

LA DURABILITE DES BETONS

Diagnostic

S. Rémond

Objectifs des 3 séances

1. Connaître les principaux mécanismes physico-chimiques impliqués dans la dégradation du béton armé.
2. Savoir identifier les différentes pathologies du béton armé et connaître les mécanismes spécifiques de dégradation dans chaque cas.
3. Connaître la démarche et les techniques d'analyses à utiliser pour l'investigation d'un matériau dégradé et les principes de l'approche performantielle de la durabilité.

Stratégie pour une étude complète d'une nouvelle pathologie

Phase 1 :

1. Observation des désordres au niveau de la structure incriminée : fissures, traces de rouille, efflorescence, taches diverses à la surface.
2. Etude des conditions environnementales : température (écart jour/nuit, gel-dégel...), présence d'eau (cycle humide-sec), nature du sol et des eaux de ruissellement, source de pollution potentielle.
3. Possibilité de carottage (si autorisé) afin d'avoir une étude microstructurale (estimation de la composition initiale du béton et des attaques potentielles), essais de résistances mécaniques et parfois de perméabilité
4. Diagnostique initial et premières hypothèses.

Stratégie pour une étude complète d'une nouvelle pathologie

Phase 2 :

1. Etude en laboratoire du mécanisme afin de le reproduire
2. Confirmation ou infirmation des premières hypothèses : hypothèses plus solides
3. Définition de lois physiques ou empiriques pour modélisation

Phase 3 :

1. Mise au point d'un test accéléré
2. Normalisation du test

Stratégie pour une étude complète d'une nouvelle pathologie

Phase 4 :

Conception de béton durable dans l'environnement avec l'aide des tests accélérés et de la simulation numérique.

Ce cheminement est souvent long (plus d'une dizaine d'années) et les moyens mis en œuvre ne sont justifiés que pour des problèmes majeurs de durabilité : la réaction alcali-granulat est un bon exemple.

Précaution vis à vis des essais accélérés

Dans le laboratoire, les spécimens de bétons sont d'habitude évalués dans des configurations considérablement différentes de celles des bétons en service afin d'accélérer la cinétique :

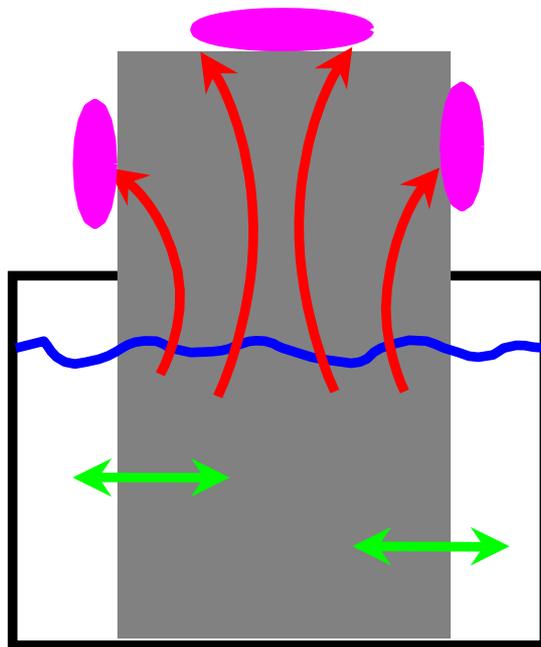
- L'échelle de temps est différente et **probablement non-linéaire** entre les résultats des essais accélérés et ceux en réalisés dans les conditions de service.
- **L'accélération peut changer le mécanisme de dégradation**. Par exemple, l'utilisation de températures plus élevées est bien connue comme un facteur pouvant changer les mécanismes.
- Ainsi, la performance d'un matériau dans un essai accéléré ne peut pas être directement corrélée avec la performance du matériau en service.

Les tests accélérés représentent donc souvent les conditions les plus défavorables.

Exemple de tests : semi-immersion

Prismes de bétons semi-immergés dans des solutions agressives connues (et renouvelées) à température et RH quasiment constant (des cycles peuvent être ajoutés pour mieux reproduire un environnement réel).

L'attaque des parties immergée et émergée est différente:



Partie émergée:
les concentrations peuvent être plus fortes qu'en solution (dépôt de sel à la surface) -> capillarité.

Partie immergée:
les concentrations sont au maximum égales à celles de la solution

Exemple de tests : semi-immersion

**Sel cristallisé
sur la partie émergée**



**Partie émergée plus
attaquée**



Exemple de tests : semi-immersion



Les expériences peuvent durer
longtemps ... 80 ans dans ce cas !

Exemple de tests : semi-immersion



**Eprouvettes de béton en zone de marnage
(La Rochelle, Tour Saint Nicolas)**

Expertise d'une structure dégradée



Expertise d'une structure dégradée

En général, l'expertise débute quand des signes visuels de dégradation commencent à être perceptibles.

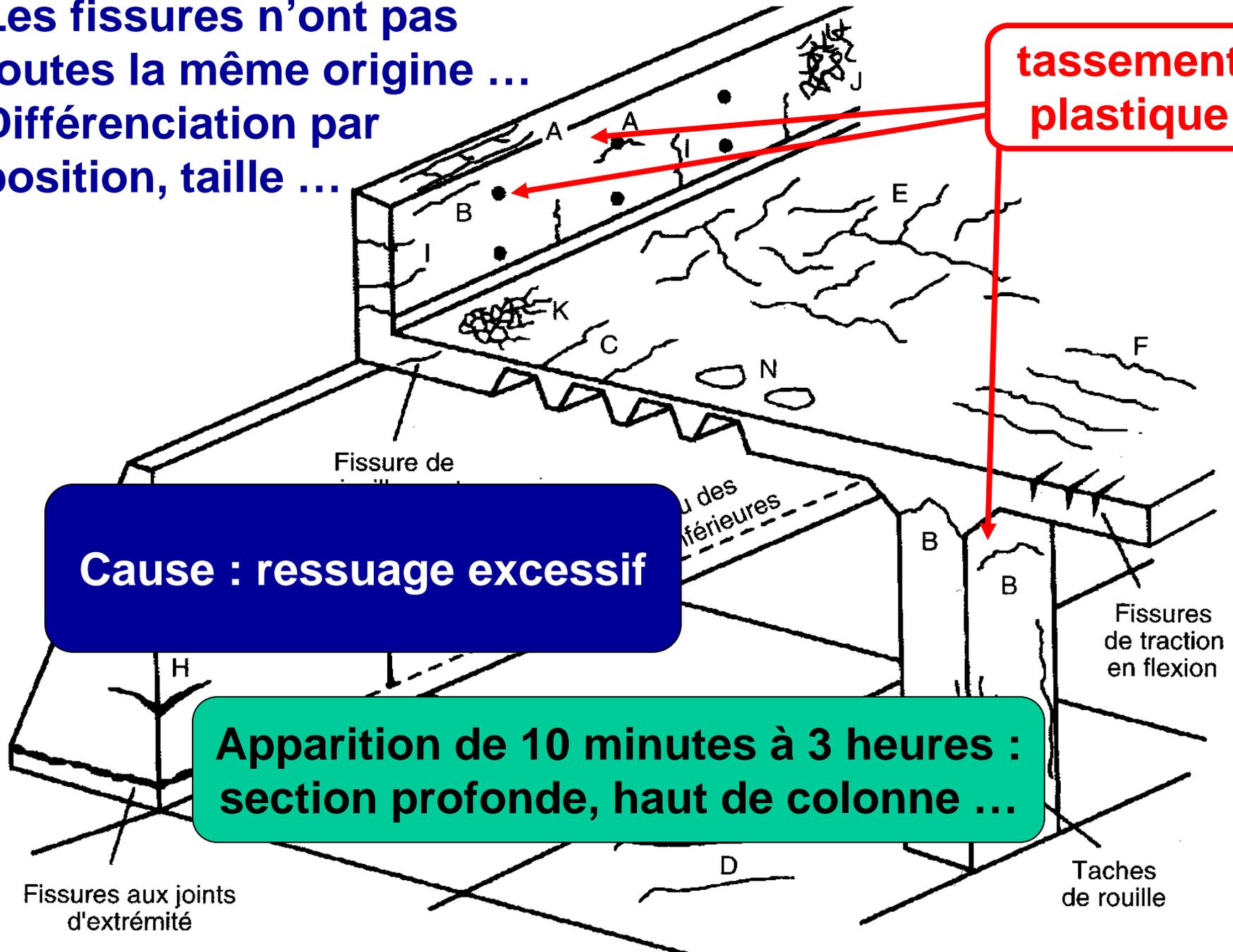
Ces signes sont le plus souvent des fissures en surface qui d'une part, ont plusieurs origines, et d'autre part, sont la conséquence **souvent tardive** de mécanismes physiques et / ou chimiques complexes.

Les fissures n'ont pas
toutes la même origine ...
Différenciation par
position, taille ...

**tassement
plastique**

Cause : ressuage excessif

**Apparition de 10 minutes à 3 heures :
section profonde, haut de colonne ...**



Les fissures n'ont pas
toutes la même origine ...
Différenciation par
position, taille ...

**Cause : séchage rapide
au jeune âge**

**Apparition de 30 minutes à 6 heures :
pavage et dalle**

**retrait
plastique**

Fissure de cisaillement

Niveau des
armatures

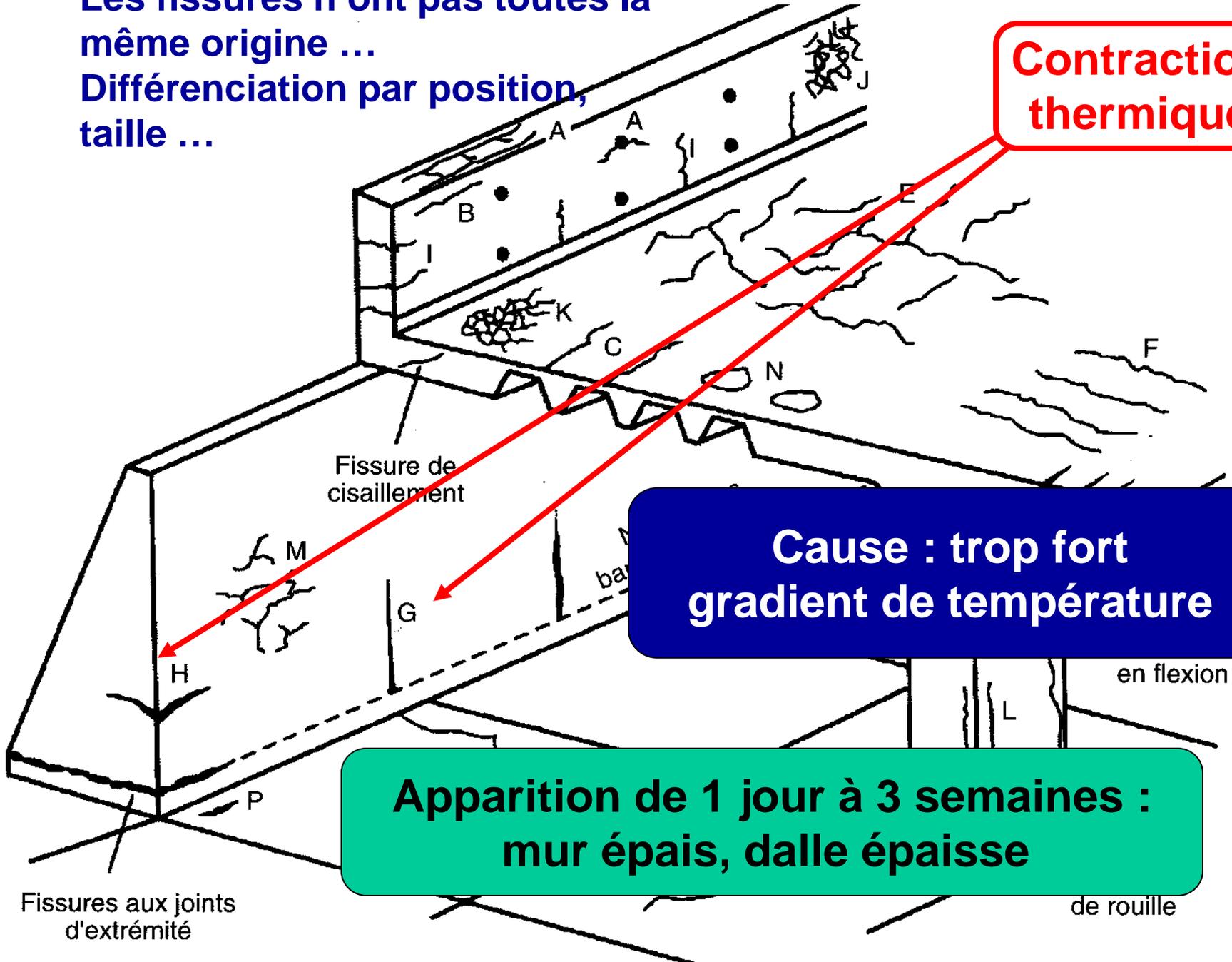
Fissures
de traction
en flexion

Fissures aux joints
d'extrémité

Taches
de rouille

Les fissures n'ont pas toutes la même origine ...
Différenciation par position, taille ...

