

ATTAQUES CHIMIQUES

POINTS ABORDES :

- Types d'environnements chimiquement agressifs
- Principes de prévention
- NF EN 206+A2/CN et FD P 18-011 et leurs évolutions

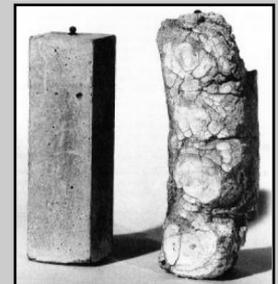
- **Atmosphères** humides acides concentrées en SO_3 et H_2S (acide sulfurique)
- **Sols**
 - acides
 - concentrés en sulfates (SO_4^{2-})
- **Eaux de surface**
 - Faiblement minéralisées ou acides
 - Concentrées en sulfates (SO_4^{2-}), en magnésium (Mg^{2+})

PATHOLOGIES POSSIBLES :

- Perte de matière par dissolution du béton (attaque acide)



- Risques de gonflement du béton (ex: si SO_4^{2-}), gonflement



- Perte de la cohésion du béton (si Mg^{2+})

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

MILIEUX CHIMIQUEMENT AGRESSIFS

Catégorisation de l'agressivité chimique du milieu
qui sera en contact avec la partie d'ouvrage en béton

+ collecte des données pour le définir



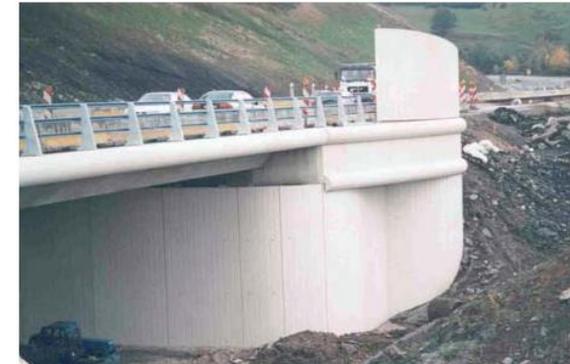
Responsabilité du Maître d'Ouvrage

Critères de définition

→ Norme NF EN 206+A2/CN: 2022 (tableau 2)

+ Fascicule FD P 18-011: 2022 (tableau 1)

(les deux documents sont indissociables)



Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

AGRESSIVITE DES EAUX



Analyse à fournir pour le marché

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN		
		XA1	XA2	XA3
CO ₂ agressif (mg/l)	NF EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	>100 Jusqu'à saturation
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
Mg ²⁺ (mg/l)	NF EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 Jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 50 et ≤ 100
pH	NF T 90-008	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
TAC (mé/l)	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	≤ 1,0 et ≥ 0,4	< 0,4 et ≥ 0,1	< 0,1

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CRITERES DE CATEGORISATION DES SOLS

AGRESSIVITE DES SOLS



Analyse à fournir pour le marché

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN		
		XA1	XA2	XA3
SO ₄ ²⁻ (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
Degré d'acidité	Annexe A	> 200	-	-

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

POUR LES AUTRES MILIEUX

Pour les autres milieux pouvant présenter un risque d'agression chimique pour les bétons, on peut se référer à une nouvelle annexe :

ANNEXE A du fascicule FD P 18-011 :
« Substances exerçant une action chimique sur les bétons »

Source : Bulletin du ciment, No 11, Novembre 1995, 63^{ème} année.

PRINCIPE DE PRÉVENTION DES DÉSORDRES

FORMULATION DU BETON (Cf. slide suivant)

CONDITIONS D'EXECUTION



Application des règles habituelles (NF EN 13670 pour béton coulé en place, NF EN 13369 pour produits en béton). Attention particulière pour la cure.

ENROBAGE (si béton armé ou avec inclusions métalliques),



Appliquer les règles d'enrobage pour les classes d'exposition concomitantes XC ou XD.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

FORMULATION DU BETON

Compacité supérieure aux bétons courants



Limitation du rapport massique Eau efficace / Liant équivalent, respect de la classe de résistance minimale

(Cf. Tableaux Annexe NA.F.)

