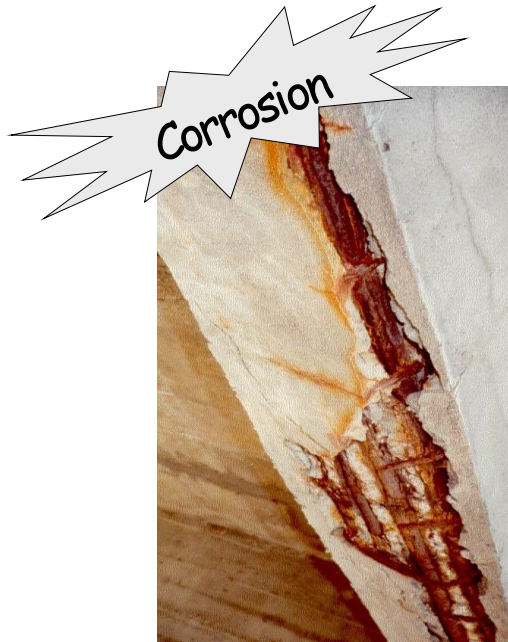


Plan

- 1 - **Introduction : nouvelle approche de la durabilité**
- 2 - **Indicateurs de durabilité : caractéristiques et pertinence**
- 3 - **Classes associées aux indicateurs de durabilité**
- 4 - **Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée**
- 5 - **Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"**
- 6 - **Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité**

1 - EXEMPLES DE DÉGRADATIONS DE STRUCTURES EN BÉTON (ARMÉ)



Pont en bord de mer

!



Alcali-réaction



Ecaillage

Corps d'épreuve exposé au gel et aux sels

- **Évaluation de la durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de **classes comparaison** et classement de bétons
(sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)
- **Évaluation de la durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de **classes comparaison** et classement de bétons
(sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)
- **Conception de bétons pour une durabilité prédéfinie**
- **Qualification de formules de béton** pour une structure donnée sur la base de critères performantiels (**spécifications**) cahiers des charges, règlements de conception, normes, ...
- **Évaluation de la durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire +

d'un système de **classes comparaison** et classement de bétons

(sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)

- **Conception de bétons pour une durabilité prédéfinie**
- **Qualification de formules de béton** pour une structure donnée sur la base de critères performantiels (**spécifications**) cahiers des charges, règlements de conception, normes, ...
- **Prédiction de la durée de vie** d'une structure (**phase de concept.**)
- **Diagnostic et prédiction de la durée de vie résiduelle** de structures existantes (éventuellement dégradées) contrôle *in situ* décision de réparation ou d'extension de la durée de service

Approche multi-niveaux

1 - LA DURABILITÉ DANS LES NORMES

Définition : la **durabilité** d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement

Elle dépend de nombreux paramètres dont la qualité de conception, la qualité des matériaux utilisés, la qualité des dispositions constructives et de la réalisation de l'ouvrage

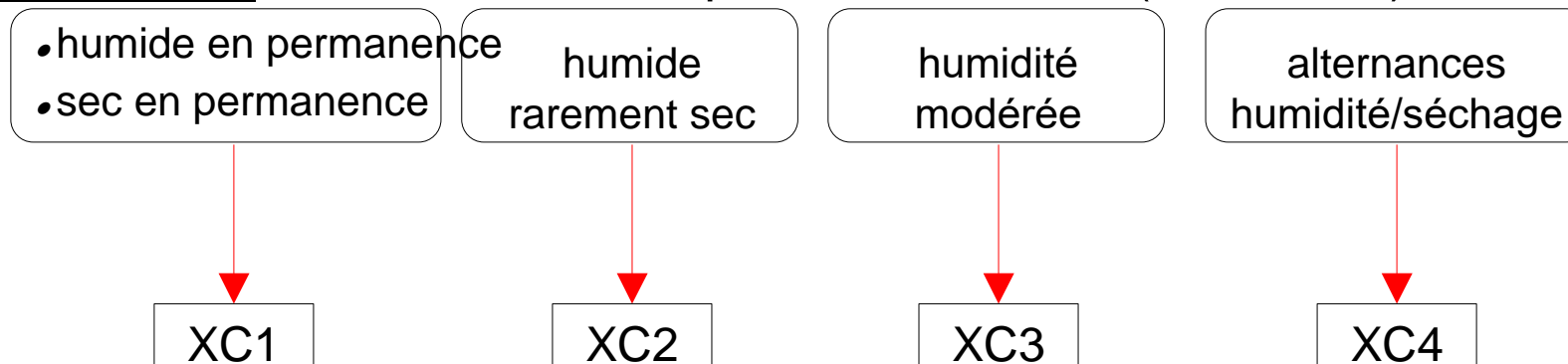
Elle est assortie de la **durée d'utilisation de l'ouvrage** (cf. *Eurocode 2*)

Prise en compte *via* la notion de **classes d'exposition** (cf. *EN 206-1*) par la prescription de **valeurs limites** notamment sur la compo. ($[E_{\text{eff}} / \text{Liant équiv.}] \text{ max.}$; Classe de résist. min. ; Teneur en liant équiv. min. ; % air min., ...) La norme européenne **EN 206-1** fixe dans une **annexe informative** des valeurs limites en fonction de la classe

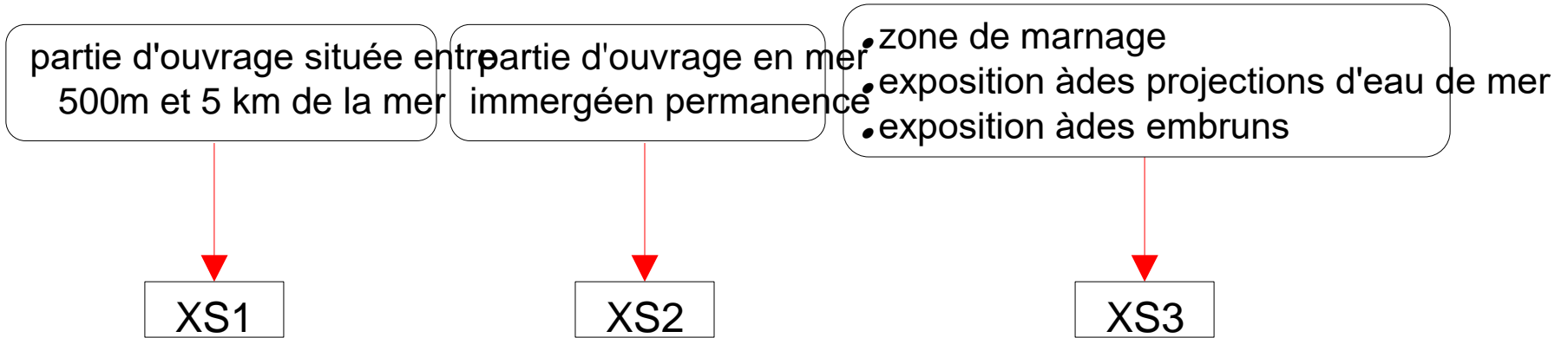
d'exposition. L'**annexe nationale** complète ces dispositions par des valeurs limites applicables en France et rend celles-ci normatives dans 2 tableaux (**NA.F.1 & NA.F.2**)

1 - LES CLASSES D'EXPOSITION

- **Exemple 1** : Corrosion induite par carbonatation (classe **XC**)



- **Exemple 2** : Corrosion induite par Cl⁻ présents dans l'eau de mer (classe **XS**)



Viser des niveaux de performance à atteindre

permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles **solutions innovantes** (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

Viser des niveaux de performance à atteindre

permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles

solutions innovantes (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

Viser des niveaux de performance à atteindre

permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles

solutions innovantes (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

Spécifications performantielles relatives à la durabilité

- prise en compte de l'aspect "durabilité" dans les textes et projets
- matériaux (et structures) optimisés pour répondre à un cahier des charges
durée de vie + longue, nouveaux types de projets, architecture de demain, ...
garantie de durée de vie (& sécurité) avec des ss-produits et sans surcoût

Contribution au développement durable

Viser des niveaux de performance à atteindre

permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles

solutions innovantes (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

Spécifications performantielles relatives à la durabilité

- prise en compte de l'aspect "durabilité" dans les textes et projets
- matériaux (et structures) optimisés pour répondre à un cahier des charges
durée de vie + longue, nouveaux types de projets, architecture de demain, ...
garantie de durée de vie (& sécurité) avec des ss-produits et sans surcoût

Retour sur investissement supérieur

1 - APPROCHE FONDÉE SUR LES INDICATEURS DE DURABILITÉ

Description : approche performantielle & prédictive de la durabilité

Référence : document AFGC (état de l'art + guide) [AFGC, 2004], [AFGC, 2007]

"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages"

Principaux objectifs et applications:

- conception de bétons pour une durée de vie donnée de l'ouvrage
- prédiction de la durée de vie
- suivi des structures existantes

renforcer le lien entre **formulation** et **durée de vie**

(structure) faciliter l'utilisation de **bétons "verts"** et assurer

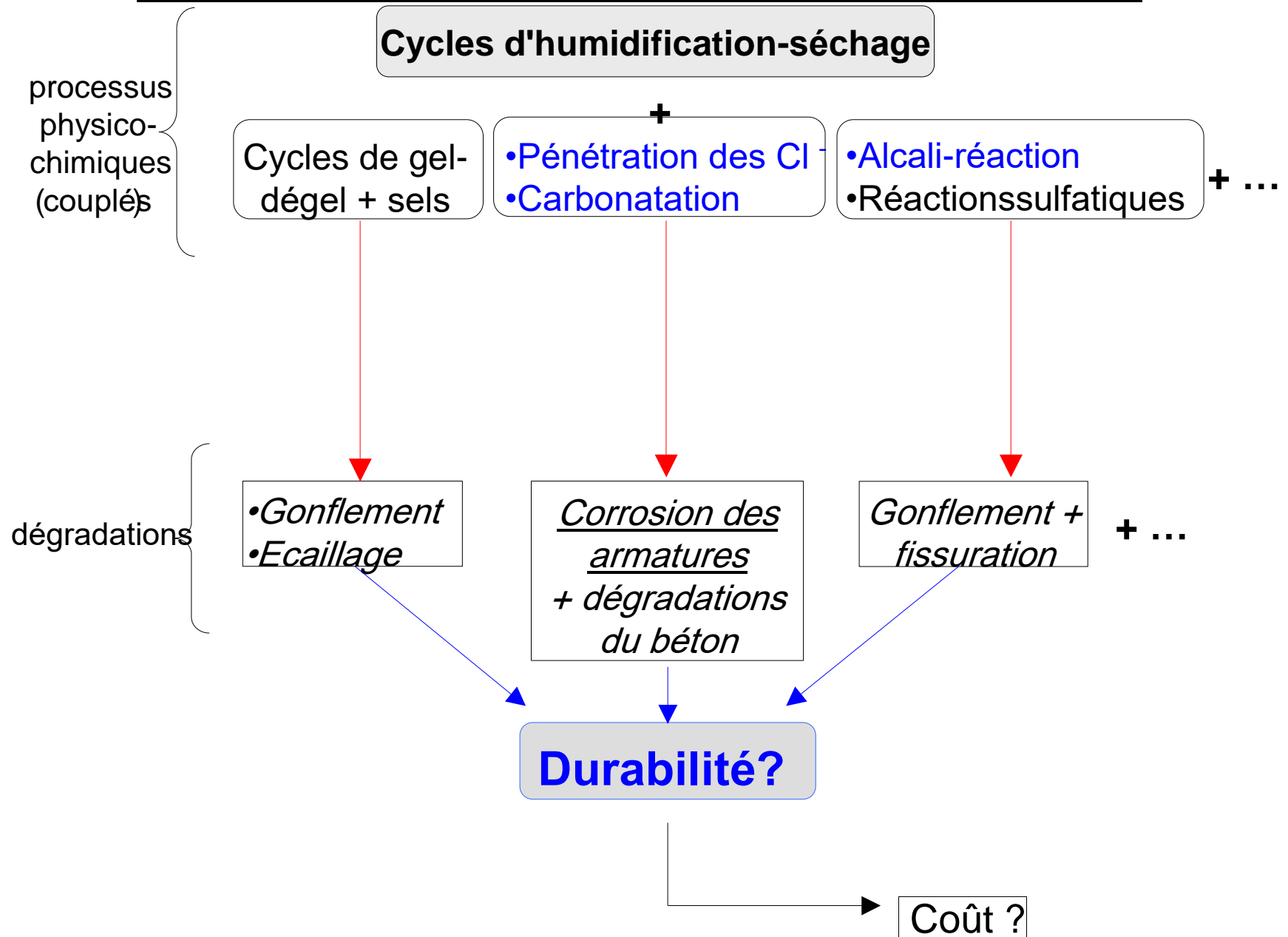
la **durabilité** aider au diagnostic et **optimiser le suivi** des

structures

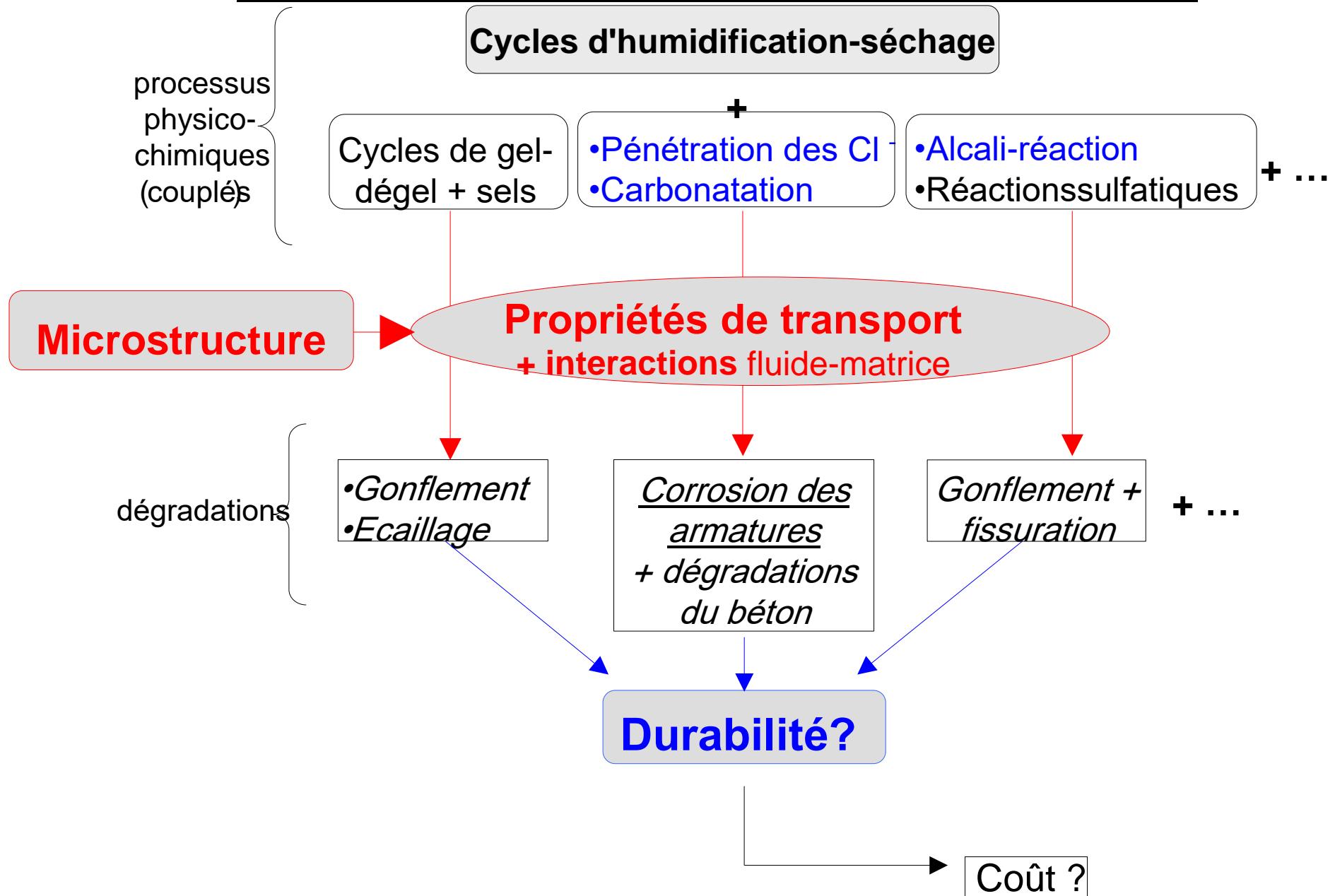


ACV

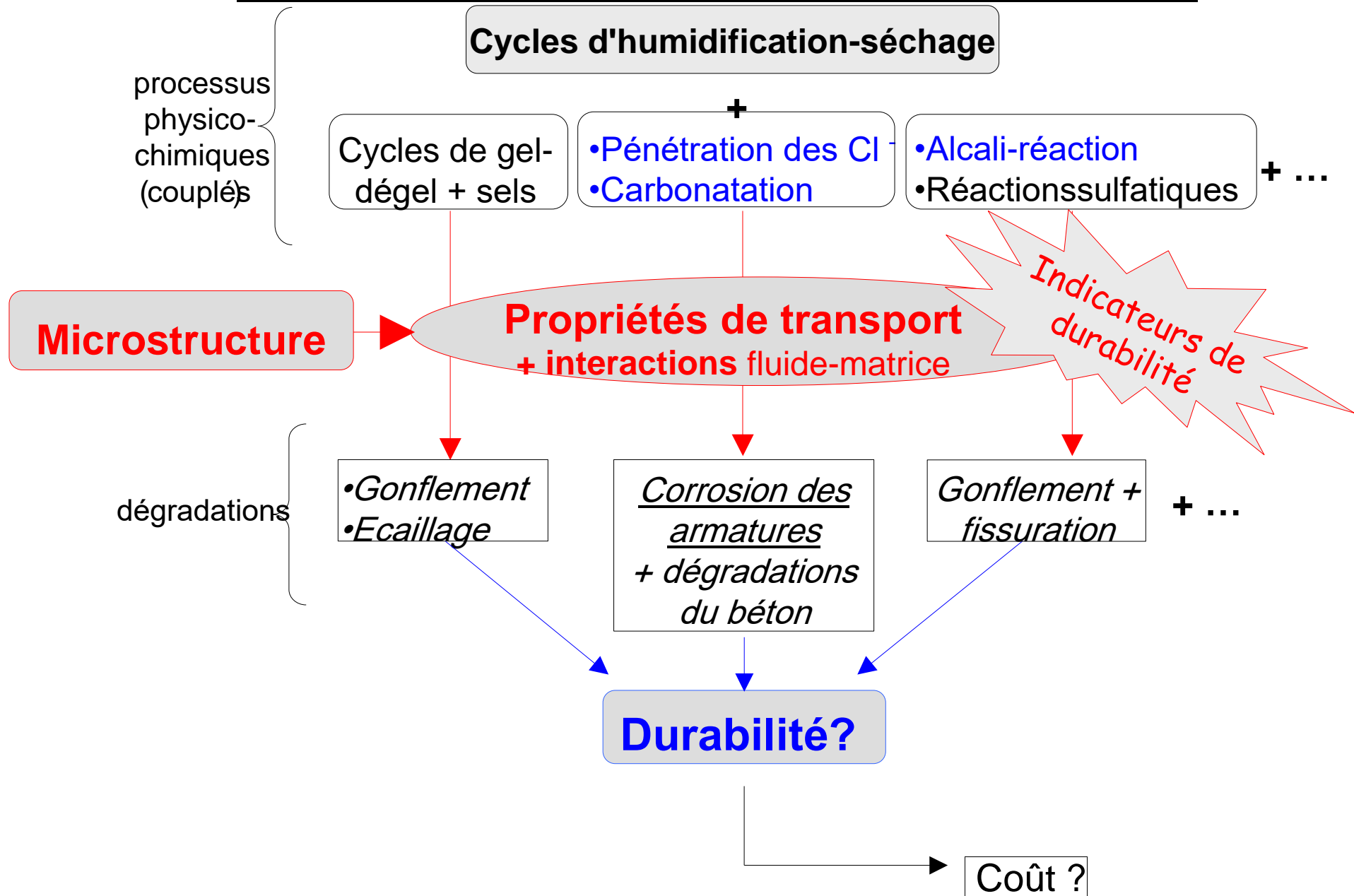
1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



