



Durabilité du béton des ouvrages d'art : Méthodologie de détermination des classes d'environnement et critères de choix des constituants

- A. OUALI Ingénieur Conseil LPEE-CEGT
- W. HAMID Professeur FST-Settat
- M. MAYOU Directeur Assistance Technique LHM
- L. KASSOUMI Ingénieur Chargée d'Affaire LPEE-CEGT
- A. SABIHI Directeur LPEE-CEGT

SOUS LE THÈME

Quels rôles de l'infrastructure
routière dans le nouveau modèle
de développement économique
et social du Maroc ?

تحت شعار

أية مكانة لتطوير البنية التحتية
الطرقية في تنزيل النموذج
الجديد للتنمية الاقتصادية
و الاجتماعية بالمغرب ؟

10/12 Nov. 2022 - Dakhla

- **Introduction à la durabilité**
- **Rappel sur les environnements agressifs**
- **Méthodologie de détermination des classes d'exposition**
- **Recommandations pour le choix des constituants**
- **Conclusion**

Introduction à la durabilité

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années)	Exemples
1	10	Structures provisoires ^{a)}
2	10 à 25	Éléments structuraux remplaçables, par exemple poutres de roulement, appareils d'appui
3	15 à 30	Structures agricoles et similaires
4	50	Structures de bâtiments et autres structures courantes
5	100	Structures monumentales de bâtiments, ponts, et autres ouvrages de génie civil

a) Les structures ou parties de structures qui peuvent être démontées dans un but de réutilisation ne doivent normalement pas être considérées comme provisoires.

DUP : « la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable tout en étant entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à de grosses réparations ».

Le maître d'ouvrage définit lors de la conception :

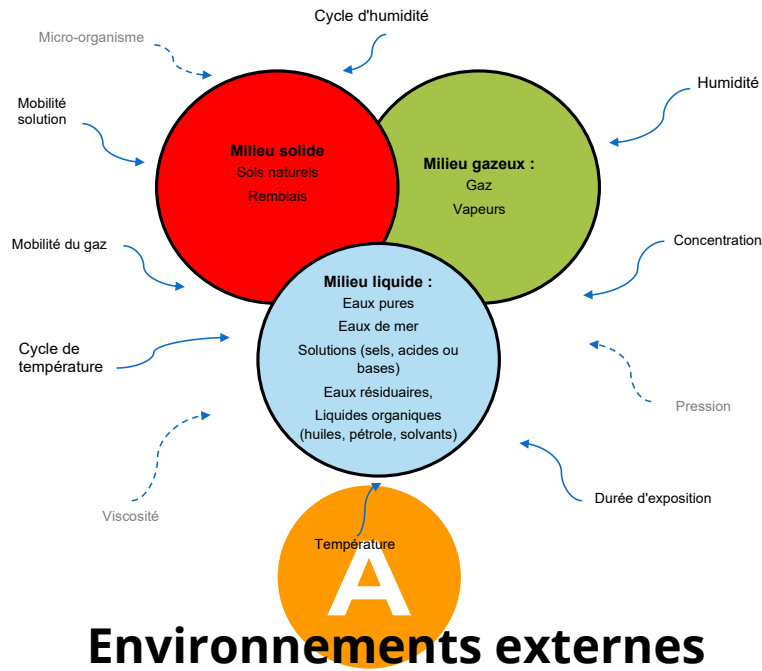
- la durée de vie souhaitée de son ouvrage (DUP) ;
- les fonctions de son ouvrage (utilisation, enjeux,...) ;
- l'environnement local et l'exploitation attendue.

La durabilité est visée dans les textes normatifs ou contractuels :

- CPS / CCTP ;
- NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2)
- NF EN 206-1 / NM 10.1.008 (Pr NM EN 206) ;
- Fascicule 65 ;
- Pr FD P 18-480 (Béton : Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle).

Les ouvrages répondant à l'exigence de DUP de 100 ans sont classés dans la classe structurale S6. L'enrobage de durabilité minimal à respecter pour cette classe structurale est défini en fonction des classes d'expositions retenues

Rappel sur les environnements agressifs



Environnements externes chimiquement agressifs

Lessivage, dissolution, précipitation, accumulation, expansion, solubilité, dépassivation, protection, formation (acide sulfurique et sulfates), carbonatation.