Contraction thermique

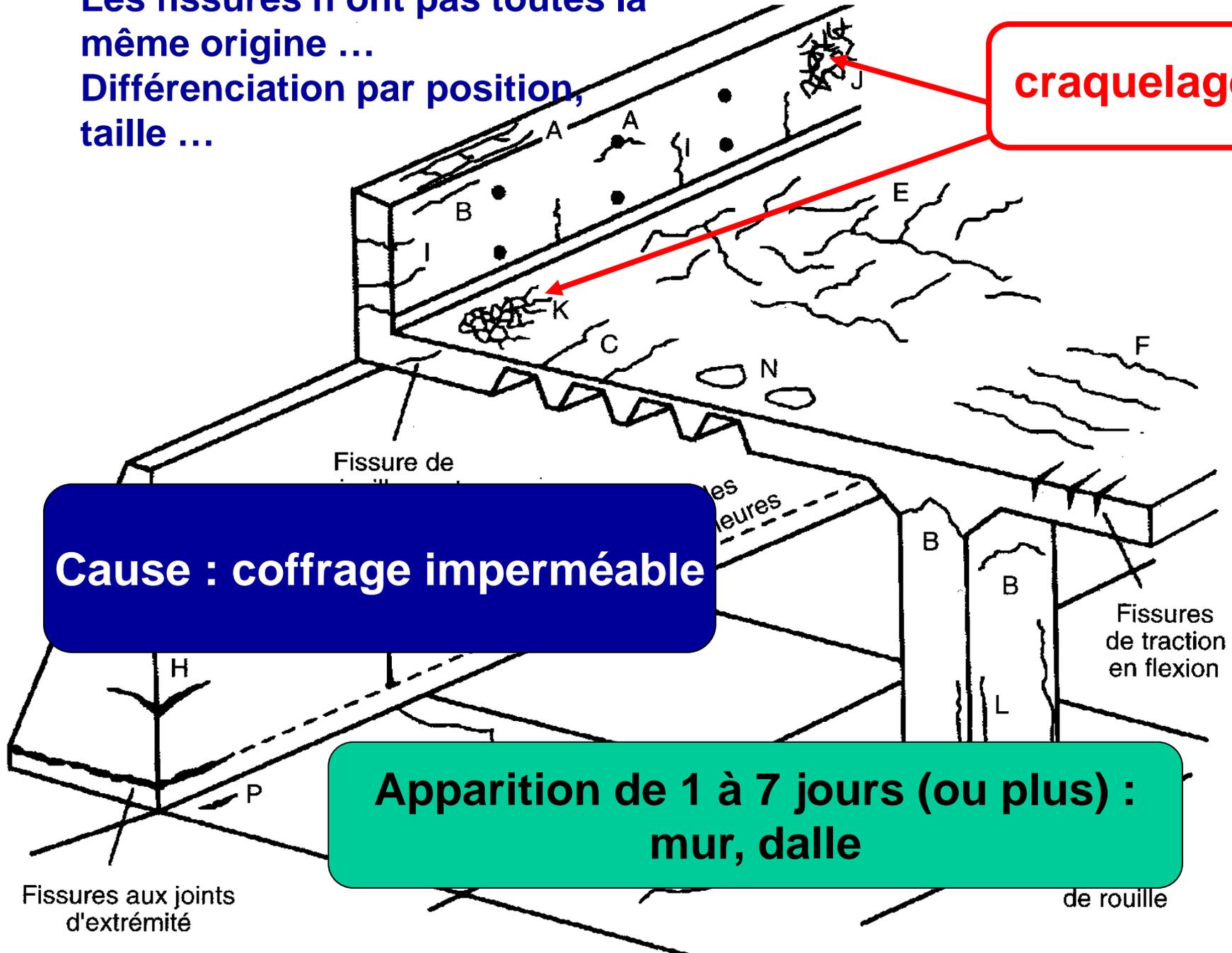


Cause : trop fort gradient de température

**Apparition de 1 jour à 3 semaines :
mur épais, dalle épaisse**

Les fissures n'ont pas toutes la même origine ...
Différenciation par position,
taille ...

craquelage



Les fissures n'ont pas toutes la même origine ...
Différenciation par position, taille ...

Corrosion armature

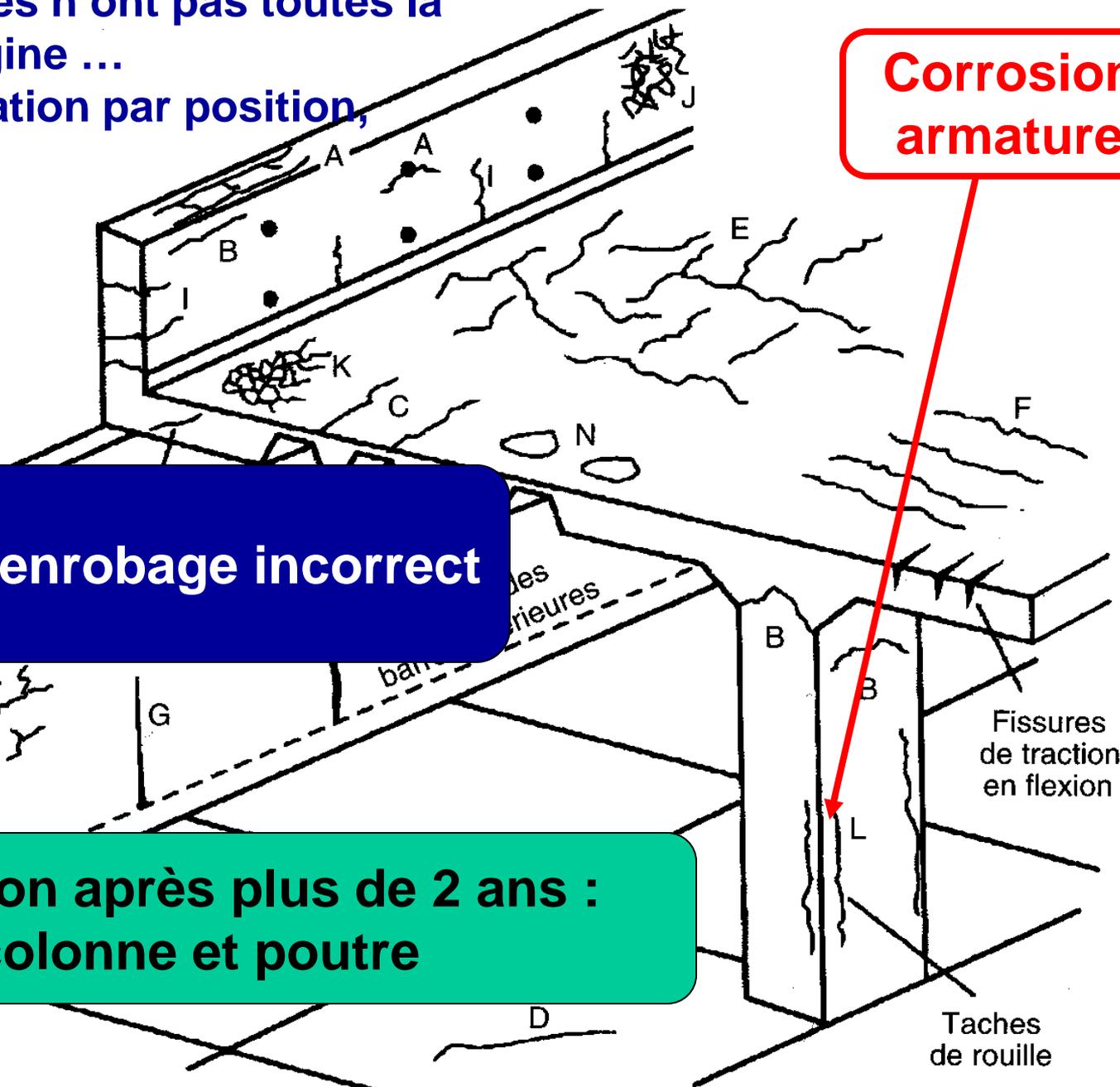
Cause : enrobage incorrect

**Apparition après plus de 2 ans :
colonne et poutre**

Fissures aux joints d'extrémité

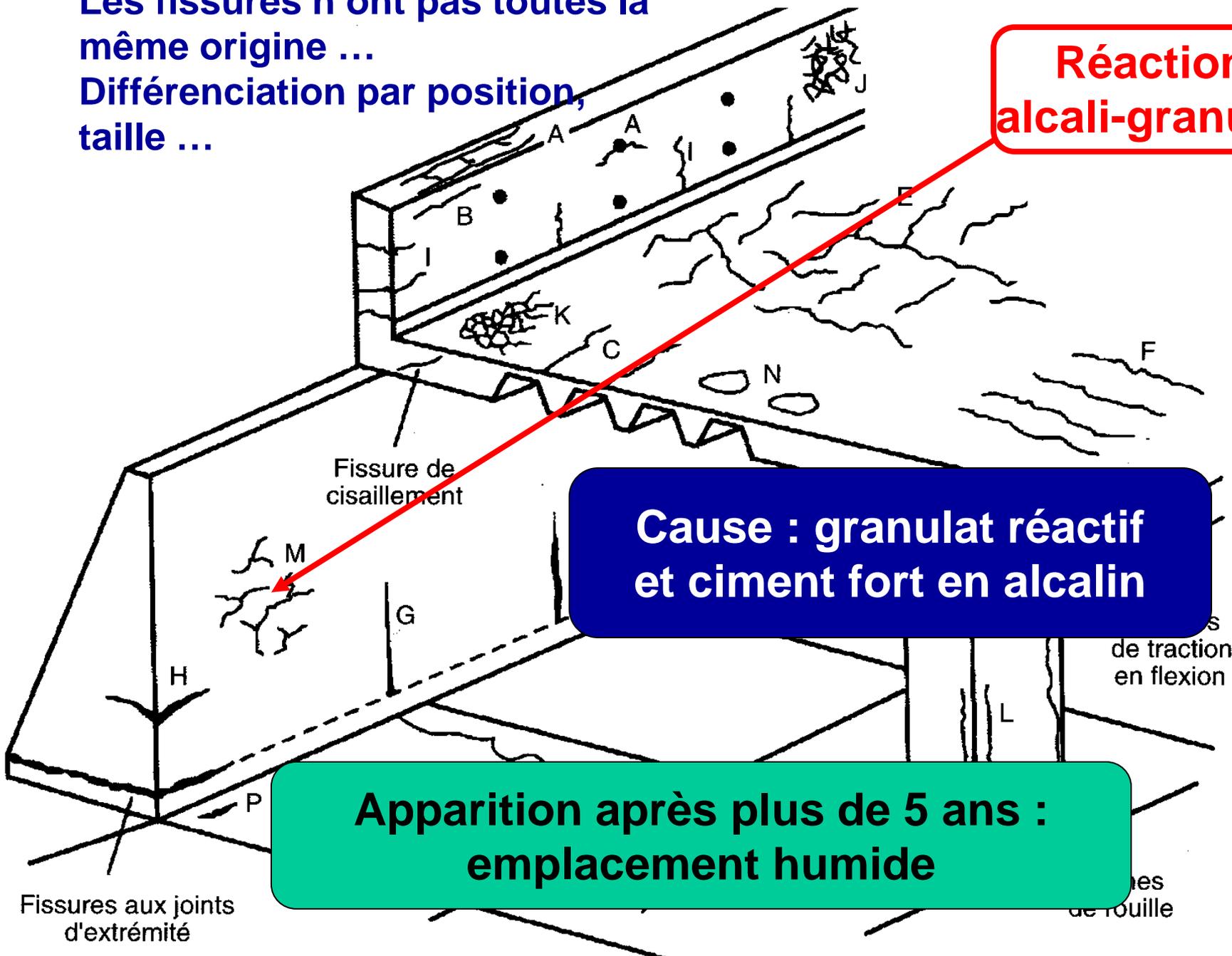
Taches de rouille

Fissures de traction en flexion



Les fissures n'ont pas toutes la même origine ...
Différenciation par position, taille ...

Réaction alcali-granulat



Cause : granulats réactifs et ciment fort en alcalin

Apparition après plus de 5 ans : emplacement humide

Fissures aux joints d'extrémité

Fissures de traction en flexion

Fissures de rouille

Expertise d'une structure dégradée

Il existe un effet de synergie entre les processus physiques et chimiques de détérioration.

La détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause : le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais, lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront.

Pour cette raison, **il est assez souvent difficile d'attribuer la détérioration à une cause particulière**, mais la qualité du béton, au sens le plus large du terme (quoique la perméabilité mérite une attention spéciale), doit presque toujours être prise en considération.

Les plus importantes causes de dégradations sont :

1. les **chlorures et CO₂**, cause de la **corrosion** des armatures
2. **effets chimiques** sur les pâtes de ciment hydraté dus aux agents extérieurs (**eaux chargées en dioxyde de carbone, sulfates ou chlorures**)
3. action du **gel** dans les climats froids

Avertissement

L'expertise passe par l'observation en passant des échelles macroscopiques aux échelles microscopiques.

Il faut que l'observation reste représentative de la structure: un cas particulier ne doit pas devenir la généralité...

Il est préférable d'utiliser plusieurs techniques d'analyses pour confirmer les résultats.

Il ne faut pas que la préparation de l'échantillon modifie ce dernier : séchage, contamination lors de la découpe ...

Moyens d'études à partir de carottage

La détermination de la cause de désordres macroscopiques nécessite le prélèvement d'échantillons qui seront soumis à différentes analyses permettant ;

- la caractérisation et l'observation de la microstructure ;
 - résistance mécanique,
 - perméabilité, distribution poreuse, diffusion Cl-
 - microscopies, ...
- la connaissance de la minéralogie et de la chimie ;
 - diffraction des rayons X, des neutrons, des électrons,
 - analyse thermique, analyse chimique,
 - microsonde électronique à dispersion d'énergie,
 - spectrométrie de fluorescence X, infra rouge,
 - résonance magnétique nucléaire, ...



Résistance mécanique



La mesure de la résistance mécanique des carottes va permettre de voir si le béton a perdu ses capacités initiales de résistance.

Mais cette technique n'est pas suffisante pour dire si un matériau est dégradé ou pas car parfois un béton altéré peut avoir de bonnes résistances mécaniques d'où la nécessité de faire des analyses complémentaires fines

Méthodes d'étude des composés poreux:

		Domaine d'utilisation des méthodes d'étude des corps poreux						
Valeur du rayon de pore (μm)		10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²
Méthodes optiques et électroniques	Œil	●						80
	Loupe	●					8	50
	Microscope optique	●						
	Microscope électronique à balayage	●						
	Microscope électronique à transmission							
Méthodes sur corps poreux	Porosimétrie à mercure	●		1,5 x 10 ⁻³				75
	Méthodes de condensation capillaire BJH et t	●	5 x 10 ⁻⁴	1,7 x 10 ⁻³				
	Thermoporométrie			2 x 10 ⁻³		150 x 10 ⁻³		
	Diffusion aux petits angles des rayons X		5 x 10 ⁻⁴		50 x 10 ⁻³			
Méthodes sur membrane	Perméamétrie aux gaz	●						
	Perméamétrie aux liquides	●						
	Perméamétrie + condensation capillaire (permporométrie)			1,7 x 10 ⁻³	30 x 10 ⁻³			
	Bullométrie gaz-liquide				40 x 10 ⁻³			30
	Bullométrie liquide-liquide			2 x 10 ⁻³				

Tableau 61 : Exemple de différentes techniques porométriques utilisables en fonction du domaine d'investigation (CHARPIN J. et coll., 1999)

● = méthodes classiques pour étudier le béton

Microscopie :

Limite de résolution

$$d = \lambda / n \times \sin \alpha$$

α = demi angle d'ouverture de l'objectif

λ = longueur d'onde de la lumière utilisée

n : indice de réfraction (objet/objectif)

Microscopie : Photons ou électrons

La **RESOLUTION** est limitée par la longueur d'onde ;