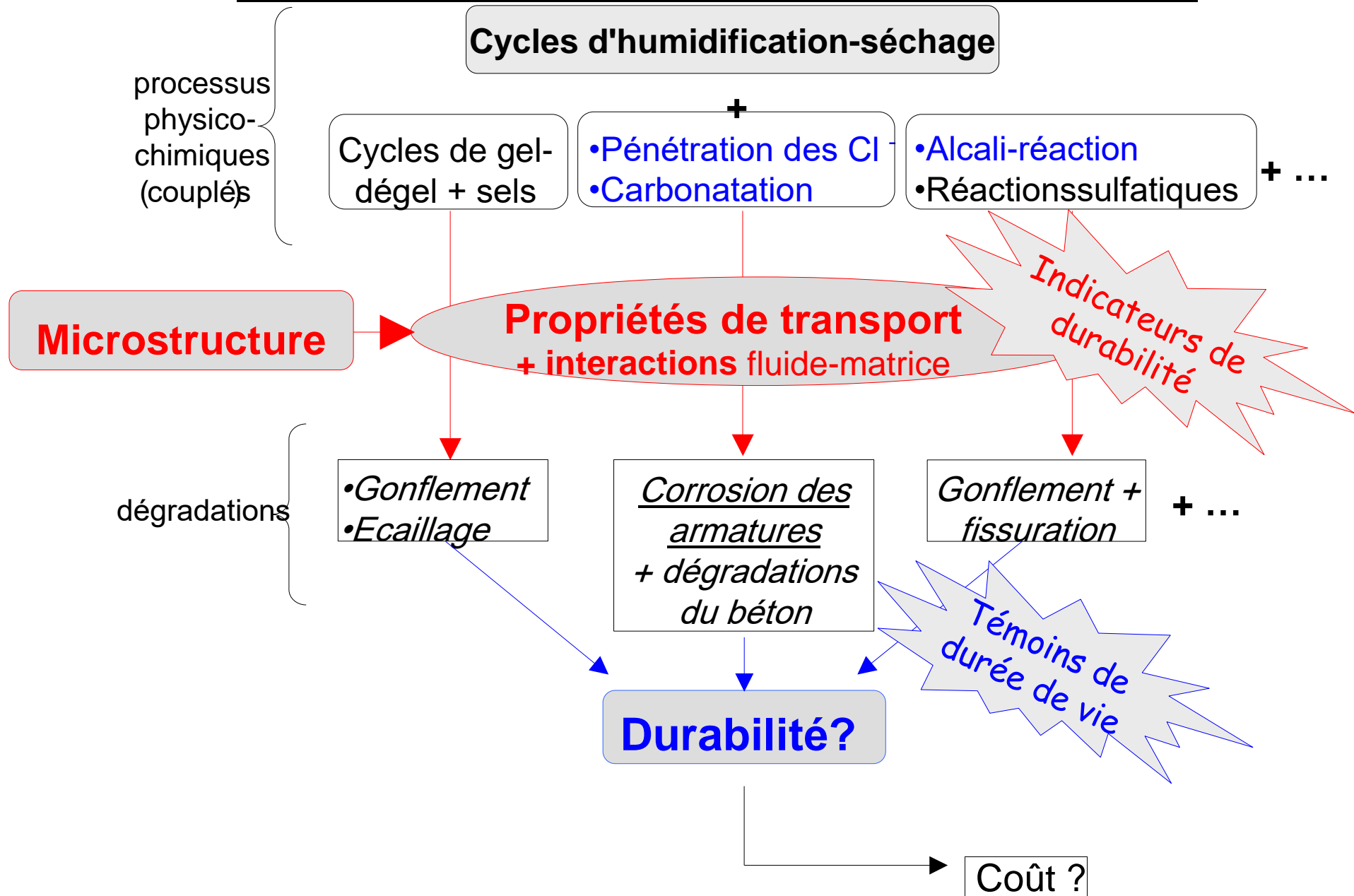
1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



- ✘ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ✘ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation

- teneur (initiale) en Ca(OH)_2
- porosité (accessible à l'eau)
- coef. de diffusion (*app.* ou *eff.*) des ions (Cl^-)
- perméabilité (aux gaz et/ou à l'eau liquide)

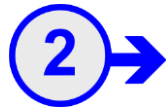
propriétés de transport

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES

- ✘ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ✘ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements



indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation



indicateurs **spécifiques** à un processus de dégradation donné(alcali-réaction, dégradations dues au gel, ...)

Exemple : Quantité de silice passant en solution basique

Pertinence théorique paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité

✘ 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES

- ✘ **Détermination fiable et facile** au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements
-

1 →

indicateurs généraux (universels) valables pour différents types de dégradation

2 →

indicateurs spécifiques à un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel, ...)

3

paramètres complémentaires (optionnels) **seuls quelques paramètres sont requis ...**

2 - PERTINENCE THÉORIQUE DE LA TENEUR EN Ca(OH)_2

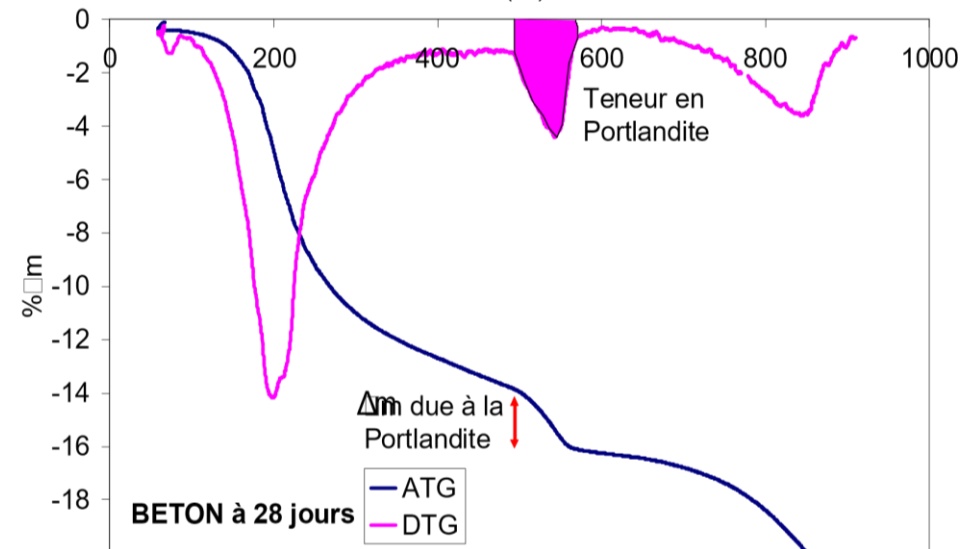
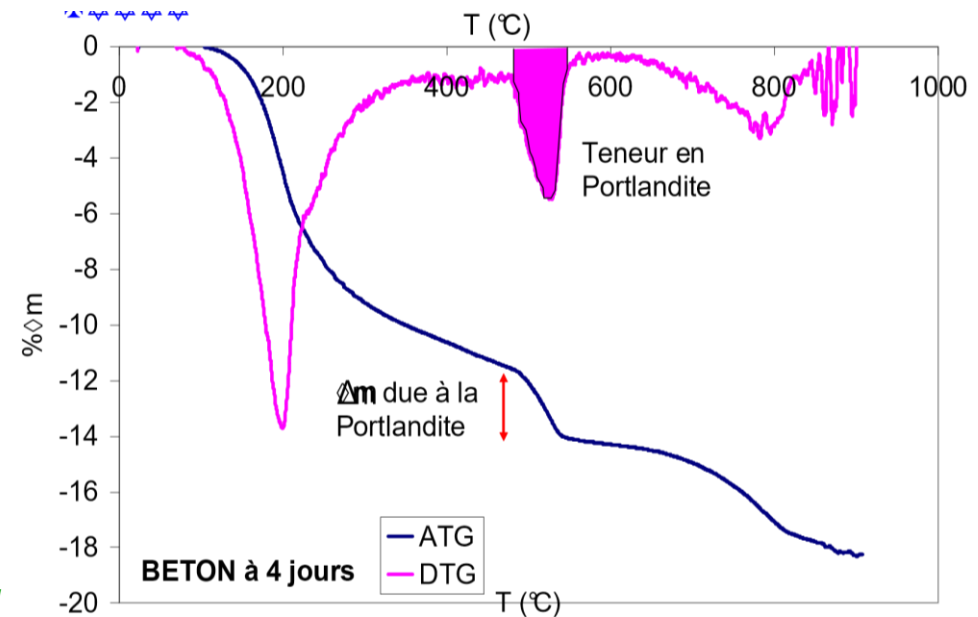
- Agressions chimiques d'origine externe Ca(OH)_2 forte solubilité très sensible aux agressions chimiques externes (attaques acides) *lixiviation (effet négatif)*
- Alcali-réaction
 Ca(OH)_2 source d'ions Ca^{++}
rôle important dans la précipitation de produits expansifs (effet négatif)
- Corrosion des armatures
Dans un matériau sain : $\text{NaOH} + \text{KOH} + \text{Ca(OH)}_2$ $\text{pH} \approx 13,5$
Réserve de Ca(OH)_2 effet tampon ($\text{pH} = 12,4$) dans solution interstitielle maintien d'un pH basique
assurance et maintien de la passivation des armatures (effet positif)
or Ca(OH)_2 est le ppal produit d'hydratation touché par la carbonatation *teneur en Ca(OH)_2 donnée d'entrée des modèles de carbonatation*

teneur en Ca(OH)_2 : indicateur de durabilité général (mesurée par ATG)

2 - MESURE DE LA TENEUR EN Ca(OH)_2 PAR ATG/ATD

- Mesure de la variation de la masse en fonction de la température
- Deshydroxylation la portlandite autour de **550°C**

[Carcasses, 2010]



2 - PERTINENCE DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU

- Évaluation de la qualité générale du matériau (paramètre global)
- Contrôle de la production de bétons ayant des caractéristiques prédéfinies
- Calcul d'autres indicateurs de durabilité (Exemple : sert à calculer le coefficient de diffusion du CO₂)
- Spécifications de durabilité limitées à des seuils sur ce paramètre dans le cas [formule simple + ouvrage-type + environnement peu agressif + durée de vie courte]
- Prédiction de la durée de vie (données d'entrée de tous les modèles, ...)
- Détermination facile : **pesée hydrostatique** [NF P18-459]

2 - PERTINENCE DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU

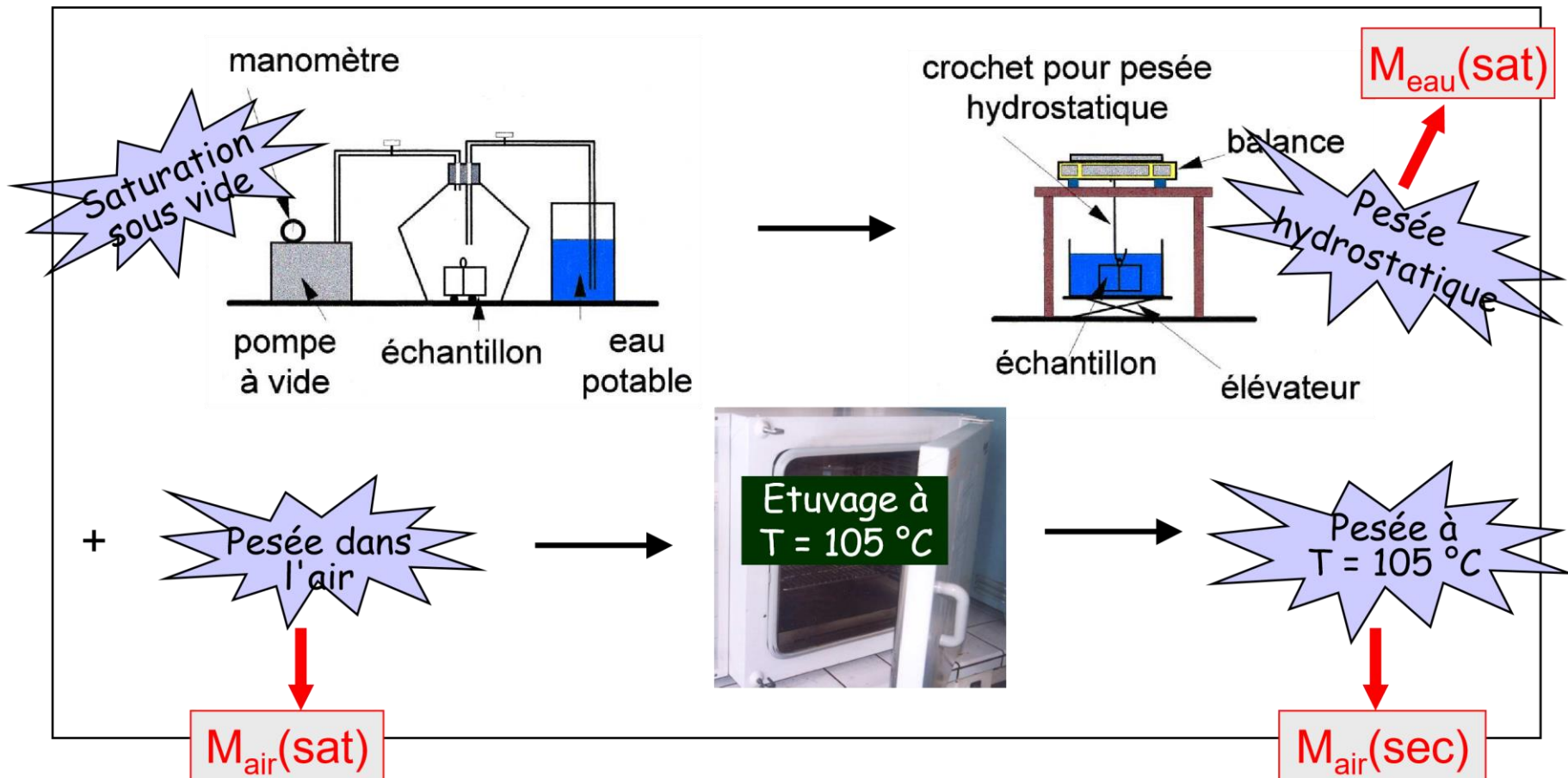
- Évaluation de la qualité générale du matériau (paramètre global)
- Contrôle de la production de bétons ayant des caractéristiques prédéfinies
- Calcul d'autres indicateurs de durabilité
- Spécifications de durabilité limitées à des seuils sur ce paramètre dans le cas [formule simple + ouvrage-type + environnement peu agressif + durée de vie courte]
- Prédiction de la durée de vie (données d'entrée de tous les modèles, ...)
- Détermination facile : **pesée hydrostatique** [NF P18-459] calcul de la porosité

$$P_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{air}}(\text{sat}) - M_{\text{air}}(\text{sec})}{M_{\text{air}}(\text{sat}) - M_{\text{eau}}(\text{sat})} \cdot 100 \quad (\text{en } \%)$$

P_{eau} : indicateur de durabilité général

2 - MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE A L'EAU

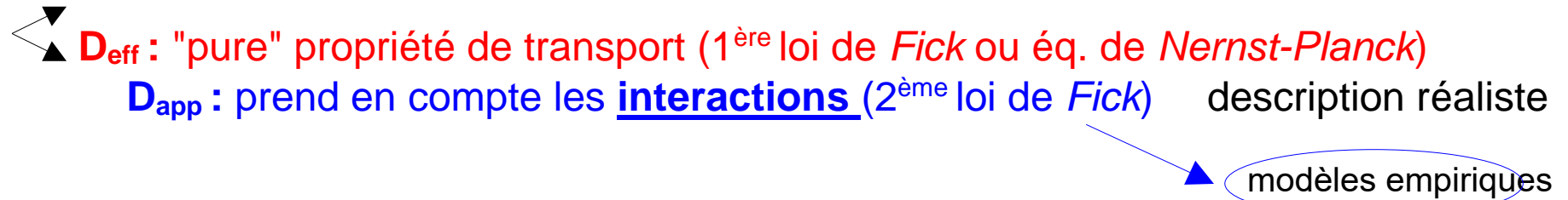
✘ Pesée hydrostatique [NF P18-459]



