

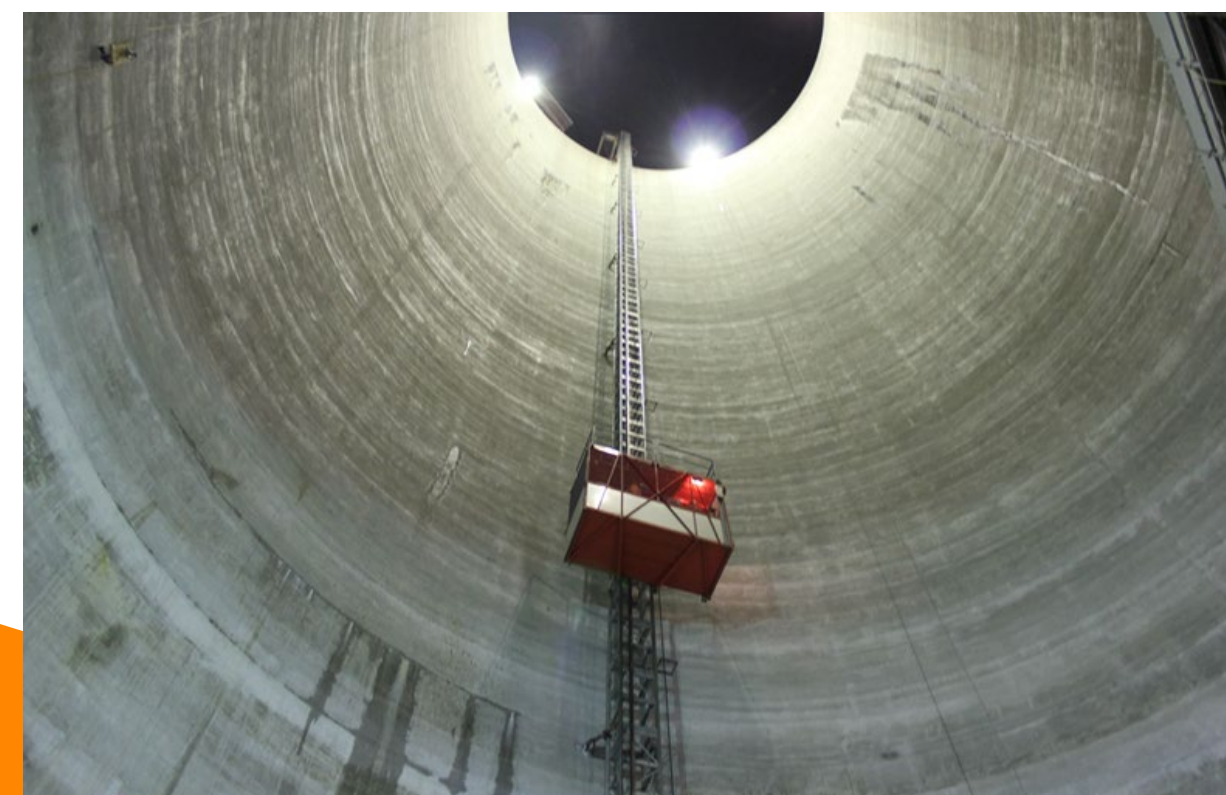
Charles-Augustin COULOMB - A geotechnical tribute