Environnements internes chimiquement agressifs

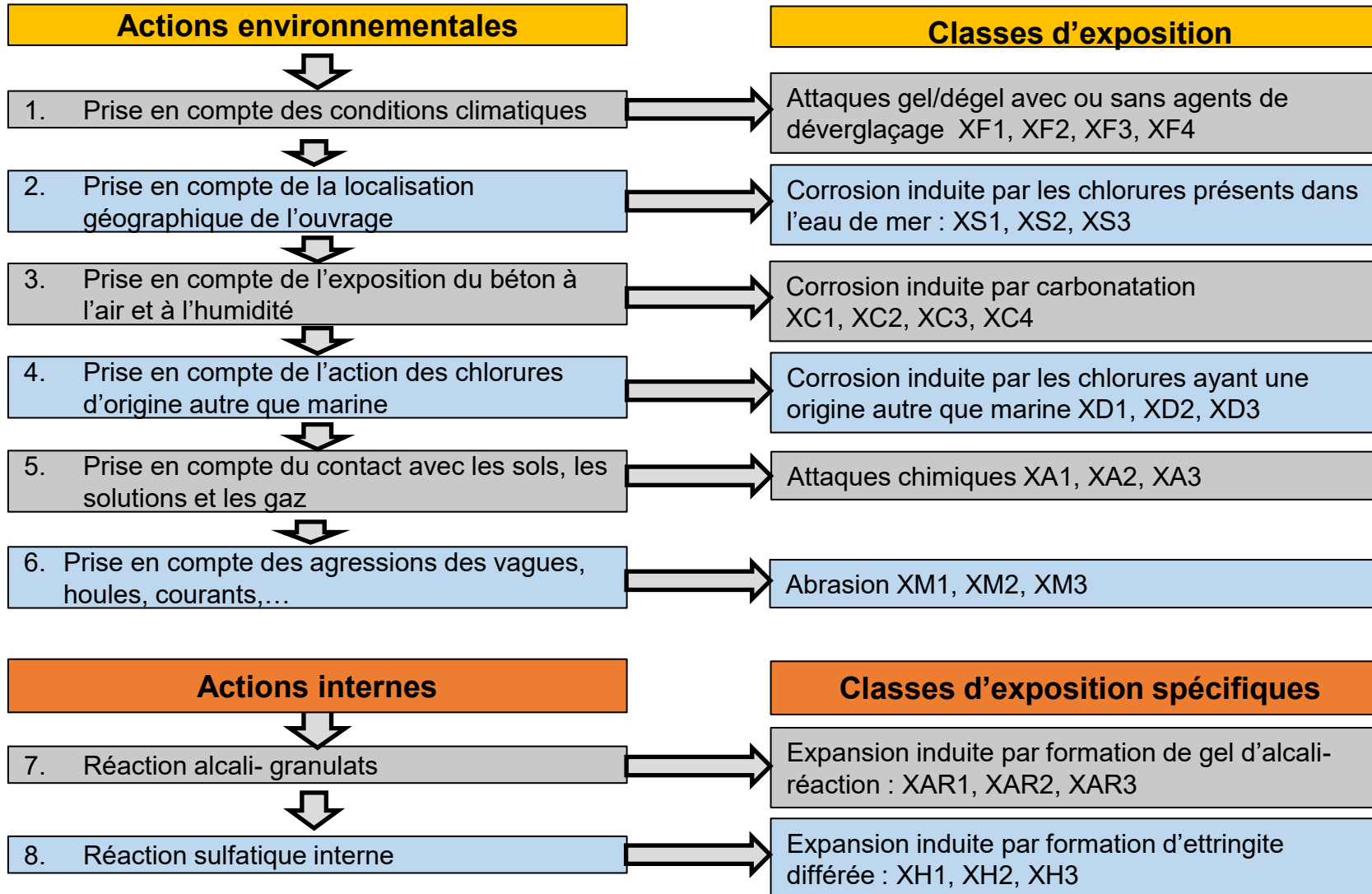
- Réaction alcali-granulats (RAG)
- Réaction sulfatique interne (RSI)



Environnements externes mécaniquement agressifs

- Abrasion par la circulation (pneumatiques ou chenilles)
- Abrasion par l'action répétée d'eau chargée en particules abrasives.

