

GUIDE D'UTILISATION
FD P 18-011

MAI 2023





SOMMAIRE

INTRODUCTION	03
PRÉCISIONS SUR LES CLASSES D'AGRESSIVITÉ CHIMIQUE	04
LES NOUVEAUTÉS DU FASCICULE	05
LE TABLEAU 2A	06
LE TABLEAU 2B	08
LE TABLEAU 2C	11

INTRODUCTION

normalisation
française

ISSN 0335-3931

FD P 18-011
Juin 2022

Indice de classement : P 18-011

ICS : 91.100.30

**Béton — Définition et classification
des environnements chimiquement agressifs —
Recommandations pour la formulation
des bétons**

- > Une nouvelle version du fascicule FD P 18-011 a été publiée par AFNOR en Juin 2022
- > Il complète la définition des environnements chimiquement agressifs les plus courants pour les bétons non armés, armés et précontraints.
- > Il comporte un nouveau paragraphe décrivant les milieux propices aux biodétériorations.
- > Il fournit des recommandations pour la fabrication des bétons destinés à des structures soumises à ces environnements chimiquement agressifs, en particulier pour le choix des ciments ou la combinaison ciment + addition(s). Il ouvre ainsi de nouvelles perspectives grâce aux multiples choix de liants introduits.
- > Il fournit les éléments pour le choix de mesures préventives en complément de celles données dans la norme NF EN 206+A2/CN:2022.
- > **Il est appelé dans les tableaux NA F de la NF EN 206+A2/CN pour les classes XA :**
« Pour le choix du ciment et des additions, se référer à FD P 18-011. »
- > Il renvoie à la méthode de conception performantielle de la norme NF EN 206+A2/CN pour des cas particuliers de formulations de bétons spécialement étudiées pour résister à certaines agressions chimiques.

Il comporte une annexe donnant des informations sur le niveau d'agressivité d'un grand nombre de substances chimiques, denrées alimentaires et produits technico-économiques vis-à-vis du béton.

► Précisions sur les classes d'agressivité chimique

> Le FD P 18-011 reprend, en le complétant pour les gaz en milieu humide et pour les eaux pures, le tableau de la norme NF EN 206+A2/CN

Agents agressifs	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206+A2/CN:2022		
		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 (hors eau de mer)				
CO ₂ agressif (mg/l)	NF EN 13577 ^a	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 ^b jusqu'à saturation
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000 ^c
Mg ²⁺ (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	≥ 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 Eau faiblement minéralisée	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	≤ 1,0 et ≥ 0,4 ^l	< 0,4 et ≥ 0,1 ^l	< 0,1 ^l
Agressivité des sols				
SO ₄ ²⁻ (mg/kg de sol séché à 105°C + 5°C) ^f	NF EN 196-2 ^g	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000 ^{c,g}
Degré d'acidité Baumann-Gully (ml/kg)	NF EN 16502	> 200	h	h
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 (ppm _v ou ml/m ³) ^l	NF EN ISO 19739	> 0,1 et ≤ 1	> 1 et ≤ 5	> 5 et ≤ 20 ^{c k}

► Les nouveautés du fascicule

Les nouveautés sont en bleu.

- L'aptitude générale des ciments est établie pour :

- > Les ciments couverts par la NF EN 197-1,
- > Les ciments d'aluminates de calcium (CAC) couverts par la NF EN 14647,
- > Les ciments sursulfatés (SSC) couverts par la NF EN 15743 + A1,
- > **Certains ciments couverts par la NF EN 197-5 dans le cadre de l'application du Tableau 2A.**

- Les ciments suivants conformes à la NF EN 197-5 peuvent être utilisés sur la base du Tableau 2A :

- > **CEM II/C-M (avec uniquement : S D P Q V dans le cas des milieux acides et eaux pures) ;**
- > **CEM VI (S-P) et (S-V).**

- L'aptitude particulière des ciments destinés aux environnements spécifiques est établie :

