Béton pour fondations profondes

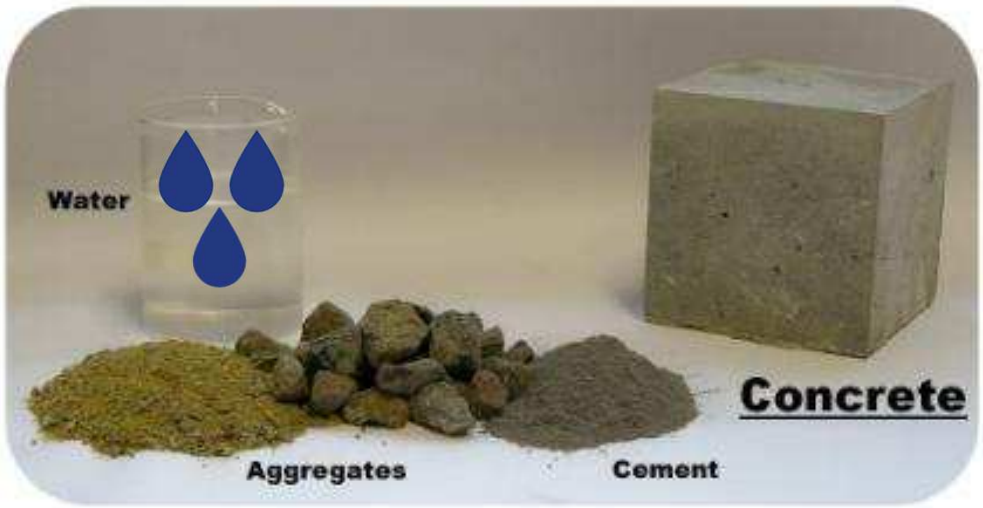
Spécification, mise en place et essais in situ

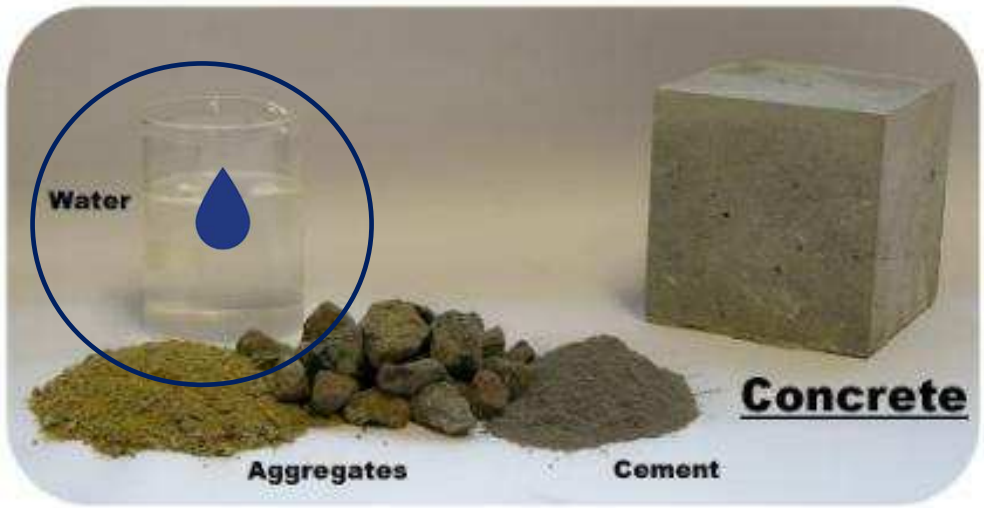
Dumont Adrien

Franki Foundations
Strong foundations. Solid future.