Paris, september 25 & 26, 2023



Concrete and Geotechnics

JUSTINO Christophe



SYMPOSIUM COULOMB
PARIS, SEPTEMBER 25 & 26, 2023

**Changes in deep foundation
concrete specification and
mix design**

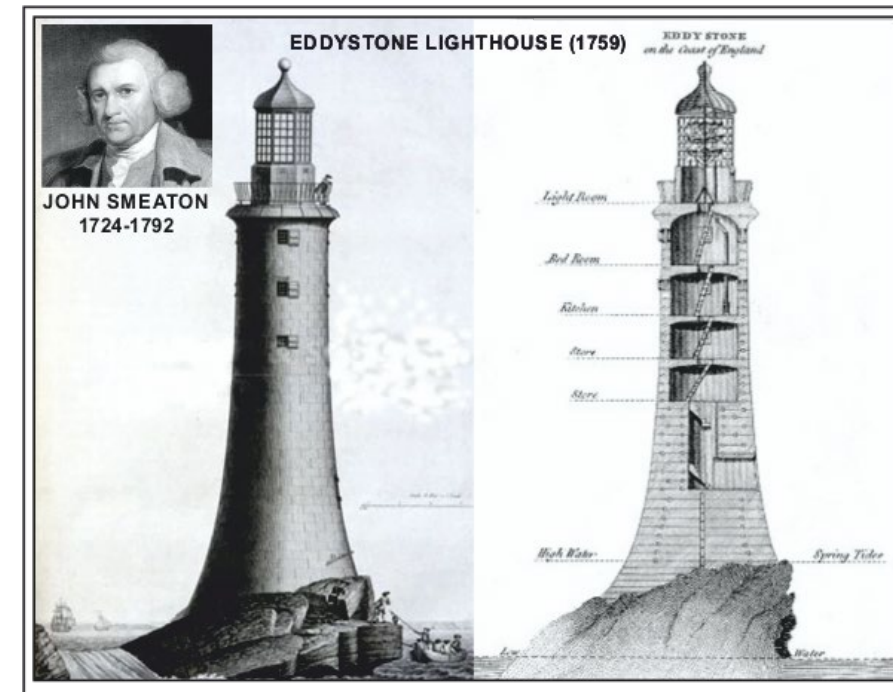
Un peu... d'Histoire

Béton romain
(pouzzolane)
Mortiers de chaux et
d'argile

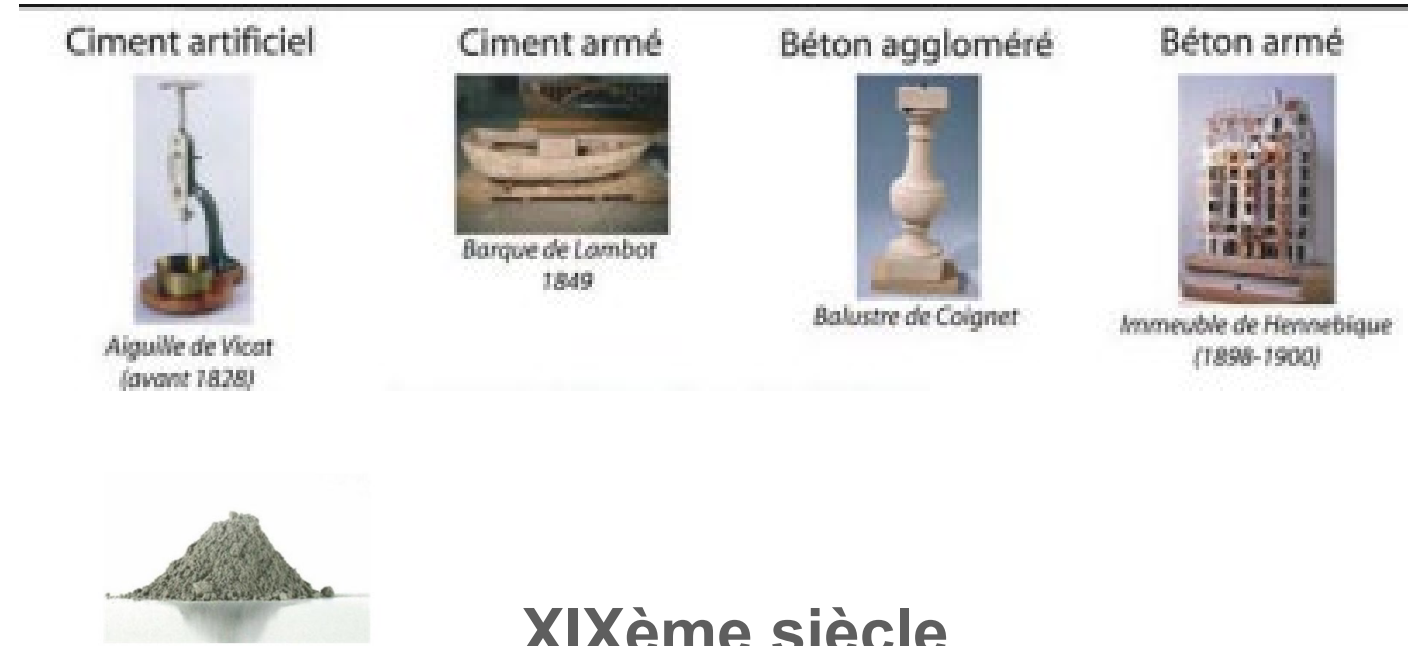


http://www.manuelcohen.com/en/reports/62-Pompeii_Italy/942

Antiquité



XVIII siècle



XIXème siècle

Béton précontraint



BFUP/BHP



XXème siècle

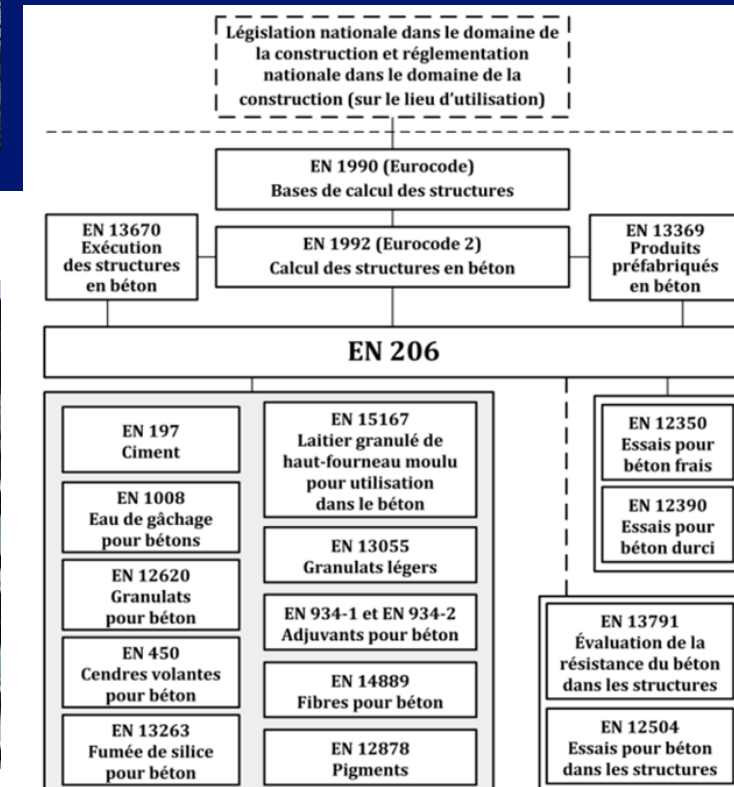
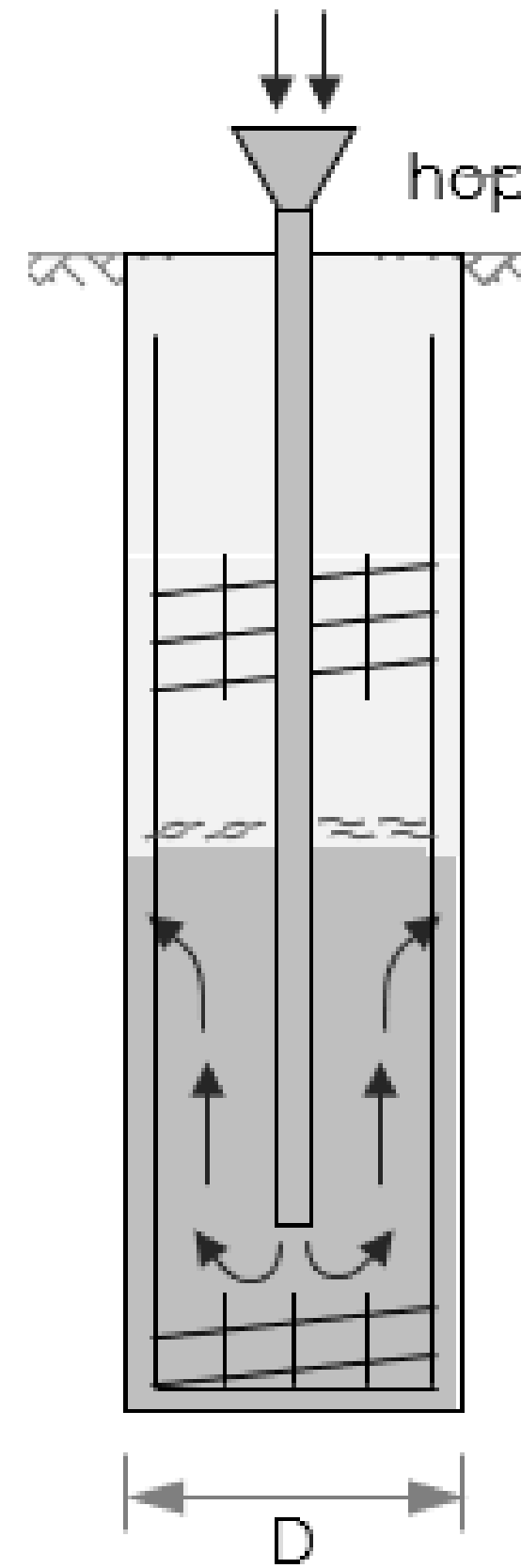
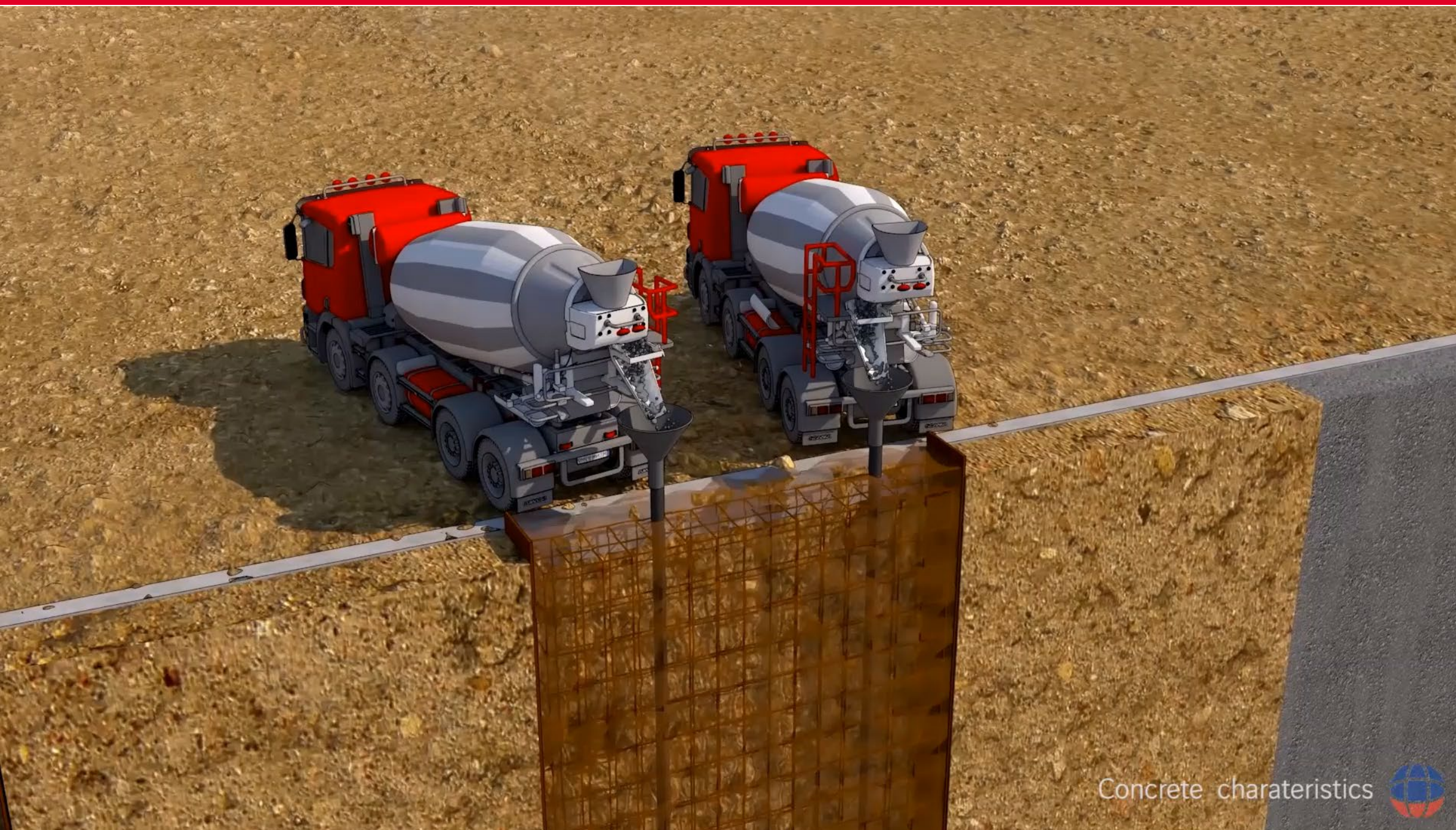