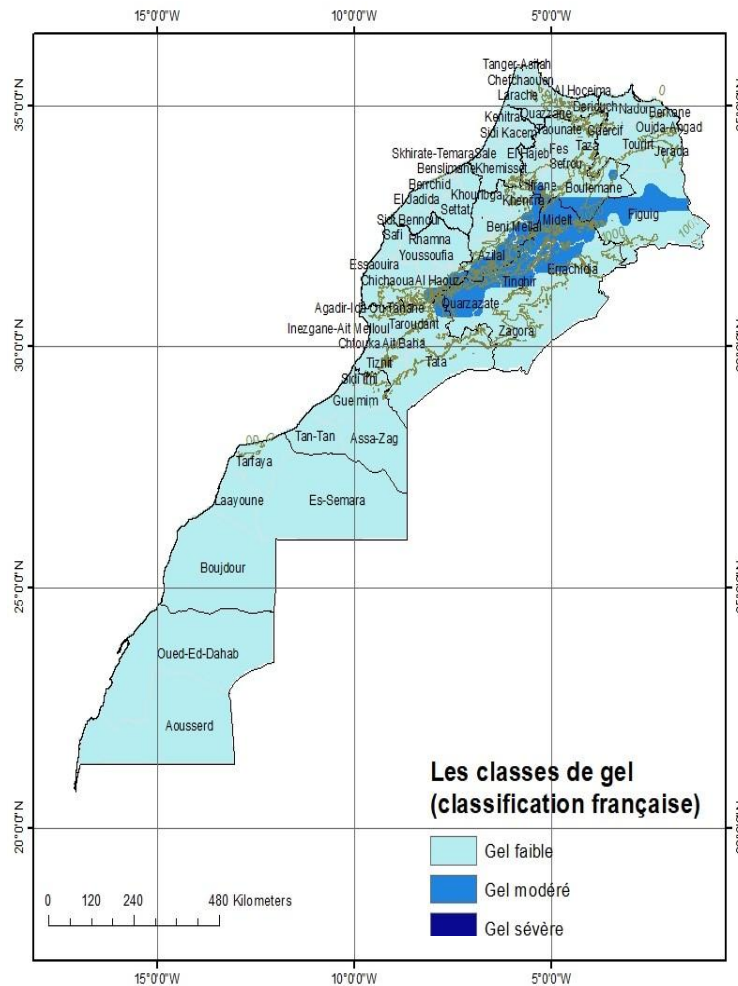
Méthodologie de détermination des classes d'exposition



27 classes d'exposition que le maître d'ouvrage doit définir pour son ouvrage ou partie d'ouvrage y compris la classe s'exposition X0 (pas de risque de corrosion ni d'attaque)

Synoptique pour la détermination des classes d'exposition

Carte de zones de gel du Maroc selon la classification française – Données CFSR 1984-2014



Méthodologie de détermination des classes d'exposition

1. Conditions climatiques de la localité de l'ouvrage

Les zones climatiques :

- **Gel sévère** : aucun.
- **Gel modéré** : zones situées dans les provinces d'Azilal, Beni Mellal, Errachidia, Figuig, Kelaat Sraghna, Midelt, Ouarzazate.
- **Gel faible** : tout le reste du pays.

Le salage au Maroc pour les zones à gel modéré est **peu fréquent**



Classe d'exposition au gel de ces zones est **XF1**

	Zone de gel faible	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	NC	XF1	XF3 (G)
Salage fréquent	NC	XF2	XF4 (G+S)
Salage très fréquent	NC	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

Classe d'exposition au gel

NC, non concernée



Distances en km des ponts classés en exposition milieu marin (XS) sur l'oued Bouregreg (estuaire)

2. Localisation géographique de l'ouvrage

Les classes d'expositions relatives au chlorures marin pour le béton armé ou précontraint conformément à la norme NF EN 206 sont :

- **XS1** : éléments de structures, directement exposés à l'air salin (situés à moins de 1, voire 5 km de la côte) ;
- **XS2** : éléments de structures marines immergés en permanence ;
- **XS3** : éléments de structures marines en zone de marnage et/ou exposés aux embruns (situés à moins de 100, voire 500 m de la côte):
 - o **XS3m** : zone de marnage (parties immergées typiquement jusqu'à 5 m au-dessous des plus basses eaux) ou de projections (typiquement jusqu'à 10 m au-dessus des plus hautes eaux);
 - o **XS3e** : zone exposée aux embruns.