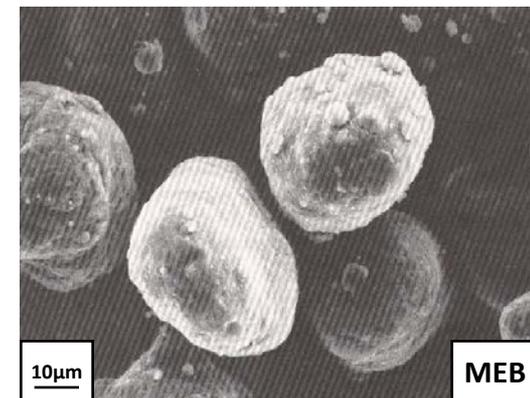
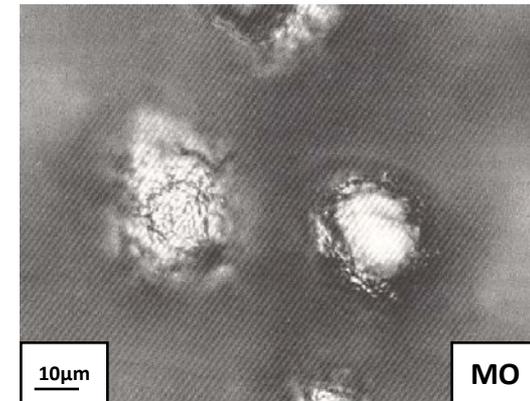
- . de la lumière en MO, $\lambda \approx 2000 \text{ \AA}$
 - . des électrons en MEB, $\lambda \approx 2 \text{ \AA}$
- résolution théorique du MEB ;
- . approx $0.2 \text{ \AA} \ll$ taille d'un atome

⇒ La **PROFONDEUR DE CHAMP** est meilleure pour des observations morphologiques avec le MEB qu'avec le MO

Il existe 3 différents types de microscopes électroniques :

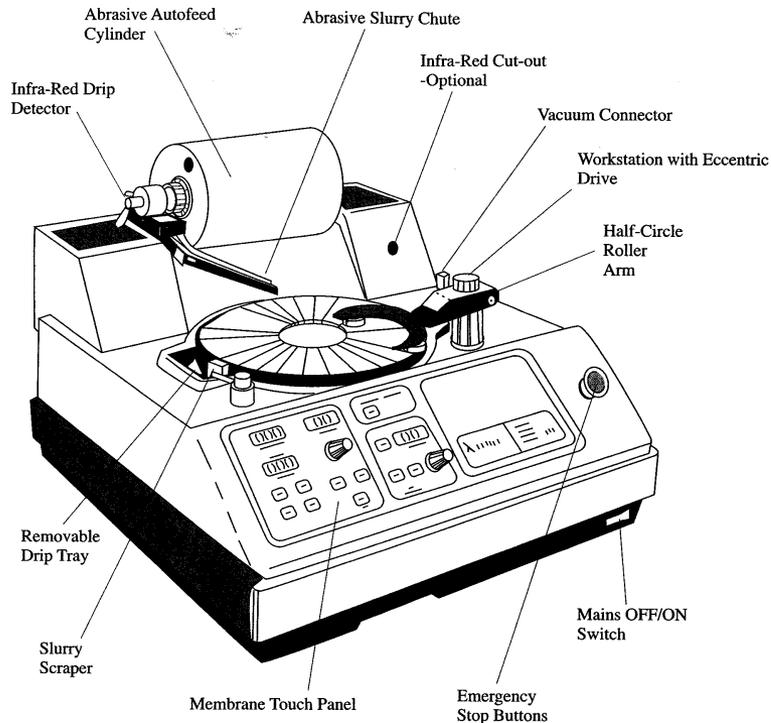
- . MET: à transmission (les années 1940)
- . MEB: à balayage (les années 1960)
- . MEBE: environnemental (les années 1990)

⇒ Avec le MEB ou le MET les électrons ayant une forte dispersion **à cause des molécules d'air nécessitent un vide important ; ceci n'est pas le cas du MEBE**



Profondeur de champ en microscopie

Microscopie : préparation des échantillons



Appareil pour faire des sections polies

Microscopie optique :

- sections polies
 - lames minces (épaisseur $30\mu\text{m}$)
- => préparation :
- tronçonnage
 - imprégnation dans résine
 - polissage

Microscopie électronique :

- fractures
 - sections polies
- => préparation :
- séchage
 - imprégnation et polissage (sections polies)
 - métallisation

Microscope Optique:

A utiliser pour :

- la minéralogie des granulats,
- l'observation du réseau de fissuration,
- une approche quantitative de la quantité de ciment et de la porosité (nécessite traitement d'image),
- la répartition et le facteur d'espacement des bulles d'air dans les bétons avec air entraîné pour résister au gel – dégel.

Inconvénients :

- grandissement maximum limité à 1000x,
- pertinence des observations dépend de l'expérience de l'utilisateur ...
- artéfacts induits par la préparation des échantillons.

Microscope électronique :

A utiliser pour :

- l'observation de la pâte de ciment hydraté et parfois l'estimation de sa quantité dans un béton / mortier
- la minéralogie du ciment (avec aspect semi-quantitatif)
- la répartition des micro-fissures et des fillers

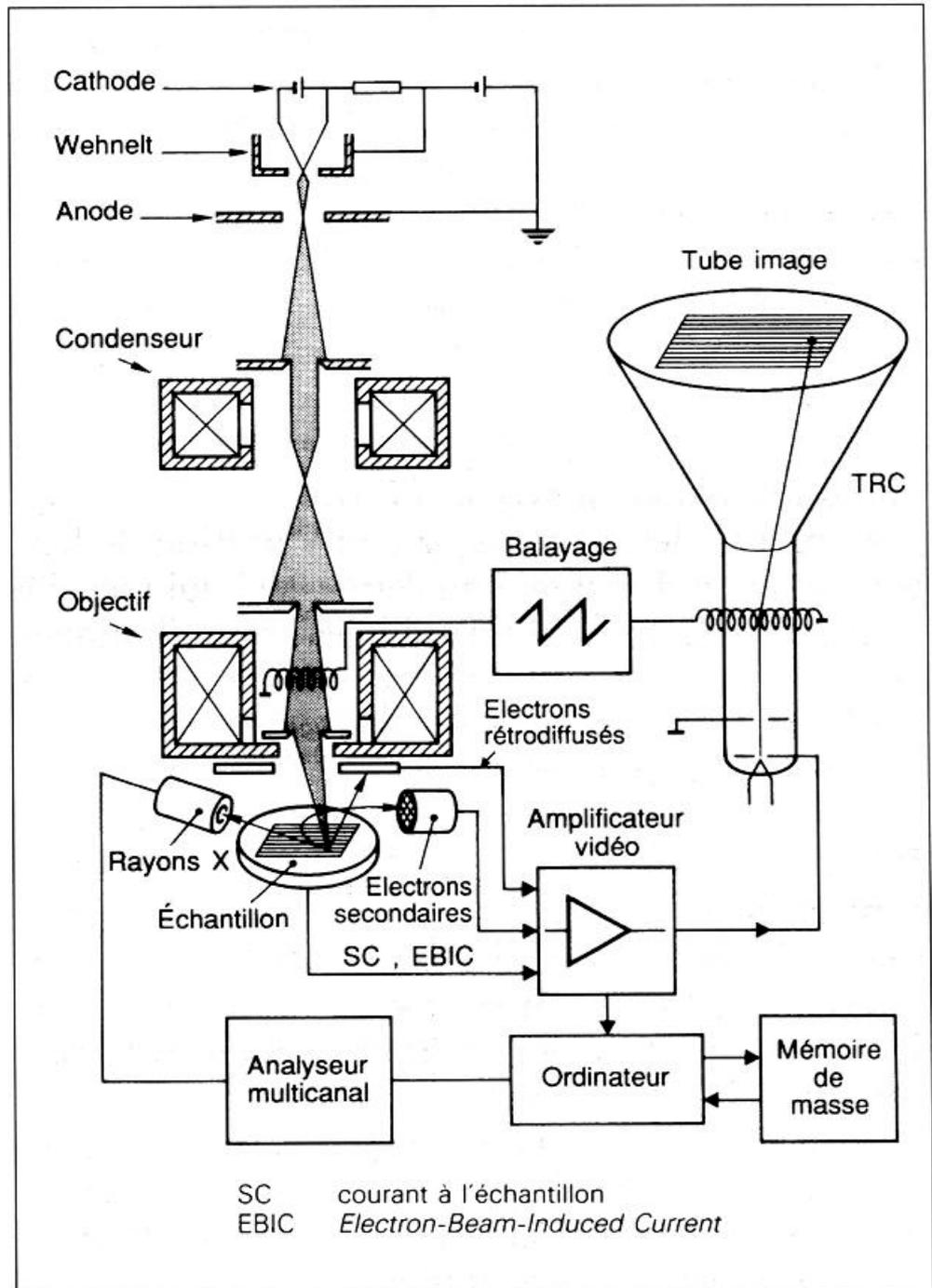
Inconvénients :

- grandissement maximum limité à 50000x
- pertinence des observations dépend de l'expérience de l'utilisateur et de nombres de plages observées (**attention** à ne pas généraliser des observations faites sur quelques microns carrés ...)
- préparation des échantillons afin de ne pas créer des artefacts
- doit être couplé à une microsonde EDS pour avoir une plus grande efficacité (permet la détermination au niveau local de la composition chimique)

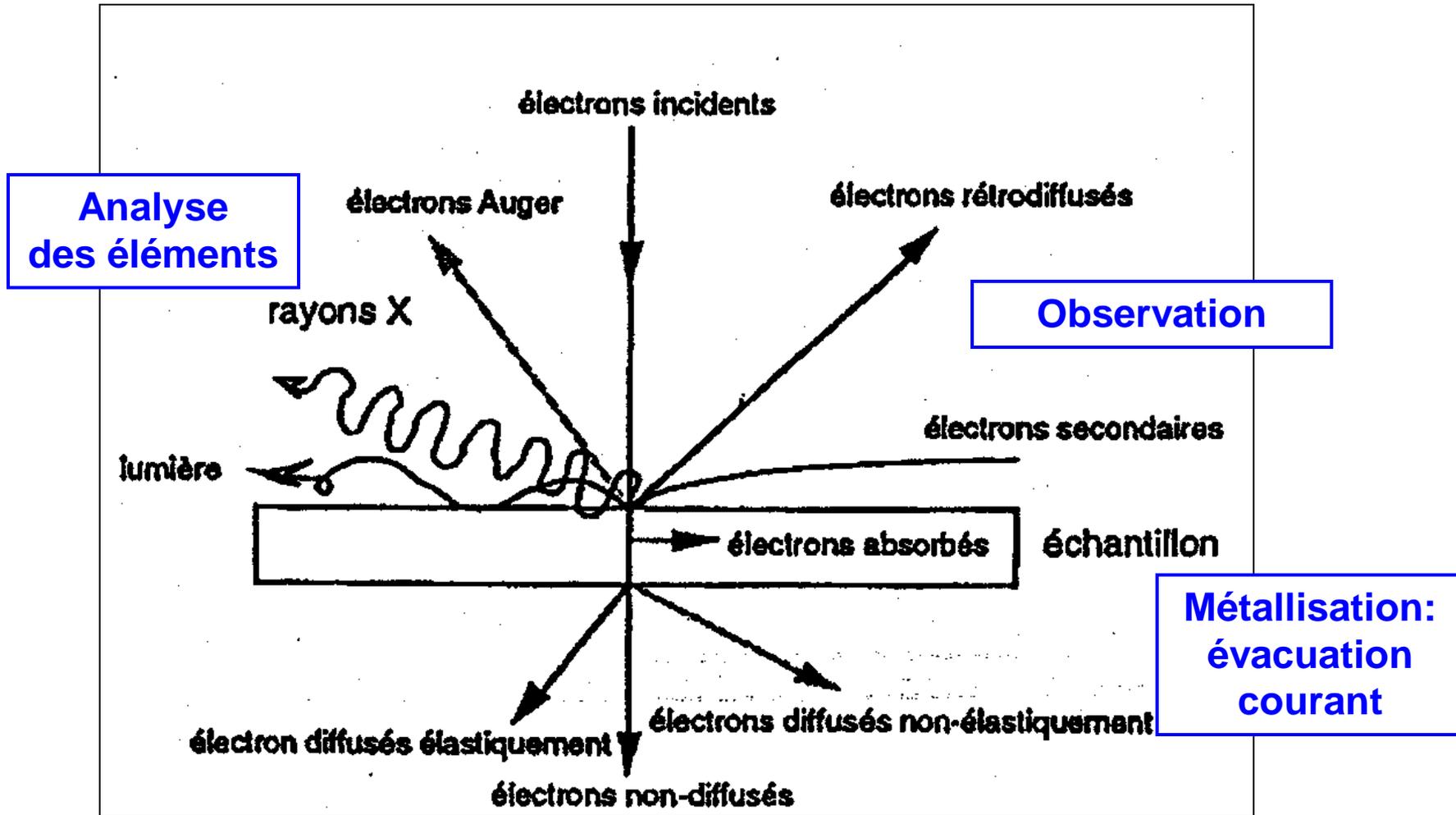
Microscope Electronique à Balayage (MEB) : Appareil