➔ **détermination facile**

2 - COEFFICIENTS DE DIFFUSION DES IONS Cl⁻ : PERTINENCE THÉORIQUE

paramètres-clés dans les lois décrivant la pénétration des ions Cl⁻



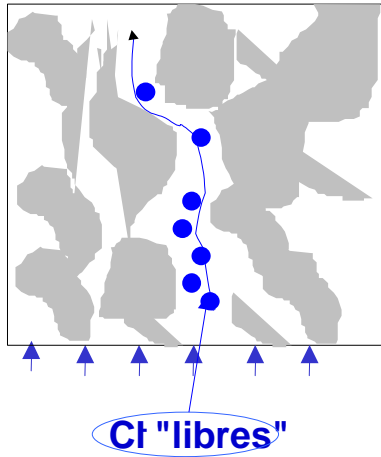
D_{eff} et D_{app} : indicateurs de durabilité

le choix entre D_{app} et D_{eff} dépendra de l'objectif de l'investigation et de l'utilisation que l'on souhaite faire de ce paramètre dans la pratique

Capacité de fixation des Cl^-

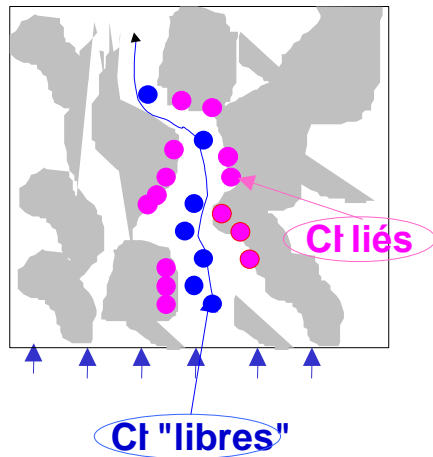
paramètre complémentaire spécifique à la corrosion initiée par les Cl^-

2 - ISOTHERMES D'INTERACTION CI-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- Chlorures "libres" (solubles dans l'eau) :
dans la phase liquide
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)

2 - ISOTHERMES D'INTERACTION CI-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



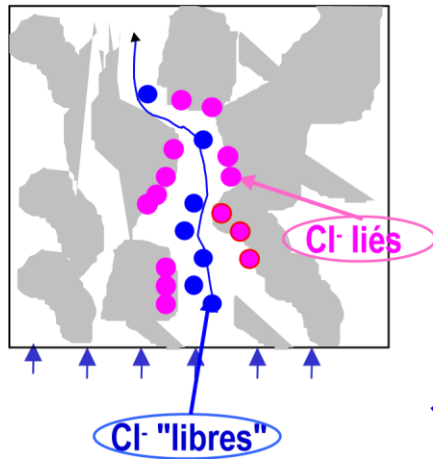
- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
dans la phase liquide
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide) •

Chlorures liés : formation de **monochloroaluminate**
(sel de *Friedel*)

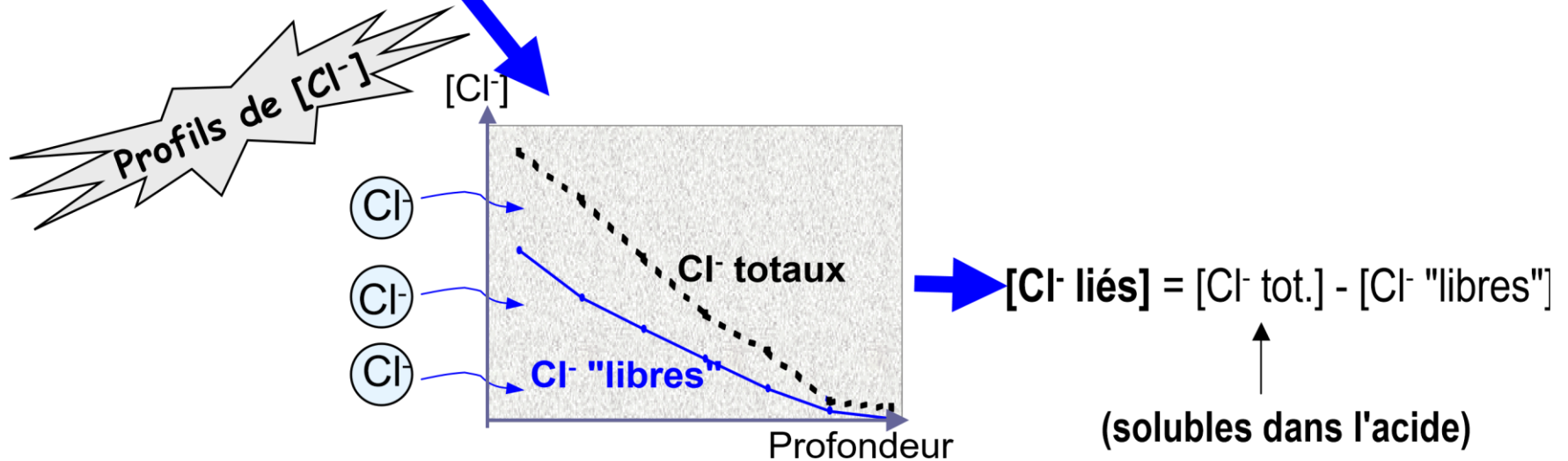
(ex. : réaction chimique avec les aluminates)
adsorption physique sur les **C-S-H**

la quantité dépend du
ciment (teneur en C_3A , ...)

2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



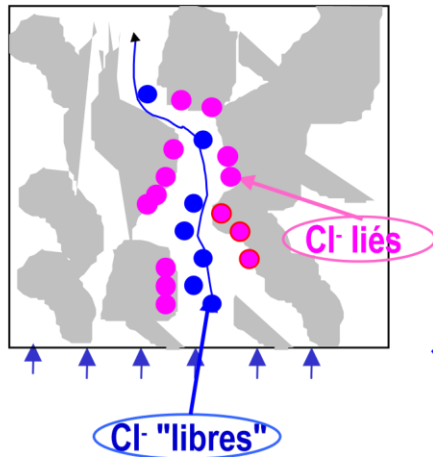
- **Chlorures "libres" (solubles dans l'eau) :**
 - ↳ dans la phase liquide
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)
- **Chlorures liés :**
 - ↳ formation de **monochloroaluminate** (sel de *Friedel*)
(ex. : réaction chimique avec les aluminates)
 - ↳



2 - ISOTHERMES D'INTERACTION CI-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE

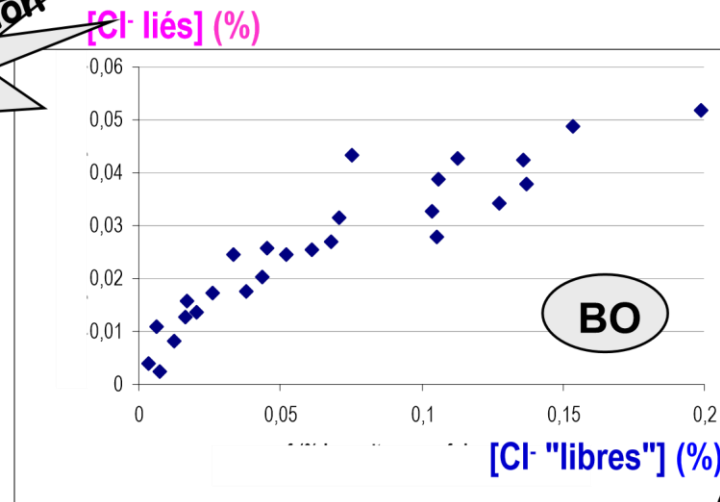
adsorption physique sur les **C-S-H**

2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
 - ↳ dans la phase liquide (ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)
- **Chlorures liés** :
 - ↳ formation de **monochloroaluminate** (sel de *Friedel*) (ex. : réaction chimique avec les aluminates)
 - ↳ adsorption physique sur les **C-S-H**

Isothermes d'interaction Cl⁻-matrice



↳ déduites des profils

(d'après [Baroghel-Bouny et al., RFGC, 2007])

2 - COEF. DE DIFF. DES Cl⁻ : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

- Migration en régime station. D_{eff} (pente)

ex. [NT Build 335]

D_{app} (time-lag)

3 techniques : titrage "aval" ou "amont", conductivimétrie "aval"

- Migration en régime non-station.

[NT Build 492, 1999]

D_{app} + capacité de fixation + P_{eau} D_{eff} ex.

- Diffusion en régime non-station.

[LPC n°58, 2002], [XP CEN/TS 12390-11, 2010]

D_{app} + capacité de fixation + P_{eau} D_{eff} ex.

2 méthodes : profil (prélèvements + extraction + dosage des Cl⁻) et colorimétrie

- Mesure de la résistivité électrique (r) $D_{eff} = a / r$

ex. [norme espagnole, recom. RILEM, ...]

indicateur de substitution

différentes méthodes sont à disposition
(directes ou par l'intermédiaire d'autres paramètres)

2 - COEF. DE DIFF. DES CI : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

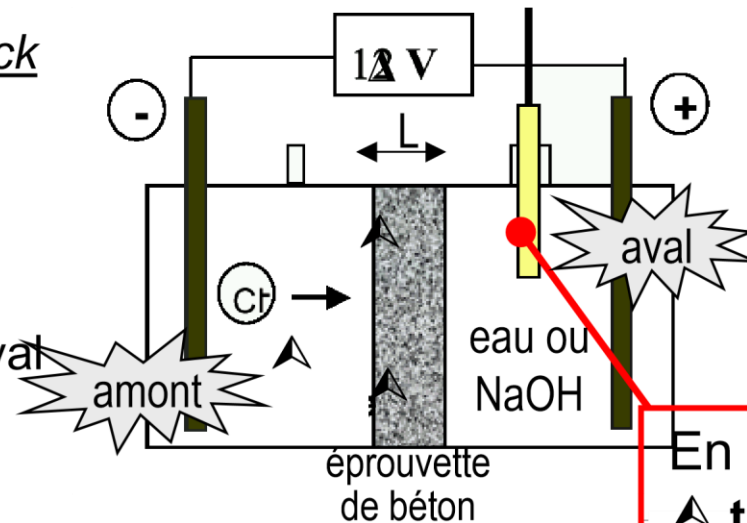
- Essais de migration sous champ électrique •

Équation de Nernst-Planck

- flux de diffusion négligé

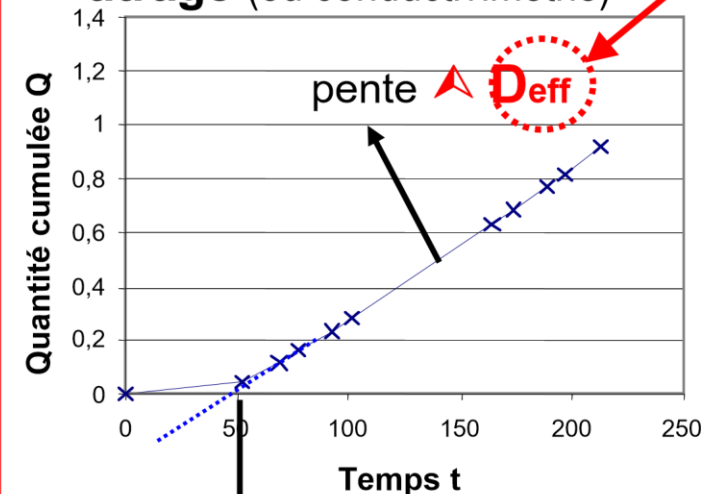
$$J = D_{\text{eff}} \left(\frac{Z.F}{R.T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

- pas d'interaction
- titrage dans le comp. aval



En régime stationnaire :

▲ **titrage** (ou conductivimétrie)



2 - COEF. DE DIFF. DES Cl⁻ : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

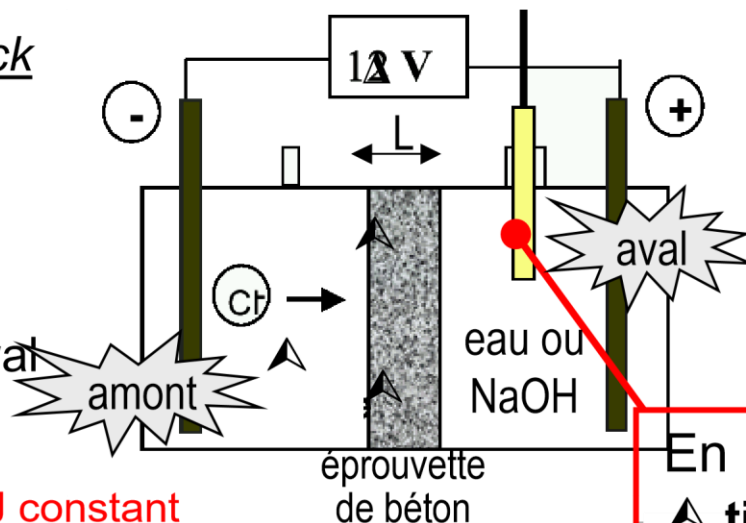
- Essais de migration sous champ électrique •

Équation de *Nernst-Planck*

- flux de diffusion négligé

$$J = D_{\text{eff}} \left(\frac{Z.F}{R.T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

- pas d'interaction
- titrage dans le comp. aval



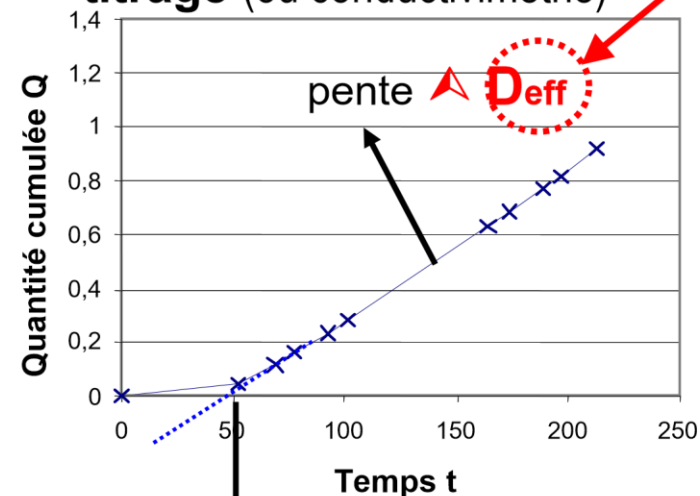
flux J constant

Coef. de dif. effectif des Cl⁻ :

$$D_{\text{eff}} = \frac{R.T}{Z.F} \cdot \frac{L}{\Delta E \cdot \gamma \cdot C_{\text{amont}}} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A} \quad (\text{en m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

En régime stationnaire :

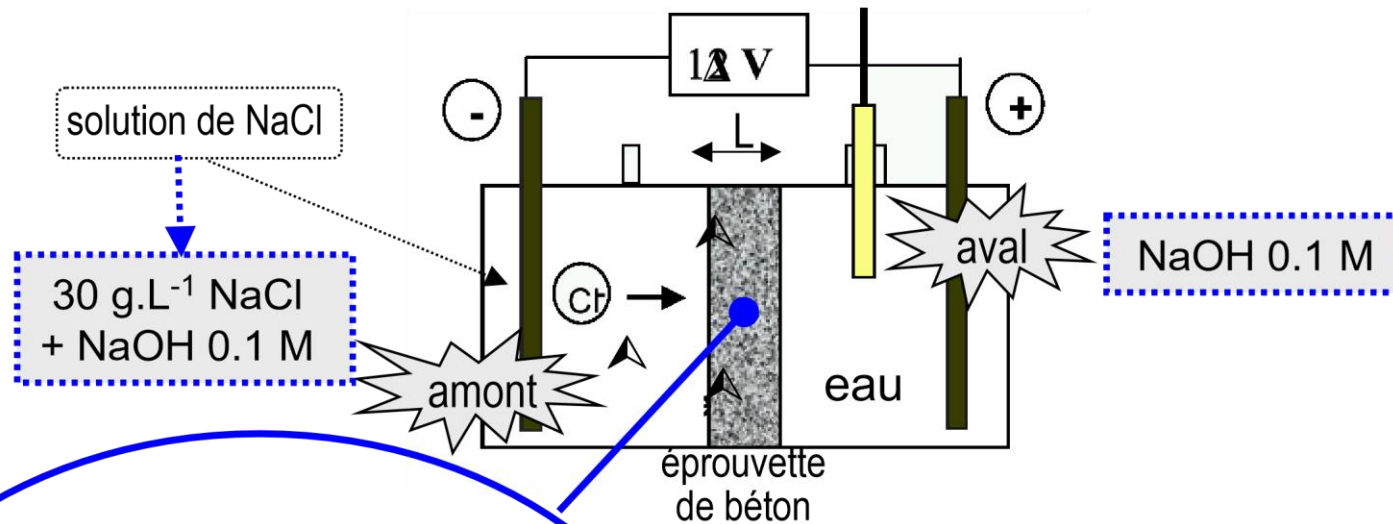
▲ **titrage** (ou conductivimétrie)



time-lag ▲ **D_{app}**

2 - COEF. DE DIFF. DES Cl⁻ : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

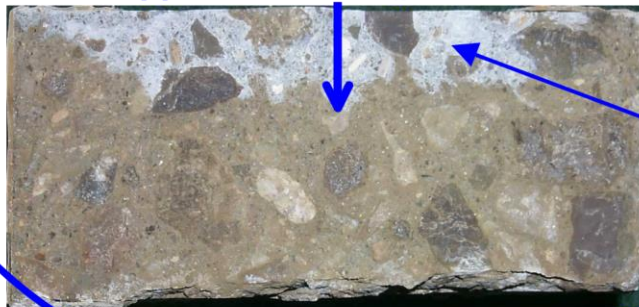
- Essais de migration sous champ électrique •



En régime non-stationnaire :

▲ x_d (test colo. $AgNO_3$)