Pour les bétons non armés exposés aux sels marins, et pour tenir compte de l'agressivité de l'eau de mer, ils sont classés en XA1.

Méthodologie de détermination des classes d'exposition

Parties d'ouvrage	XC
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)	
fondations de tous types entièrement immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC1
fondations de tous types en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC4
fondations profondes enterrées hors eau	XC2
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûte	
parties immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC1
parties en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC4
parties enterrées	XC2
parties à l'air libre	XC4
faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3
dalles de transition	XC2
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)	
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3
faces extérieures	XC4
faces intérieures des caissons	XC3
équipements et superstructures	
corniches	XC4
solins de joints de dilatation	XC4
contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4
massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4
corniches-caniveaux	XC4

Ouvrages d'art situés à moins de 1 km de la côte (ou jusqu'à 5 km de la côte, suivant la topographie (Cib))

3. Exposition de l'ouvrage à l'air et à l'humidité

Les classes d'expositions relatives à la corrosion induite par la carbonatation sont :

- XC1 : parties d'ouvrages à l'abri de la pluie (sec avec un taux d'humidité de l'air ambiant faible < 50 %), à l'exception des parties classées en XC3, ou humide en permanence (cas du béton submergé en permanence dans l'eau) ;
- XC2 : parties d'ouvrages au contact de l'eau à long terme : C'est le cas notamment des fondations en zone humide ;
- XC3 : parties d'ouvrages à l'abri de la pluie mais non closes (humidité modérée avec un taux d'humidité de l'air ambiant moyen de 50 à 70 % ou élevé > 70 %), ou exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée ;
- XC4 : parties aériennes d'ouvrages d'art soumises à une alternance d'humidité et de séchage.

Méthodologie de détermination des classes d'exposition



Ouvrages d'art situés à proximité d'une zone industrielle

4. Exposition à l'action des chlorures d'origine autre que marine

Les classes d'exposition relatives à la corrosion induite par les chlorures ayant pour origine les eaux industrielles sont :

- XD1 : surfaces modérément humides exposées à des chlorures transportés par voie aérienne ;
- XD2 : parties d'ouvrage exposées aux eaux industrielles et contenant des chlorures ;
- XD3 : parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures (cas non rencontré au Maroc pour les ouvrages d'art).

Méthodologie de détermination des classes d'exposition

Agents agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN:2014		
		XA1	XA2	XA3
Agressivité des eaux en fonction de leur concentration en agents agressifs et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale				
CO ₂ agressif (mg/l)	NF EN 13577 ^a	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 ^b jusqu'à saturation
SO ₄ ⁻	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000 ^c
Mg ⁺⁺ (mg/l)	NF EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 ^b jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100 ^{c,d}
pH	NF T 90-008	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	> 4,5 et ≥ 4,0 ^c
TAC (mé/l) ^e	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	≤ 1,0 et ≥ 0,4	< 0,4 et ≥ 0,1	< 0,1 ^b
Agressivité des sols				
SO ₄ ⁻ (mg/kg de sol séché à 105 °C ± 5 °C)	NF EN 196-2	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000 ^c
Degré d'acidité Baumann-Gully (ml/kg)	NF EN 16502	> 200	*	*
Agressivité des gaz en milieu humide > 75 % en présence d'oxygène				
SO ₂ (mg/m ³)	NF EN 14791	≥ 0,15 et ≤ 0,5	> 0,5 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200 ^c
H ₂ S (mg/m ³)	NF EN ISO 19739	> 0,1 ^b	≥ 0,1 et ≤ 10 ^b	> 10 et ≤ 200 ^{c,h}

**Définition des classes d'agressivité chimique pour
les solutions, les sols et les gaz (NF P 18-011)**

5. Exposition à l'action des sols, les solutions et les gaz

Les classes d'exposition qui correspondent aux environnements d'agressivité chimique dues aux eaux souterraines, aux sols naturels et étendu aux **eaux de surface, eaux et sols pollués, les eaux pures et les gaz en milieu humide** :