Extrait Tableau NA.F1:

	XA1	XA2	XA3
Rapport E_{eff}/L_{eq} maximal c)	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur mini en L_{eq} (kg/m ³) c) d)	330	350	360

Liant chimiquement résistant



Cf. Tableaux 2a, 2b et 2c du Fascicule FD P 18-011 + sections afférentes.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EVOLUTION DU FD P 18-011

FD P 18-011: 2022

FD P 18-011: 2016



Tableau 2 :
*Choix des ciments
en fonction du milieu*

Tableau 2A : Choix des ciments en fonction du milieu

**Tableau 2B : Choix des additions en fonction du milieu
pour un ciment PM, ES ou SR**

**Tableau 2C — Choix des combinaisons (ciment +
addition(s))
en fonction du milieu**

+ approche **béton d'ingénierie** (respect des exigences
norme §NA.3.1.1.21 et NA.6.5 de la NF EN 206+A2/CN)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

FD P 18-011 – TABLEAU 2A

Tableau 2A — Choix des ciments en fonction du milieu

Milieu	Classe	Dispositions concernant le ciment ^b
Milieu contenant des sulfates (solutions) à l'exclusion de l'eau de mer	XA1	Pas de recommandations particulières, les préconisations de la NF EN 206+A2/CN s'appliquent
	XA2 (600 < x < 1 500 mg/l)	ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
	XA2 (1 500 < x < 3000 mg/l)	ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
	XA3	ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
Milieu contenant des sulfates (sols)	XA1	Pas de recommandations particulières, les préconisations de la NF EN 206+A2/CN s'appliquent
	XA2	ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
	XA3	ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
Milieux acides et eaux pures ^a	XA1	CEM II/B-S CEM II/B-V CEM II/B-P CEM II/B-Q CEM II/B-M(S-V) CEM III/A, B ou C CEM IV/A ou B CEM II/C-M (avec uniquement : S D P Q V) CEM VI (S-P) ou (S-V) ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC

Milieu	Classe	Dispositions concernant le ciment ^b
Milieux acides et eaux pures ^a	XA2	CEM II/B-S CEM II/B-V CEM II/B-P CEM II/B-Q CEM II/B-M(S-V) CEM III/A, B ou C CEM IV/B CEM II/C-M (avec uniquement : S D P Q V) CEM VI (S-P) ou (S-V) ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 ^c ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES) SSC CAC
	XA3	CEM III SR ou ES CEM V/A ou B ES CEM IV/ B CEM II/C-M (avec uniquement : D P Q V) SSC CAC

^a En l'absence d'étude spécifique ou de retour d'expérience, les préconisations de choix des ciments pour attaque acide pourraient être retenues pour les attaques par le CO₂ agressif.
Pour les attaques par l'hydrogène sulfuré (H₂S) il est souhaitable d'utiliser des formules bénéficiant d'un retour d'expérience, ou des CAC.

^b Dans le cas d'un mélange de ciments qui ne comporteraient pas les caractéristiques complémentaires requises dans le Tableau 2A (caractéristique PM, ES ou SR), les exigences relatives au type de ciment (Tableau 2A) s'appliquent au mélange des deux ciments de la manière suivante :

- sur la base des compositions déclarées de chacun des deux ciments du mélange et de leur proportion respective, calculer la composition du mélange. Cette composition permet d'établir une équivalence avec un type de ciment ;
- identifier dans les normes des ciments PM, ES ou SR les spécifications chimiques pour le type de ciment dont l'équivalence par mélange de deux ciments est visée ;
- à partir des résultats des analyses chimiques de chacun des ciments, calculer pour le mélange les teneurs de chacun des éléments requis dans les spécifications chimiques et en vérifier le respect.

Le Tableau 2A comporte également des choix de ciments pour lesquels aucune caractéristique complémentaire n'est requise. Dans ce cas précis, l'équivalence d'un mélange de deux ciments peut être établie sur la base de la composition.

^c Dans le cas des eaux pures, l'utilisation de ciment CEM I SR n'est pas recommandée.

- Formalisation de l'introduction des ciments d'aluminates de calcium (CAC) et des ciments sursulfatés (SSC)

- Introduction de certains ciments ternaires NF EN 197-5 pour les milieux acides et eaux pures

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

FD P 18-011 – TABLEAU 2B

Tableau 2B — Choix des additions en fonction du milieu pour un ciment PM, ES ou SR