Figure 1 — Relations entre l'EN 206 et les normes de calcul et d'exécution, les normes relatives aux constituants et les normes d'essais



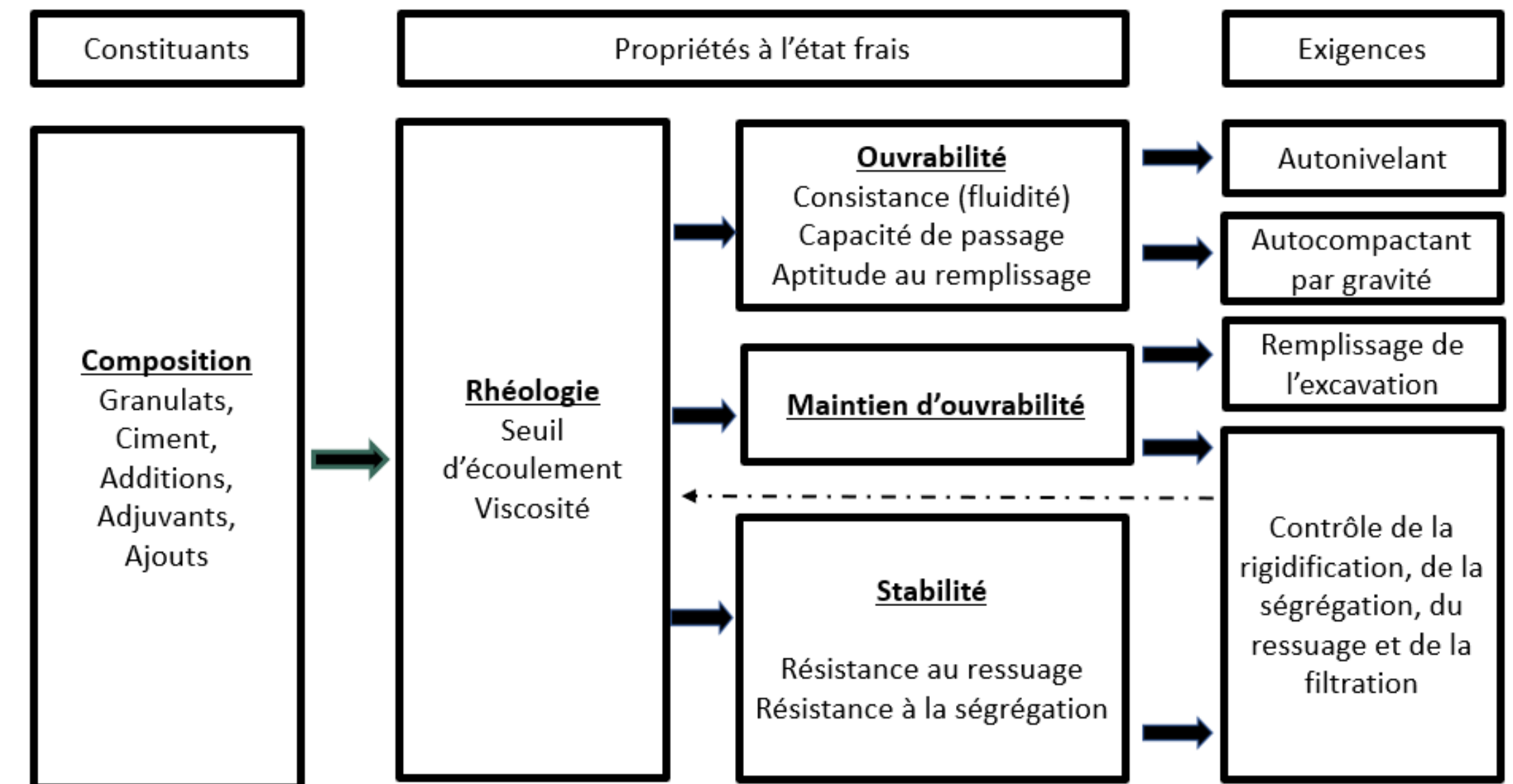
SYMPOSIUM COULOMB
PARIS, SEPTEMBER 25 & 26, 2023





Concrete characteristics

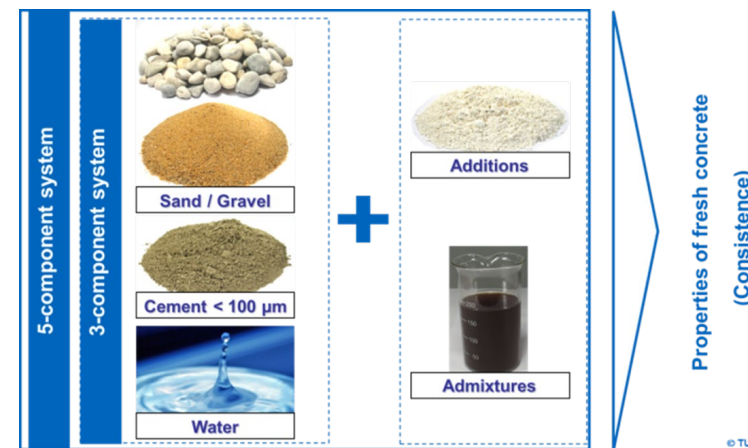
Paramètres à considérer



- Béton non vibré
- Pompable
- Grande ouvrabilité
- Maintien long d'ouvrabilité (au-delà de 3h et parfois jusqu'à 8 à 10h)

- Mise en place sous fluide sans délavement
- Autonivelant (sans être un BAP)

- Stable à l'état frais (absence de ségrégation)
- Résistance à l'essorage sous pression



Béton à 5 composants

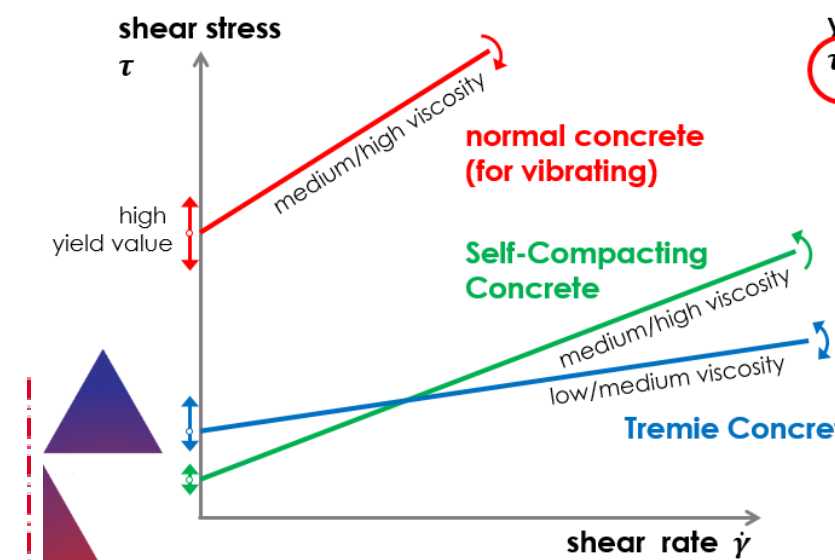
Propriétés du béton gouvernées par adjuvants et liants (réduction eau++)



Viscosité du béton

Suite au chantier des pieux du pont sur Canal Panama, systématisation de l'essai de viscosité du béton au cône inversé pour limiter impact sur temps de bétonnage

EFFC/DFI Tremie Guide



Exigences environnementales (réchauffement climatique) + normalisation du concept d'approche performantielle)