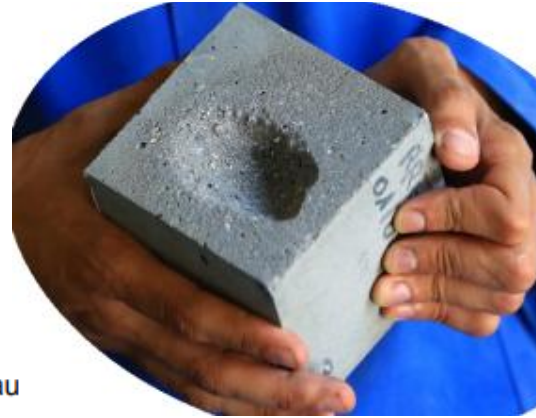
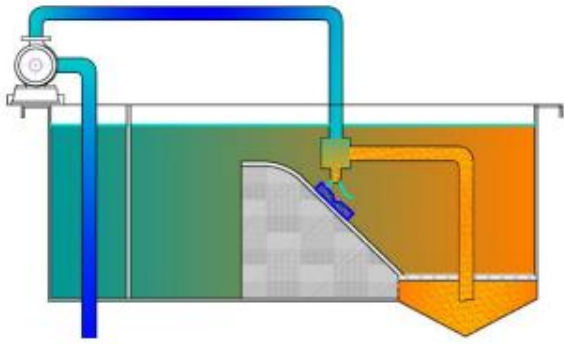
- XA1 : faible agressivité chimique ;
- XA2 : agressivité chimique modérée ;
- XA3 : forte agressivité chimique, même lorsque plusieurs agents agressifs sont présents avec des concentrations conduisant à un classement en XA3.

Méthodologie de détermination des classes d'exposition

6. Exposition à l'abrasion mécanique

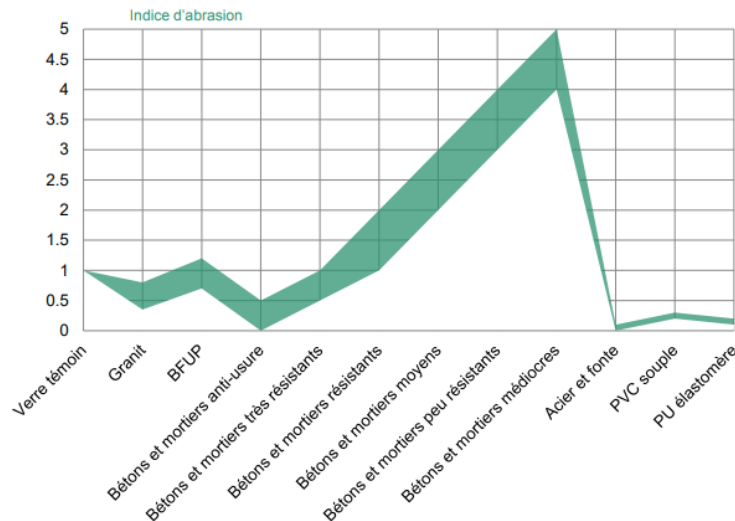
Les classes d'exposition à l'abrasion mécanique de surface du béton subie par les véhicules et hydraulique sont :

- **XM1 abrasion modérée** : agression mécanique de sites industriels soumis à la circulation de véhicules équipés de pneumatiques et matériau peu résistant à l'abrasion hydraulique de classe d'abrasion RM1 ($5 \leq \text{Indice d'abrasion} < 10$) ;
- **XM2 abrasion importante** : agression mécanique de sites industriels soumis à la circulation de chariots élévateurs équipés de pneumatiques ou de bandages en caoutchouc plein et matériau résistant à l'abrasion hydraulique de classe RM2 ($1 \leq \text{Indice d'abrasion} < 5$) ;
- **XM3 abrasion extrême** : agression mécanique de sites industriels soumis à la circulation de chariots élévateurs équipés de bandages élastomères ou métalliques ou d'engins à chenilles et matériau très résistant à l'abrasion hydraulique de classe RM3 (Indice d'abrasion < 1).



$$I = \frac{V}{V_0} \begin{cases} V = \text{volume de l'empreinte sur le matériau} \\ V_0 = \text{volume moyen des empreintes sur le verre} \end{cases}$$

Valeurs indicatives de l'indice d'abrasion



Banc d'essai d'abrasion et indice d'abrasion indicatives des matériaux (CNR)