▲ D_{app}



zone contaminée par les Cl⁻

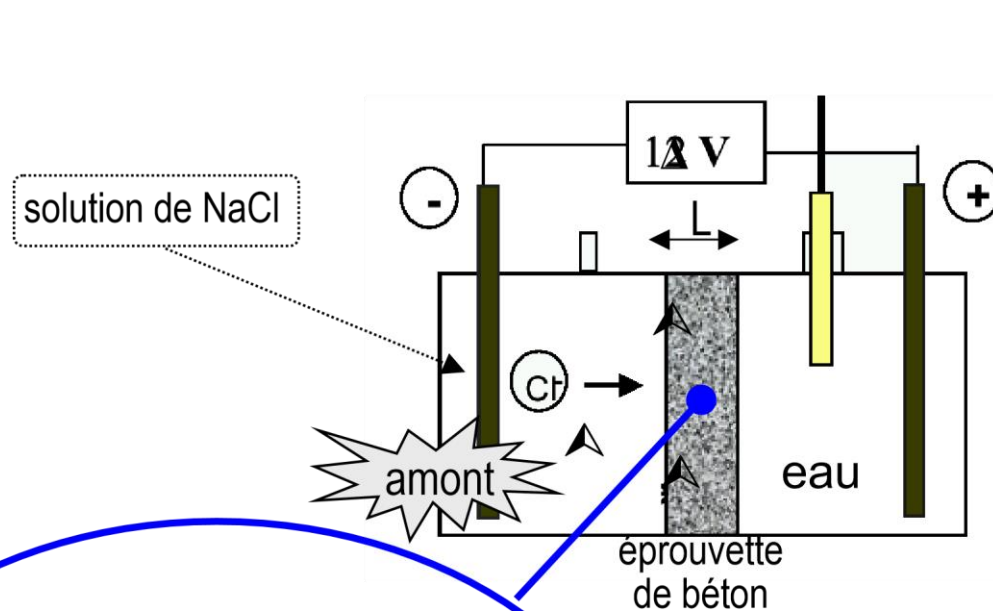
méthode de Tang & Nilsson
[NT Build 492, 1999]



[Dispositif LCPC]

2 - COEF. DE DIFF. DES Cl⁻ : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

- Essais de migration sous champ électrique •



Équation de *Nernst-Planck*

$$J = - D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial C}{\partial x} - \frac{Z.F}{R.T} \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

(si D_{eff} constant)

$$\frac{\partial^2 C}{\partial t^2} = D_{\text{app}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{Z.F}{R.T} \frac{\Delta E}{L} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Coef. de dif. apparent des Cl⁻ (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) :

$$D_{\text{app}} = \frac{R.T}{Z.F} \cdot \frac{L}{\Delta E} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t}$$

[Tang & Nilsson, 1992]

En régime non-stationnaire :

▲ x_d (test colo. AgNO_3)

▲ D_{app}



avec

x_d : profondeur moy. de pénétration des Cl⁻

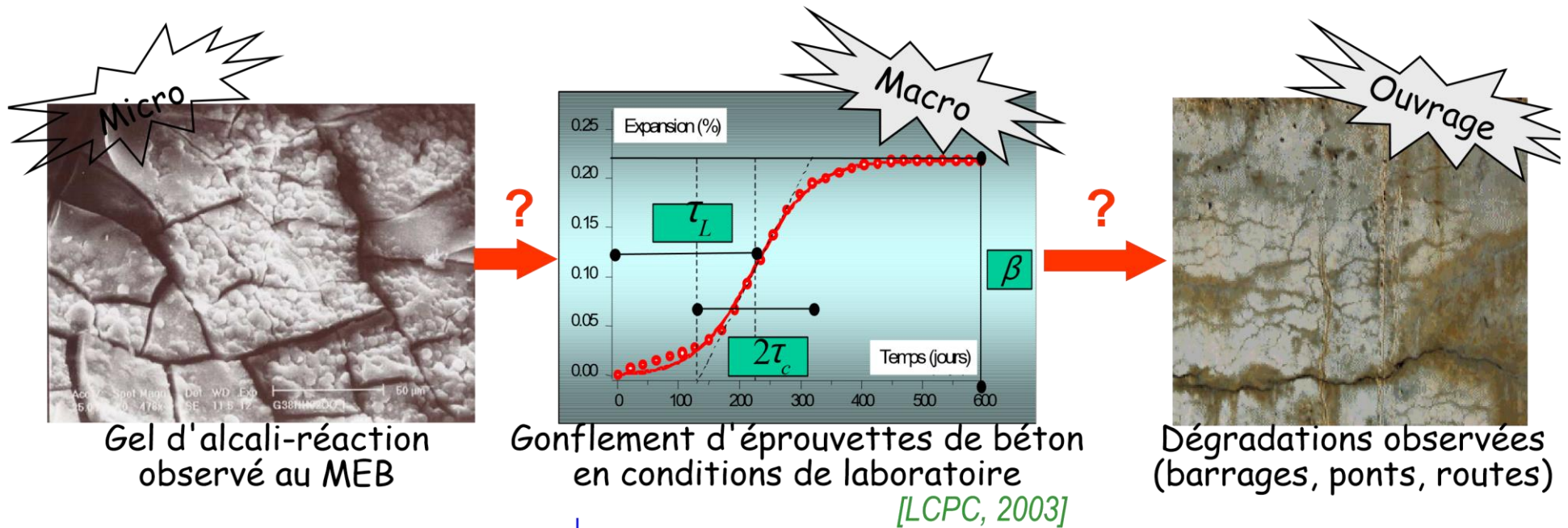
t : durée de l'essai

Z : valence de l'ion Cl⁻

ΔE : dif. de pot. réelle aux bornes de l'épr.

α : terme auxiliaire

2 - ALCALI-RÉACTION : IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES



PERTINENTS • Alcali-réaction : phénomène multi-

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION

échelles • τ_L : temps de latence τ_c : temps caractéristique β :

amplitude max. de gonflement

*En dépit de mécanismes non complètement élucidés **identification de paramètres pertinents** (sur la base d'études en labo.) pour une nouvelle approche de la durabilité vis-à-vis de l'alcali-réaction*
Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION

évaluation de la réactivité des granulats ou des mélanges granulaires sans add.

NR : non réactif

PR : potentiellement réactif

PRP : potentiellement réactif à effet de pessimum



Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**

(cinétique de dissolution de la silice)

↳ évaluation de la réactivité des mélanges granulaires sans addition
(PRP, PR et NR)



- **concentration en alcalins équivalents Na_2O_{eq} . actifs de la solution interstitielle**

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION

(bilan des alcalins contenus dans [ciment + granulats + additions min.] par analyse chimique)



Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**

(cinétique de dissolution de la silice)

↙ évaluation de la réactivité des mélanges granulaires sans addition
(PRP, PR et NR)

Micro

- **concentration en alcalins équivalents Na_2O_{eq} . actifs de la solution interstitielle**

(bilan des alcalins contenus dans [ciment + granulats + additions min.] par analyse chimique)

Macro

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION

Indicateur physique global (mesuré sur éprouvettes en béton)

- **déformations de gonflement (expansion) en fonction du temps** (*cinétique d'expansion longitudinale de bétons dopés en alcalins*) jusqu'à l'échéance de **3 mois** (ou éventuellement **5 ou 12 mois**)

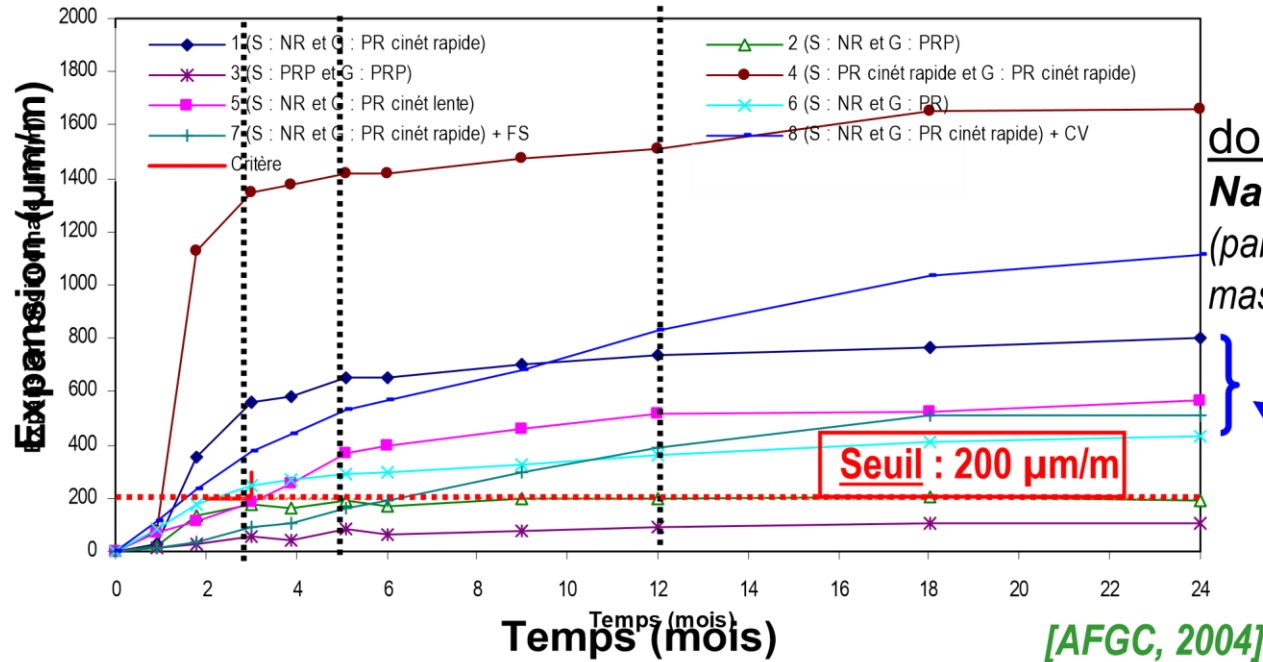
Exemples : résultats exp. obtenus en labo. (groupe AFGC)



Indicateur physique global (mesuré sur éprouvettes en béton)

2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION

- déformations de gonflement (expansion) en fonction du temps



dopage :
 $Na_2O_{eq} = 1,25\%$
 (par rapport à la masse de C+A)



(T=60°C - HR=100%)

3 - CLASSES ASSOCIÉES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX



[AFGC, 2004]

Coef. de diffusion des Cl⁻

Durabilité "potentielle" → Indicateur général ↓	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Elevée (E)	Très élevée (TE)
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coef. de diffusion "effectif" des Cl ⁻ D_{eff} ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl ⁻ (mesuré par essai de migration) $D_{\text{app(mig)}}$ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl ⁻ (mesuré par essai de diffusion ns) $D_{\text{app(dif)}}$ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)				< 5	
Perméabilité "apparente" aux gaz $K_{\text{app(gaz)}}$ (10^{-18} m^2) (à S=0)	> 1000	300 à 1000	100 à 300	30 à 100	< 30
Perméabilité intrinsèque à l'eau liq. k_{liq} (10^{-18} m^2) (à S=1)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur en Ca(OH) ₂ (% par rapport à la masse de ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25

[valeurs moy. indicatives - Mesures sur éprouv. conservées préalablement dans l'eau (âge ≤ 90 j)]

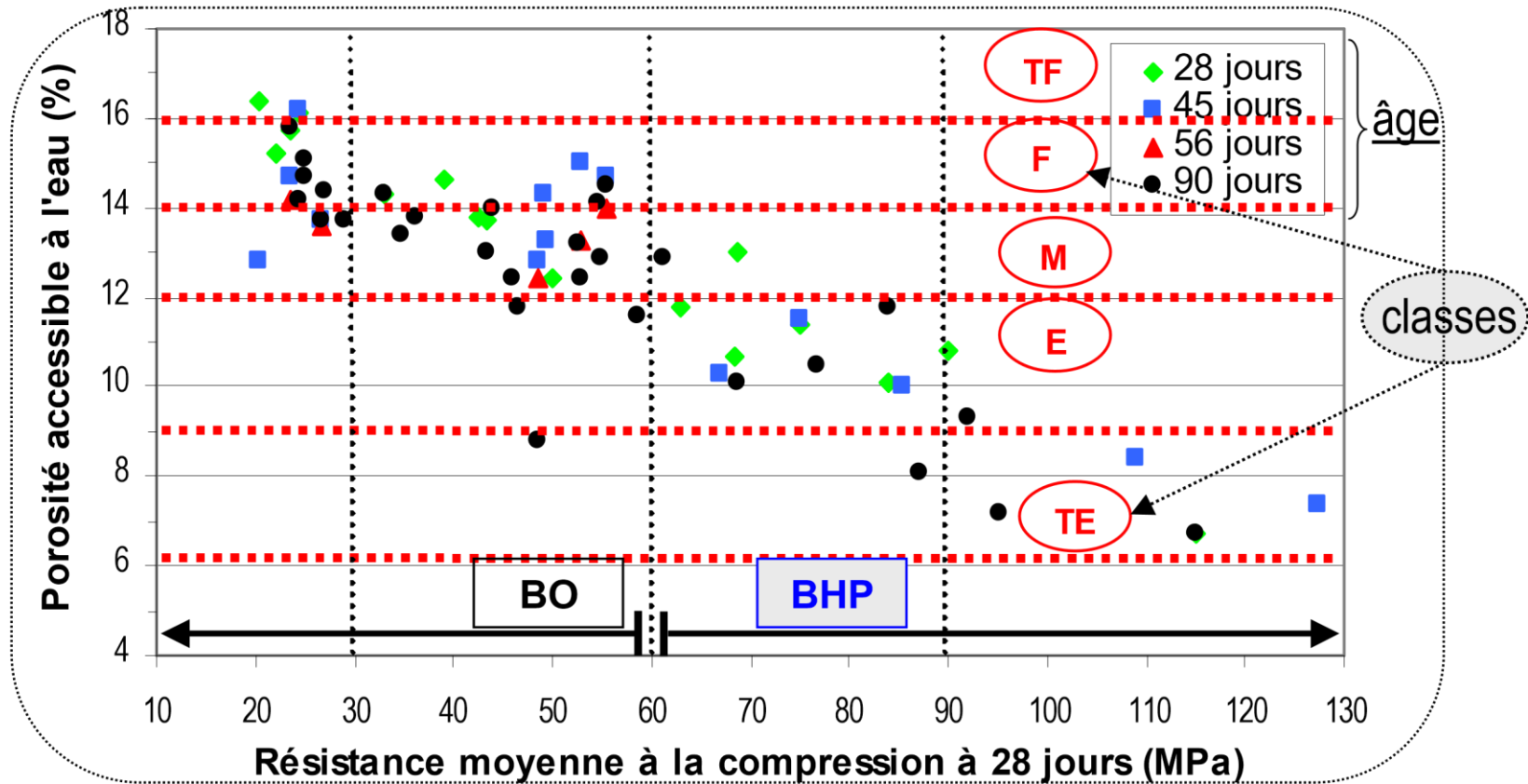
(PRÉVENTION DE LA CORROSION DES ARMATURES)

Évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné

- ① selon chaque indicateur déterminé sur la base d'une
- ② appréciation globale

3 - POROSITÉ ACCESSIBLE A L'EAU

Résultats obtenus par pesée hydrostatique sur éprouvettes de bétons (après conservation dans l'eau) - Mode opératoire AFPC-AFREM •



Corrélation entre porosité et résistance : [Baroghel-Bouny, TI, 2005] P_{eau} des

B20 aux **BHP** avec FS tels que $R_{\text{moy.28}} > 90 \text{ MPa}$ ($P_{\text{eau}} < 10\%$)

BHP durabilité "potentielle" élevée ou très élevée

3 - PERMÉABILITÉ AUX GAZ : MÉTHODE DE DÉTERMINATION

- Dispositif à charge constante (CEMBUREAU) - Mode opératoire AFPC-AFREM •



épreuve en béton

[LPC n° 58, 2002]

Éprouvette soumise à une pression d'entrée P constante de gaz (après séchage)

Perméabilité aux gaz "apparente" $K_{app(gaz)}$ à partir de la mesure du débit de gaz Q (en $m^3.s^{-1}$) sortant en régime permanent et des caractéristiques de l'épr. et de l'essai :

à $S = 0$

$$K_{app(gaz)} = \frac{2 \cdot Q \cdot P_{2atm} \cdot L}{2 \cdot \eta_{gaz}}$$

(en m^2)

dépend de P_{moy}

$$A.(P - P_{\text{atm}})$$

L : épaisseur de l'éprouvette (m) A

: section de l'éprouvette (m²) η_{gaz}

: viscosité dynamique du gaz

(Pa.s) P_{atm} : pression

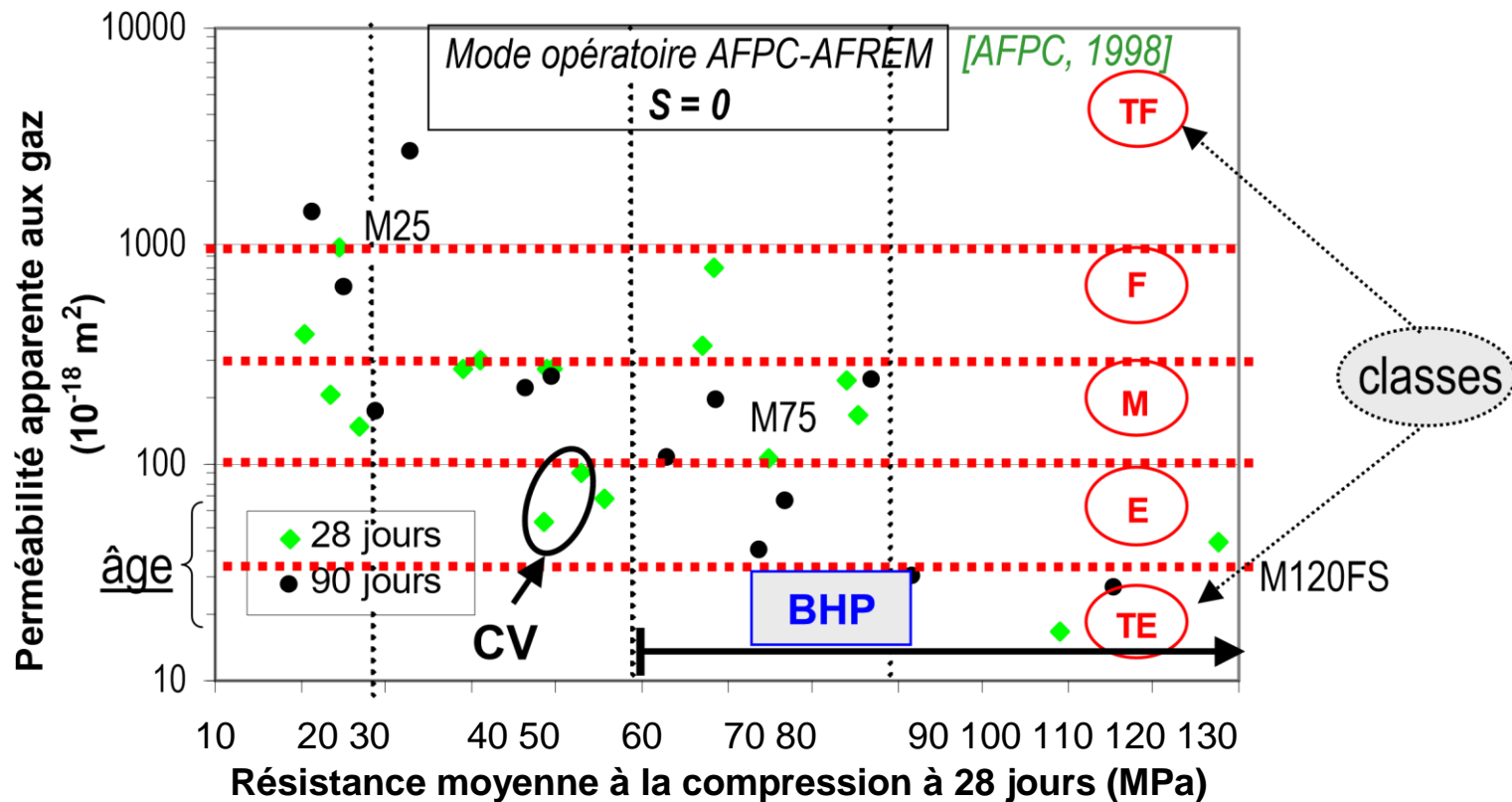
atmosphérique (Pa)

