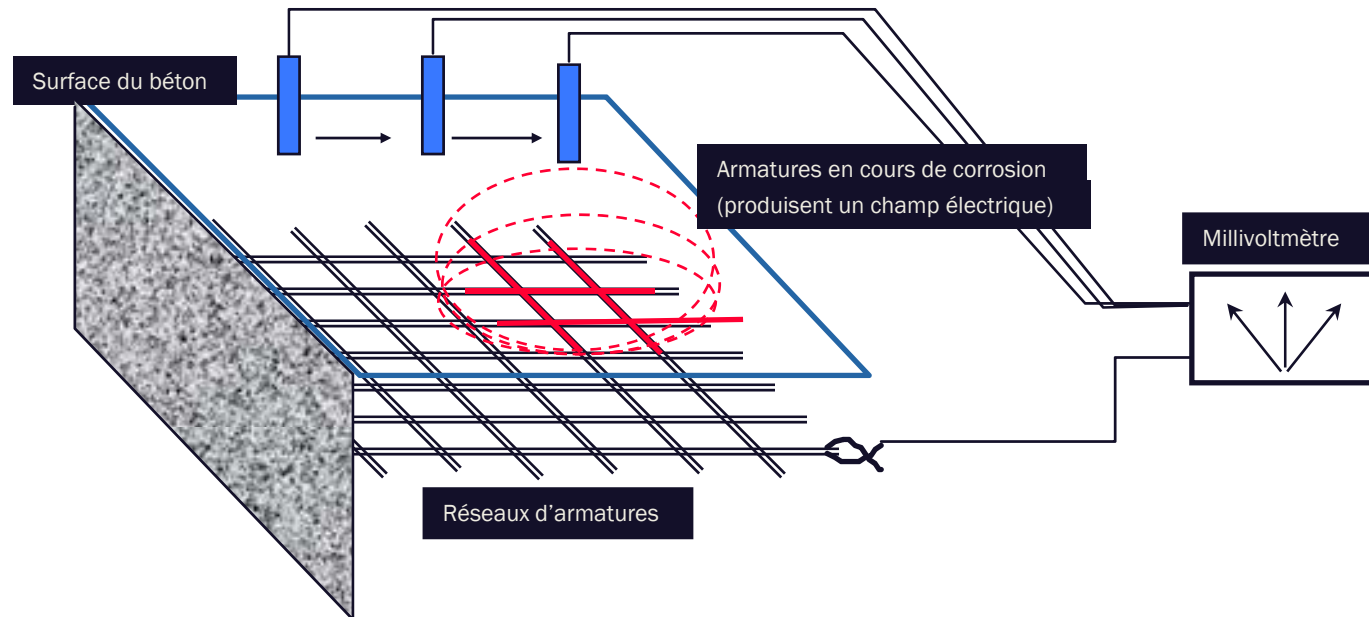
Mesure de corrosion - Potentiel d'électrode

Evaluation de la corrosion des aciers dans un béton

Principes de la méthode



Schematic representation of steel corrosion process in the basic environment (Gulikers, 2005).