Méthodologie de détermination des classes d'exposition

Désignation de la classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs de type d'ouvrages ou de parties d'ouvrage illustrant le choix des classes d'exposition
XAR1	Environnement sec ou peu humide (hygrométrie inférieure ou égale à 80 %) ^a	<ul style="list-style-type: none"> — Intérieurs de bâtiments d'habitations ou de bureaux — Ouvrages protégés contre les sources d'eau, les intempéries et les condensations — Dallages sur terre-plein drainé
XAR2	Environnement avec hygrométrie supérieure à 80 % sans fondants salins ou en contact avec l'eau hors environnement marin	<ul style="list-style-type: none"> — Parties Intérieures de bâtiments où l'humidité est élevée (laveries, réservoirs, piscines,...) — Parties extérieures exposées aux intempéries — Parties en contact avec un sol et/ou de l'eau
XAR3	Environnement avec hygrométrie supérieure à 80 % et avec fondants salins, ou en environnement marin	<ul style="list-style-type: none"> — Parties intérieures humides et parties extérieures, exposées aux fondants salins — Éléments complètement ou partiellement immergés dans l'eau de mer ou éclaboussés par celle-ci — Éléments exposés à un air chargé en sel (zone côtière)

^a Certaines pièces de forte épaisseur (au moins de l'ordre de 50 cm pour une pièce ayant une seule face de séchage, et de l'ordre de 1 m d'épaisseur pour des pièces ayant deux faces de séchage), situées en environnement sec ou d'hygrométrie inférieure à 80 %, peuvent garder, selon les conditions d'exposition, une humidité interne qui amène à les classer en XAR2.

Classes d'exposition vis-à-vis de l'alcali-réaction en fonction de l'hygrométrie et du lieu de construction

(FD P 18-464/2014)

7. Exposition vis-à-vis de l'alcali-réaction

Méthodologie de détermination des classes d'exposition

Désignation de la classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
XH1	Sec ou humidité modérée	Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen Partie d'ouvrage en béton située à l'extérieur et abritée de la pluie
XH2	Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumis aux intempéries, sans stagnation d'eau à la surface Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumise à des condensations fréquentes
XH3	En contact durable avec l'eau : immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	Partie d'ouvrage en béton immergée en permanence dans l'eau Éléments de structures marines Un grand nombre de fondations Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau

8. Exposition vis-à-vis de l'attaque sulfatique interne

Classes d'exposition vis-à-vis de la RSI en fonction de l'hygrométrie et du lieu de construction (IFSTAR 2017)

Recommandations pour le choix des constituants



Ciment

CPA, CPJ, CPZ (A et B), CHF (A et B), CLK, CLC (A et B), Ciment PM, Ciment ES.



Granulats

Calcaires, alluvions hétérogènes, alluvions homogènes, sable dune, quartzite, granite,...



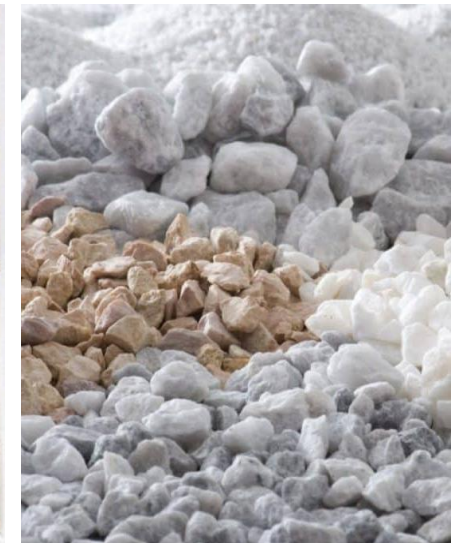
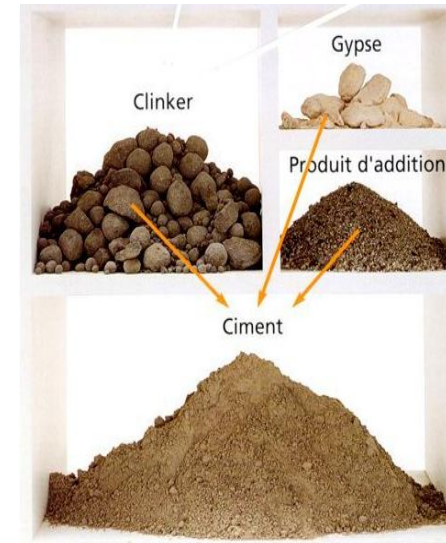
Eau de gâchage

Eau potable, eau de nappe, eau des oueds, eau recyclé, eau de mer,....