... to 2000

2010

2014

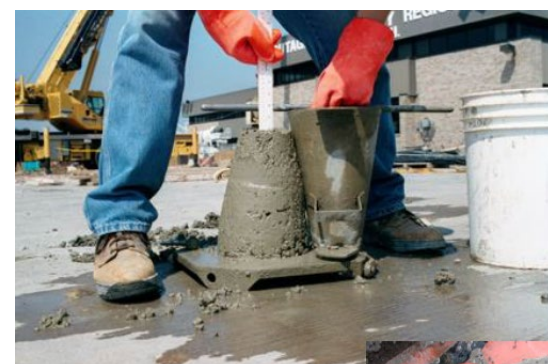
2017

2020

...2050

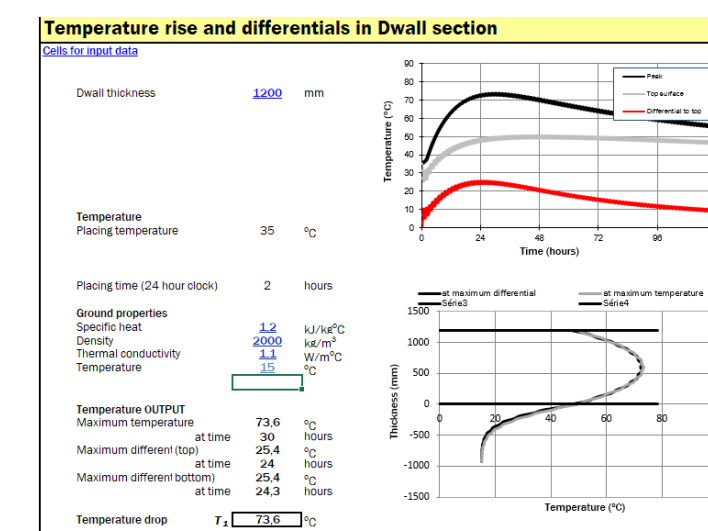
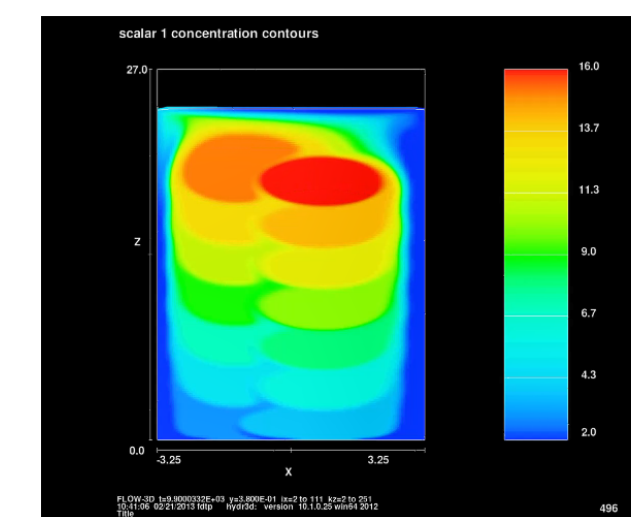
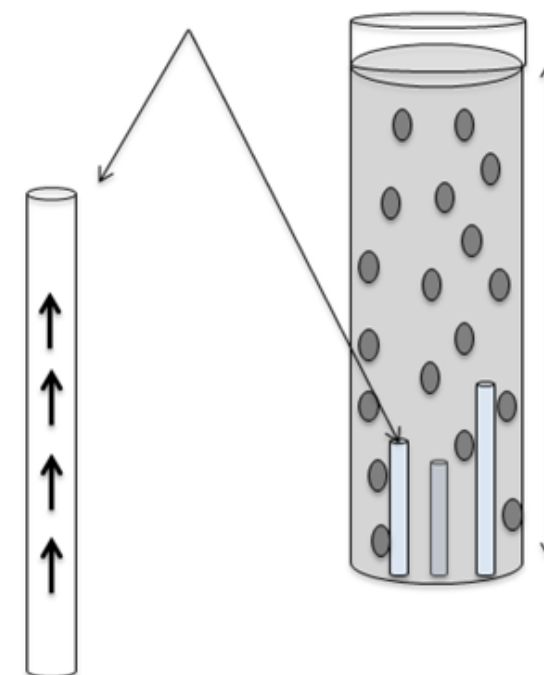
Béton à 3 composants

Propriétés du béton gouvernées par l'eau et le liant



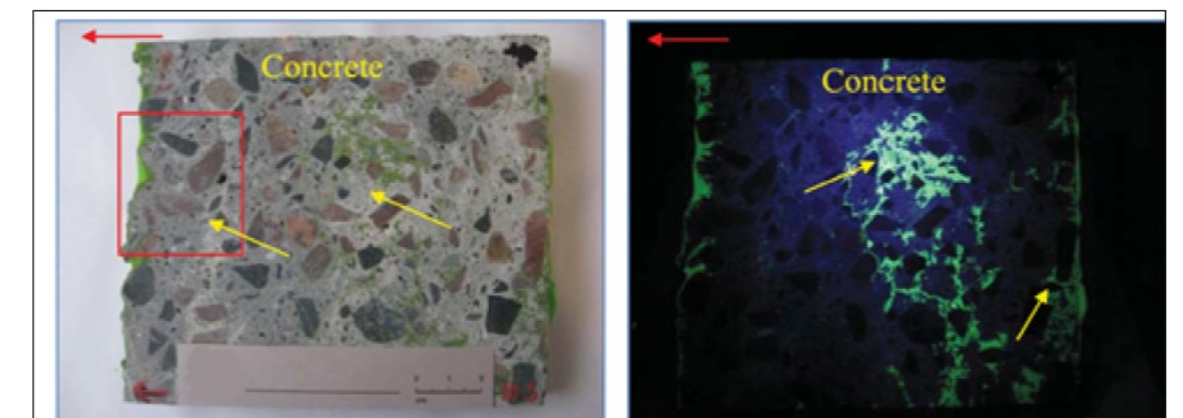
Essais de stabilité

Dans le contexte du chantier LGP, développement de nouveaux essais de stabilité du béton vis-à-vis du ressuage



Modélisation

Les exigences en terme de qualité et de durabilité poussent à explorer les sujets en lien avec la modélisation des écoulements de béton, des comportements thermo-mécaniques, et la durabilité du béton et des aciers soumis à la corrosion



Appearance of core after epoxy impregnation and cutting. Position of thin section is marked; red arrow indicate surface. Yellow arrows point to zones of higher porosity.

Surface of concrete photographed using UV light. Porous areas lights up. Yellow arrows point light grey porous zones under the surface.

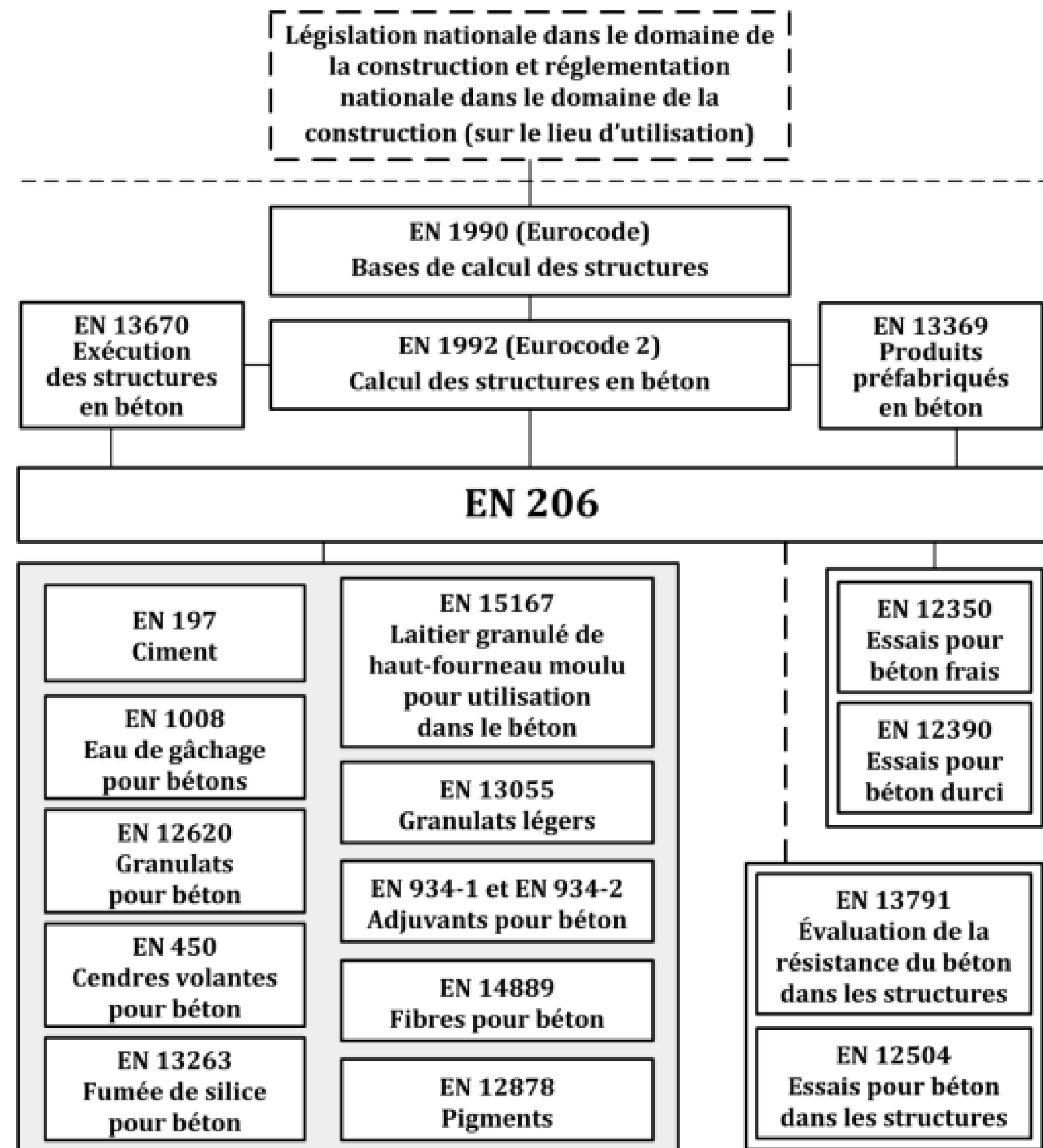


Figure 1 — Relations entre l'EN 206 et les normes de calcul et d'exécution, les normes relatives aux constituants et les normes d'essais