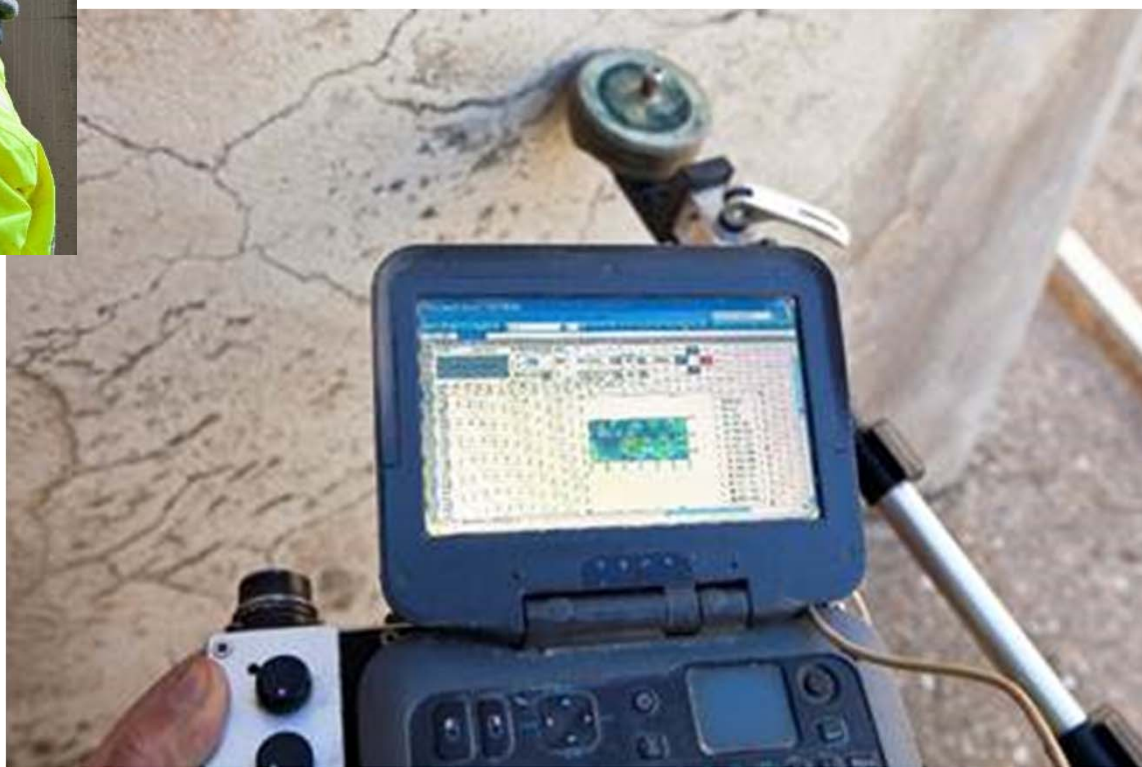


Mesure de corrosion - Potentiel d'électrode

Evaluation de la corrosion des aciers dans un béton

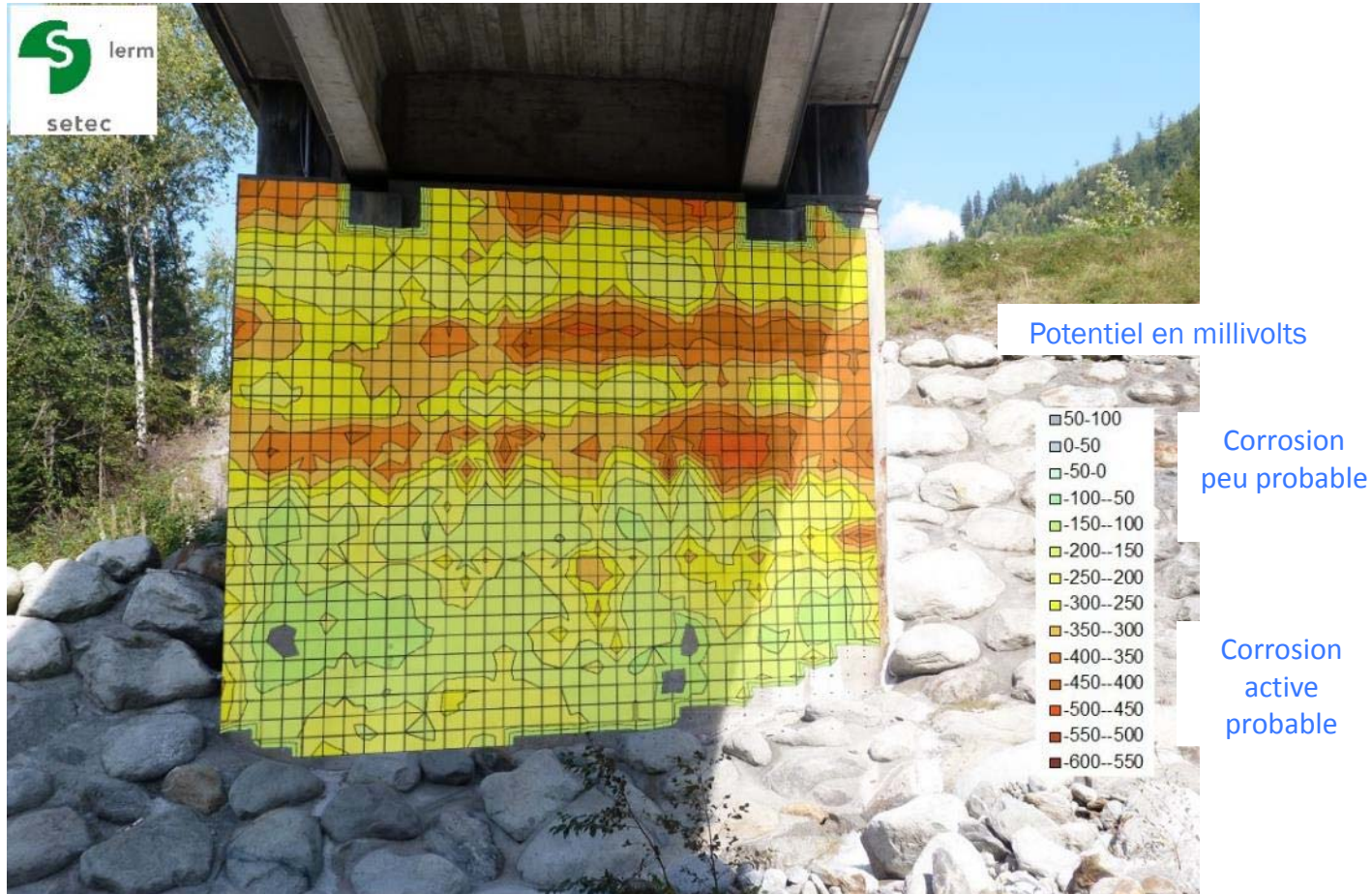


Préparation : dégagement d'une armature pour connexion au réseau de ferrailage



Exemple de représentation des résultats

Carte d'isopotentiels



Seuils de potentiel de corrosion à retenir



De nombreuses publications et présentations mettent en garde aujourd'hui sur les précautions à prendre pour l'interprétation des mesures de potentiel de corrosion.

Notamment : ne pas appliquer systématiquement les seuils de la norme ASTM C876 et suivre les recommandations plus récentes (RILEM TC 154-EMC), qui tiennent compte du contexte et de l'environnement des mesures (enrobage, humidité, température, carbonatation, chlorures, etc...).

Potentiel libre ESC	Probabilité de corrosion
> -200 mV	<10 % (peu probable)
-200 à -350	50 %
< -350 mV	50 à 90 % (très probable)