- > Pour les ciments titulaires d'une caractéristique complémentaire « ES » pour les eaux sulfatées ou les sels marins en classe d'exposition XA ou XD
- > Pour les ciments titulaires d'une caractéristique complémentaire « PM » pour les eaux de mer ou les sels marins en classe d'exposition XS et XD
- > Pour les ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1, avec dans le cas particulier des milieux contenant des sulfates (solutions ou sols) les exigences complémentaires suivantes :
- > Pour les CEM I SR 5 : teneur en $SO_3 \leq 2,5 \%$;
- > Pour les ciments CEM I : teneurs en C3A et C4AF du clinker telles que : $(C_4AF) + 2 (C_3A) \leq 20 \%$

VERSION 2016

VERSION 2022

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

Dans le cas d'utilisation de ce tableau, le béton correspondant doit être considéré comme un béton d'ingénierie au sens de la norme NF EN 206/CN et répondre aux exigences associées des articles NA.3.1.1.21 et NA.6.5 de cette même norme.

Le Tableau 2A

Clarification du tableau. Réintégration des CAC et SCC directement dans le tableau et ajouts de certains ciments de la NF EN 197-5 pour les milieux acides et eaux pures.

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 P15-317 (PM) ciments conformes à la norme NF P15-319 (ES) SSC CAC
	XA2 (1 500 < x < 3 000 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 P15-319 (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 P15-319 (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 P15-317 (PM) ciments conformes à la norme NF P15-319 (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 P15-319 (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/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 15-319 (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 sulfureux (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 (caractéristiques 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. Celle composition permet d'établir une équivalence avec un type de ciment ;
- Identifier dans les normes de 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.

► Le Tableau 2B

Le FD P 18-011 autorise l'emploi d'additions avec des ciments SR, PM ou ES. Le respect des exigences de compositions stipulé dans le tableau est suffisant pour garantir l'adéquation de la nature du liant à l'agressivité du milieu considéré.

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

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)	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 ≤ 3 000 mg/l)	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + ≤ 10% Q (MK) ^a CEM II/A-V ES + (S ou V) CEM II/A-P ES + V CEM II/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))

Milieu	Classe	Dispositions concernant le ciment ^b
Milieux acides et eaux pures ^a	XA2	CEM I SR ou PM + (V ou S ou D) CEM I SR ou PM + Q(MK) ($Q \leq 10\%$) ^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
	XA3	CEM I SR + (V ou S ou D) CEM I SR + Q(MK) ($Q \leq 10\%$) ^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 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 $E_{eff}/L_{eq} \leq 0,4$.
Des exemples d'utilisation du Tableau 2B sont donnés en Annexe B.

En Annexe B, quelques exemples sont explicités tels que celui-ci :

Note : Il est toujours possible d'utiliser des additions non prises en compte dans le calcul du liant équivalent en complément des ciments ou des combinaisons autorisés par le Tableau 2B, pour améliorer d'autres caractéristiques du béton.

Exemple 1 : le milieu contenant des sulfates (solution / concentration comprise entre 1 500 et 3 000 mg/l) à l'exclusion de l'eau de mer en XA2 est à considérer.

Le producteur de béton choisit de s'appuyer sur les prescriptions du tableau 2B en utilisant une **combinaison de CEM I 52,5 N SR (NF EN 197-1) avec du laitier granulé de haut-fourneau moulu de classe A (NF EN 15167-1)**.

Il faut d'abord qu'il vérifie les exigences du tableau NA.F.1 de la NF EN 206+A2/CN qui sont les suivantes pour le cas examiné :

- Teneur mini en liant équivalent : 350 kg/m³ (D_{max} 20 mm)
- Rapport Eeff / Liant eq. ≤ 0,5
- Classe de résistance minimale : C35/45
- A/(A+C) ≤ 0,3 dans le liant équivalent.

En raison de la classe mécanique minimale à respecter, il utilise des granulats présentant des caractéristiques indicées A ou B. Il choisit de partir avec un D_{max} de 20 mm.

Pour le marché visé, le respect de la classe mécanique minimale liée au milieu considéré est suffisant. En tant que formulateur, il a vérifié que la teneur minimale en liant équivalent était suffisante pour obtenir un béton C35/45.