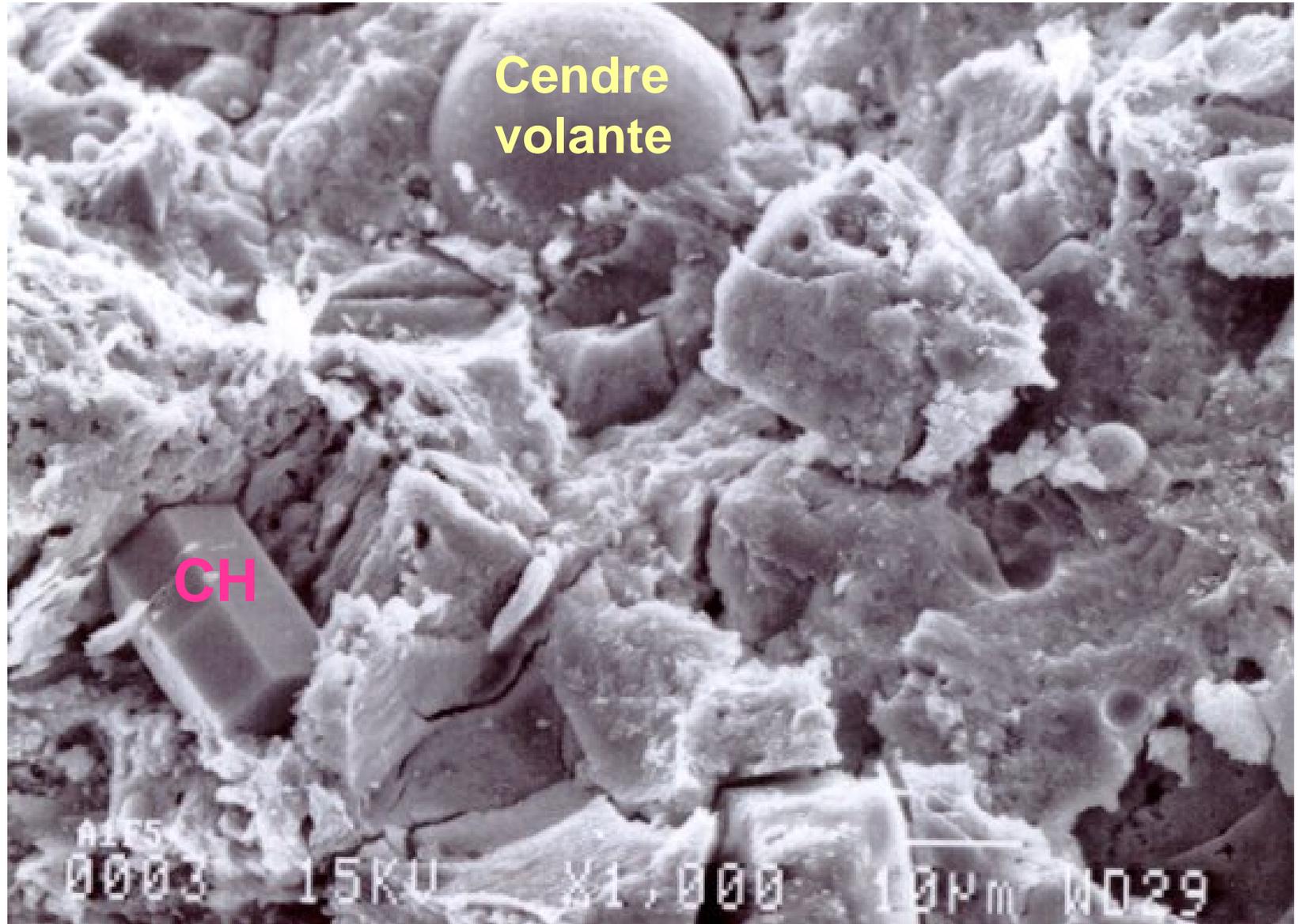
Principe du Microscope Electronique à Balayage (MEB)



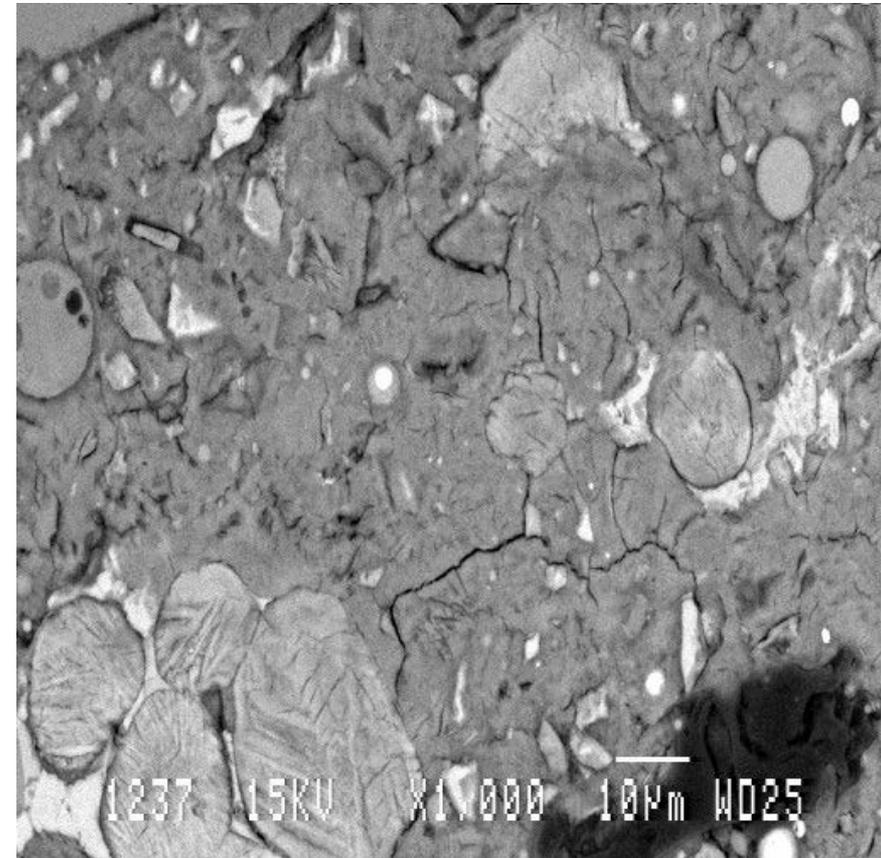
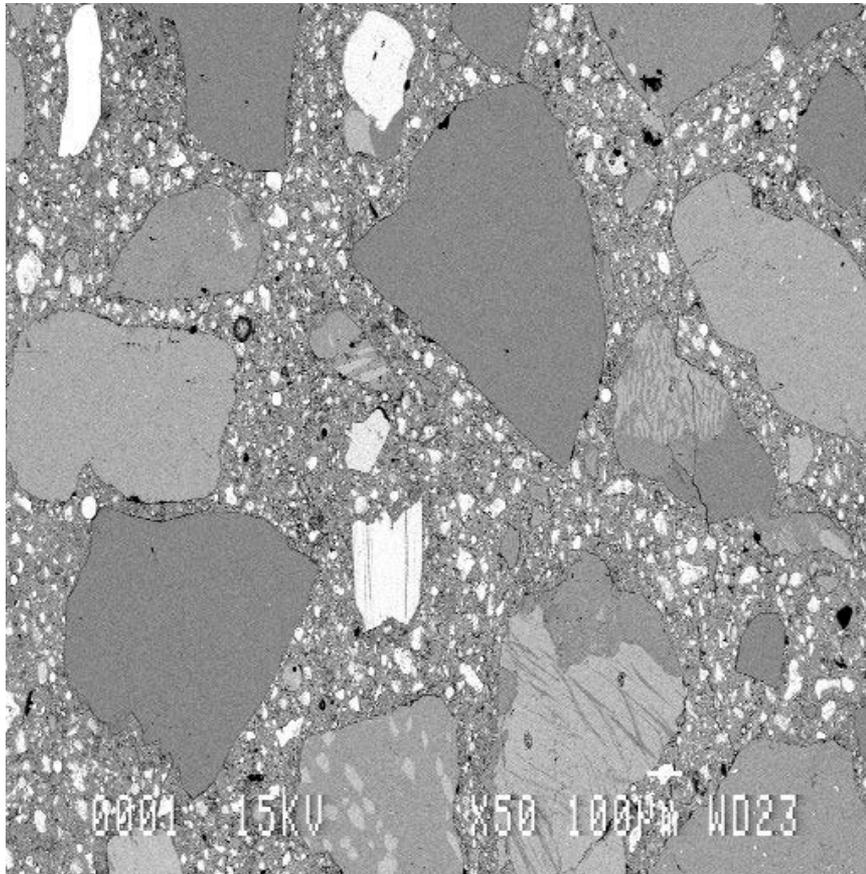
Interactions électrons - matière : Signaux générés



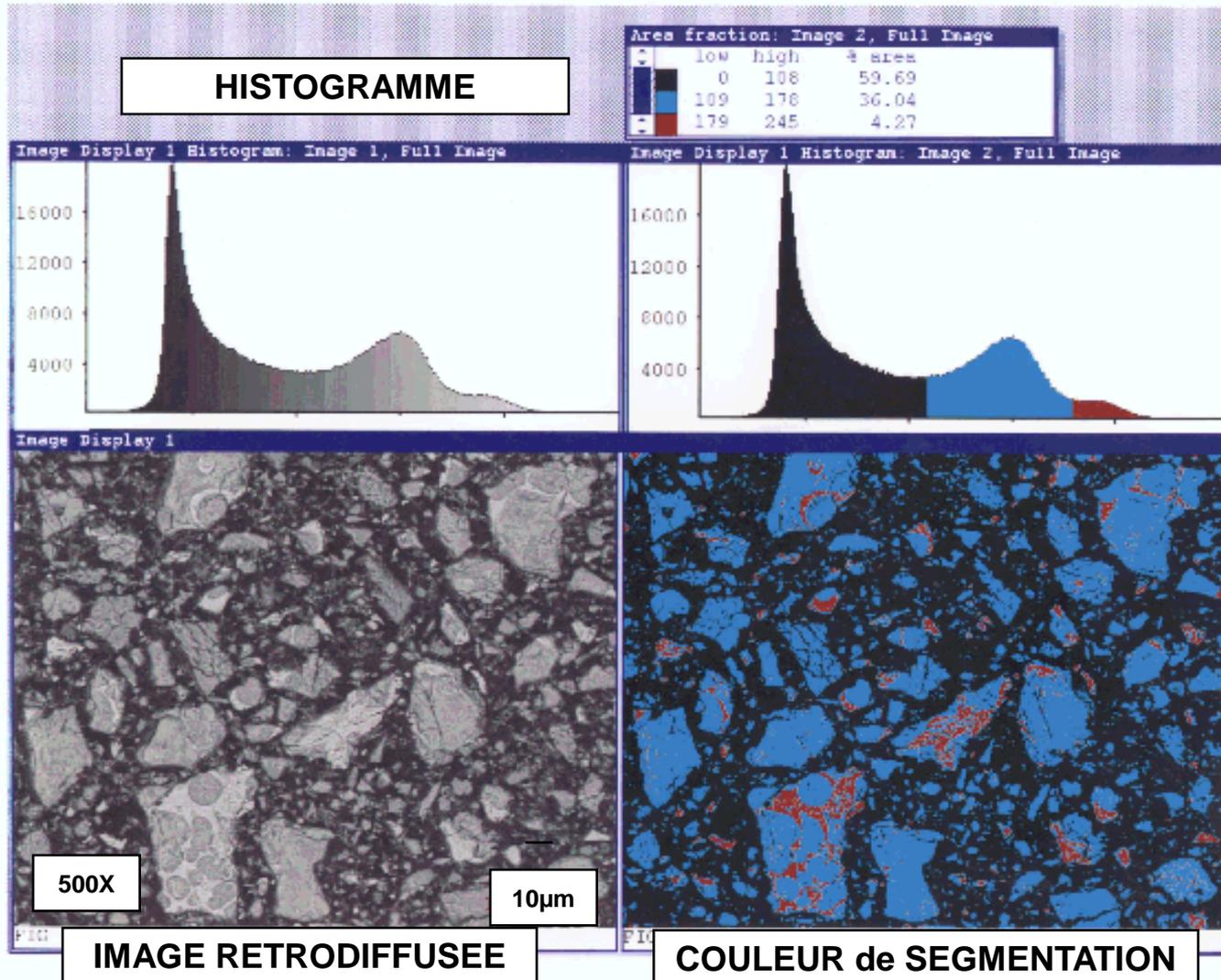
Electrons secondaires : Observation de fractures



Electrons retrodiffusés : Observation de sections polies



Electrons retrodiffusés : Observation de sections polies



Méthodes d'analyse chimique à l'échelle micronique

A utiliser pour :

- compléter des observations morphologiques et minéralogiques (souvent indispensable),
- avoir des compositions chimiques locales.

Inconvénients :

- préparation des échantillons ; idem MEB,
- quantitatif uniquement sur sections planes mais des difficultés avec les éléments légers et certaines interactions électrons – matière.

Remarque : dispositif le plus souvent associé à un MEB

Interactions électrons - matière :

Analyse chimique

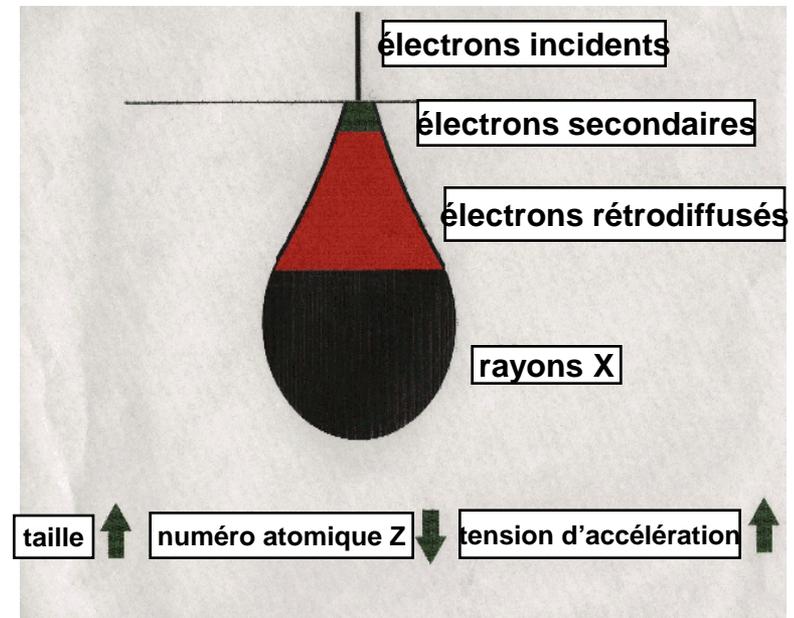
Dans une **collision inélastique**, une partie de l'énergie de l'électron incident est transférée à l'échantillon, ce qui se traduit par l'apparition :

- d'électrons secondaires (lents ou rapides).
- d'électrons Auger.
- de photons (rayons X caractéristiques de l'atome bombardé).
- de phonons (excitation du réseau cristallin).

Interactions électrons - matière :

Volume d'interaction

Volume d'excitation (ou d'ionisation) : il correspond à la "**poire**" dans laquelle les électrons incidents, progressivement ralentis par les différentes interactions, ont encore une énergie supérieure à l'énergie de seuil. Il dépend donc de l'énergie des électrons incidents, du numéro atomique Z moyen de la cible (pouvoir ralentisseur d'autant plus élevé que Z est grand) et de l'énergie du seuil E_k (seul les électrons d'énergie résiduelle supérieure à E , peuvent créer des ionisations). **Le volume d'ionisation sera plus grand pour les seuils de faible énergie que pour ceux de haute énergie.**



Dans les ciments, le volume d'interaction est typiquement :

de 1 à $2\mu\text{m}$ à **15KV**

Analyse chimique par rayons X spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS)

⇒ Les rayons X sont détectés et analysés chacun par leur énergie ou leur longueur d'onde.