Seuils ASTM (potentiel)

Risque de corrosion en fonction de la résistivité	
>100 Kohm.cm	négligeable
50 – 100 Kohm.cm	faible
10 – 50 Kohm.cm	modéré
<10 Kohm.cm	élevé

Mesure de la vitesse de corrosion



La mesure des variations de potentiel provoquées par l'injection d'impulsions d'intensité calibrée (méthode galvanostatique), sur une surface polarisée connue, permet la détermination de la **résistance de polarisation linéaire** RPL et le calcul du **courant de corrosion**.

Ce courant de corrosion peut ensuite être converti en **vitesse de corrosion** par une relation déduite des lois de Faraday.

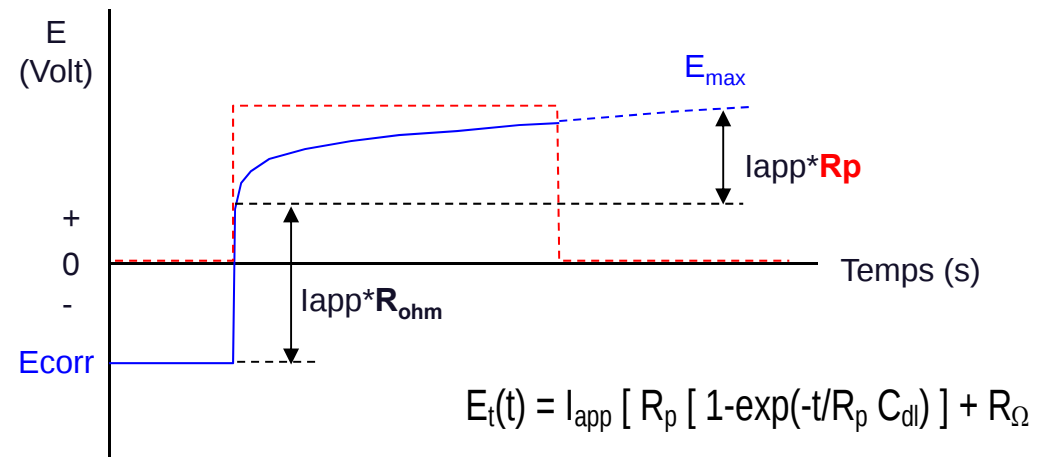
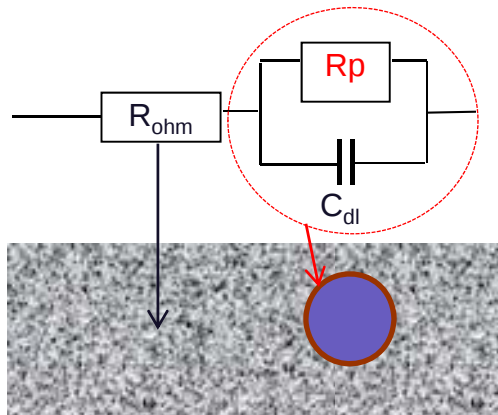
La vitesse de corrosion, exprimée en **micromètres par an**, traduit ainsi la perte de section des aciers soumis à la corrosion en fonction du temps et, par conséquent, permet d'aborder les questions de durabilité d'une structure.