La teneur en liant équivalent du béton est donc :

$$C + k \times A = 350 \text{ soit } C + 0,9 \times A = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 0,3 \times A + 0,3 \times C$$

$$A = (0,3/0,7) \times C$$

$$C + 0,9 \times (0,3/0,7) \times C = 350 \text{ kg/m}^3.$$

La résolution de ce système de deux équations à deux inconnues l'amène aux teneurs en ciment et laitier suivantes :

- Teneur en CEM I 52,5 N SR : 253 kg/m³
- Teneur en laitier moulu de haut-fourneau : 109 kg/m³

Exemple supplémentaire non décrit dans le FD P18-011 : Milieux acides et eaux pures en XA3, cas d'un béton d'ingénierie.

Le producteur de béton choisit de s'appuyer sur les prescriptions du tableau 2B en utilisant une **combinaison de CEM I 52,5 N SR (NF EN 197-1) avec du laitier granulé de haut-fourneau moulu de classe A (NF EN 15167-1)**.

Le respect de l'exigence du tableau 2B conduit à ajouter du laitier de telle manière que la proportion de ce dernier dans la combinaison ciment + addition soit supérieure à 60%.

Dans cet exemple, le béton fourni est un béton d'ingénierie et doit répondre aux exigences associées des articles NA.3.1.1.21 et NA.6.5 de la norme NF EN 206+A2/CN:2022.

Les exigences prescriptives sont indiquées dans le tableau NA.F.3 de la NF EN 206+A2/CN. Ces dernières autorisent une prise en compte du laitier dans le liant équivalent à hauteur de 50%.

Il faut d'abord que le producteur de béton vérifie les exigences du tableau NA.F.3 de la NF EN 206+A2/CN qui sont les suivantes pour le cas examiné

- Teneur mini en liant équivalent : 360 kg/m³ (D_{max} 20 mm)
- Rapport Eeff / Liant éq. $\leq 0,45$
- Classe de résistance minimale : C40/50
- $A/(A+C) \leq 0,50$

Le respect de ces exigences conduit aux teneurs en ciment et laitier suivantes :

- Teneur en CEM I 52,5 N SR : 190 kg/m³
- Teneur en laitier granulé de haut-fourneau moulu : 190 kg/m³

La teneur minimale en CEM I est ainsi déterminée. Il s'agit maintenant de respecter l'exigence du tableau 2B concernant la teneur minimale en laitier du liant qui doit être supérieure à 60%.

La quantité totale de laitier devra donc être supérieure à $(190 \times 60) / 40$, soit 285 kg/m³.

Le liant devra être composé au minimum de

- CEM I 52,5 N SR : 190 kg/m³
- Laitier granulé de haut-fourneau moulu : 285 kg/m³

Note : Conformément à la section NA.5.2.3.1 Généralités de la norme NF EN 206+A2/CN, les granulats utilisés doivent présenter une absorption d'eau déclarée (WA24 pour les gravillons et Ab pour les sables) indiquée A ($\leq 2,5$ %) et leurs autres caractéristiques doivent être au minimum indicées B".

► Le Tableau 2C

Dans le cas où les ciments autorisés par le tableau 2A ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser un mélange ciment + addition, dans deux cas :

> **Premier cas : utilisation sur la base d'exigence de composition**

Par cohérence avec les ciments autorisés dans le Tableau 2A, certaines combinaisons ciment + addition sont possibles. Par exemple, de même qu'un CEM II/B-S est autorisé pour une classe XA2 acide, on pourra utiliser :

- **Un CEM I + laitier :**

CEM I conforme aux exigences de la norme NF EN 197-1 + laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme aux exigences de la norme NF EN 15167-1.

Le pourcentage de laitier granulé de haut-fourneau moulu doit être compris entre 21 à 35% (en tenant compte des tolérances de dosage en fabrication). Le laitier granulé de haut-fourneau ne doit pas contenir plus de 0,10% de chlorure.

- **Un CEM II/A-S + laitier**

CEM II/A-S conforme aux exigences de la norme NF EN 197-1 + laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme aux exigences de la norme NF EN 15167-1.