- Parution du complément national NF EN 206+A2 /CN oct 2022
- FD P18-480 Approche performancielle
- FD P18-011 Environnement agressifs

Béton

2.2 L'évolution du contexte normatif français

2.2.1 Parution de la Norme granulats NF P 18-545

La nouvelle version de la norme NF P 18-545 est parue en octobre 2021. Elle incorpore un certain nombre de modifications dont les principales sont :

- La prise en compte des conclusions du PN RECYBETON et des évolutions normatives proposées relatives aux granulats dont les granulats de prémélange ;
- La Fiche Technique Produit (FTP) et les éléments à renseigner ;
- Le remplacement de la granularité type par la granularité de référence ;
- L'Article 13 sur les granulats légers

La révision de la NF EN 206/CN incorpore principalement les dispositions relatives aux conclusions du PN RECYBETON.
Voir également le § 3.1 de ce document

2.2.2 L'annexe nationale de la norme Eurocode EC2

Le nouvel amendement à l'annexe nationale de l'EC2 partie 1-1 (NF EN 1992-1-1/NA) prend en compte les conclusions du projet national Recybeton concernant les règles de dimensionnement des bétons contenant des granulats recyclés. Sa parution simultanée avec celle de la NF EN 206+A2/CN a permis d'assurer une bonne coordination entre les deux documents.

Par ailleurs, un amendement pour l'utilisation des granulats recyclés dans l'annexe nationale de l'EC2 partie 1-2 (NF EN 1992-1-2/NA), calcul du comportement au feu est en cours de parution.

2.2.3 Les normes ciments françaises

2.2.3.1 NF P 15-302 : Liants Hydrauliques - Ciments à Usage Tropical- Composition, Spécifications et Critères de Conformité

Les modifications principales portent sur les points suivants :

- Filler pouzzolanique : Modification de la définition avec ajout des matériaux pouvant avoir une origine sédimentaire.
- Composition : Ajout de la possibilité d'introduire les constituants autres que le clinker seuls ou en combinaison
- Nouvelles désignations en ligne avec la NF EN 197-1 (CP2 devient CEM IV, ...)
- Changement de quelques limites de composition des constituants principaux

2.2.3.2 NF P 15-317 : Liants Hydrauliques — Ciments pour travaux à la Mer

Par rapport au document remplacé, la NF P 15-307 constitue principalement une mise à jour éditoriale. Il rend également éligibles, pour les travaux à la mer, les ciments à usage tropical couverts par la norme NF P 15-302.

NF EN 197-5 Ciment

NF P18-545 Granulats

1.1 Parution de la Norme EN 206 + A2

En 2021 est paru, au niveau européen, l'amendement A2 de la norme EN 206.

L'amendement A2 a pour objet d'apporter les modifications nécessaires pour clarifier les recommandations relatives à l'évaluation de la conformité, ainsi que la correction de l'annexe C « Dispositions pour l'évaluation, la surveillance et la certification du contrôle de la production » : précédemment normative, cette annexe devient informative. Cet amendement a été rendu nécessaire par l'évolution des règles du CEN (Comité Européen de Normalisation). Il est un préalable à une révision en profondeur de la norme prévue en 2025 environ.

1.2 Parution de la Norme EN 197 - 5

Entérinée en mai 2021, la norme européenne EN 197-5 « Ciment - Partie 5 : ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI » a été officiellement publiée en version française NF EN 197-5 en septembre 2021 par l'AFNOR.

Elle donne un cadre très précis aux exigences techniques et de mise en œuvre concernant ces deux nouveaux types de ciments jusqu'ici non répertoriés par la norme EN 197-1 de 2011. Contrairement à l'EN 197-1, cette norme n'est pas harmonisée et n'a pas été publiée au Journal Officiel de l'Union Européenne, chaque pays l'intégrant sans modification dans sa collection nationale. Les ciments couverts par la norme EN 197-5 ne peuvent donc bénéficier du marquage CE. Ils peuvent par contre bénéficier de la marque NF LH (Cette condition est d'ailleurs nécessaire pour leur emploi dans un béton conforme à la NF EN 206 CN /A2)

3.7 Annexe D Bétons pour travaux géotechniques spéciaux

Les références des normes d'essais pour vérifier la rhéologie et la stabilité du béton ont été mises à jour, en particulier pour tenir compte de la parution de nouvelles normes françaises dans l'intervalle (voir paragraphe 4.4) :

- NF EN 12350-1:2019 pour le suivi du maintien de la consistance
- XP P 18-469 pour la viscosité à l'essai d'écoulement
- XP P 18-468 et XP P 18-475 pour le contrôle de la stabilité

Vers des spécifications complémentaires pour une approche de la performance du comportement à l'état frais



Etalement/Slump flow



Table à Choc / Flow table
NF EN 12350-5



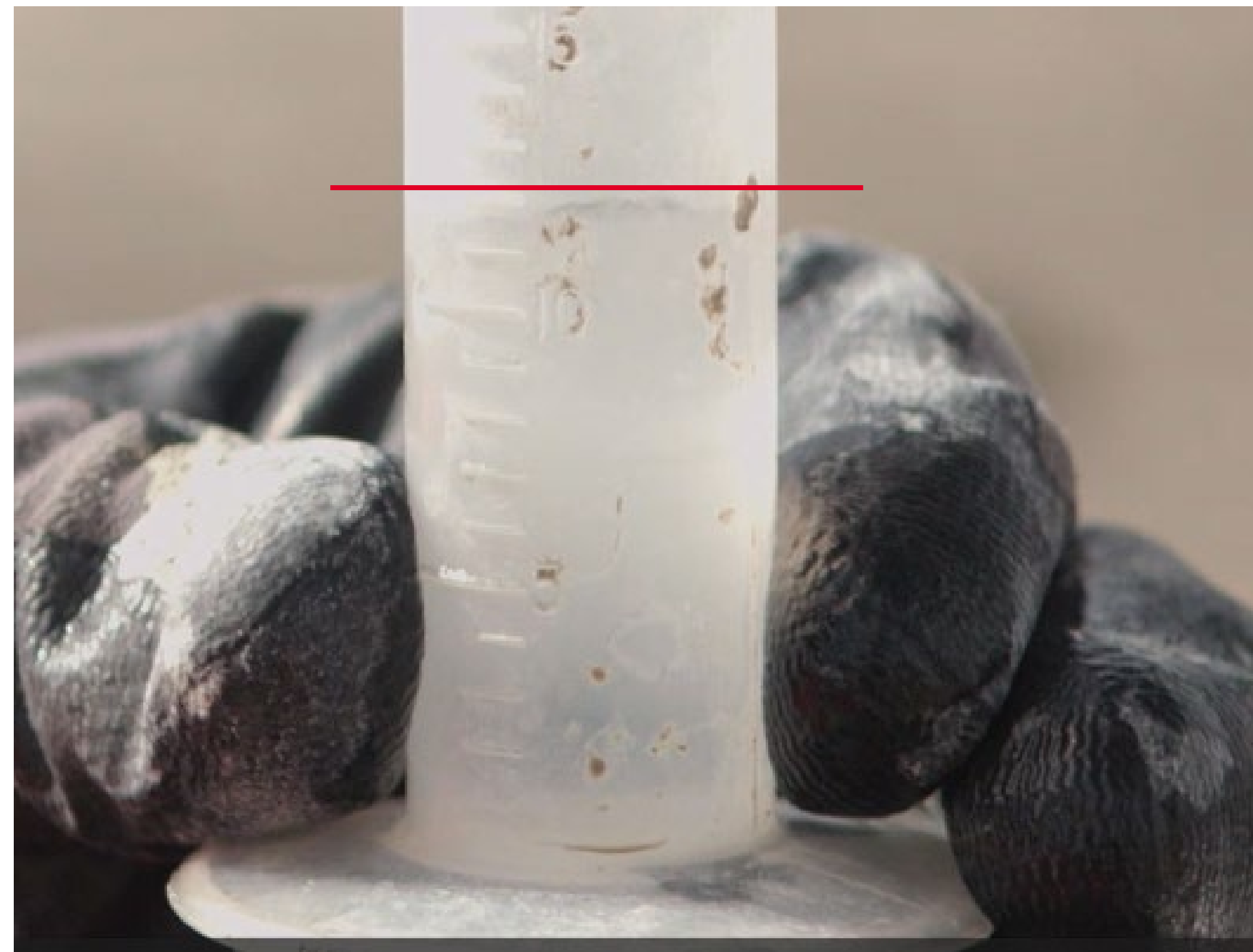
Temps d'écoulement / Flow time
NF P18-469