P : pression d'entrée appliquée (Pa) [par ex. P = 0,2 MPa]

3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"

- Résultats sur **bétons**

après conservation dans l'eau et étuvage à
 $T=105\pm 5^{\circ}\text{C}$



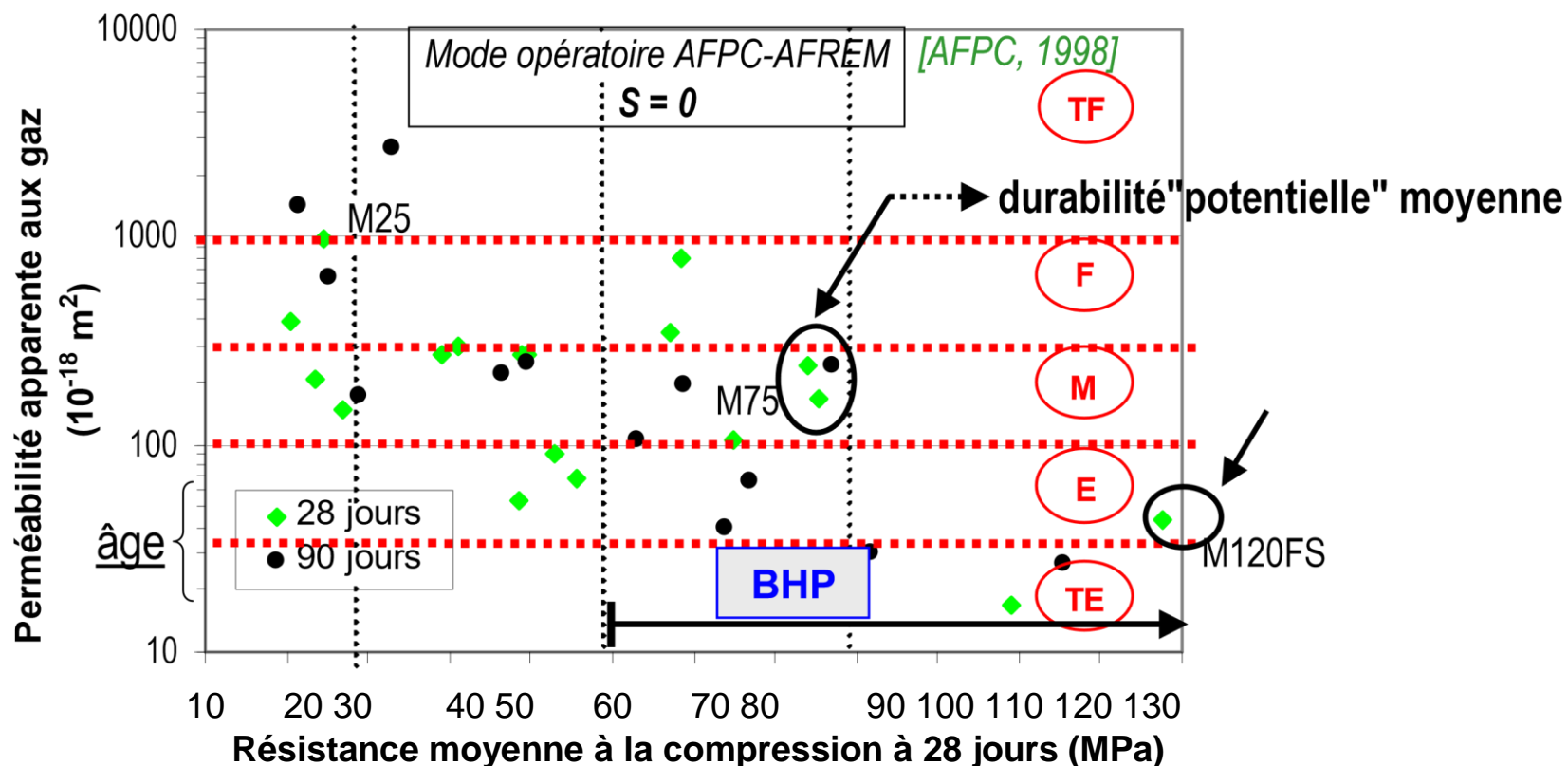
[Baroghel-Bouny, TI, 2005]

3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"

- Résultats sur **bétons**

$K_{app(gaz)}$ (à $S=0$) (de plusieurs ordres de grandeur) des bétons bas de gamme (20-25 MPa) aux **BHP avec FS**

après conservation dans l'eau et étuvage à $T=105\pm 5^\circ\text{C}$



3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"

- Résultats sur **bétons**

... mais dispersion des résultats : *[Baroghel-Bouny, TI, 2005]* influence négative sur les **BHP** de

- **microfissuration** (mais ne semble pas amplifiée par le préconditionnement)

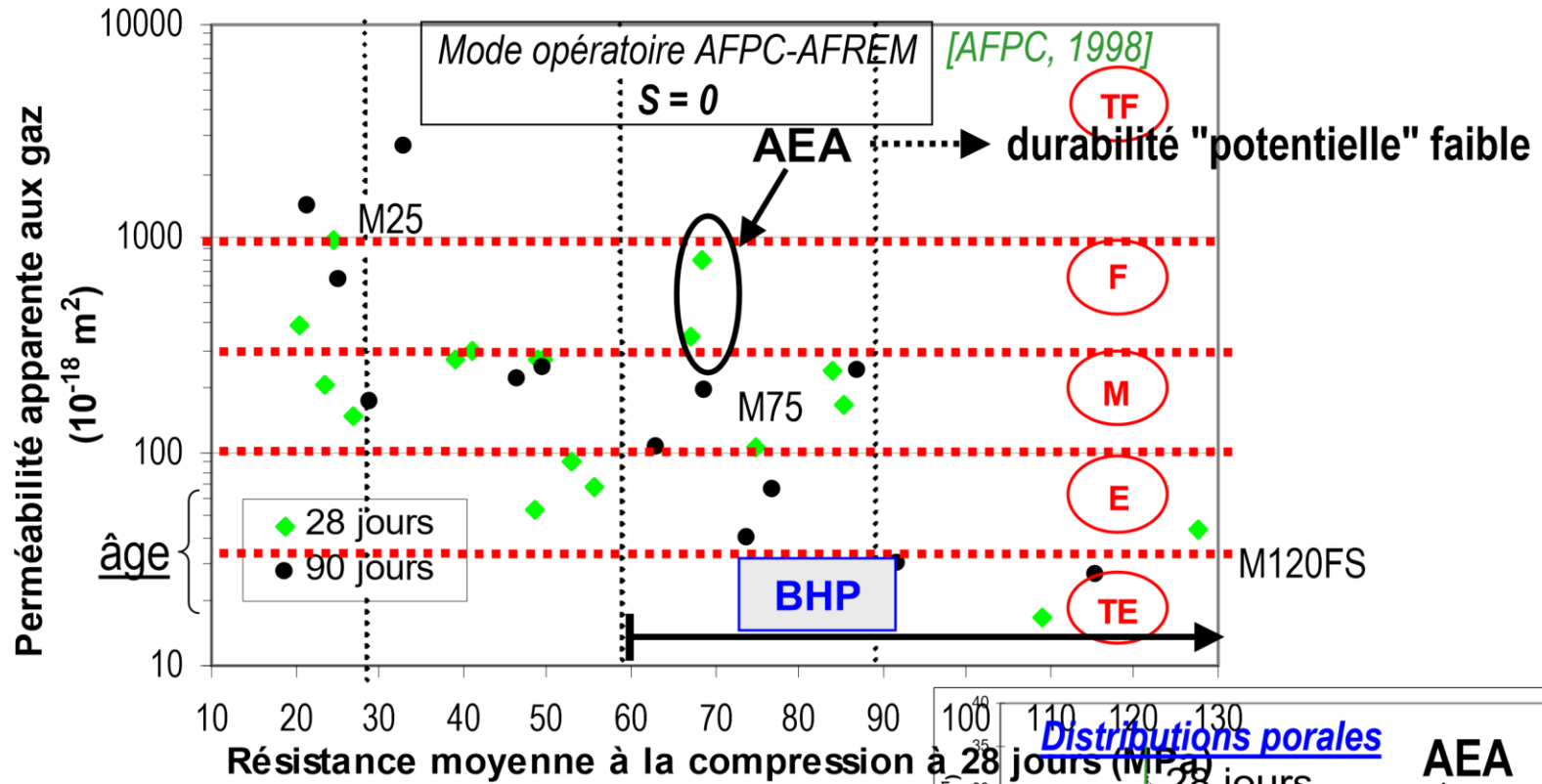
3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"

- Résultats sur **bétons**

après conservation dans l'eau et étuvage à
 $T=105\pm 5^{\circ}\text{C}$

3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"

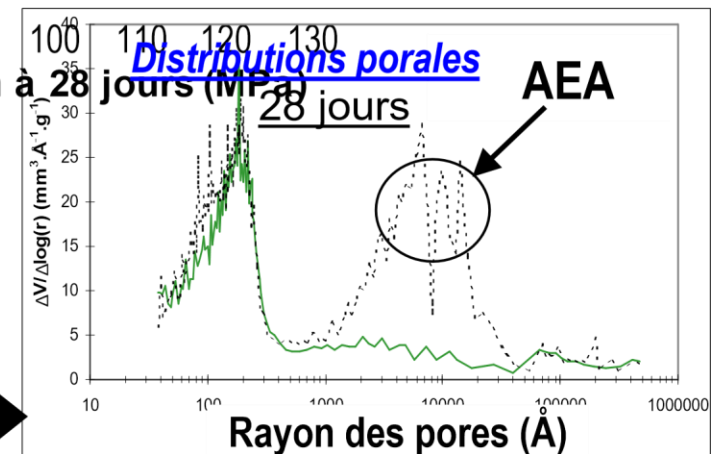
- Résultats sur **bétons**



... mais dispersion des résultats :

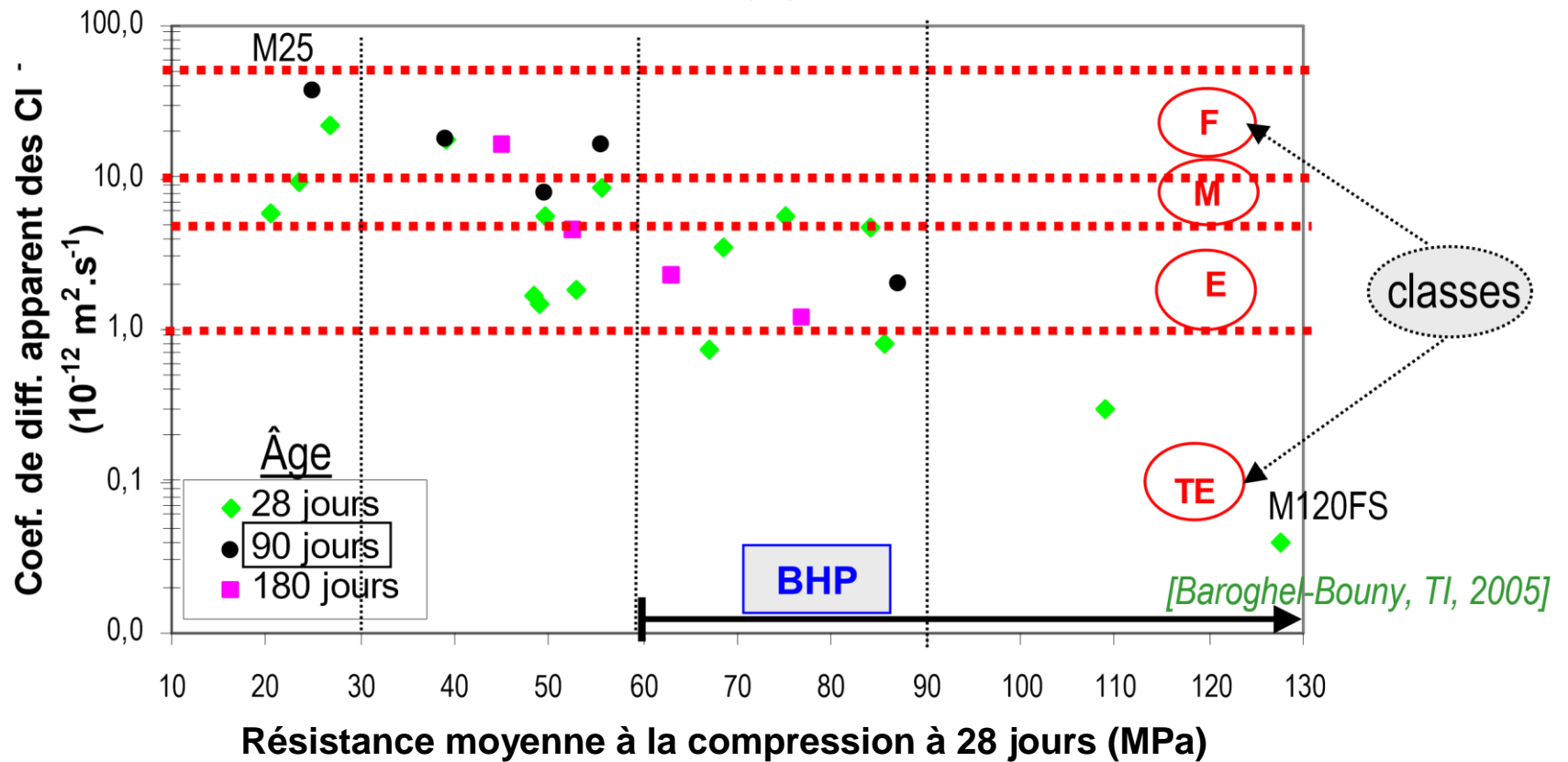
influence négative sur les **BHP** de

- **microfissuration** (mais ne semble pas amplifiée par le préconditionnement)
- présence d'**AEA** → connectivité du réseau des vides



3 - EXEMPLE : COEFFICIENT DE DIFFUSION "APPARENT" DES Cl^-

- Résultats obtenus par essai de migration en régime non-stationnaire sur des bétons saturés (après conservation dans l'eau) •



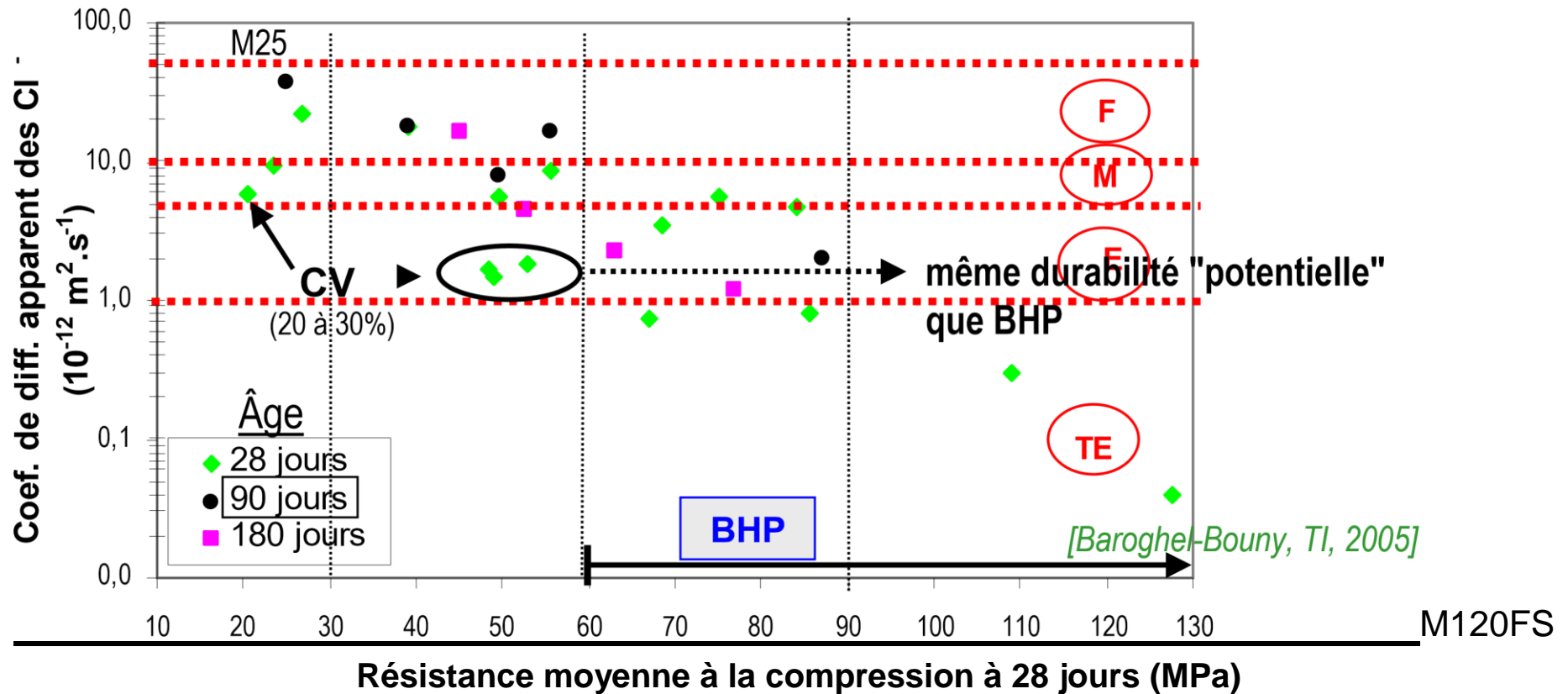
$D_{ns(mig)}$ (2 ordres de grandeur) entre bétons bas de gamme (20-25 MPa) et **BHP avec FS** **BHP** **durabilité "potentielle" élevée ou très élevée** mais déviation par rapport à une relation simple entre $D_{ns(mig)}$ et