Le pourcentage total de laitier granulé de haut-fourneau moulu (laitier contenu dans le ciment + laitier d'apport) doit être compris entre 21 et 35% (en tenant compte des tolérances de dosage en fabrication). Le laitier granulé de haut-fourneau ne doit pas contenir plus de 0,10% de chlorure.

> **Deuxième cas : utilisation sur la base d'exigences de composition chimique d'un mélange de ciments ou de la combinaison [ciment+addition]**

Dans le cas général des attaques chimiques pour lesquelles le Tableau 2A du FD P18-011 autorise l'emploi de ciment de type PM, ES ou SR, les additions peuvent être prises en compte pour justifier que la combinaison [ciment + addition] confère au béton une résistance aux agressions chimiques équivalente.

Le mélange est conforme aux prescriptions citées dans le tableau 2C (types de combinaisons ciment + addition(s) autorisées en fonction du milieu agressif) et aux exigences générales (paragraphe 6.5.1) et de composition chimique (paragraphe 6.5.2.2).

Il est aussi rappelé que le liant équivalent tel que décrit dans les dispositions de NA 5.2.5.2 et des Tableaux NA.F de la norme NF EN 206/CN:2022 s'applique pour toutes les combinaisons spécifiées dans le Tableau 2C.

Note : Il est toujours possible d'utiliser des additions non prises en compte dans le calcul du liant équivalent en complément des ciments ou des combinaisons autorisés par le Tableau 2C, pour améliorer d'autres caractéristiques du béton.

Le tableau 2C comporte de très nombreuses combinaisons possibles ; seuls quelques extraits illustratifs sont reportés ici, avec la revue en détail d'une des exigences.

Tableau 2A

Milieu contenant des sulfates (solutions) à l'exclusion de l'eau de mer

XA2
(1 500 < x < 3 000 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 P15-319 (ES)
SSC
CAC

Tableau 2C

XA2
(1 500 < x ≤ 3 000mg/l)

CEM + V (11% mini)
CEM II/A-V + V (mini V = 11%V du CEM II)

Exigence 1

CEM I + S (S du liant total > 60%)^a
CEM II/A-S + S (S du liant total > 60%)^a

Sans objet

CEM I + S (35% max de S)
CEM I + V (20% max de V)
CEM II/A-S + V (S+V < 20%)
CEM II/A-V + S (S+V < 20%)
CEM II/A-V + V (20% max de V total)
CEM II/A-S + S (35% max de S)

Exigence 4

CEM I + S + V (S > 18% V > 18%)

Exigence 5

Exigence 4

- Les valeurs limites rapportées à la combinaison (ciment + addition) sont les suivantes, tolérances comprises : Fréquence de contrôle 1/mois.

- $(SO_3) \leq 2,5\%$

- Pour S (laitier de haut fourneau), V (cendres volantes siliceuses), D (fumées de silice) : transmission autocontrôle fabricant.
- Pour Q (Mk Métakaolin) : Engagement fournisseur plus contrôle 1/an mini augmentant si valeur supérieure à 0,5%.

- Perte au feu $\leq 3\%$

- Pour S (laitier de haut fourneau), V (cendres volantes siliceuses), D (fumées de silice) : transmission autocontrôle fabricant.
- Pour Q (Mk Métakaolin) : Engagement fournisseur plus contrôle 1/an mini augmentant si valeur supérieure à 1,5%.

- Les valeurs limites du clinker sont les suivantes, tolérances comprises : Fréquence de contrôle 1/mois

- Résidu insoluble $\leq 0,75\%$

- $(MgO) \leq 4,0\%$

- $(C_3A) \leq 5,0\%$

- $(C_4AF) + 2 (C_3A) \leq 20\%$

Points d'attention

- Le béton doit répondre aux exigences associées des articles NA.3.1.1.21 et NA.6.5 de la norme NF EN 206/CN:2022 et être considéré comme un béton d'ingénierie au sens de cette même norme.
- En complément des prescriptions liées au béton d'ingénierie (pour un ouvrage ou un ensemble d'ouvrages pour un projet donné, fabrication soumise à un contrôle de conformité spécifique défini dans le plan qualité de l'ouvrage et accepté par toutes les parties concernées, essais initiaux selon NA.A.6 de la norme NF EN 206/CN:2022), les ciments doivent bénéficier de la marque NF Liants hydrauliques ou d'une certification dont les fréquences de contrôle sont au moins équivalentes.