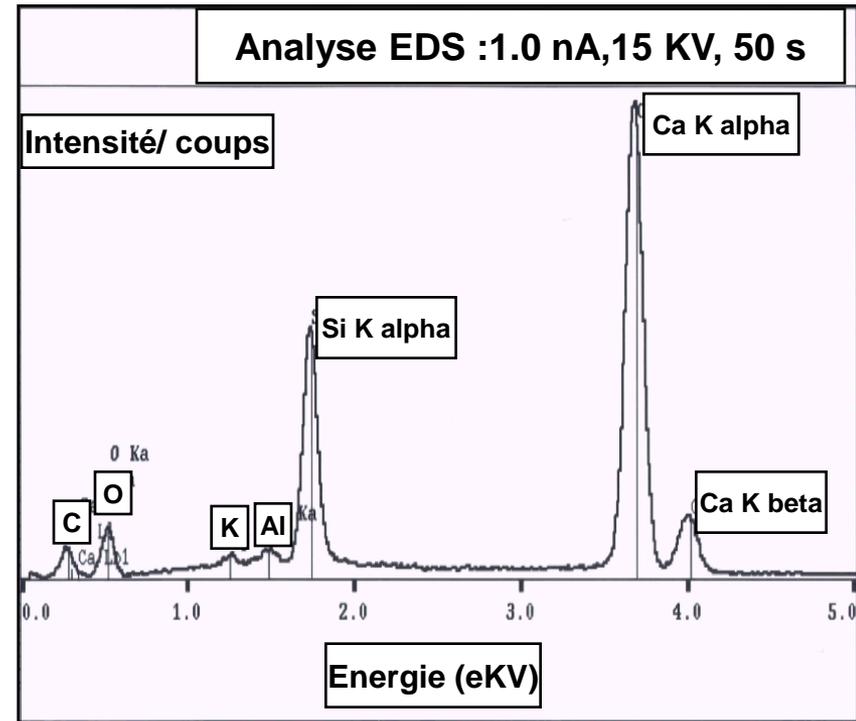
⇒ Les détecteurs de spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) permettent l'analyse simultanée de tous les éléments

⇒ Avec un détecteur à fenêtre d'éléments légers, tous les éléments à partir du bore peuvent être détectés.

⇒ Les analyses EDS sont rapides (30 à 60 s).

⇒ Les détections EDS sont limitées à environ 0.5 à 1 % en poids.

Les éléments légers (N ou inférieur) sont plus difficiles à détecter.



Spectre d'analyse EDS
d'un grain d'alite

Analyse chimique par rayons X sur une fracture (section non plane)

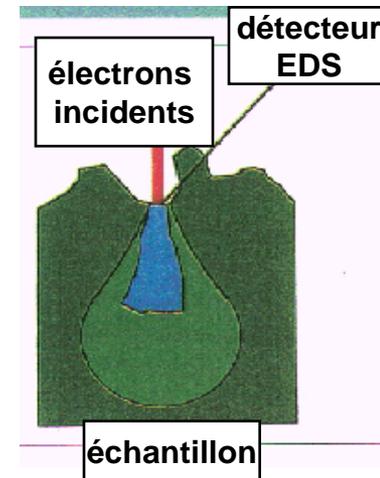
Avantage : identification des phases par la composition chimique.

Mais la forme, la taille des phases et la connaissance des constituants des matériaux sont souvent aussi nécessaires pour confirmer le type de phase analysée.

ATTENTION : Analyses seulement **QUALITATIVES**.

Situations dans lesquelles on doit éviter les analyses :

- phases trop petites pour le volume d'interaction (environ $2\mu\text{m}$)
- surfaces à angles extrêmes (déviations significatives de l'horizontale)
- surfaces qui mènent au détecteur gênées par d'autres phases
- quand le nombre de coups des rayons X sont trop faibles pour être statistiquement valables (ex : cas des courants très faibles).



Analyse chimique par rayons X sur section polie (section plane)

Avantage : l'interprétation d'analyses chimiques est optimale avec les images rétrodiffusées (parce que les volumes d'interactions sont plus proches pour les électrons rétrodiffusés et les rayons X)

⇒ **ANALYSES PAR POINTÉS** :

Qualitative : identification des phases dans les microstructures connues

Exemple : sable, calcite, gypse ou grains d'anhydres

Quantitative :

1 - détermination des compositions des phases par les ratios atomiques

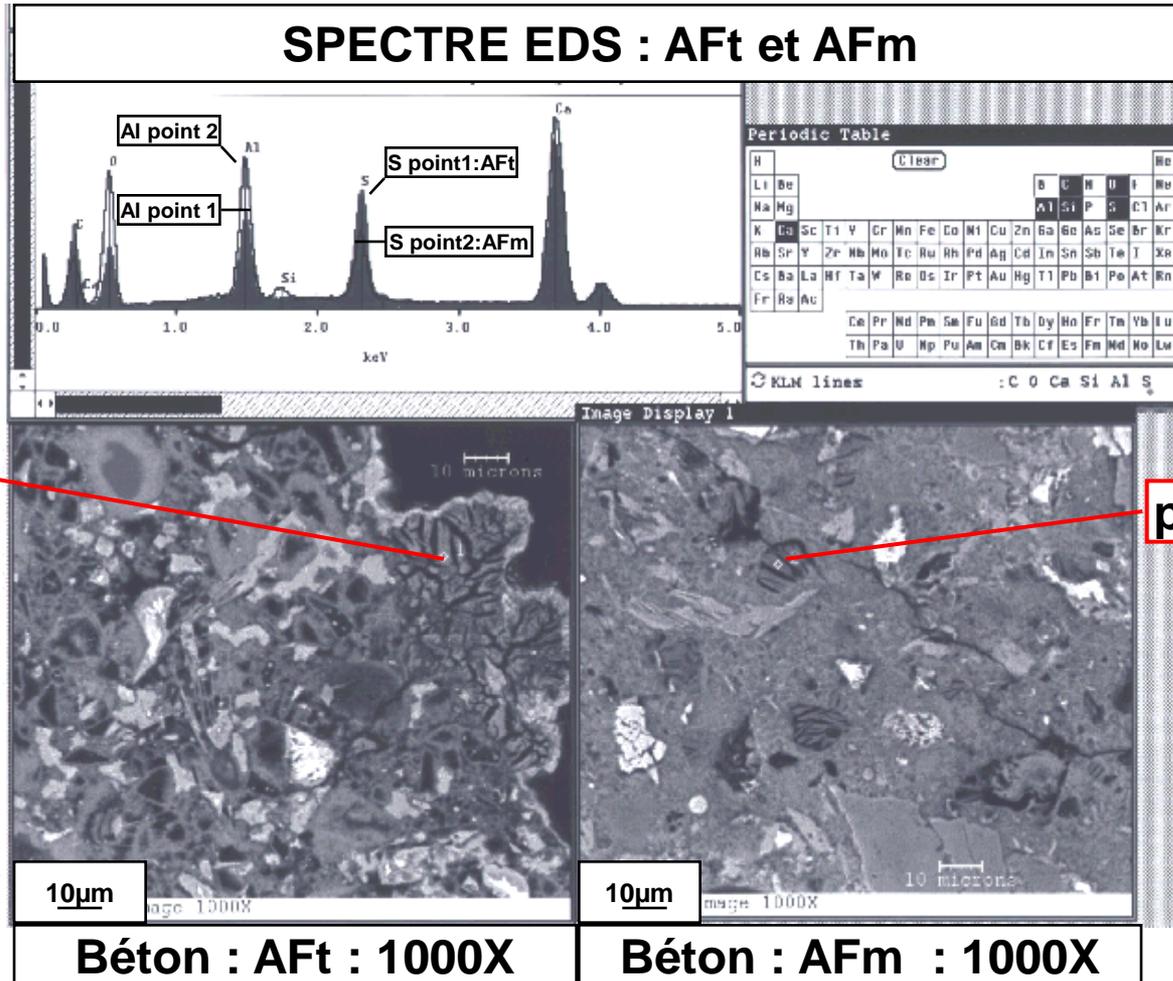
Exemple : alite ou belite; AFt ou AFm.

2 – détermination des incorporation en éléments mineurs dans les phases

⇒ **ANALYSES PAR BALAYAGE** :

Cartographie X : distribution spatiale de chaque élément dans la microstructure

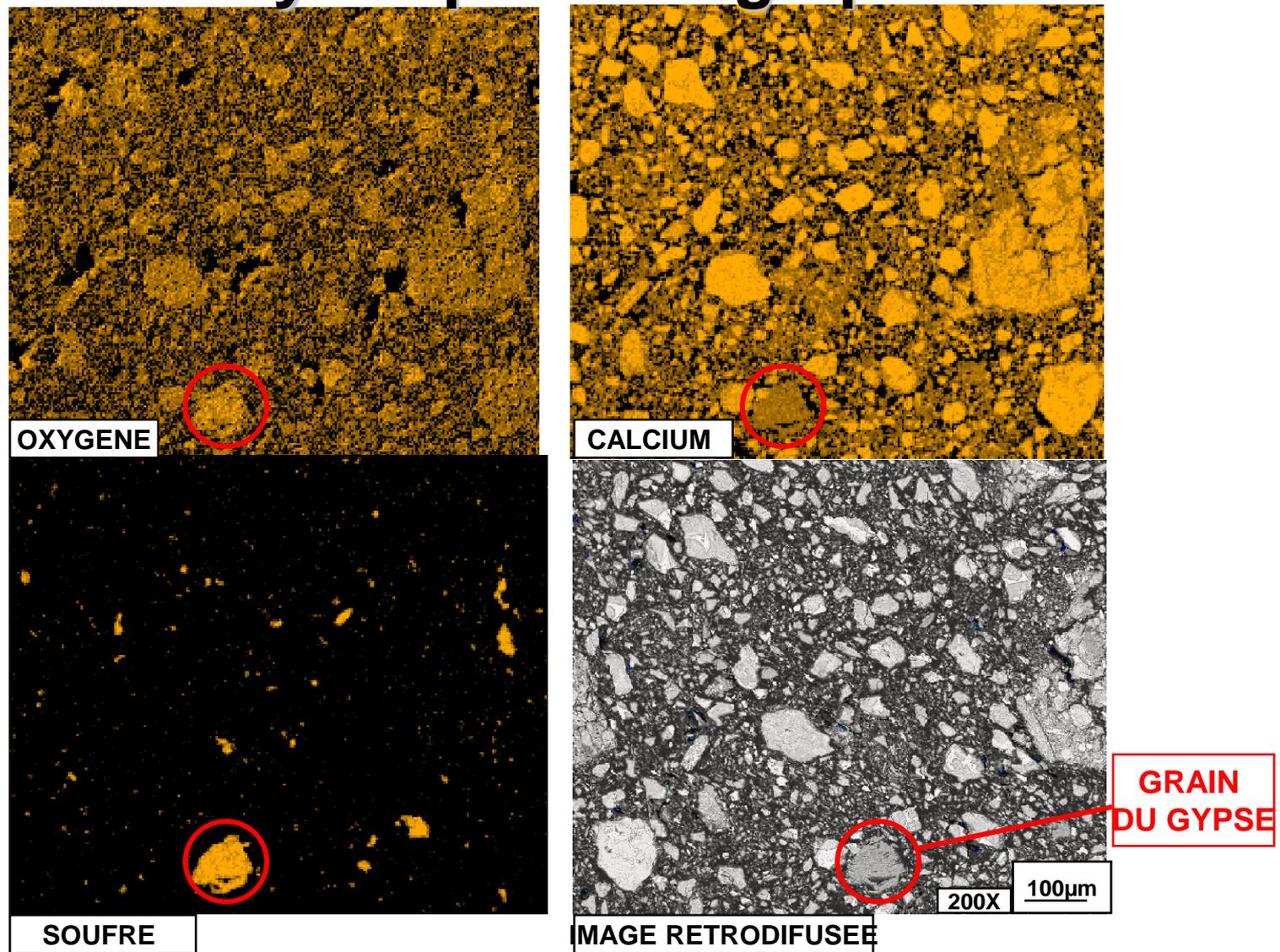
Analyses quantitatives sur sections polies : analyses par pointé



AFt : atomique ratio
 $Ca/Al = 3$
 $Ca/S = 2$
atomique %
 $Ca=20$
 $Al=6.7$
 $S=10$

AFm : atomique ratio
 $Ca/Al = 2$
 $Ca/S = 4$
atomique %
 $Ca=22$
 $Al=11$
 $S=5.5$

Analyses quantitatives sur sections polies : Analyses par cartographie



Ciment Portland anhydre

Diffraction des rayons X

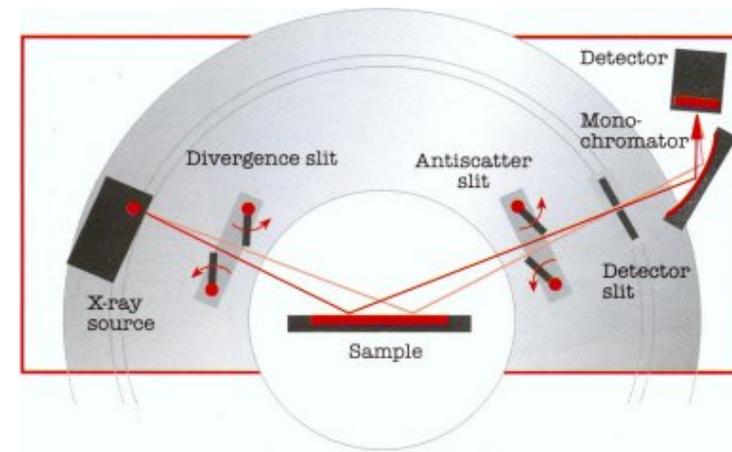
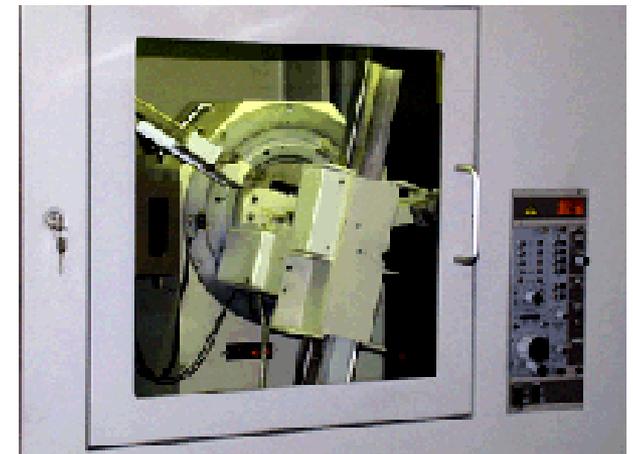
A utiliser pour :

- connaître la minéralogie (peut être quantitatif) des différentes phases cristallines,
- les substitutions ou solutions solides dans les cristaux.