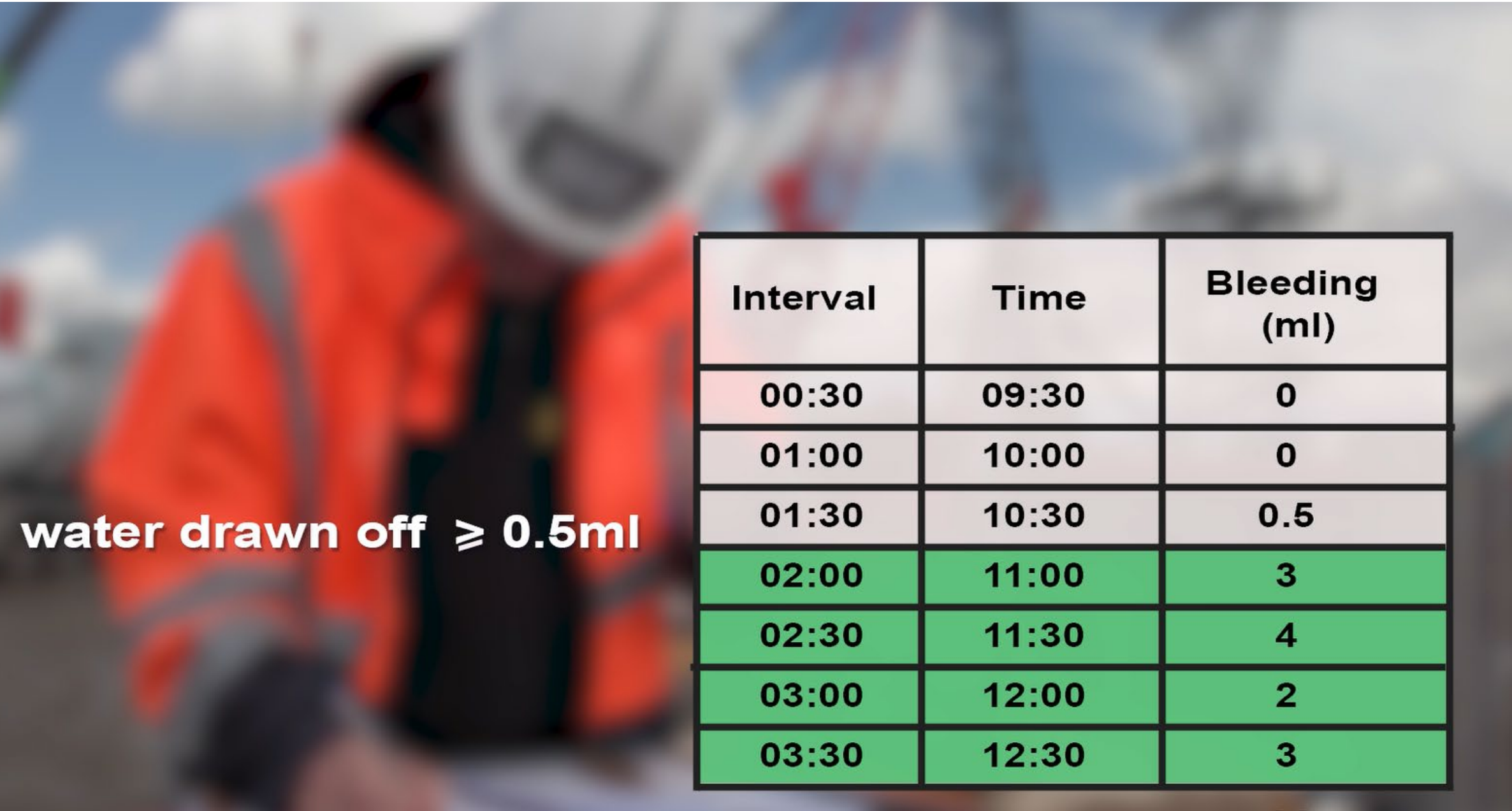


Intervalle	Heure	Ressuage (ml)
00:30	09:30	0
01:00	10:00	0
01:30	10:30	0,6
02:00	11:00	3
02:30	11:30	4
03:00	12:00	2
03:30	12:30	3

Prélèvement > 0,6ml
12 : 120 soit 0,1ml/min



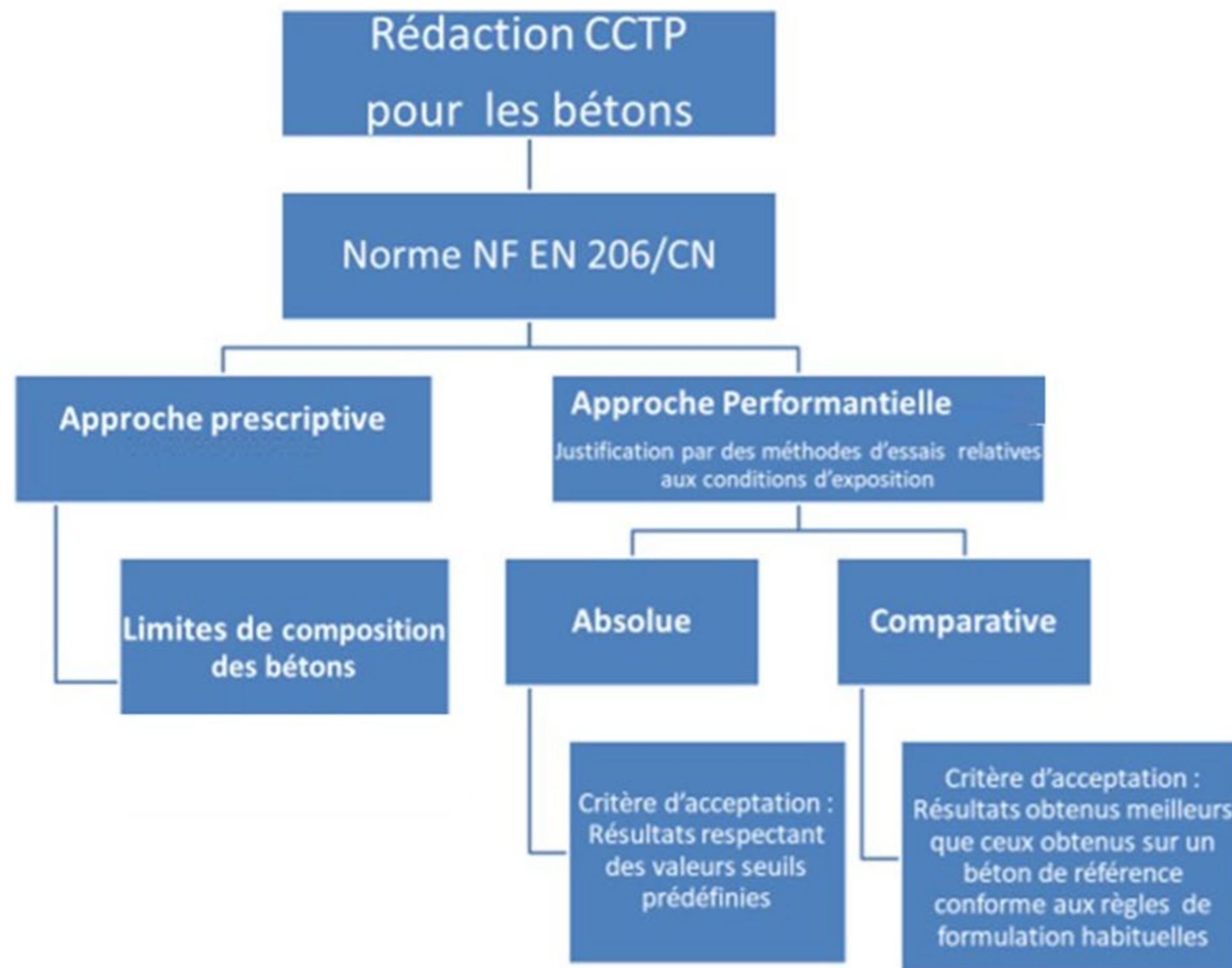




water drawn off $\geq 0.5\text{ml}$

Interval	Time	Bleeding (ml)
00:30	09:30	0
01:00	10:00	0
01:30	10:30	0.5
02:00	11:00	3
02:30	11:30	4
03:00	12:00	2
03:30	12:30	3





Approche prescriptive

Approche performantielle

- **Composition du béton, composition du liant et qualité des granulats non imposées ***
- Justification de la durabilité par **respect de valeurs limites / essai(s) performantiel(s) sur béton, indicateurs de durabilité**
- Epaisseurs d'enrobages minimales ($c_{min, dur}$) modulables avec justification d'une durabilité supérieure.