Adjuvant

Plastifiants, superplastifiants, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateur de prise, hydrofuges, entraîneurs d'air, rétenteurs d'eau,...



Recommandations pour le choix des constituants

2. Choix des granulats



Agressivité chimique

- $Ab_{eau} \leq 2,5 \%$ (XA3, XS2 et XS3) ;
- Granulats non calcaires : environnement acide ;
- Limitation des chlorures .



RAG

- Granulats non réactifs (NR), si non potentiellement réactifs (PR) à condition de satisfaction de l'essai de performance ;
- Pauvres en alcalins actifs.



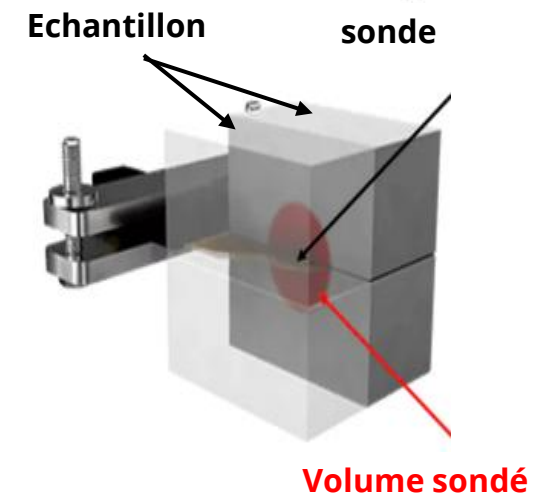
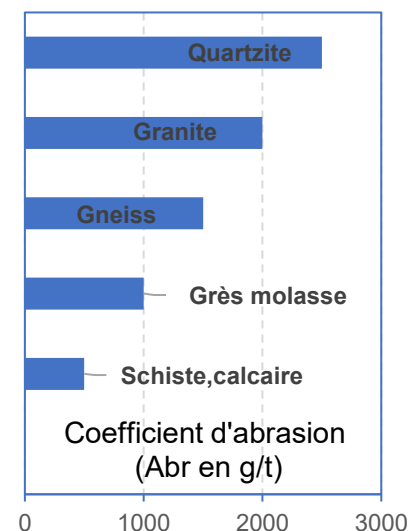
Abrasion

Abrasion élevée à très élevée (granite, quartzitique,...) : classe d'exposition XM3.



RSI

- Sulfates solubles (SA < 0,2%) ;
- Pauvres en alcalins actifs ;
- Capacité thermique.



Recommandations pour le choix des constituants

3. Choix des adjuvants



Agressivité chimique

- Superplastifiant haut réducteur d'eau (XA3, XS2 et XS3) ;
- Hydrofuge ;
- Adjuvant pour imperméabilisation



RAG

- Pauvres en alcalins actifs ;
- Adjuvants hydrofuges
- Adjuvant pour imperméabilisation .



Corrosion

- Superplastifiant haut réducteur d'eau (XA3, XS2 et XS3) ;
- Adjuvant chloré à proscrire pour béton armé et précontraint.



RSI

- Retardateur de prise ;
- Pauvres en alcalins actifs.