$R_{moy.28}$

52

3 - EXEMPLE : COEFFICIENT DE DIFFUSION "APPARENT" DES Cl^-

- Résultats obtenus par essai de migration en régime non-stationnaire sur des bétons saturés (après conservation dans l'eau) •



La résistance mécanique est insuffisante pour évaluer la durabilité "potentielle" d'un BA (notamment avec additions pouzzo.) et pour qualifier une formule **pertinence d'une approche performantielle et des ID choisis**

3 - DURABILITÉ "POTENTIELLE" SUR LA BASE D'INDICATEURS (MESURÉS À 28 JOURS)

Bétons (classés selon $R_{moy,28}$)	E/C	E/liant	$R_{moy,28}$ (MPa)	P_{eau} OU P_{Hg} (%)	$K_{app(gaz)}$ ($S = 0$) ($10^{-18} m^2$)	$D_{ns(mig)}$ OU $D_{ns(dif)}$ ^(*) ($10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$)	Durabilité "potentielle" globale ⁽¹⁾
M25CVEA	0,84	0,67	20,5	16,4	390	5,8	F
M25CV	0,96	0,77	23,5	15,7	206	9,5	M
M25	0,84	0,84	24,5	16,1	978	30,0	F
M25EA	0,70	0,70	26,8	13,7	148	22,4	M
B30	0,43	0,43	39,0	10,7(H_g)	270	17,5	M
B32	0,44	0,44	46,5	11,8	217	8,6^(*)	M
M30CV	0,74	0,52	48,5	12,8	54	1,7	E
M50CVEA	0,45	0,36	49,0	14,3	271	1,5	M
M50EA	0,39	0,39	49,5	13,3	272	5,5	M
M50CV	0,56	0,45	53,0	15,0	89	1,8	M
M50	0,48	0,48	55,5	14,7	69	8,7	M
M75FSEA	0,34	0,32	67,0	10,3	347	0,7	M
M75EA	0,27	0,27	68,5	10,7	782	3,5	M
B60	0,34	0,34	68,8	10,1	196	1,2^(*)	E
M75	0,32	0,32	75,0	11,4	106	5,6	M
B70FS	0,37	0,35	84,0	7,6(H_g)	240	4,8	E
M75FS	0,38	0,36	85,5	10,0	167	0,8	E
B80FS	0,30	0,28	91,9	9,3	30	0,7^(*)	E
M100FS	0,33	0,30	109,0	8,4	17	0,3	TE
M120FS	0,26	0,23	127,5	7,4	43	0,04	TE

$R_{moy,28}$ croissante

30% CV

BHP

(1): pondération identique pour chaque indicateur

[Baroghel-Bouny, OA 44, 2004]

BHP (avec FS et sans AEA)

durabilité "potentielle" élevée ou très élevée

4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

EN



- **Exemple 1** : protection contre la corrosion initiée par les Cl⁻ (enrobage = 50 mm) •

☆☆☆☆☆

Type d'environnement →

5

Durée de vie exigée / Niveau d'exigence ↓	(exposition aux sels marins)			
5.1	5.2 < 30 ans	•P _{eau} < 16	•K _{app(gaz)} < 30	•K _{app(gaz)} < 30
•P _{eau} < 14			•k _{liq} < 0,1	•k _{liq} < 0,01
Niveau 1 de 30 à 50 ans	•P _{eau} < 15	•P		•k _{liq} < 0,01
•P _{eau} < 11	Niveau 2 de 50 à 100 ans	•P _{eau} < 14	> 120 ans	6
•P _{eau} < 11			•P _{eau} < 9	(immersion dans l'eau de mer)
Niveau 3		•D _{app(mig)} < 2	Niveau 5	
		•k _{liq} < 0,1	•D _{app(mig)} < 10	
de 100 à 120 ans	•P _{eau} < 12	•P _{eau} < 9	•D _{app(mig)} < 1	•P _{eau} < 15
Niveau 4	•D _{app(mig)} < 20	•D _{app(mig)} < 1		•P _{eau} < 13

4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ

FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

- $P_{\text{eau}} < 13$
- $D_{\text{app(m ig)}} < 7$

- $P_{\text{eau}} < 12$
- $D_{\text{app(m ig)}} < 5$

- $P_{\text{eau}} < 9$

- $D_{\text{app(m ig)}} < 1$
- $P_{\text{eau}} < 14$
- $P_{\text{eau}} < 11$
- $P_{\text{eau}} < 11$
- $D_{\text{app(m ig)}} < 3$
- $k_{\text{liq}} < 0,1$
- $P_{\text{eau}} < 10$
- $D_{\text{app(m ig)}} < 2$
- $K_{\text{app(gaz)}} < 100$
- $k_{\text{liq}} < 0,05$
- $P_{\text{eau}} < 9$
- $D_{\text{app(m ig)}} < 1$
- $K_{\text{app(gaz)}} < 30$
- $k_{\text{liq}} < 0,01$

7 (zone de m arnage)

[Baroghel-Bouny, TI, 2005]

cahiers des charges, recommandations, règlements, normes, ...

Sélection ou qualification de formules de béton pour une structure donnée

4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ

FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

EN

- Exemple 2 : prévention vis-à-vis de l'[alcali-réaction](#) • (1)



Sur la base des niveaux de prévention **A**, **B** et **C** définis dans *Recommandations [LCPC, 1994]*

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Niveau d'exigence ↓	1 (sec ou modérément humide)	2 (cycles d'humid.séchage)	3 (immersion ou présence de sels)
de 5 à 50 ans Niveau 1	A	A	A
de 50 à 100 ans Niveau 2	A	B	B

4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

> 120 ans Niveau 3	C	C	C
-----------------------	---	---	---

- **A** aucune spécification (supplémentaire aux *Recommandations [LCPC, 1994]*) • **B** et **C** spécifications relatives aux indicateurs spécifiques à l'alcali-réaction ...

4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ

FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

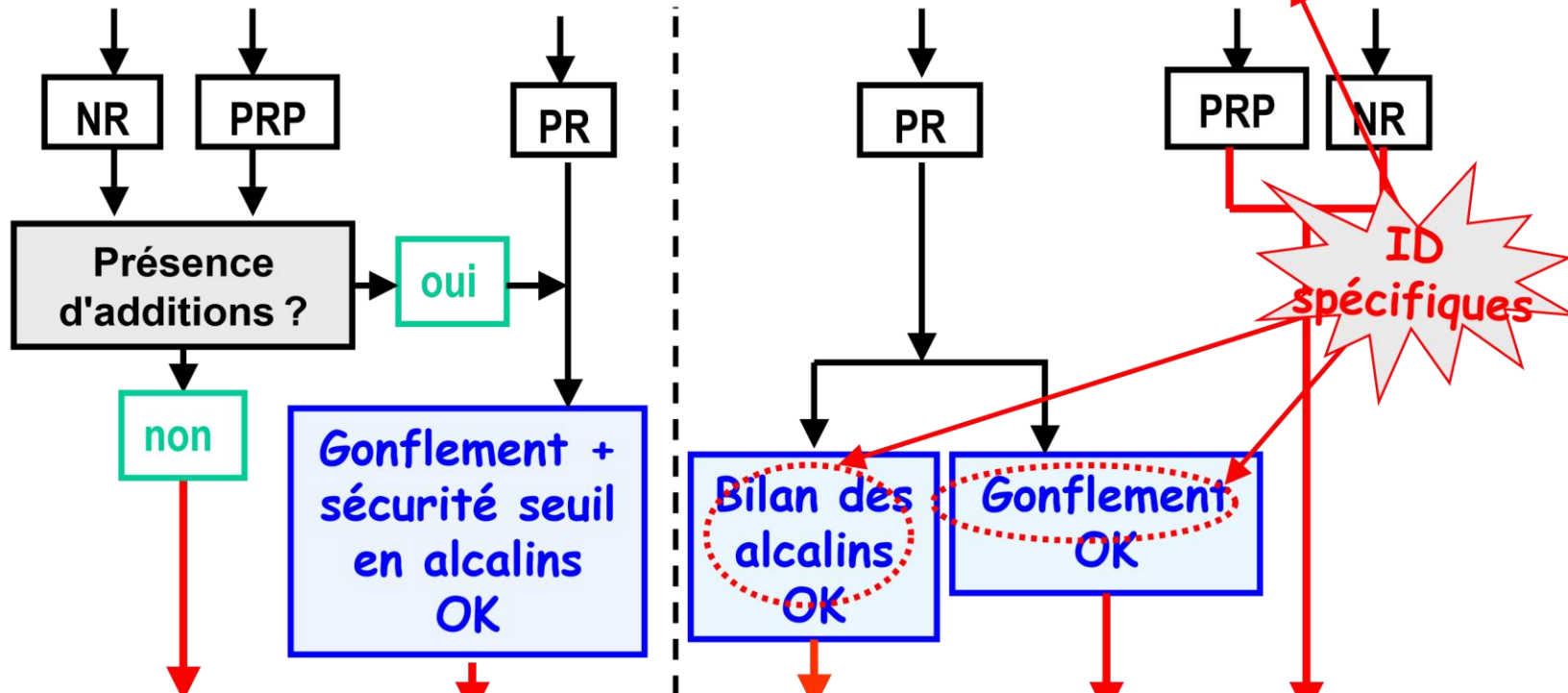


✱✱✱✱✱

• Exemple 2 : prévention vis-à-vis de l'alcali-réaction • (2)

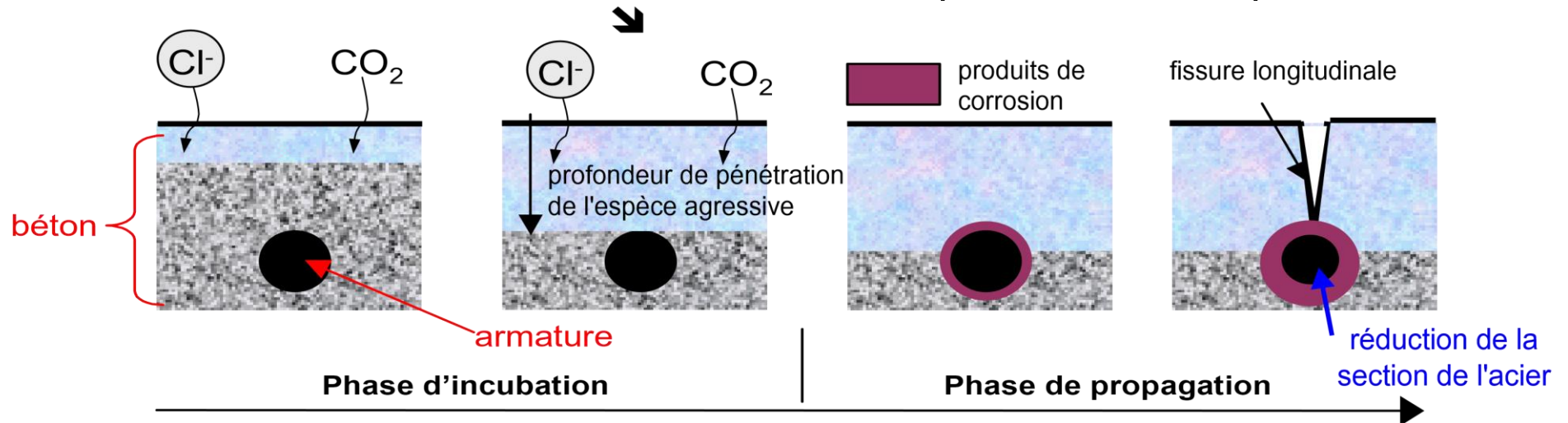
Niveau 3 (> 120 ans) (C) | Niveau 2 (de 50 à 100 ans) + B

Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps ?



5 - LA CORROSION DES ARMATURES DU BÉTON ARMÉ

La corrosion des armatures du béton armé peut être initiée par la



→ pénétration d'espèces agressives

→ les espèces agressives ont atteint les aciers

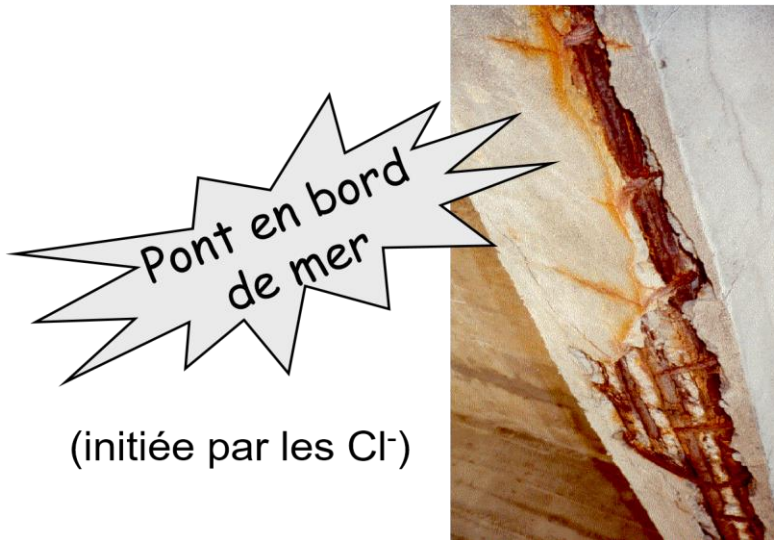
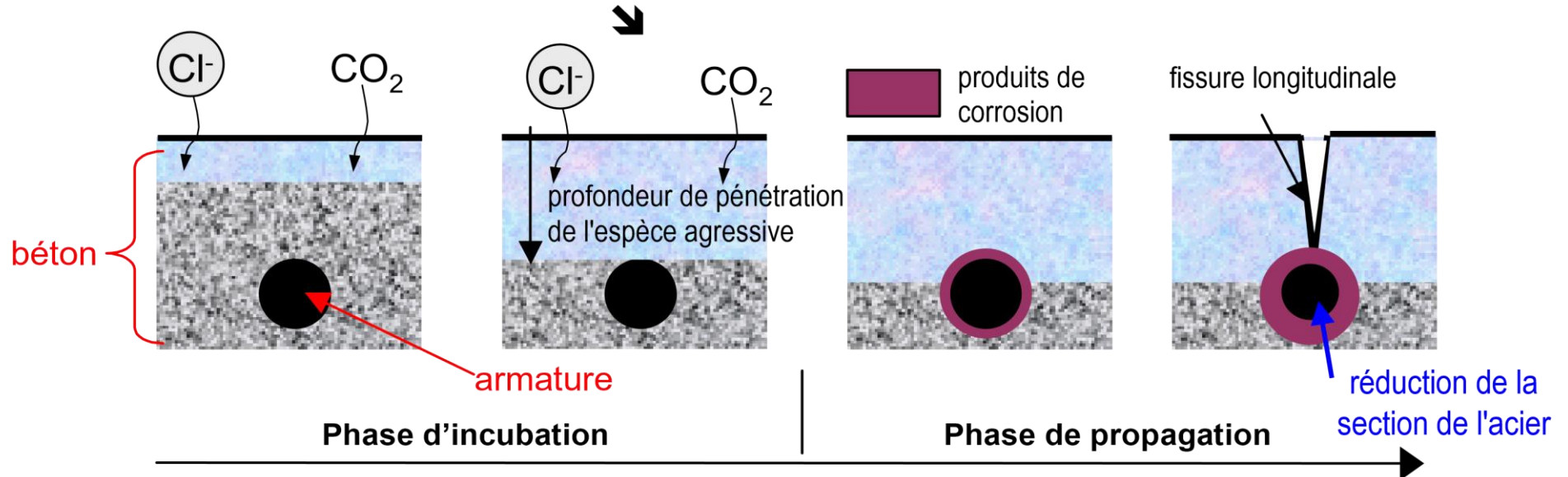
→ amorçage et propagation de la corrosion

→ structure dégradée

(fissuration béton, réduction section acier)

carbonatation du béton (du pH) ou par la pénétration des **chlorures**

La corrosion des armatures du béton armé peut être initiée par la



(initiée par la carbonatation)

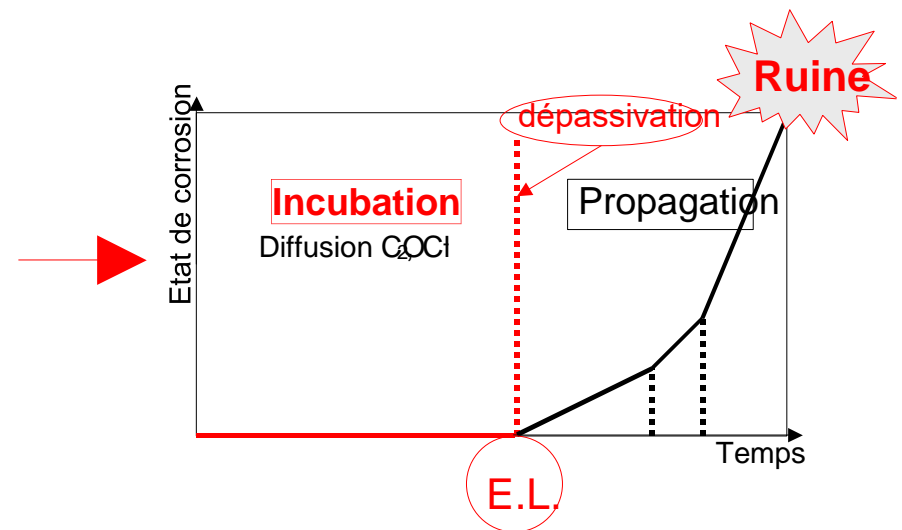
carbonatation du béton (du pH) ou par la pénétration des **chlorures**

5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.