- Les vérifications de conformité de composition chimique sont effectuées à partir des résultats d'autocontrôle des fournisseurs de ciment et d'addition. Les fréquences d'autocontrôle de chacun des constituants doivent être équivalentes/homogènes et doivent intégrer la variabilité de composition chimique sur une période d'au moins six mois ou avec un engagement du fournisseur. Le calcul de la composition résultante et de ses variations possibles doit être documenté dans un rapport d'étude préliminaire.
- Le contrôle documentaire des caractéristiques chimiques de la combinaison [Ciment+ addition] doit être complété par un suivi régulier des caractéristiques des constituants sur la durée de production aux fréquences définies par l'exigence 4.
- La partie contractuelle doit comporter :
 - le contrôle documentaire initial comprenant l'ensemble des éléments mentionnés ci-dessus et les informations sur les méthodes d'essais utilisées ; il doit être accepté par l'ensemble des parties concernées (utilisateur, prescripteur, producteur,...)
 - la mise en place d'un suivi mensuel de l'évolution des caractéristiques des constituants permettant de vérifier les exigences mentionnées, ceci pour toute la durée de production
 - la mise à disposition d'un nouveau contrôle documentaire en cas de changement d'origine d'un des constituants lors de la durée de production.

► Les exemples

En Annexe B, quelques exemples sont aussi explicités et nous en détaillons deux :

Pour rester sur l'exemple du milieu contenant des sulfates (solution / concentration comprise entre 1 500 et 3 000 mg/l) à l'exclusion de l'eau de mer en XA2 déjà considéré avec le tableau 2B, nous illustrons maintenant le cas d'un producteur de béton qui ne dispose d'aucun ciment PM, ES ou SR. Il doit alors s'appuyer sur les prescriptions du tableau 2C (paragraphes 6.5 et 6.5.2 du FD P18-011) ; ces nouvelles dispositions lui ouvrent la possibilité de proposer un béton répondant aux exigences de cette classe d'exposition. Les dispositions permettent d'assurer un niveau de garantie équivalent à celui de l'utilisation d'un ciment préconisé dans le tableau 2A.

Exemple 1 (Alternative) : Combinaison CEM II/A-S 52,5 N (contenant 15% de laitier de haut-fourneau) avec du laitier granulé de haut-fourneau moulu. Milieu contenant des sulfates (solution / concentration comprise entre 1 500 et 3 000 mg/l) à l'exclusion de l'eau de mer en XA2.

Il faut d'abord vérifier les exigences du tableau NA.F.1 de la NF EN 206/CN qui sont les suivantes pour le cas considéré :

- Teneur mini en liant équivalent : 350 kg/m^3 ($D_{\max} 20 \text{ mm}$)
- Rapport $E_{\text{eff}} / \text{Liant éq.} \leq 0,5$
- Classe de résistance minimale : C35/45
- $A/(A+C) \leq 0,2$ dans le liant équivalent.

Après avoir vérifié que la teneur minimale en liant équivalent était suffisante pour atteindre la classe mécanique, cela conduit aux teneurs de ciment et addition suivantes :

- Teneur en CEM II/A-S 52,5 N : 286 kg/m^3 dont 43 kg de laitier (15%)
- Teneur en laitier granulé de haut-fourneau moulu d'apport : 72 kg/m^3
- Le pourcentage total de laitier granulé de haut-fourneau (laitier contenu dans le ciment + laitier d'apport) est de : $(72+43) / (286+72) = 32\%$.

La disposition du tableau 2C (35% maximum de laitier de haut-fourneau dans le liant) est bien respectée.

Il faut maintenant vérifier les exigences chimiques complémentaires (Exigence 4 du § 6.5.2.2).