Inconvénients :

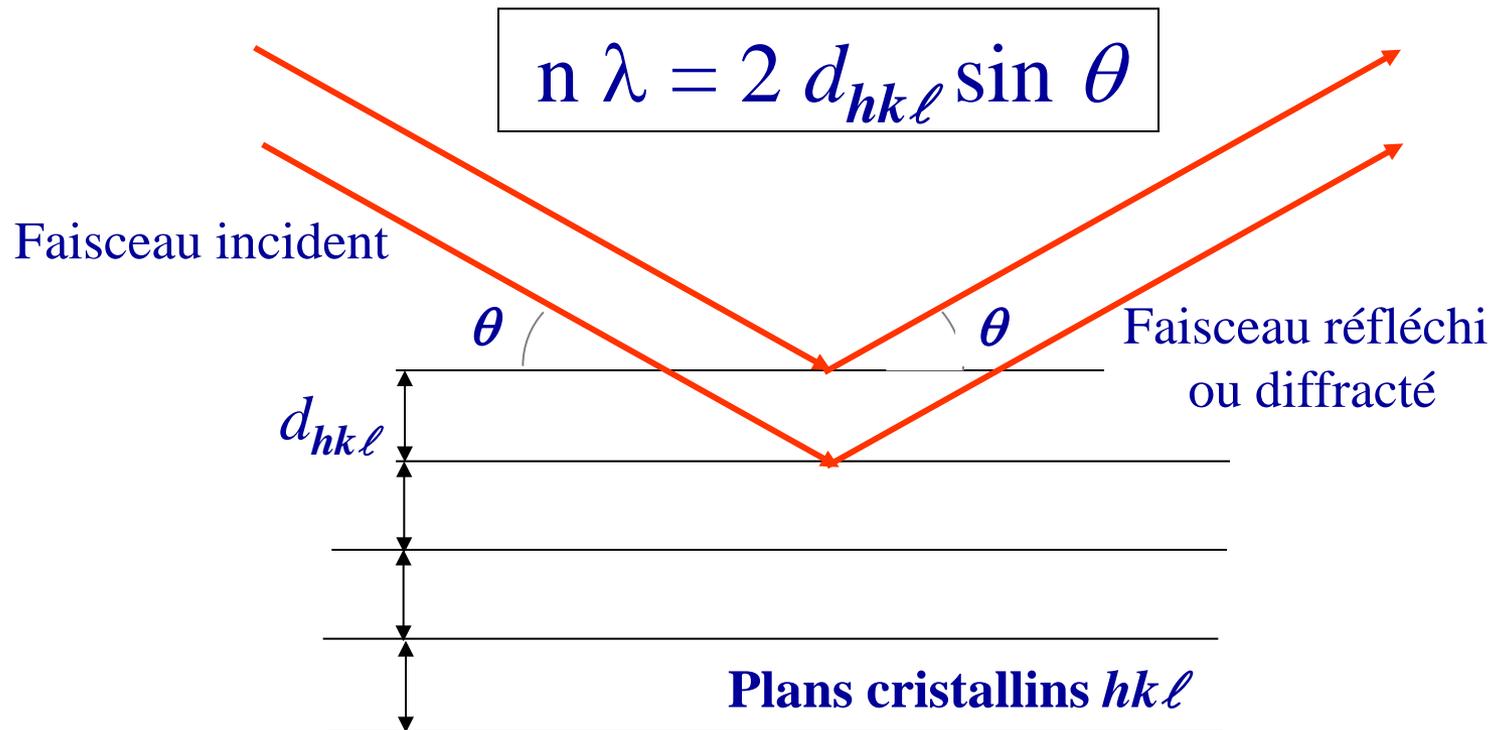
- préparation des échantillons ; broyage,
- interprétation souvent compliquée dans le cas des bétons ; nombre de phases (plusieurs raies superposées) et présence de phases peu cristallisées comme C-S-H,
- difficultés pour être quantitatif ; orientation préférentielle de certains cristaux, phases amorphes, le calcul des diffractogrammes est difficile (méthode RIETVELD ...).

Diffraction des rayons X : appareil



Diffraction des rayons X : principe

Un cristal est constitué de **plans atomiques** dont l'équidistance est d_{hkl} . Quand un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ interfère avec le cristal, il y a diffraction. Quand la différence de marche entre les rayons incidents et les rayons diffractés par les atomes est égale à un nombre entier de fois la longueur d'onde, il y a interférence constructive suivant la loi de Bragg :



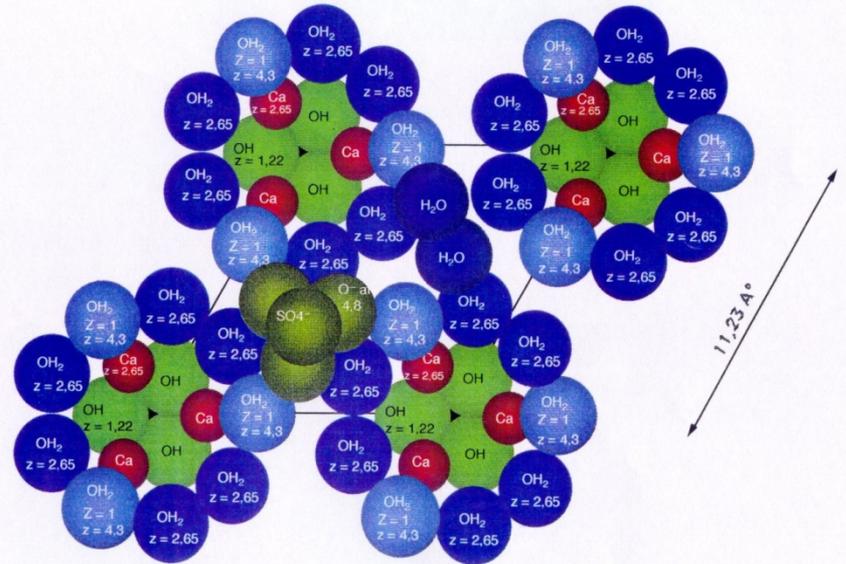
Diffraction des rayons X : exemple

Ettringite :
 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

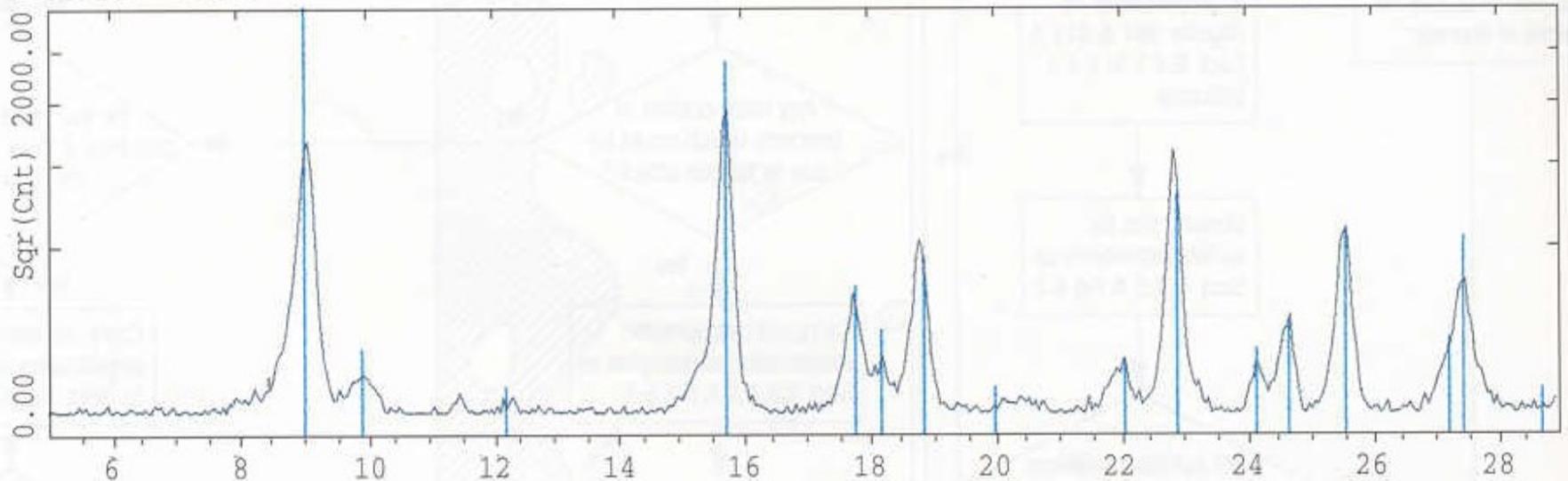
Diffractogramme de la phase pure ;

ETTRINGITE

2 \AA°



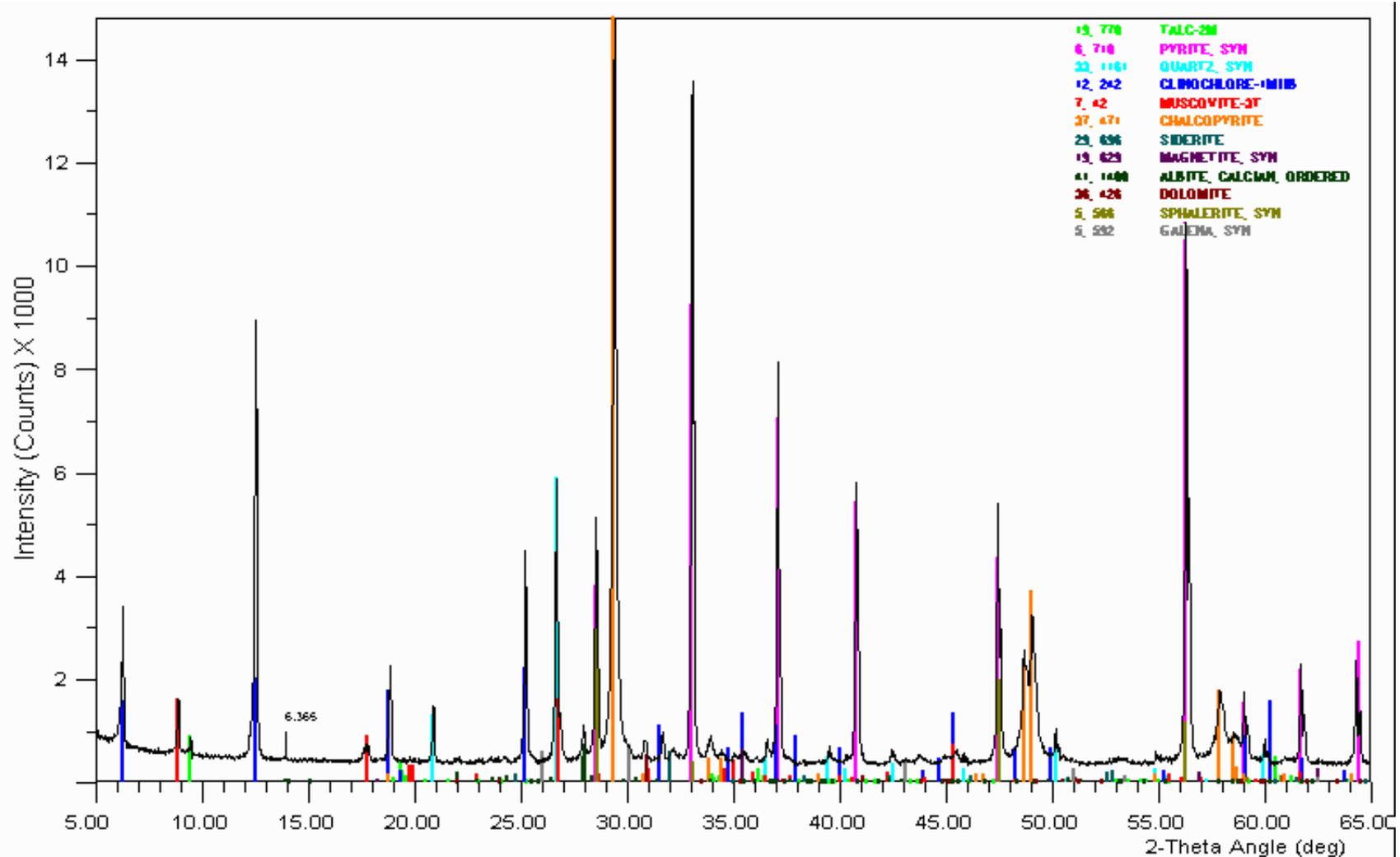
2-Theta - Scale



La position des raies et leur intensité sont définis dans des bases de données. 46

Diffraction des rayons X : exemple

Diffractogramme d'un mélange de plusieurs phases ;



File Name: c:\ud\sulphide.xpl

Méthodes d'analyse thermique

A utiliser pour :

- la nature minéralogique de certaines phases (aspect quantitatif possible),
- la quantité d'eau libre.

Inconvénients :

- préparation des échantillons ; séchage et broyage,
- intensité et position des pics varient avec les conditions expérimentales ; difficulté d'optimiser le protocole opératoire (stabilité de ligne de base, tassement de l'échantillon, P_{H_2O} , granulométrie, rampe de température),
- dans les mélanges complexes comme le béton, il y a souvent une superposition de pics,
- représentativité de l'échantillon (quelques mg).

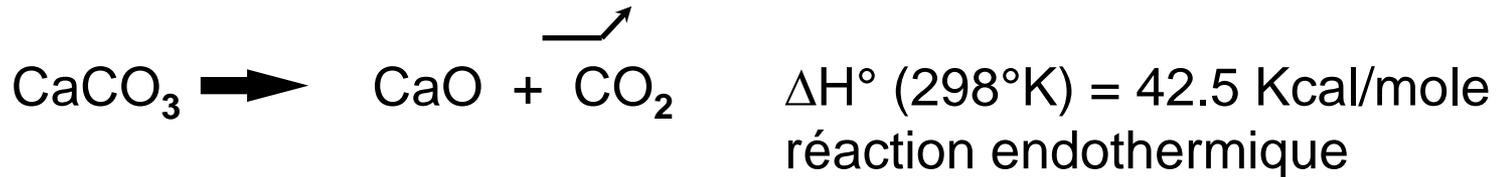
Méthodes d'analyse thermique : applications

Identification de composés, connaissance de la stabilité thermique, température de changement de phases ...