- Méthodologie •
(3)

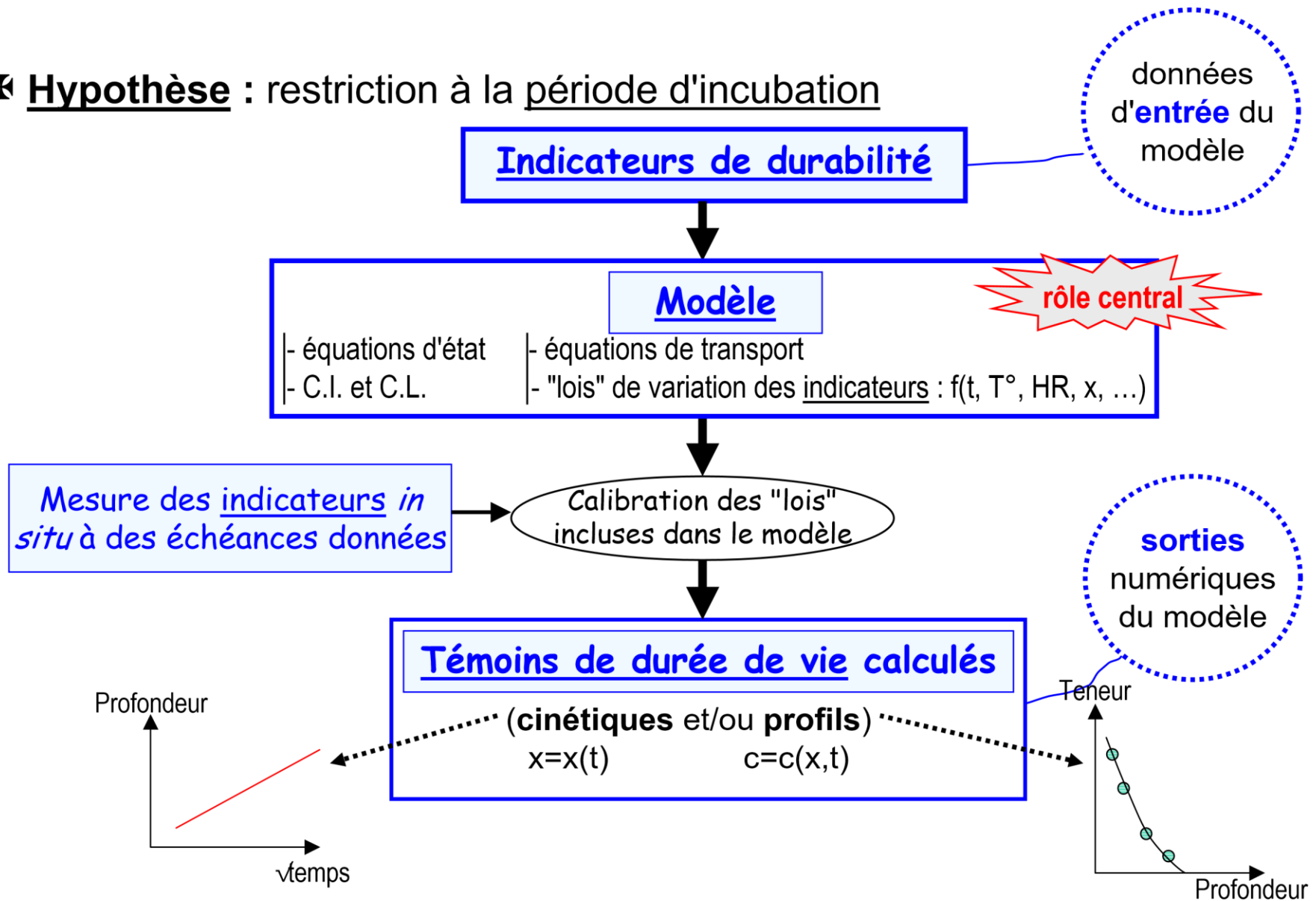
Hypothèse : restriction à la période d'incubation

(état limite (E.L.) =
dépassivation des
armatures) **sécuritaire**,
approche matériau, ...



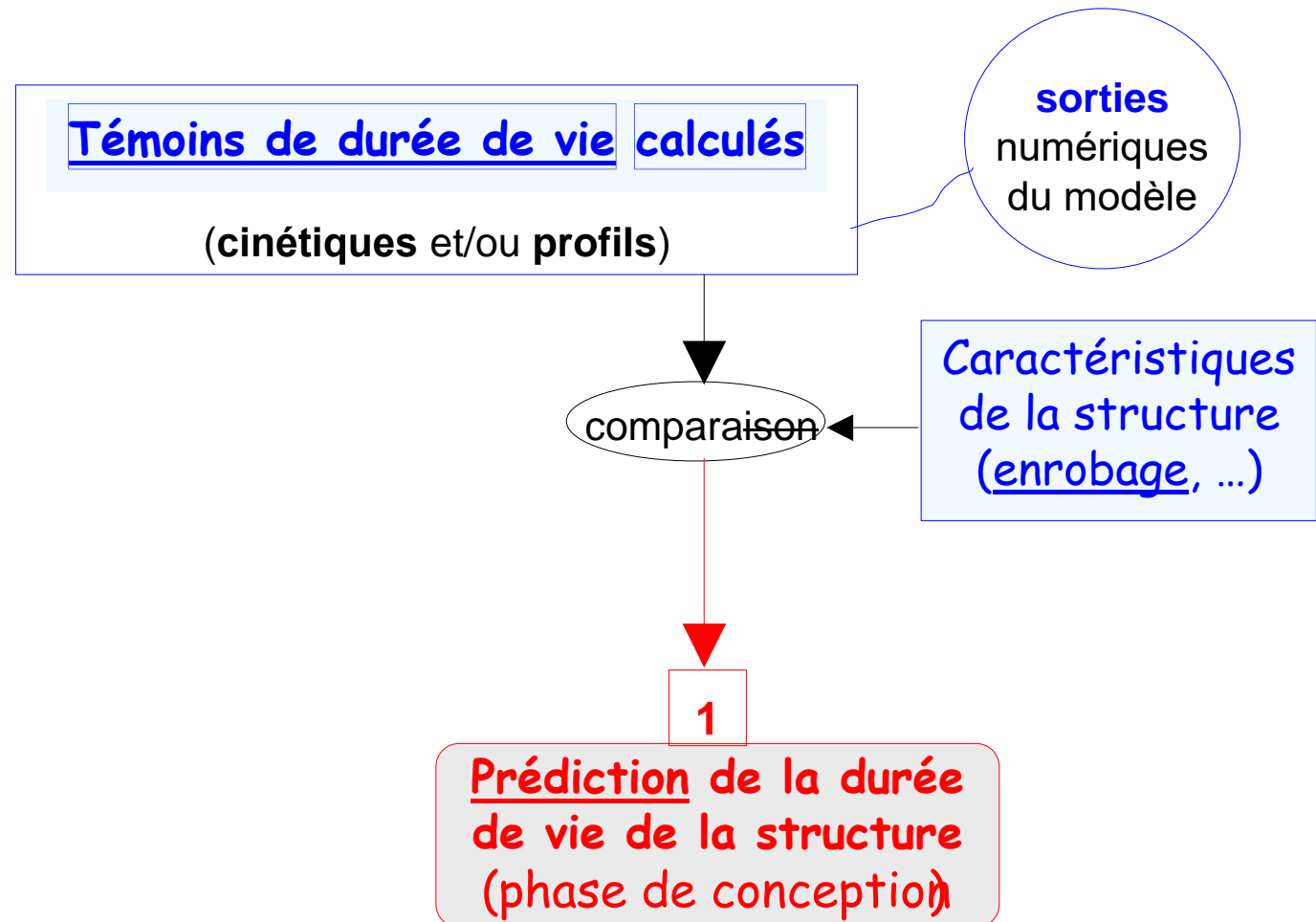
Corrosion des armatures initiée par la carbonatation

⊗ **Hypothèse** : restriction à la période d'incubation



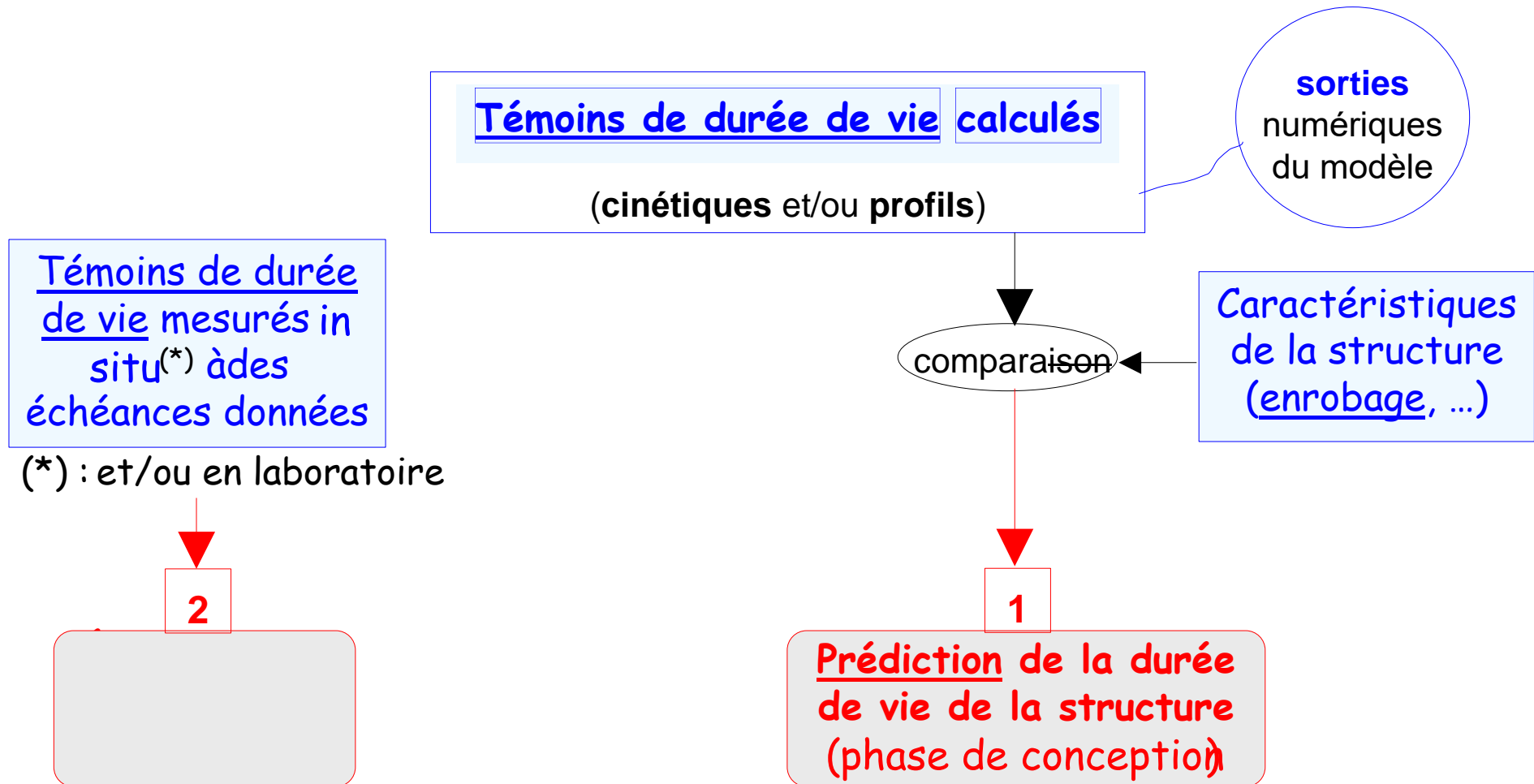
5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.

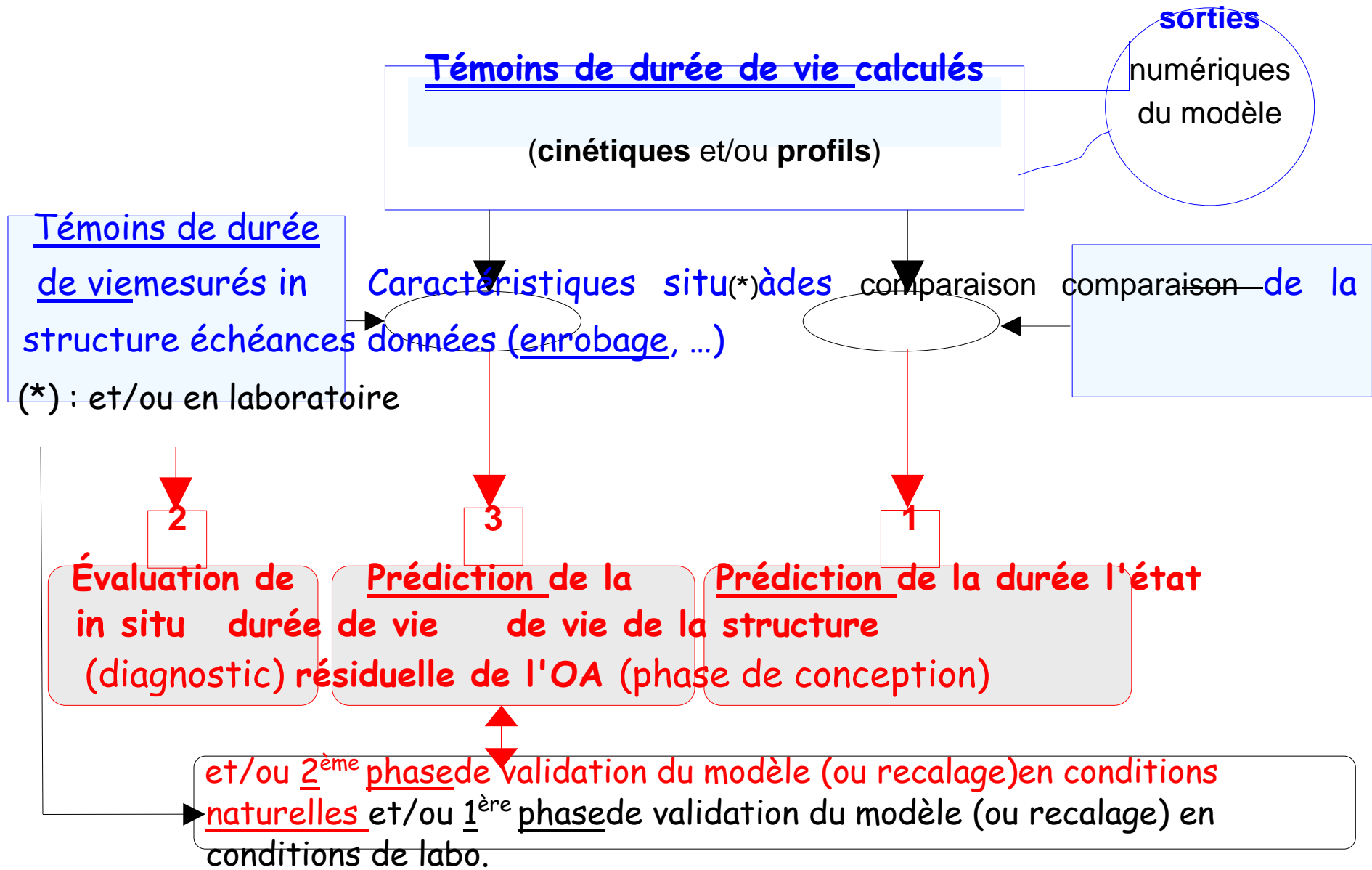
- Méthodologie •



5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.

• Méthodologie • (4)





5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.

- Méthodologie • (4)

5 - TEMOINS DE DUREE DE VIE

Témoins de durée de vie données pertinentes indispensables pour le suivi *in situ* et la prédiction de la durée de vie (résiduelle) des OA en BA

Définitions (corrosion des armatures)

- Environnement sans chlorure :

- évolution de la profondeur carbonatée (*i.e.* zone où $\text{pH} \leq 9$) en fonction du tps (cinétique)

ou - profil de teneur en CaCO_3 (ou en Ca(OH)_2 résiduelle) et évol en fct du tps

- En présence de chlorures :

- évolution de la profondeur de pénétration des Cl⁻ (*i.e.* zone où [Cl⁻"libres"] ≥ ou [Cl⁻"libres"]_{crit}) en fonction du tps (cinétique) - profil de [Cl⁻"libres"] et évolution en fonction du tps

- **En conditions non saturées :**

- profil hydrique et évolution en fonction du tps

5 - MODÈLES PRÉDICTIFS

- Caractéristiques requises •
- **indicateurs de durabilité** (+ param. complém.) données d'entrée
- **témoins de durée de vie** (cinétiques & profils) sorties
- fondés d'un point de vue physique et chimique
- flexibles et facilement accessibles
- cadre déterministe ou probabiliste

sélection d'un éventail de modèles validés ayant **différents niveaux de sophistication**

5 - MODÈLES PRÉDICTIFS

- Caractéristiques requises •

- **indicateurs de durabilité** (+ param. complém.) données d'entrée

- **témoins de durée de vie** (cinétiques & profils) sorties

- fondés d'un point de vue physique et chimique

- flexibles et facilement accessibles

- cadre déterministe ou probabiliste

modèles phys.-chim.