N°	Propriété	Méthode d'essai	Exigences
1	Homogénéité ^{a)}	Examen visuel	Homogène au moment de l'utilisation. Une ségrégation éventuelle ne doit pas dépasser les limites fixées par le fabricant.
2	Couleur ^{a)}	Examen visuel	Uniforme et similaire à la description fournie par le fabricant.
3	Composant actif ^{a)}	EN 480-6 ^{b)}	Le spectre infrarouge ne doit pas présenter de variation en ce qui concerne le composant actif par rapport au spectre de référence fourni par le fabricant.
4	Densité relative ^{a)} (liquides seulement)	ISO 758	<ul style="list-style-type: none"> • $D \pm 0,03$, si $D > 1,10$ • $D \pm 0,02$, si $D \leq 1,10$ où D correspond à la valeur indiquée par le fabricant.
5	Extrait sec conventionnel ^{a)}	EN 480-8 ^{c)}	<ul style="list-style-type: none"> • $0,95 T \leq X < 1,05 T$, pour $T \geq 20 \%$ • $0,90 T \leq X < 1,10 T$, pour $T < 20 \%$ T correspond à la valeur fixée par le fabricant en % en masse ; X est le résultat de l'essai en % en masse.
6	Valeur du pH ^{a)}	ISO 4316	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur indiquée par le fabricant ± 1 ; ou • à l'intérieur des limites indiquées par le fabricant.
7	Effet sur le temps de prise au dosage maximal recommandé	EN 480-2 avec le dosage maximal recommandé dans le mortier de référence avec 4 ciments différents (voir EN 480-1).	Noter les résultats dans le rapport.
8	Teneur en chlore total ^{a) d)}	ISO 1158 ^{e)}	<ul style="list-style-type: none"> • $\leq 0,10 \%$ en masse ; ou • inférieure ou égale à la valeur indiquée par le fabricant.
9	Teneur en chlorure soluble dans l'eau (Cl ⁻) ^{a)}	EN 480-10	<ul style="list-style-type: none"> • $\leq 0,10 \%$ en masse ^{h)} ; ou • inférieure ou égale à la valeur indiquée par le fabricant.
10	Teneur en alcalins (Na ₂ O équivalent) ^{a)}	EN 480-12	Inférieure ou égale à la limite supérieure indiquée par le fabricant.
11	Comportement à la corrosion	^{f) g)}	Ne doit pas favoriser la corrosion de l'acier enrobé dans du béton ^{g)} .

Exigences générales
(EN 934 et NM EN 934)

Recommandations pour le choix des constituants

4. Choix d'eau de gâchage



Agressivité chimique

- Substances nocives ;
- Pauvre en sulfate ;
- . Pauvre en chlorures



RAG

- Pauvres en alcalins.



Corrosion

- Pauvre en chlorures.



RSI

- Pauvre en sulfate ;
- Pauvres en alcalins.

Le respect de la norme NM 10.1.353 permet d'éviter ces phénomènes et toutes dérogations doivent être justifiées par l'application scrupuleuse des méthodes performantielles conformément au FD P18-480.

Désignation du type d'essai		Spécifications (utilisable si)
Essais préliminaires	Huile et graisse	Traces uniquement (émulsion d'huile)
	Détergent	Légère formation de mousse, stabilité de la mousse < 2 min
	Couleur	Incolore, voire légèrement jaunâtre
	Matière en suspension	< 4 ml
	pH	≥ 4
	Odeur	Aucune odeur, voir pas plus d'une légère odeur
	Matière humique	plus pâle que bru jaunâtre
Essais chimiques	Chlorures	< 500mg/l béton précontraint/coulis
		< 1000 mg/l béton armé
		< 4500 mg/l béton non armé
	Sulfates	< 2000 mg/l
	Alcalins	< 1500 mg/l Na ₂ Oéq
Autres sels	< 100 mg/l	

1. Les 27 classes d'expositions doivent être définies conformément aux documents en vigueur à travers des essais et des études spécifiques réalisées par un laboratoire expert et pluridisciplinaire. **Une mauvaise définition des classes d'environnement d'un ouvrage risque d'être préjudiciable sur sa durabilité et par conséquent engendrer des surcoûts ;**
2. Les classes d'exposition doivent être spécifiées au CCTP par le Maître d'ouvrage pour chaque ouvrage ou partie d'ouvrage ;
3. Le choix du ciment joue un rôle déterminant pour la durabilité des bétons et les ciments spéciaux CHF, CLC et CPZ ont une place essentielle ;
4. Les autres constituants ont aussi leurs importances dans la durabilité des bétons, mais le respect des normes en vigueur et les recommandations permet d'éviter la plupart des désordres liés aux agressions interne et/ou externe ;
5. L'étude de la formulation des bétons durables nécessite parfois plusieurs mois pour obtenir un résultat probant. Ce délai d'étude doit être pris en compte dans la planification d'un projet ;
6. Des dérogations peuvent être faites sur certains paramètres des constituants moyennant l'application scrupuleuse des **méthodes performantielles** conformément au fascicule de documentation FD P 18-480 dont les résultats doivent être transparentes pour le Maître d'Ouvrage/la Maîtrise d'œuvres et l'ensemble des parties prenantes du projet.