- Ciment avec fréquences de contrôle idem marque NF > ok car le ciment dispose bien de la marque F-LH, c'est un CEM II/A-S 52,5 N CE NF.

- Les valeurs limites rapportées à la combinaison [ciment+addition] sont les suivantes, tolérances comprises :

Fréquence de contrôle 1/mois

- $(SO_3) \leq 2,5\%$; avec transmission autocontrôle fabricant > transmission par le producteur de ciment et le producteur de laitier des valeurs d'autocontrôles des 6 derniers mois (au moins). Vérification que la somme des valeurs maximum de SO_3 du ciment et du laitier respecte l'exigence : $0,8(SO_3)_{\text{ciment}} + 0,2(SO_3)_{\text{laitier}} \leq 2,5\%$

- Perte au feu $\leq 3,0\%$ avec transmission autocontrôle fabricant > transmission par le producteur de ciment et le producteur de laitier des valeurs d'autocontrôles des 6 derniers mois (au moins). Vérification que la somme des valeurs maximum de perte au feu du ciment et du laitier respecte l'exigence $0,8(PF)_{\text{ciment}} + 0,2(PF)_{\text{laitier}} \leq 3,0\%$

- Les valeurs limites du clinker sont les suivantes, tolérances comprises : Fréquence de contrôle 1/mois (engagement du producteur de ciment)

- Résidu insoluble $\leq 0,75\%$

- $(MgO) \leq 4,0\%$;

- $(C_3A) \leq 5,0\%$;

- $(C_4AF) + 2(C_3A) \leq 20\%$

Autre exemple :

Milieu acide et eaux pures en XA1 : **Combinaison CEM I 52,5 N avec du Métakaolin conforme à la norme NF P18-513.**

2 cas sont proposés pour cet exemple :

Milieux acides et eaux pures ^b	XA1	<ul style="list-style-type: none"> - CEM I + S ; S > 21% - CEM II/A-S. +S ; S du liant total > 21% - CEM I + V ; V de 21 à 35% - CEM II/A-V + V ; total de 21 à 35% - CEM I + Q (MK) ; Q de 21 à 35%^a - CEM II/A-Q + Q (MK) ; Q total de 21 à 35%^a - CEM II/A-S + V ; (21-x)% à (35-x)% de V, x étant la quantité de S dans le CEM II/A-S - CEM II/A-S + Q (MK) ; (21-x)% à (35-x)% de Q, x étant la quantité de S dans le CEM II/A-S - CEM II/A-S + 10% D - CEM II/A-V + S ; (21-x)% à (35-x)% de S, x étant la quantité de V dans le CEM II/A-S - CEM II/A-P + Q(MK) (P+Q > 11%) - CEM II/A-P + V (P+V > 11%) - CEM II/A-P + D (P+D > 11% et D < 10%) - CEM II/A-V + Q(MK) (V+Q > 11%) - CEM II/A-D + Q(MK) (D+Q > 11%) - CEM II/A-D + V (D+V > 11%) - CEM II/A-V + D (V+D > 11% et D < 10%) 	Sans objet
		<ul style="list-style-type: none"> - CEM I + V (11% mini) - CEM II/A-V + V (mini V = 11-%V du CEM II) 	Exigence 1
		<ul style="list-style-type: none"> - CEM I + S (35% max de S) - CEM I + V (20% max de V) - CEM I + Q(MK) (6 à 20%) et $E_{\text{eff}}/\text{Liant} \text{ éq. } \leq 0,4$ - CEM I + D (6 à 10%) - CEM II/A-S + V (S du CEM II + V < 20%) - CEM II/A-S + Q(MK) (Q < 10%) et $E_{\text{eff}}/\text{Liant} \text{ éq. } \leq 0,4$ - CEM II/A-S + S (35% max de S) 	Exigence 2

Pour les deux cas, les prescriptions générales du 6.5.1 du FDP 18-011 s'appliquent puis les prescriptions complémentaires suivantes :

Cas 1 (non traité dans le FD P18-011) :

Exigences du Tableau NA.F.1 de la NF EN 206+A2/CN

Teneur mini en liant équivalent : 330 kg/m³

$A/(A+C) \leq 0,15$

Teneur en CEM I 52,5 N : 281 kg /m³

Teneur en métakaolin : 50 kg/m³

Exigence du Tableau 2C du présent fascicule

CEM I + Q (21 à 35%) > la quantité de métakaolin prise en compte dans le calcul du liant équivalent est insuffisante, il faut en rajouter au minimum 25 kg et cet apport n'est pas pris en compte dans le calcul du liant équivalent.