* les constituants doivent toutefois être **aptés à l'emploi selon la norme NF EN 206+A2/CN**

28 jours de carbonatation



3 mois de carbonatation



Méthodes d'essais actualisées :

- **Pour les classes XC :**

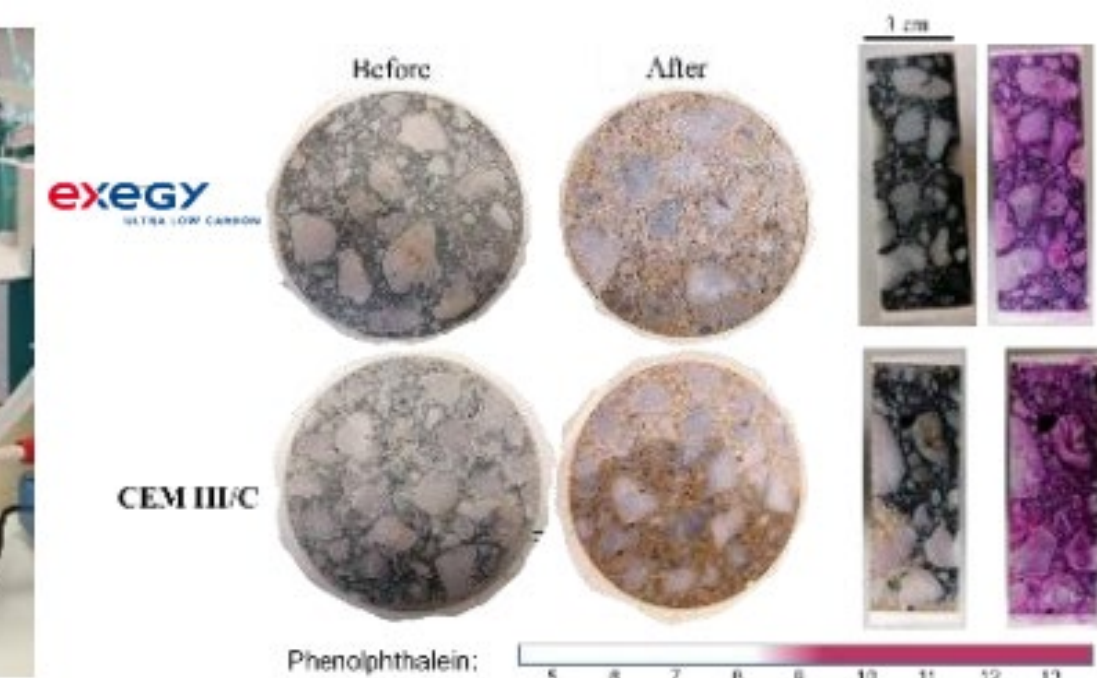
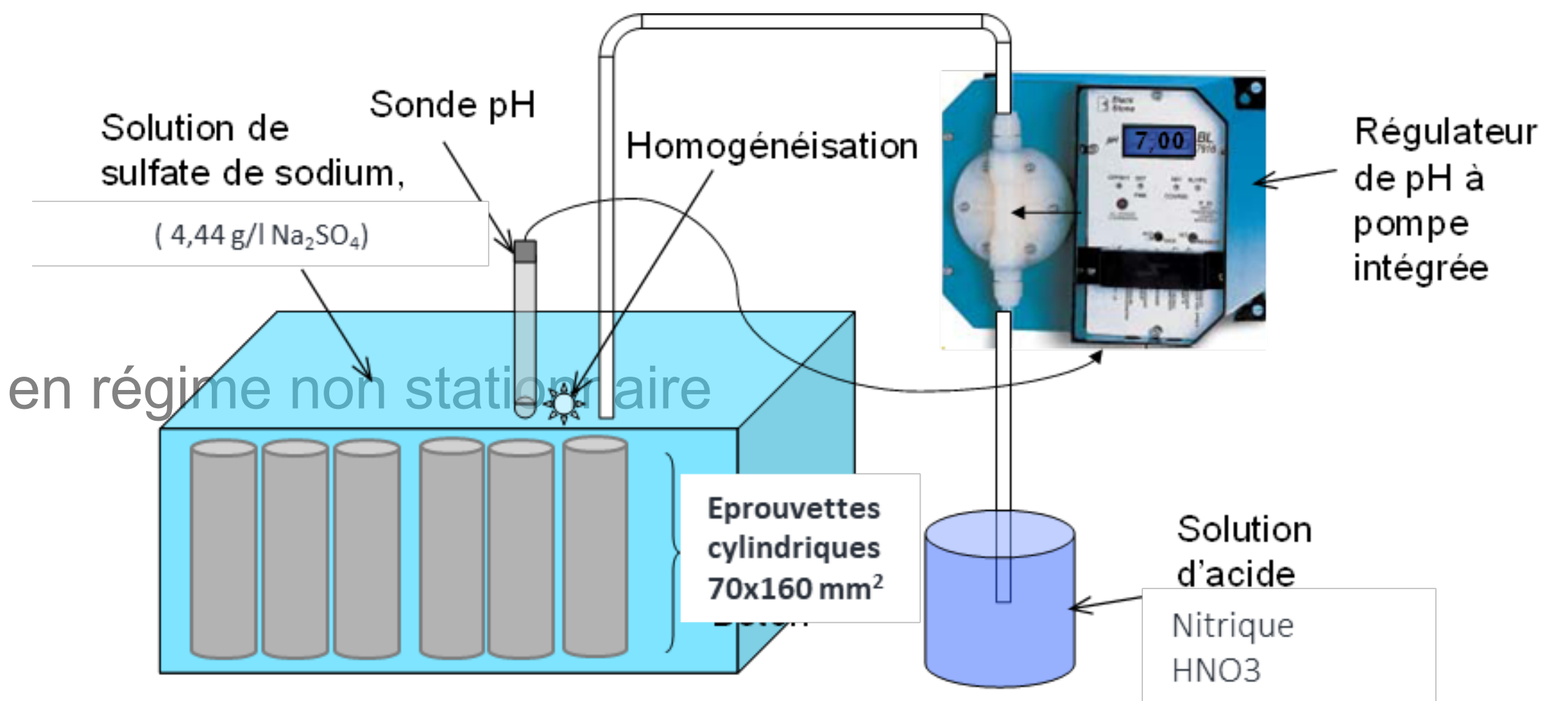
- XP P 18-458 : Essai de carbonatation accélérée
- NF P 18-459 : Essai de porosité et de masse volumique
- XP P 18-481 : Essai de résistivité électrique