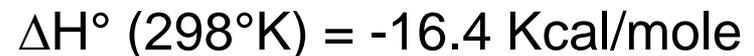


TRANSFORMATIONS CHIMIQUES

○ AVEC VARIATION DE MASSE



Notons qu'une enthalpie peut être la résultante de plusieurs réactions :



Méthodes d'analyse thermique : applications



TRANSFORMATIONS CHIMIQUES

- SANS VARIATION DE MASSE

Il s'agit en général de réactions à l'état solide peu intenses (dérive de ligne de base)



TRANSFORMATIONS PHYSIQUES

- TRANSFORMATIONS POLYMORPHIQUES (ALLOTROPIQUES)

Rappel : la stabilité thermodynamique d'un matériau , à une température donnée, correspond à ΔG° la plus faible

Transformation réversible : cas du QUARTZ

Analyse Thermique Différentielle : appareil



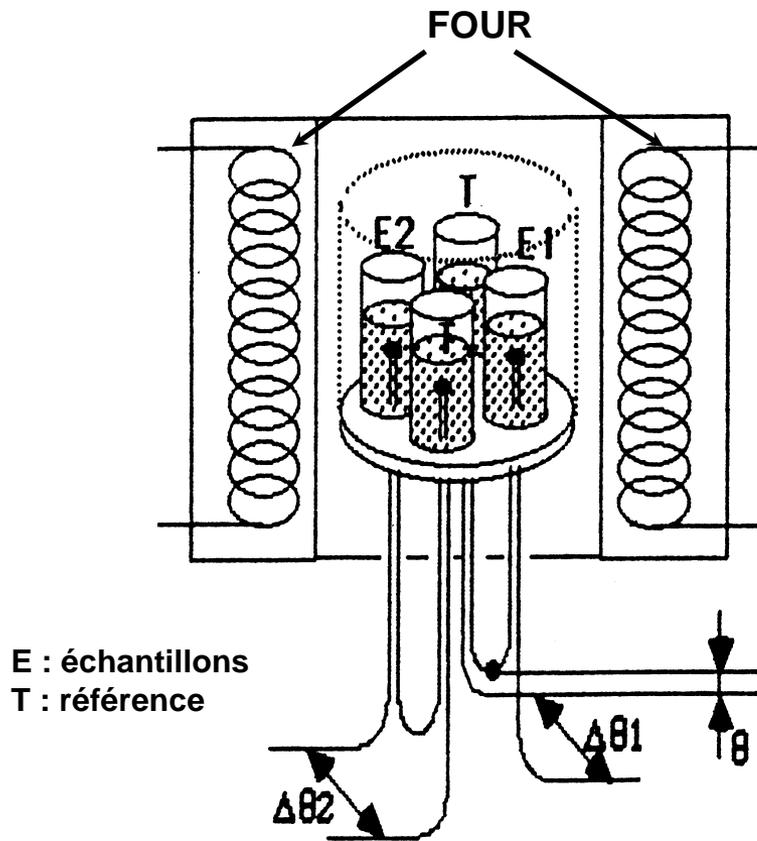
Analyse Thermique Différentielle : Principe

La méthode la plus appropriée pour la détection de petits changements d'énergie consiste à chauffer l'échantillon à côté d'un matériel thermiquement inerte.

La différence de température entre les deux composés est mesurée continuellement pendant le processus de chauffage au moyen d'un thermocouple approprié branché sur un galvanomètre très sensible.

La courbe obtenue n'est pas, bien sûr, une vraie courbe différentielle, mais simplement une différence de température.

Analyse Thermique Différentielle : principe



Un **four unique** chauffe à vitesse constante et définie, une référence et un échantillon contenus dans des petites nacelles.

On mesure la différence de température entre la référence et l'échantillon.

Mesure reproductible si :

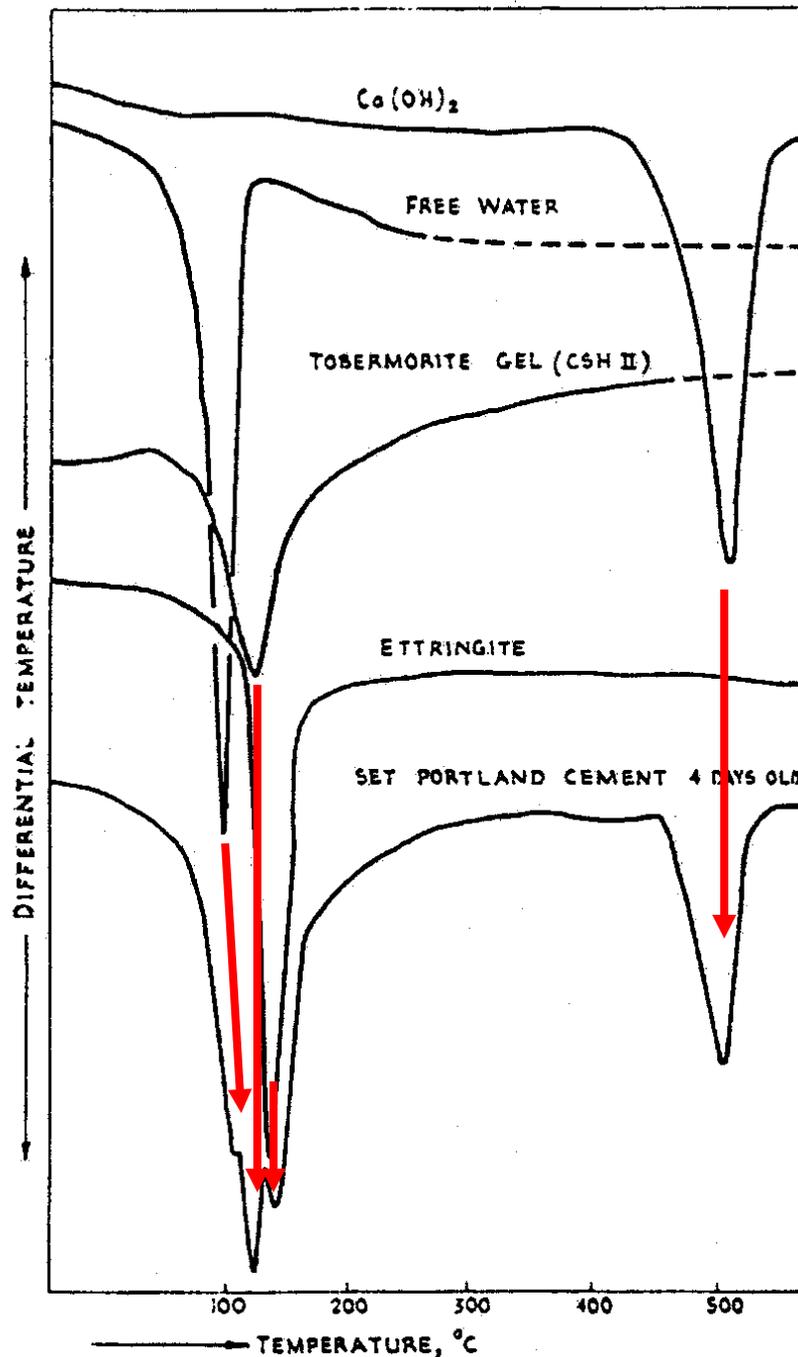
- la géométrie entre les nacelles est conservée
- la même masse est utilisée
- la Cp de la référence n'est pas trop éloignée de celle de l'échantillon
- la vitesse de chauffe est appropriée

ATD : exemple

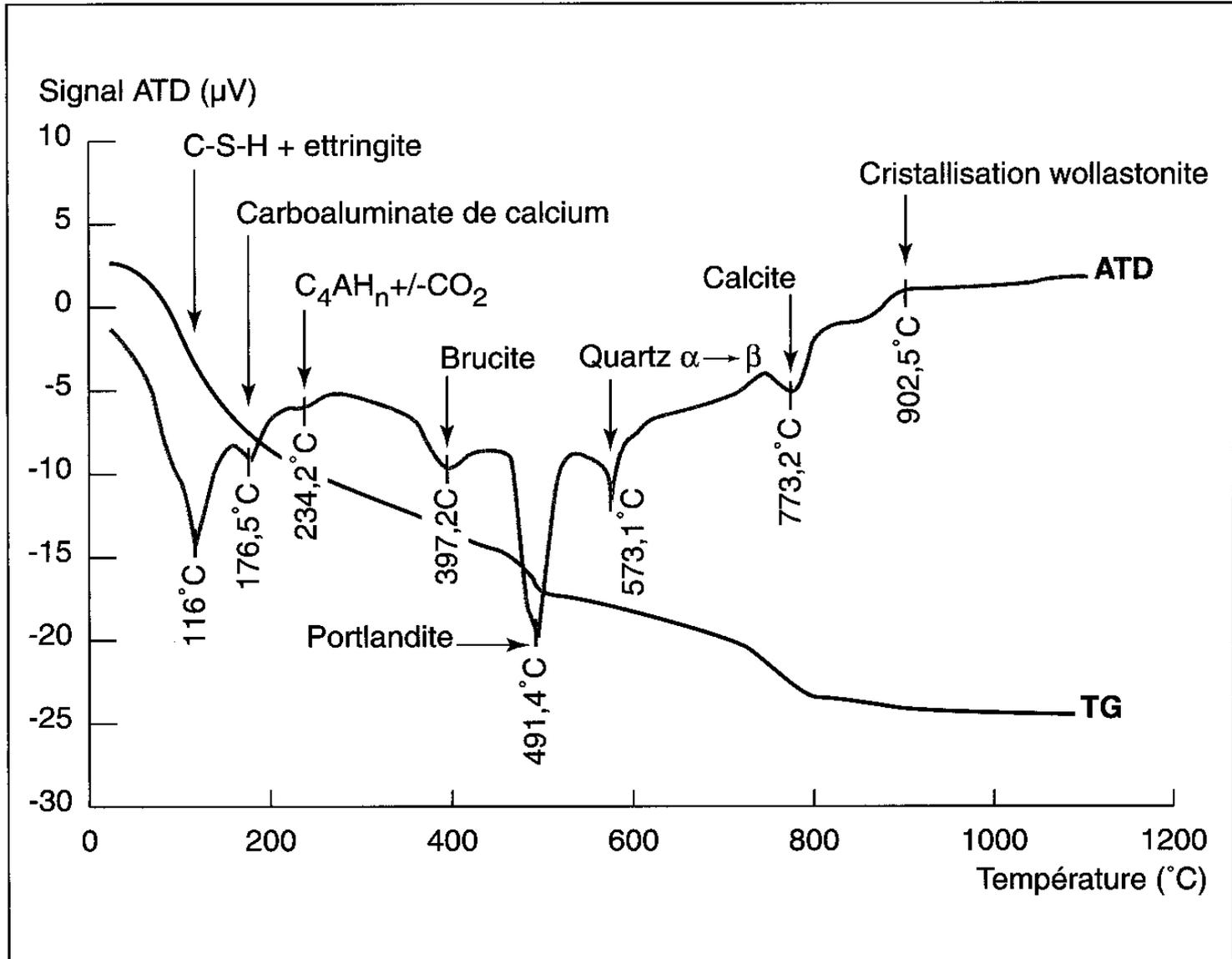
La connaissance de **thermogramme de référence** réalisés sur des phases pures est une aide à l'identification des pics.

Remarque : un pic thermique associé à une réaction intervient à une température variant de **+/- 7°C** suivant les conditions opératoires. Il faut utiliser la même référence : souvent alumine calcinée.

Le thermogramme est représentatif de l'ensemble des réactions : **addition des effets thermiques** qui peut compliquer l'interprétation même qualitative.



ATD : exemple



Porosimétrie par intrusion de mercure :

A utiliser pour :

- connaître la distribution poreuse de la pâte du béton
- la porosité totale du béton

Inconvénients :

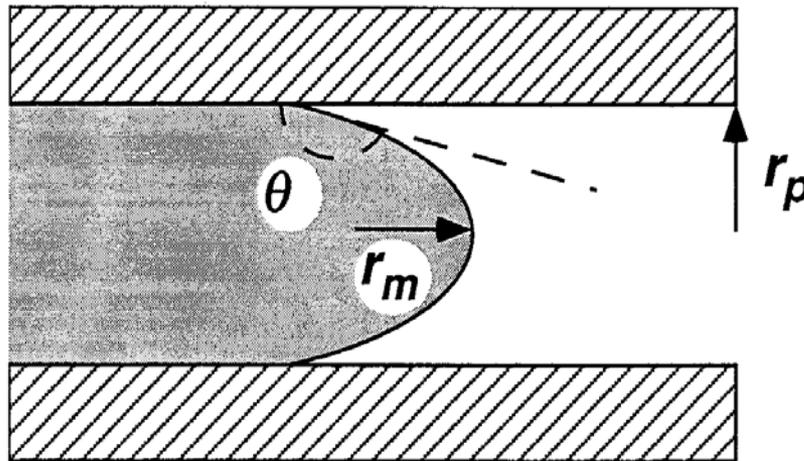
- préparation des échantillons ; séchage
- artéfacts possible au niveau de la mesure
- endommagement possible de la microstructure aux plus fortes pression d'intrusion du mercure.
- contamination des échantillons par le mercure.

Porosimétrie par intrusion de mercure : Appareil



Porosimétrie par intrusion de mercure : Principe

La mesure de porosité par intrusion de mercure fait appel aux principes de capillarité. **Le rayon du pore envahi par le mercure est une fonction de la pression appliquée au liquide.** Pour qu'un liquide entre dans un pore d'un solide, l'interface liquide/gaz doit adopter une courbure définie par la taille du pore et l'angle de contact. La loi de Washburn similaire à la loi de Laplace permet de quantifier cette relation :



$$P = - \frac{2\gamma_{Hg} \cos \theta}{r_p}$$

r_p = rayon du pore envahi

γ_{hg} = tension de surface du mercure

θ = angle de mouillage mercure / pore

P = pression d'injection

En pratique, on applique au mercure une pression d'injection croissante par paliers et on mesure le volume de mercure qui pénètre dans l'échantillon pour chacun de ces paliers.

Porosimétrie par intrusion de mercure :

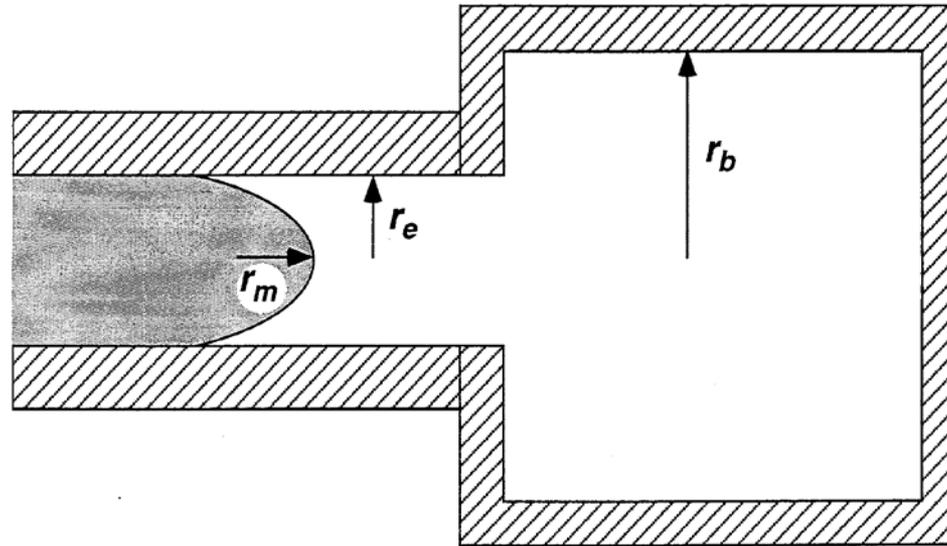
Propriété du mercure

- Le mercure ne mouille pas les non métaux : il réagit avec ces derniers pour faire des amalgames.
- L'angle de contact varie entre 135 et 142° (une valeur de 140° est usuellement utilisée en porosimétrie) : on a une surpression dans le mercure lors de l'intrusion.
- $\gamma_{\text{Hg}} = 0.480 \text{ J/m}^2$
- Pression d'intrusion :

Rayon du pore	Pression d'intrusion (MPa)
10 μm	0.0735
1 μm	0.735
100 nm	7.35
10 nm	73.5
1 nm	735

ATTENTION:
La microstructure du matériau peut être détériorée lors de l'intrusion de Hg avec de fortes pressions

Porosimétrie par intrusion de mercure : Artéfacts : pore en forme de bouteille



Lorsque l'on a des pores en forme de bouteille, il faut appliquer la pression la plus forte (pore d'entrée : r_e) avant de mesurer le pore le plus gros (r_b): **tout le volume est attribué aux pores de diamètre r_e .**

Porosimétrie par intrusion de mercure : Artéfacts : seuil de percolation

Pour de faibles pressions d'intrusion, la pénétration de mercure est uniquement sensible à la périphérie de l'échantillon. Elle ne devient véritablement représentative de la totalité du volume qu'une fois le **seuil de percolation** franchi.