Milieu	Classe	Cas d'un ciment PM, ES ou SR avec une addition
Milieu contenant des sulfates (solutions) à l'exclusion de l'eau de mer	XA1	Pas de recommandations particulières, les préconisations de la NF EN 206+A2/CN s'appliquent
	XA2 (600 < x ≤ 1 500 mg/l)	CEM I SR ou PM + (V ou S ou D) CEM I SR ou PM + ≤ 10 % Q(MK) ^b CEM II/A-S PM ou ES + (V ou S ou D ou Q(MK)) CEM II/A-V PM ou ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-D PM + S
	XA2 (1 500 < x ≤ 3000 mg/l)	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + ≤ 10 % Q(MK) + CEM II/A-V ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-S ES + (V ou S ou D ou Q (MK))
	XA3	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + ≤ 10 % Q(MK) ^b CEM II/A-V ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-S ES + (V ou S ou D ou Q (MK))
Milieu contenant des sulfates (sols)	XA1	Pas de recommandations particulières, les préconisations de la NF EN 206+A2/CN s'appliquent
	XA2	CEM I SR ou PM + (V ou S ou D) CEM I SR ou PM + Q(MK) (Q ≤ 10 %) ^b CEM II/A-V PM ou ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-D PM + S CEM II/A-S PM ou ES + (V ou S ou D ou Q (MK))
	XA3	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + Q(MK) (Q ≤ 10 %) ^b CEM II/A-V ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-S ES + (V ou S ou D ou Q (MK))
Milieux acides et eaux pures ^a	XA1	CEM I SR ou PM + (V ou S ou D) CEM I SR ou PM + Q(MK) (Q ≤ 10 %) ^b CEM II/A-S PM ou ES + (V ou S ou D ou Q(MK)) CEM II/A-V PM ou ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-D PM + S
	XA2	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + Q(MK) (Q ≤ 10 %) ^b CEM II/A-V PM ou ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/A-S ES + (V ou S ou D ou Q (MK))
	XA3	CEM I SR + S (S du liant total > 60 % avec prise en compte du Leq pour 50 % max) ou CEM II/A-S ES + S (S du liant total > 60 % avec prise en compte du Leq pour 35 % max) CEM I SR + S + V ; (S> 18 % V> 18 %) (avec prise en compte du Leq avec une seule addition) CEM I SR + S + Q(MK) ; (S> 18 % Q > 18 %) (avec prise en compte du Leq avec une seule addition)

^a En l'absence d'étude spécifique ou de retour d'expérience, les préconisations de choix des ciments et additions pour attaques acides pourraient être retenues pour les attaques par le CO₂ agressif.
Pour les attaques par l'hydrogène sulfureux (H₂S) il est souhaitable d'utiliser des formules bénéficiant d'un retour d'expérience, ou des CAC.

^b Pouvant être porté à 20 % (dont 15 % pris en compte dans le calcul du liant équivalent) sous réserve d'un E_{at}/L_{eq} ≤ 0,4.
Des exemples d'utilisation du Tableau 2B sont donnés en Annexe B

Le FD P 18-011 autorise l'emploi d'additions avec des ciments SR, PM ou ES

FD P 18-011 – TABLEAU 2C

En l'absence de ciments PM ou ES ou SR, le FD P 18-011 autorise l'emploi d'additions avec des ciments

☞ Recours au Tableau 2C pour la nature du liant + prescriptions supplémentaires.

CONDITIONS D'APPLICATION DU TABLEAU 2C :

- Respect des critères de l'Annexe NA.F de la norme NF EN 206+A2/CN (classe de résistance minimum, teneur en liant équivalent minimum, rapport Eau eff/ Liant éq mini)
- Le béton est considéré comme **Béton d'ingénierie**
☞ Respect des exigences §NA.3.1.1.21 et NA.6.5 de la NF EN 206+A2/CN
- **Application de prescriptions supplémentaires** : cf. §6.5 du FD P 18-011
Critères sur le ciment et la combinaison Ciment + Addition en cohérence avec tableau 2A
 - Ciment : Type, certification avec fréquence de contrôles selon Marque NF Liants Hydrauliques ou équivalent, spécifications chimiques
 - Addition : Type, spécifications chimiques,
 - Ciment + addition : spécifications chimiques

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

FD P 18-011 – Section 7.3 Ouverture à l'approche performantielle

Section 7.3 du Fascicule FD P P18-011 :

Il est possible de recourir à un béton spécialement formulé pour certaines agressions chimiques ne répondant pas strictement aux exigences de formulation mais ayant fait l'objet d'une étude de qualification documentée.

- ➔ Justification de la durabilité du béton sur la base d'un test adapté au milieu considéré (Norme ou mode opératoire issu du projet national PerfDuB).
- ➔ Application des conditions générales de l'approche performantielle :

Cf. §5.3 de la NF EN 206+A2/CN + Fascicule de document FD P 18-480.

Désignation spécifique du béton + accord préalable des parties prenantes + exigence « Qualité » spécifiques en phase d'étude, de convenance et de production (cf. Fiche et présentation dédiées)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

CE QU'IL FAUT RETENIR ...



La prescription de la classe d'exposition est de la responsabilité du MOA

- Recourir à la norme NF EN 206+A2/CN (tableau 2) + fascicule de documentation FD P 18-011 (tableau 1).
- Préciser la classe XA1, XA2 ou XA3 avec précision du type d'agression
- Fournir analyse du sol ou des eaux qui seront en contact avec la partie d'ouvrage considérée.



Réponse possible en **approche prescriptive** ou bien en **approche performantielle avec des conditions particulières** (justification de la durabilité et au niveau Plan Assurance Qualité)

**Merci de votre
attention**