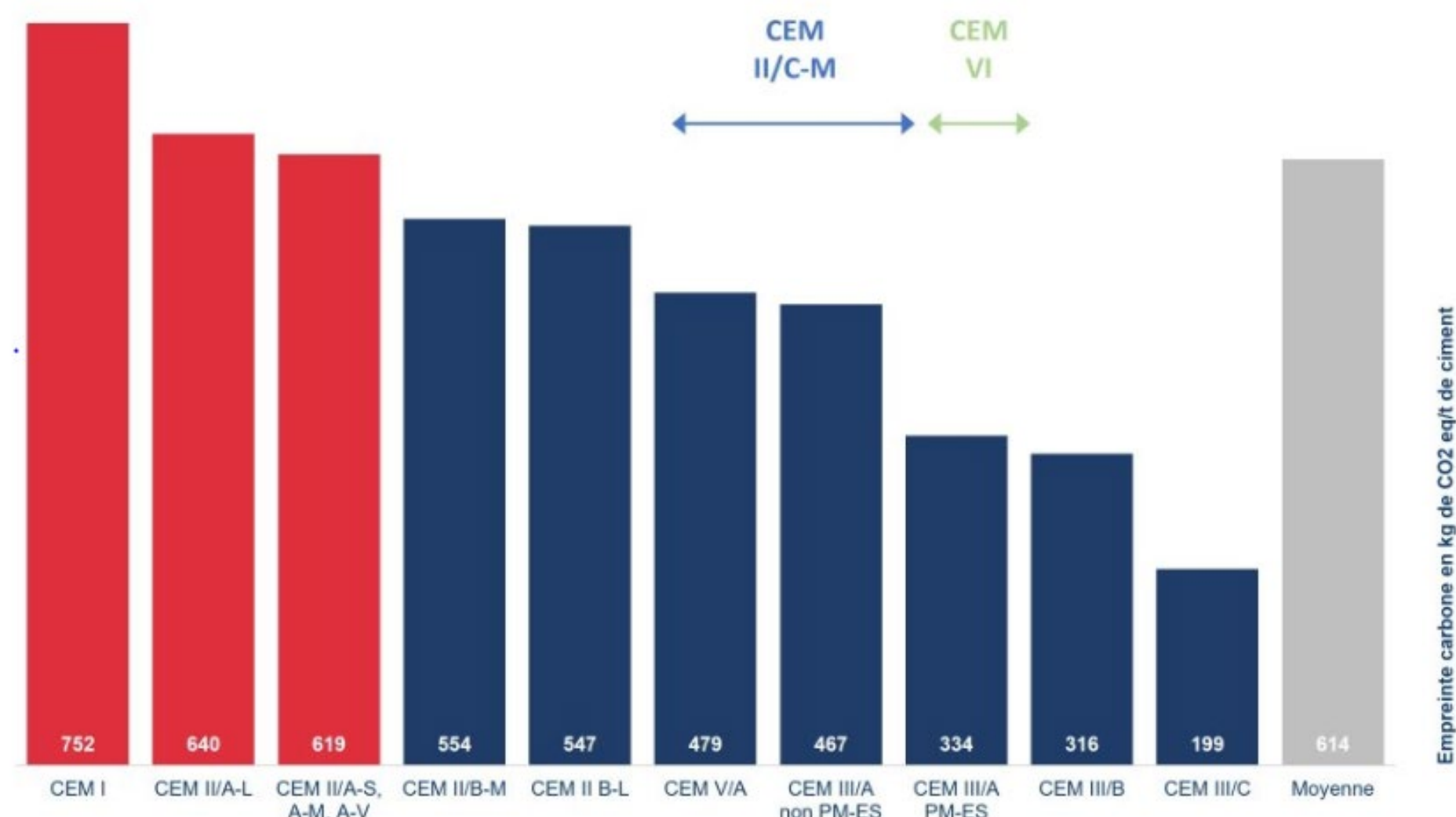
- **Pour les classes XD / XS :**

- XP P 18-462 : Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non stationnaire
- NF P 18-459 : Essai de porosité et de masse volumique
- XP P 18-481 : Essai de résistivité électrique

- **Pour les classes XA:**

- XP P 18-482 – Béton - Essai sur béton durci - Essai de lixiviation à
- XP P 18-462 : Béton - Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration stationnaire
- SIA 262-1 annexe D : Essai de résistance aux sulfates
- Mode opératoire PERFDUB : Protocole RSE par saturation





Source : moyenne SFIC pour les ciments français, en conformité avec la norme NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN.

Approche normative

Approche performantielle

- Substitution du Ciment Portland (combinaisons)
- Dérogation au W/C max et dosage ciment imposé
- Constituants traditionnels (normalisation)
- Validation d'indicateurs de durabilité
 - Carbonatation
 - Résistivité électrique
 - Porosité accessible à l'eau
 - Résistance aux sulfates (essai d'expansion)
 - Résistance aux acides (essai de lixiviation)

Innovation de rupture

- Liants alkali – activés
- Geopolymères
- Matériaux biosourcés
- Fibres autres que PP et métalliques



- Nature du liant imposé / W/C max imposé
- Restriction sur les combinaisons
- Dosage en ciment minimum imposé
- Classe de résistance minimum à 28j

European Technical
Assessment

ETA-21/0746
of 10-09-2021

General Part

Technical Assessment Body issuing the European Technical Assessment: Cerema

Trade name of the construction product

Ecocem Ultra

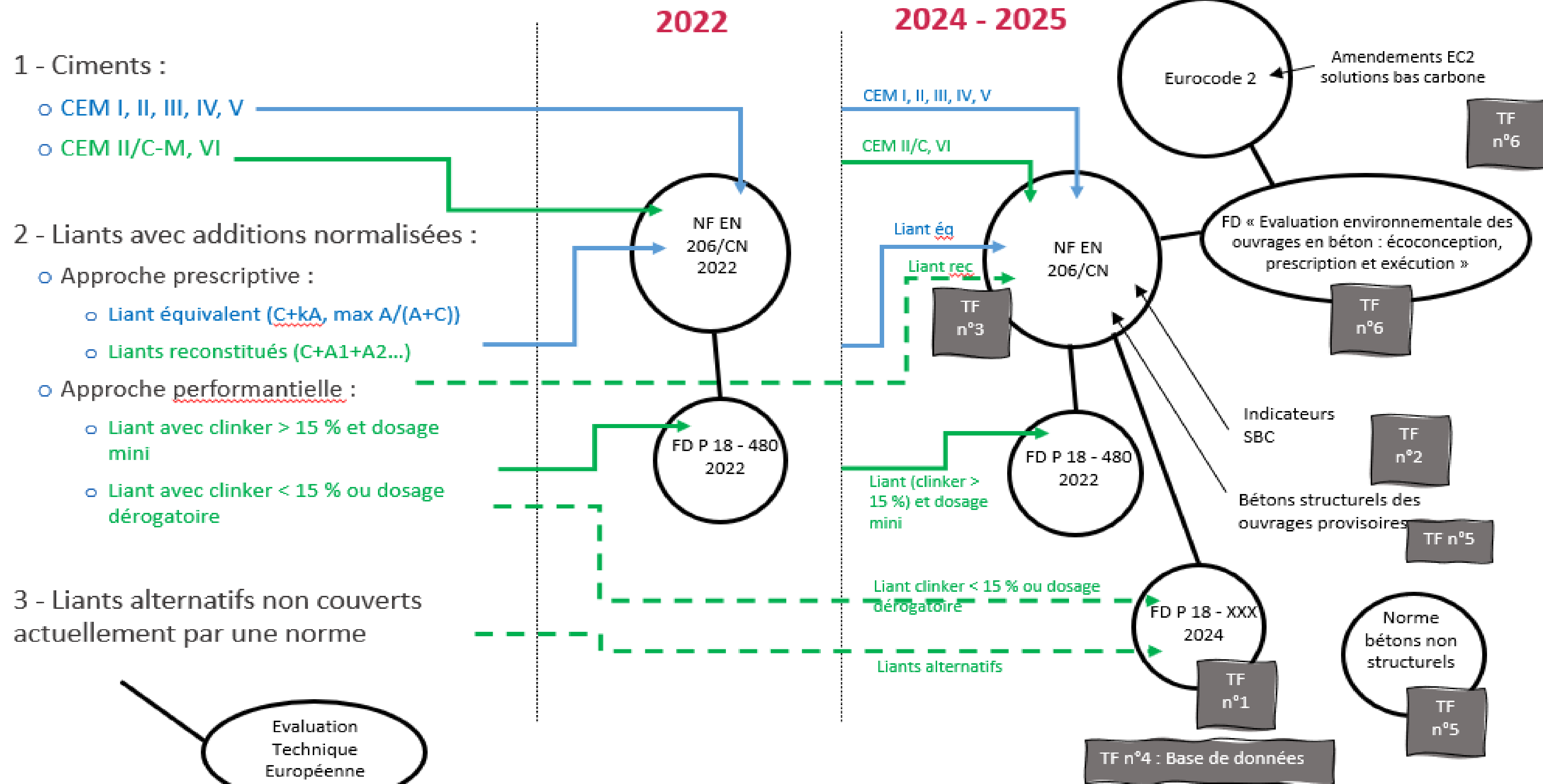
À l'échelle du matériau : L'empreinte carbone des additions minérales

Les additions minérales permettent de diminuer la quantité de clinker dans les bétons :

- ➔ Additions calcaires : 40 à 60 kg eq CO₂/t
- ➔ Additions siliceuses : 40 à 60 kg eq CO₂/t
- ➔ Laitiers de haut fourneaux : 100 kg eq CO₂/t
- ➔ Métakaolins : 139 à 239 kg eq CO₂/t
- ➔ Cendres volantes (après séchage) : 47,5 kg eq CO₂/t
- ➔ Fumées de silice : 354 kg eq CO₂/t



Groupe d'experts « Solutions Bas Carbone » (P18B/GE SBC)



**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**



**SYMPOSIUM COULOMB
PARIS, SEPTEMBER 25 & 26, 2023**