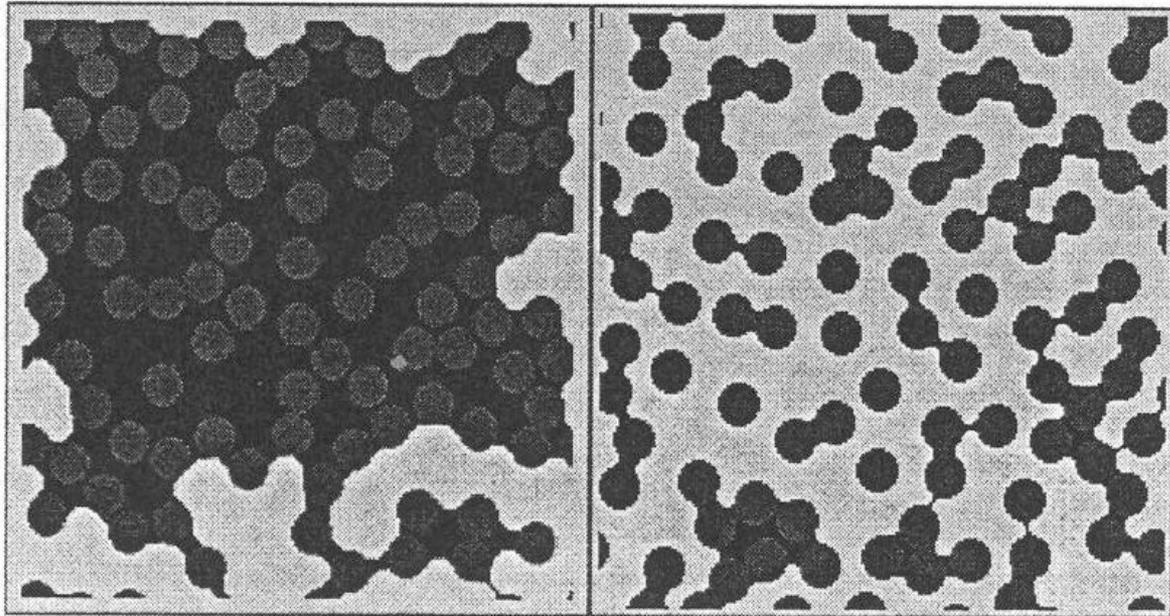
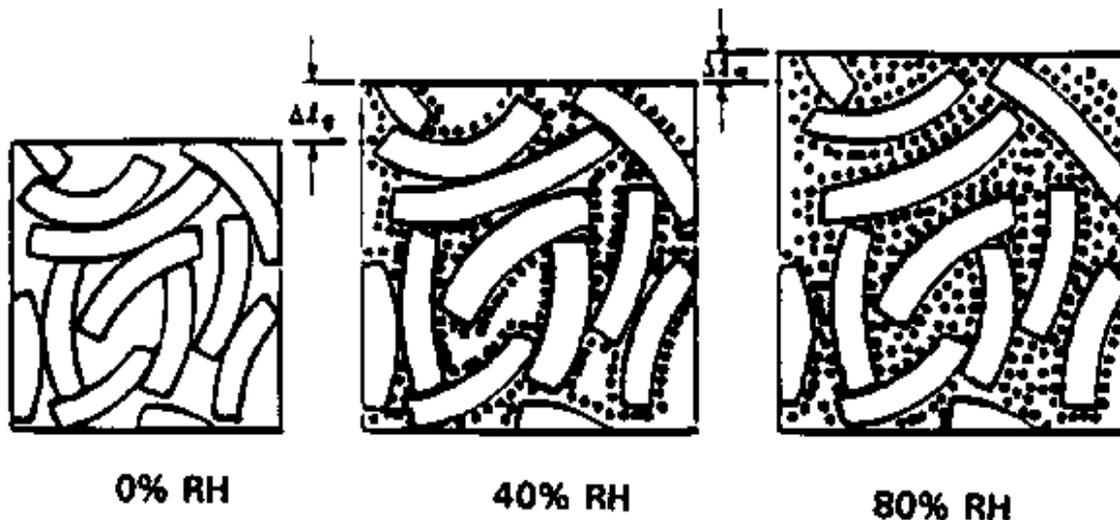


Fig. 180 : Modèle d'intrusion de mercure 2D. A gauche, injection pour de faibles pressions et à droite, injection pour des pressions plus élevées.

Porosimétrie par intrusion de mercure : préparation des échantillons

Il est difficile de préparer les échantillons car il n'est pas possible de dégazer énergiquement le réseau poreux puisque les hydrates sont sensibles aux conditions de RH : la déshydratation de ces derniers peut conduire à une modification de la porosité ;

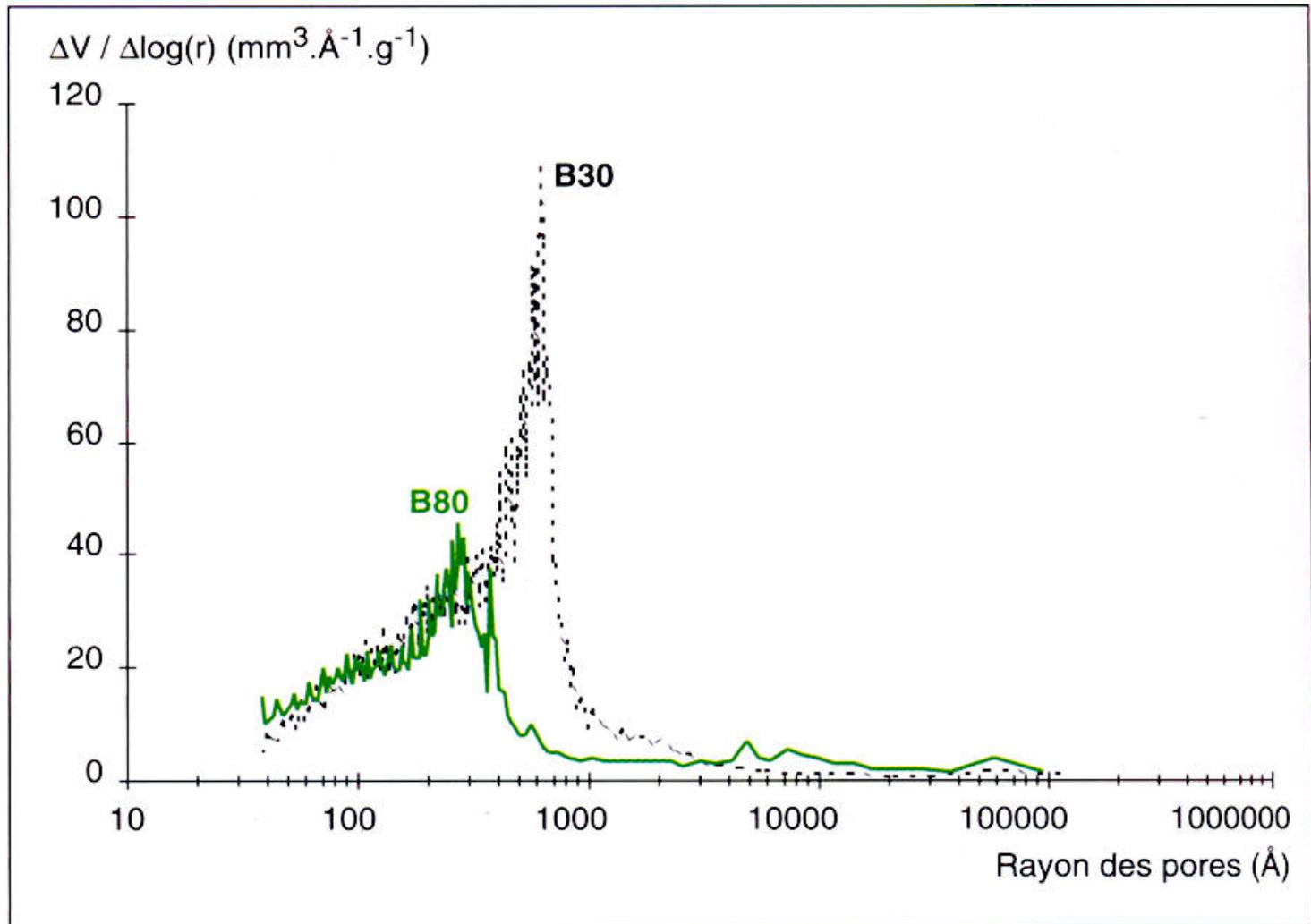


Conseil ;

Utilisation de petits morceaux de pâte de ciment (< 2mm) avec un RH > 50%.

Influence du RH sur le
volume occupé par C-S-H

Porosimétrie par intrusion de mercure : Exemple



Mesure de la perméabilité à l'air :

A utiliser pour :

- connaître la constante de perméabilité d'un gaz dont l'air pour une pâte de ciment, d'un mortier ou d'un béton

Inconvénients :

- préparation des échantillons ; séchage
- dans la réalité, le matériau est partiellement saturé d'eau, ce qui conduit à une perméabilité très différente

Mesure de la perméabilité à l'air :



Mesure de coefficient de diffusion des chlorures :

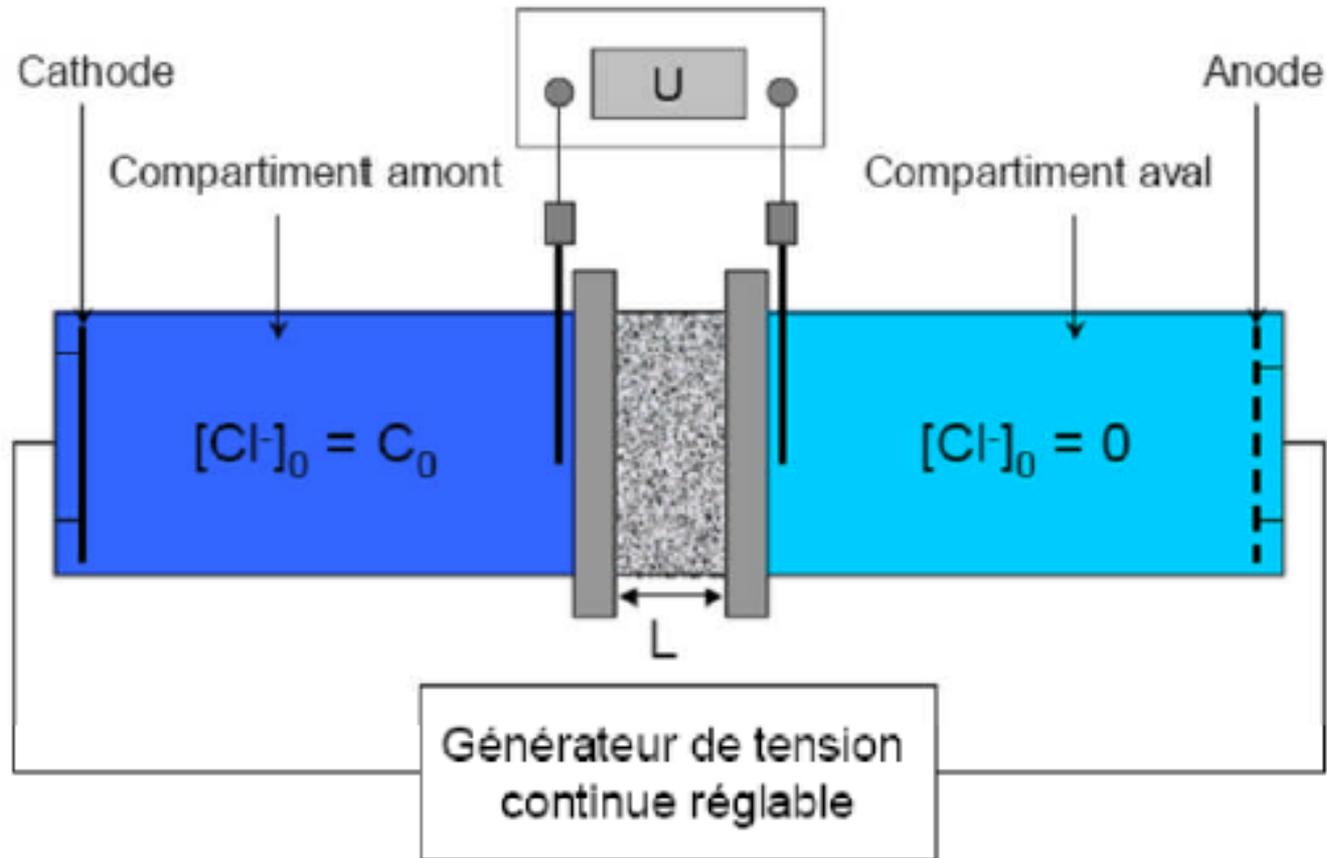
A utiliser pour :

- le coefficient de diffusion effectif d'une pâte de ciment, d'un mortier ou d'un béton pour les ions chlorures

Inconvénients :

- application d'un courant qui conduit à des vitesses de migrations différentes entre les ions
- augmentation de la température lors de l'expérience dont il faut tenir compte
- adsorption des ions chlorures d'autant plus forte que la pâte de ciment contient plus de C-S-H
- possibilité de précipiter le sel de Friedel (monochloro-aluminate de calcium hydraté) si pâte de ciment riche en aluminate de calcium

Mesure de coefficient de diffusion des chlorures :



Attention à avoir une bonne étanchéité au niveau de la cellule qui contient l'échantillon