Risque en fonction de la densité de courant de corrosion (RILEM)	
< 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	négligeable
0.1 - 0.5	faible
0.5 - 1	modéré
>1	élevé

Risque en fonction de la densité de courant de corrosion (Galvapulse)	
< 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	négligeable
1 - 5	faible
5 - 15	modéré
>15	élevé

I corr en $\mu\text{A} / \text{cm}^2$	Vitesse de corrosion (perte d'acier) en $\mu\text{m} / \text{an}$
< 0.1	< 1 (nulle à très faible)
0.1 à 0.5	1 à 5 (faible)
0.5 à 1	5 à 10 (moyenne à forte)
> 1	> 10 (très forte)

Mesure de la vitesse de corrosion – Principe

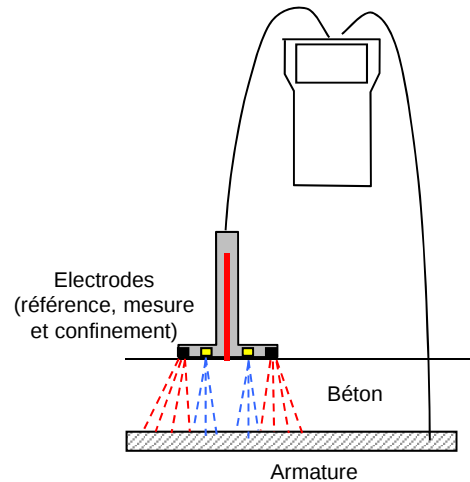


Résistivité électrique du béton d'enrobage : $\rho = k * R_{ohm}$ exprimée en $k\Omega.cm$ ou en $\Omega.m$
 Exprime la capacité de transport des charges électriques (ions) et dépend surtout de l'humidité du béton

Matériel de mesure



GECOR (méthode par courbe courant / potentiel)



Recherches en cours : projet Diamond
www.projet-diamond.com



GALVAPULSE de la Société Germann-Instrument
(impulsion de courant)

Objectifs du projet DIAMOND



Acquisition et Traitement de l'information



Photogrammétrie
Scanner 3D
Enveloppe texturée
Interaction enveloppe/carte
Transparence
Intégration de données
(lab., CND, vidéo, etc.)
Export (.dwg, .tif, .jpg, etc.)



• Développements en cours

- Présentation de l'interface de visualisation des données 3D en phase de tests.