- incluant les **couplages** (physicochimiques, multi-espèces, ...) •
applicables en conditions **partiellement saturées** :

- *séchage naturel*

- *cycles réels d'humidification-séchage*

- incluant les **modifications microstructurales** induites par les dégrad. :

- *espace poreux par carbonatation ou cristallisation de sels*

- *porosité par lixiviation*
- *modification de la structure poreuse par formation de sel de Friedel*
- si possible **multi-échelles** (du mat. à la structure)

5 - CONCEPT MULTI-NIVEAUX APPLIQUÉ À LA MODÉLISATION DE LA CARBONATATION

Niveau de sophistication croissant



- Modèles physico-chimiques **analytiques**
front de carbonatation raide (loi en \sqrt{t})



- Modèles physico-chimiques **semi-analytiques**
approche de *Papadakis* + **cycles** d'humidification-séchage
améliorations : absence carbo. qd $HR \geq 80\%$ + modèle physique de transport hydrique



extension aisée : cadre **probabiliste** prédictions en termes d'indice de fiabilité (β) ou de probabilité de défaillance (P_f) prise en compte des **incertitudes** relatives aux données d'entrée aide à la décision pour l'**optimisation** *marges de sécurité appropriées* *bénéfices éco. & environ. !*

5 - CONCEPT MULTI-NIVEAUX APPLIQUÉ À LA MODÉLISATION DE LA CARBONATATION

- Modèles physico-chimiques **analytiques**
front de carbonatation raide (loi en \sqrt{t}) [*Papadakis et al., ACI, 1991*]
- Modèles physico-chimiques **semi-analytiques**
approche de *Papadakis* + **cycles** d'humidification-séchage [*Bakker, 1993*]
améliorations : absence carbo. qd $HR \geq 80\%$ + modèle physique de transport hydrique [*Thiery et al., CONMOD'08, 2008*]
- Modèles physico-chimiques **numériques**
modèles complets de **spéciation** (+ processus hydrodyn. en cond. sat.)
- assemblage des phases à l'équilibre [*Matschei, Lothenbach et al., CCR, 2007*]
[*Steffens, CCR, 2002*], [*Bary et al., CCR, 2004*],

modèles (couplés) **transport-chimie** [Saetta et al., CCR, 2004], [Thiery, Ph.D thesis, 2005] • couplage avec modèle avancé de transport hydrique (**cond. non sat.**)

- modifs. microstructurales
- cinétique des réactions chimiques *profil de carbonatation adouci*
- chimie de la solution interstitielle ([K⁺], [Na⁺], ...) évolution du pH
- évolution de la phase solide (ex. décalcification des C-S-H)

5 - MODÈLE PHYSIQUE NUMÉRIQUE 1-D DE PÉNÉTRATION DES Cl⁻ (COND. ISOTH.)

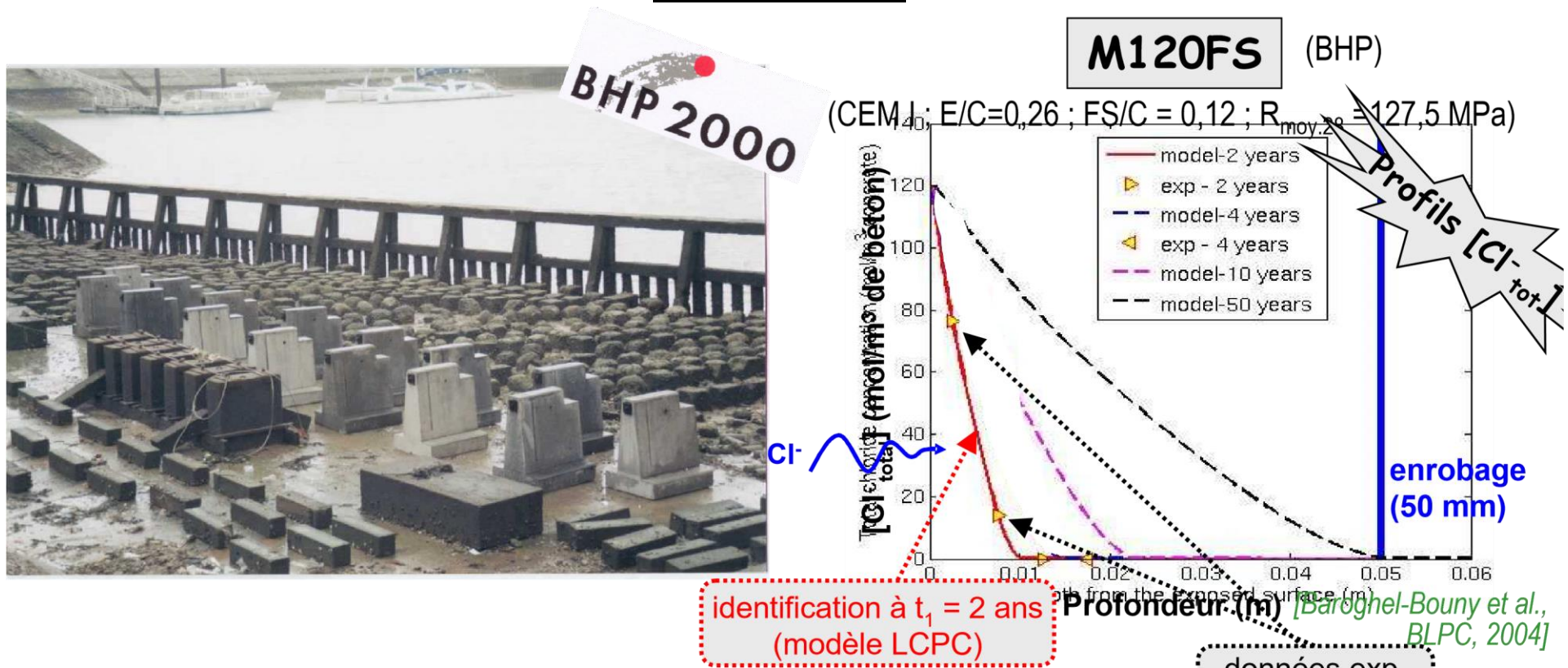
• Spécificités • [Baroghel-Bouny et al., CCC, 2009]

→ 4 niveaux de sophistication.

- Niveau 1 - Modèle de diffusion des chlorures diffusion des Cl⁻ (en solution diluée) 1^{ère} loi de **Fick** interactions Cl-matrice (globales) isoth. non lin. de **Freundlich**

- **Niveau 2 - Modèle multi-espèces (cond. saturées)**
4 ions + interactions électriques entre ions
interactions Cl⁻-matrice **différentes options** (description + détermination)
- **Niveau 3 - Modèle physicochimique avancé (cond. saturées)**
6 ions + 3 composés solides
interactions Cl⁻-matrice **adsorption physique** sur C-S-H + **formation sel de Friedel** par réactions chimiques instant. (dissol./précip.)
modif. microstructure et propriétés de transport
- **Niveau 4 - Modèle de transport combiné humidité-ions** **niveau 2**
étendu aux conditions **non saturées** mouvement phase **liquide loi de Darcy** diffusion **vapeur d'eau 1^{ère} loi de Fick**

5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [Cl⁻] ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)

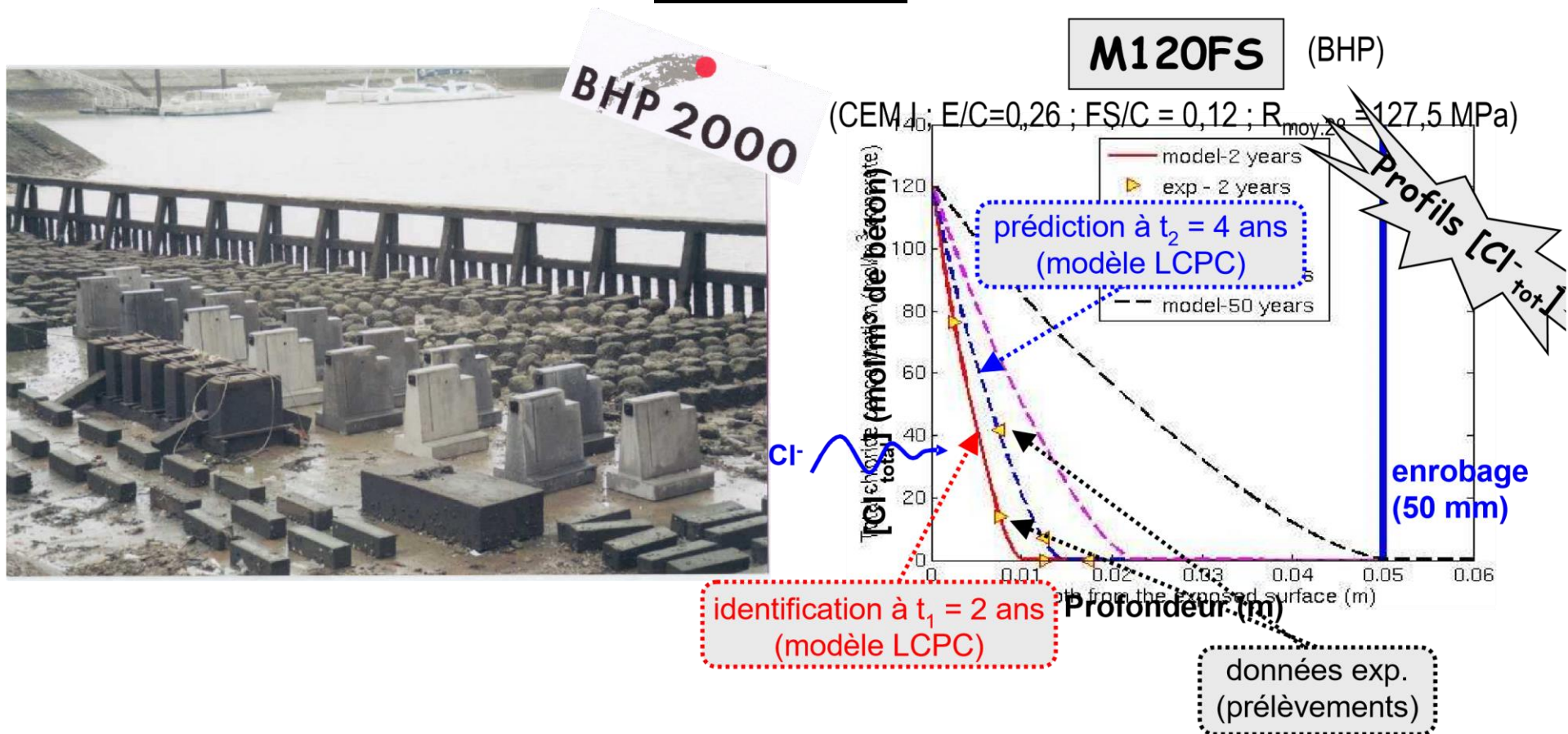


↙ Identification des données d'entrée (D_{Cl} , isotherme d'interaction, ...) par **analyse inverse** à partir d'un **profil exp. de [Cl⁻]_{tot}**

5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [CI] ET DE LA DURÉE DE
VIE EN
ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES
(NIVEAU 2)

Méthode particulièrement appropriée au suivi de structures existantes

5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [Cl⁻] ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)

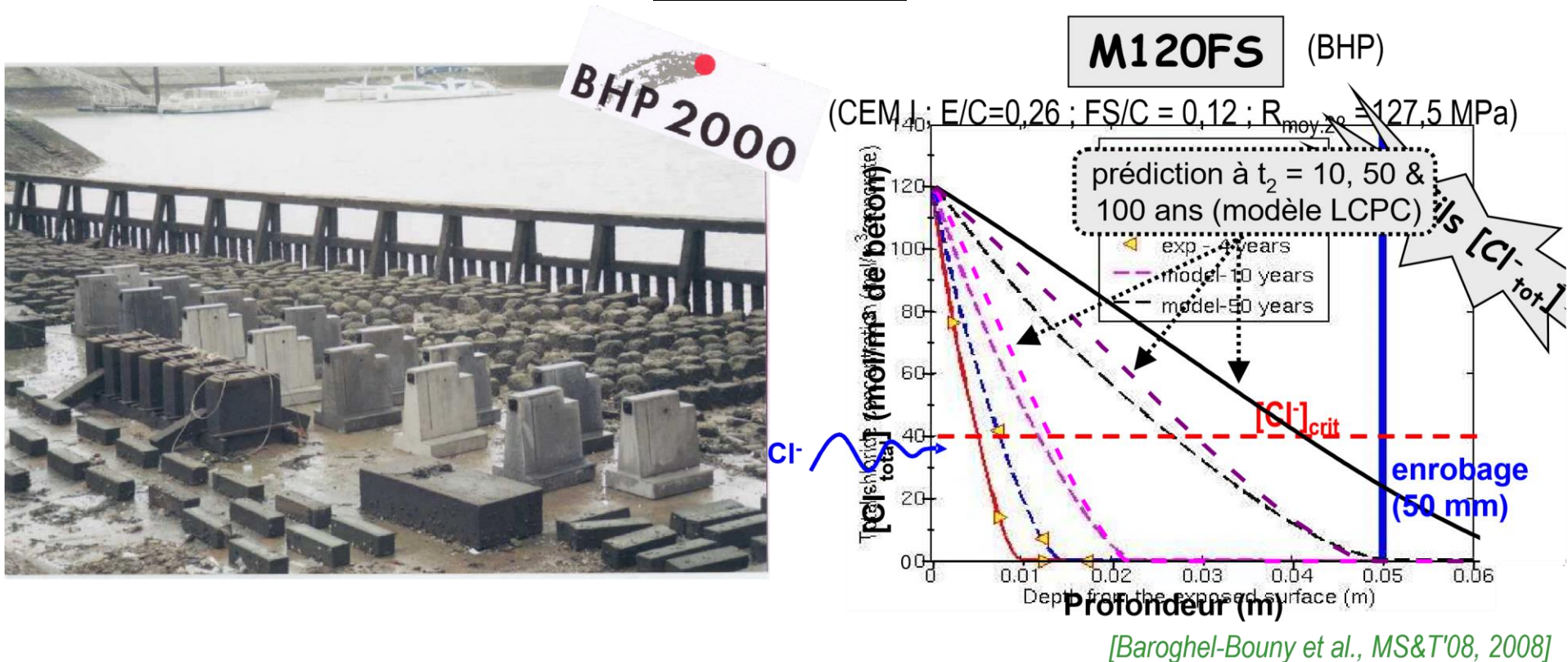


↙ Comparaison entre simulations numériques et mesures

➔ **2^{ème} phase de validation** (en environ. naturel) ou **recalage** du modèle

↙ *bonne concordance à $t_2 = 4$ ans*

5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [Cl⁻] ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)



Calculs aux échéances ultérieures

Prédiction de l'évolution future de la structure (à long terme)

5 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

- **Exemple** : protection contre la corrosion initiée par les Cl⁻ (enrobage = 50 mm) •

Type d'environnement →	5		> 120 ans	(immersion dans l'eau de mer)
Durée de vie exigée /	5.1	5.2 < 30 ans		
Niveau d'exigence ↓				
	•P _{eau} < 14	•P _{eau} < 16	•P _{eau} < 9	•P _{eau} < 9
Niveau 1 de 30 à 50 ans	•P _{eau} < 15	•P _{eau} < 16	Niveau 5	•P _{eau} < 15
Niveau 2 de 50 à 100 ans	•P _{eau} < 14	•P _{eau} < 14	•D _{app(mig)} < 10	•P _{eau} < 13
•P _{eau} < 11			•D _{app(mig)} < 1	
Niveau 3		•D _{app(mig)} < 2	•K _{app(gaz)} < 30	•K _{app(gaz)} < 30
			•K _{app(gaz)} < 30	•P _{eau} < 13
		•k _{liq} < 0,1	•k _{liq} < 0,01	•k _{liq} < 0,01
de 100 à 120 ans	•P _{eau} < 12	•P _{eau} < 9	•k _{liq} < 0,01	•P _{eau} < 12
Niveau 4	•D _{app(mig)} < 20	•D _{app(mig)} < 1		•D _{app(mig)} < 5
		•K _{app(gaz)} < 30		
	•k _{liq} < 0,1	•k _{liq} < 0,01		

6

- $P_{\text{eau}} < 9$
- $D_{\text{app(mig)}} < 1$
7 (zone de marnage)
- $P_{\text{eau}} < 14$
- $P_{\text{eau}} < 11$

- $P_{\text{eau}} < 11$
- $D_{\text{app(mig)}} < 3$
- $k_{\text{liq}} < 0,1$
- $P_{\text{eau}} < 10$
- $D_{\text{app(mig)}} < 2$
- $K_{\text{app(gaz)}} < 100$
- $k_{\text{liq}} < 0,05$
- $P_{\text{eau}} < 9$
- $D_{\text{app(mig)}} < 1$
- $K_{\text{app(gaz)}} < 30$
- $k_{\text{liq}} < 0,01$

*[Baroghel-Bouny et al.,
CCC, 2009]*

M120FS

$$P_{\text{eau}} = 7,4\% ; D_{\text{app(mig)}} = 0,04 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$K_{\text{app(gaz)}} = 43 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 ; k_{\text{liq}} = 10^{-5} \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$$

6 - NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ

Approche intégrée exp./mod. et "multi-niveaux"

et
précise

Indicateurs de durabilité ≠ *Témoins de durée de vie*

Chaque outil a une
fonction bien définie
intervient à une étape

mesures distinctes

Modèles Ppales entrées (données pertinentes & facil^e accessibles)

2 étapes de validation (labo. + *in situ*) + étude de sensibilité
préalablement à toute prédiction

Viser des niveaux de performance / durée de vie spécifiés *plus grande liberté nouveaux concepts de formulation & matériaux high-tech, ..., dans le contexte du développement durable*

6 - BOÎTE À OUTILS POUR L'ÉVALUATION ET LA PRÉDICTION DE LA DURABILITÉ

1 - Conception des bétons & ouvrages neufs

Méthodologie générale et complète

2 - Suivi des ouvrages en BA existants

- **Indicateurs de durabilité** + Méthode(s) + **Classes**
 - **Spécifications** performantielles
 - **Modèle(s)** prédictif(s)
- **Témoins de durée de vie** + Méthode(s) (labo. / env. nat.)

Évaluation et prédiction de la durabilité à l'aide d'un **éventail de propriétés du matériau** (signification physique précise + accessibilité par des

méthodes bien définies & validées) ***méthodologie scientifiquement fondée ... mais facile à utiliser !***

6 - CONCLUSION

la durabilité, c'est pérenniser cela ...