Au final, le béton serait composé de 281 kg/m³ de CEM I 52,5 N et de 75 kg/m³ de métakaolin.

Pas d'exigences chimiques dans ce cas particulier. Dans le second cas explicité ci-dessous, il est possible de ne pas ajouter de métakaolin non pris en compte dans le liant équivalent du fait du rapport $E_{eff}/Liant\ eq.$ du béton inférieur à 0,4, mais des exigences de composition chimique doivent être vérifiées sur la combinaison ciment + métakaolin.

Cas 2 (Exemple 2 du FD P18-011) :

Les exigences du Tableau NA.F.1 de la NF EN 206+A2/CN sont les mêmes que dans le cas 1.

Les exigences du Tableau 2C : CEM I + Q (Mk) (6 à 20%) et $E_{eff}/Liant\ eq. \leq 0,4$ sont bien respectées avec 15% Q (Mk) + formulation béton adaptée en termes de $E_{eff}/Liant\ eq.$

Il faut aussi appliquer les exigences de compositions chimiques (Exigence 2 du § 6.5.2.2)

- Les valeurs limites rapportées à la combinaison [ciment + addition] sont les suivantes, tolérances comprises :
 - $(SO_3) < 3\%$; avec transmission autocontrôle fabricant > transmission par le producteur de ciment des valeurs d'autocontrôles des 6 derniers mois (au moins) et engagement producteur métakaolin valeur inférieure à 0,5 ou moins (transmission au moins 1 essai contrôle / an).
Possibilité de réviser engagement producteur métakaolin en cas de valeur supérieure à 0,5.
Vérification que la somme des valeurs maximum de SO_3 du ciment et du métakaolin respecte l'exigence $0,85(SO_3)_{ciment} + 0,15(SO_3)_{m\acute{e}takaolin} \leq 3\%$.
 - $(MgO) < 4\%$; avec transmission autocontrôle fabricant > transmission par le producteur de ciment des valeurs d'autocontrôles des 6 derniers mois (au moins) et engagement producteur métakaolin valeur inférieure à 0,5% ou moins (transmission au moins 1 essai contrôle / an).
Possibilité de réviser engagement producteur métakaolin en cas de valeur supérieure à 0,5%.
Vérification que la somme des valeurs maximum de MgO du ciment et du métakaolin respecte l'exigence $0,85(MgO)_{ciment} + 0,15(MgO)_{m\acute{e}takaolin} \leq 4\%$
 - Soufre à l'état d'ions sulfures $S^{2-} < 0,5\%$; avec transmission autocontrôle > transmission par le producteur de ciment des valeurs d'autocontrôles des 6 derniers mois (au moins) et engagement producteur métakaolin valeur inférieure à 0,5% ou moins (transmission au moins 1 essai contrôle / an).
Possibilité de réviser engagement producteur métakaolin en cas de valeur supérieure à 0,5.
Vérification que la somme des valeurs maximum de S^{2-} du ciment et du métakaolin respecte l'exigence $0,85(S^{2-})_{ciment} + 0,15(S^{2-})_{m\acute{e}takaolin} \leq 0,5\%$
 - Les valeurs limites suivantes doivent être respectées pour le (C_3A) : Fréquence de contrôle 1/mois (C_3A) du clinker < 11,5% lorsque la teneur en addition est supérieure ou égale à 13%.

Le cas d'une **combinaison de ciment avec 2 additions** (CEM I avec du laitier et des cendres volantes) **est illustré dans l'exemple 3 du FD P18-011.**