LES DÉVELOPPEMENTS TECHNIQUES

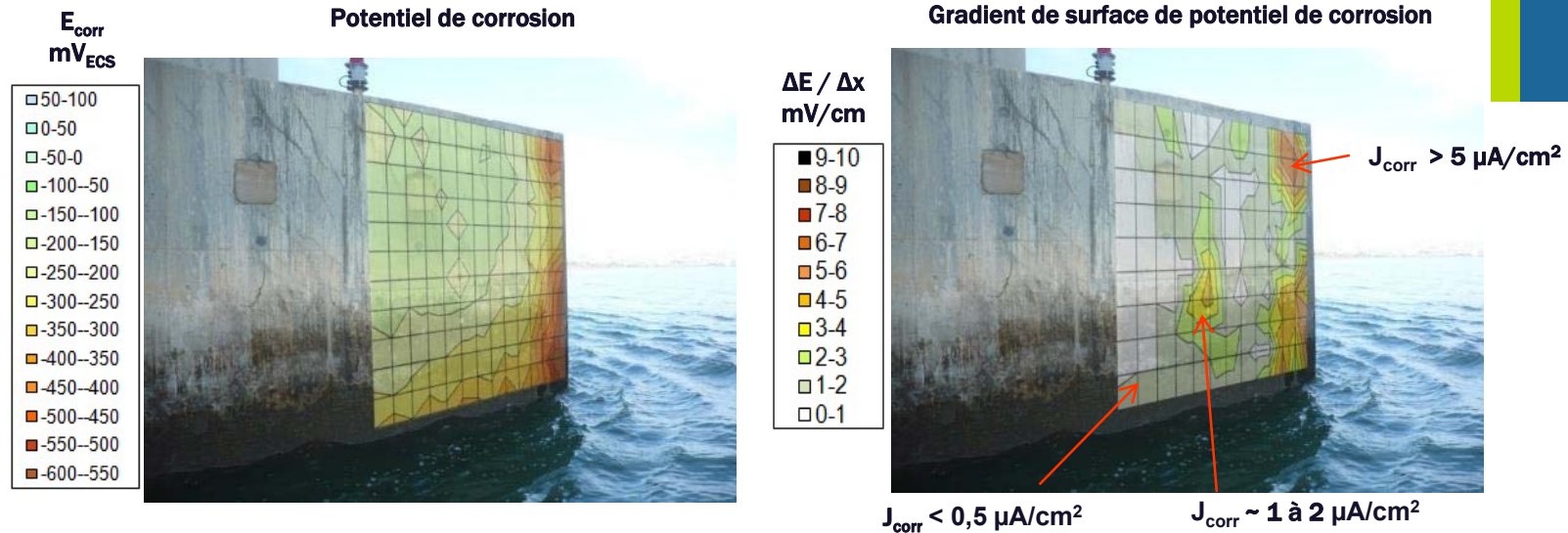
- *Monitoring in situ de l'activité de corrosion par des capteurs autonomes communicants sans fil*
- *Diagnostic ponctuel possible grâce à la portabilité de la sonde de surface*
- *Logiciel d'exploitation 3D et multi-paramètres permettant de corréler et d'analyser des années d'informations*

GAINS POUR LE MAÎTRE D'OUVRAGE

- *Optimiser la maintenance préventive des ouvrages de génie civil en limitant les interventions*
- *Lisser les dépenses*

Mesure de la vitesse de corrosion

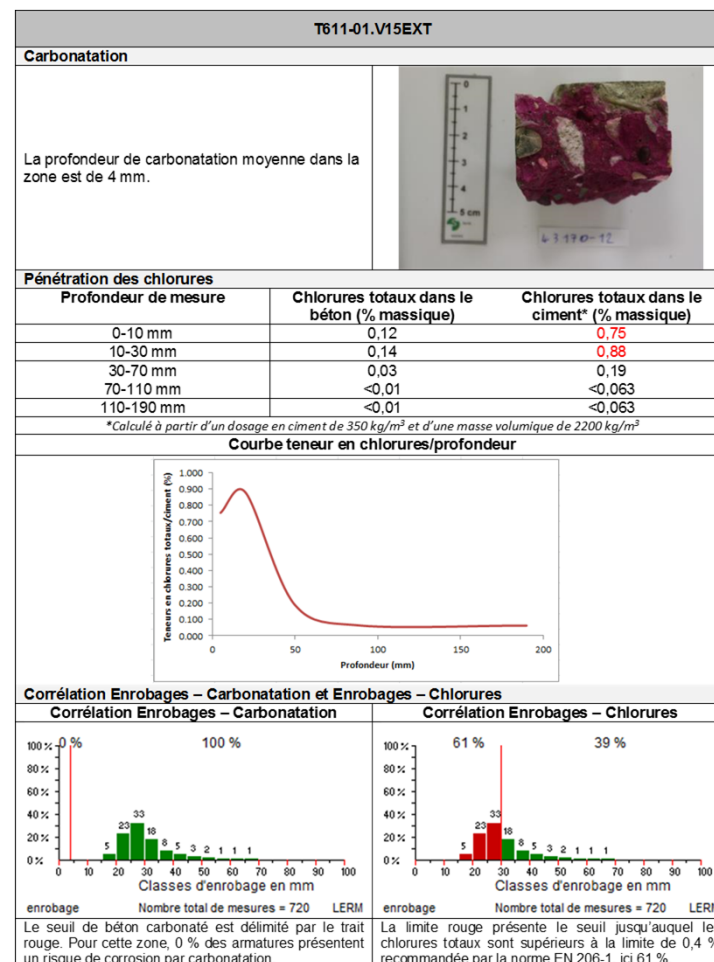
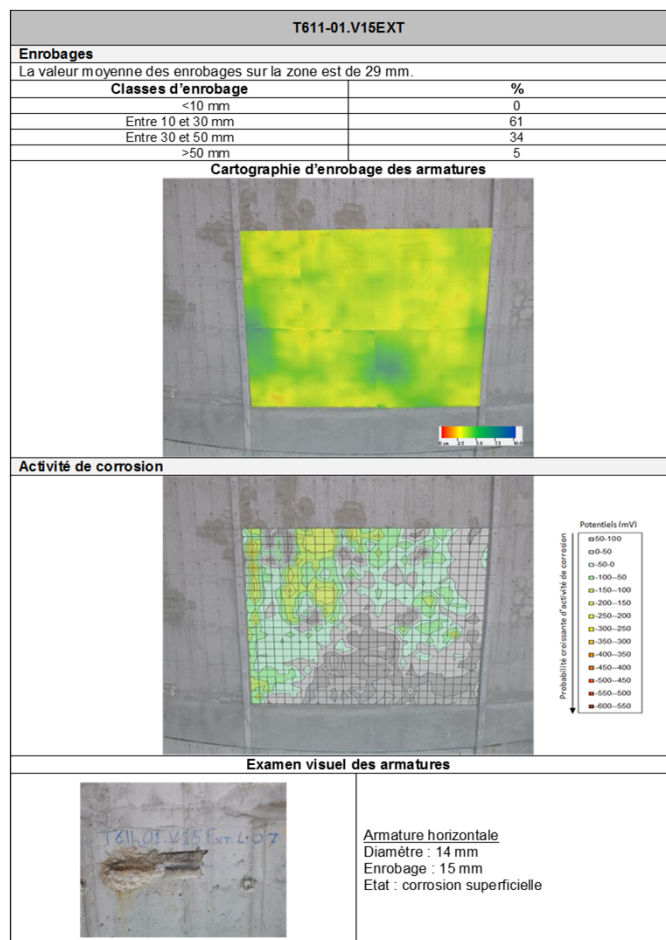
50



Mesures en environnement marin

- La valeur absolue du **potentiel de corrosion** peut conduire à des erreurs d'interprétation.
- L'exploitation des **gradients de potentiel** ($\Delta E_{corr} / \Delta x$), permet parfois de contourner cette difficulté.
- Les mesures de densité de **courant de corrosion (vitesse de corrosion)** permettent de conforter les résultats.
- Les mesures d'**enrobage** et de profondeur de pénétration des **chlorures** permettent de confirmer le diagnostic avec contrôle visuel.

Représentation de résultats

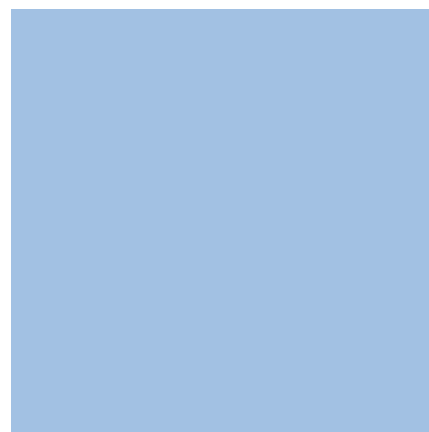




Merci pour
votre
attention



52



**LA PROTECTION CATHODIQUE DES
OUVRAGES EN BETON ARME :
*DU DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX***

bernard.quenee@lerm.setec.fr