Franki Foundations

Le béton a changé

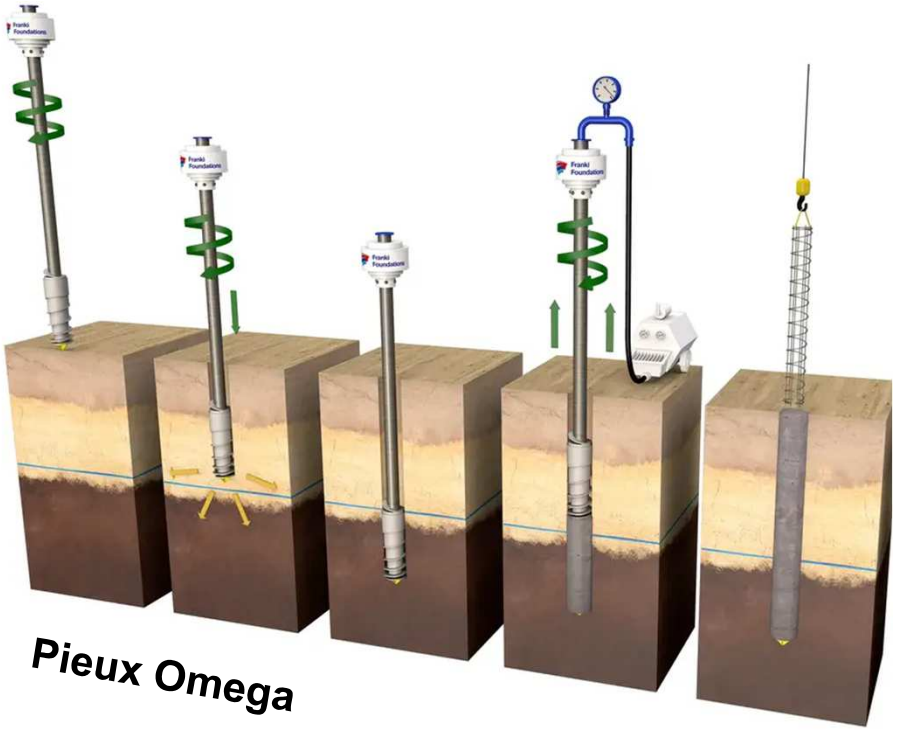




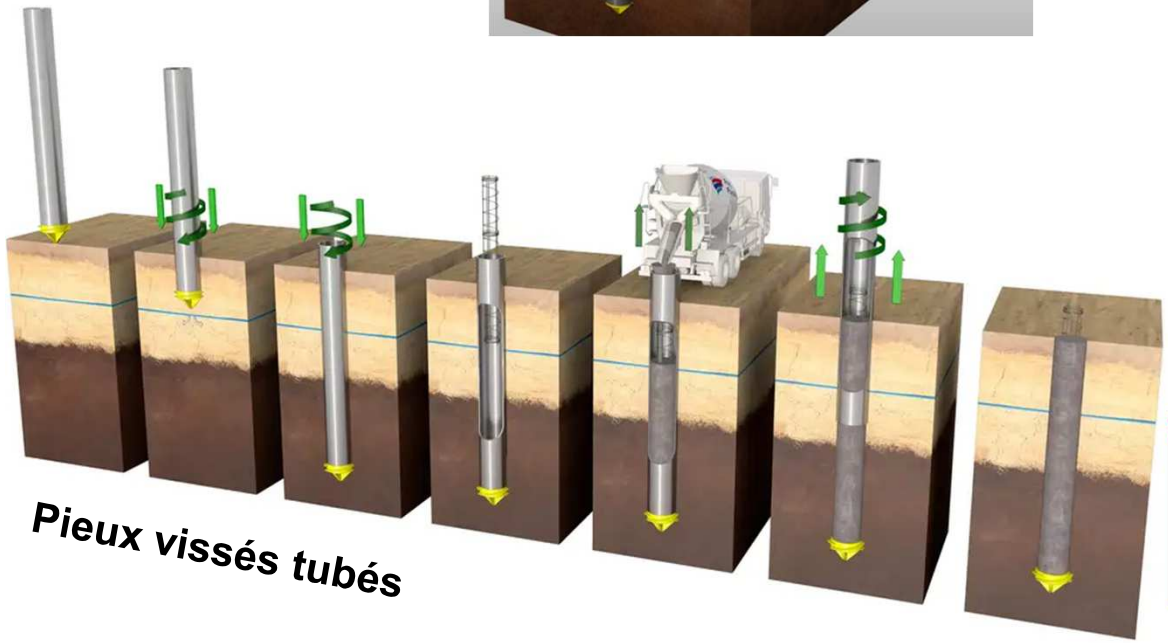
Les techniques de fondation

AVEC refoulement

Pieux Atlas



Pieux Omega

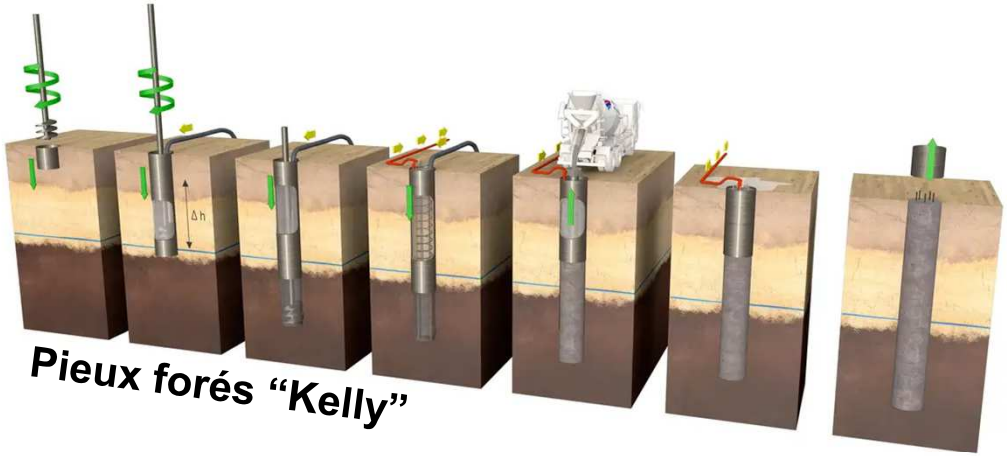


Pieux vissés tubés

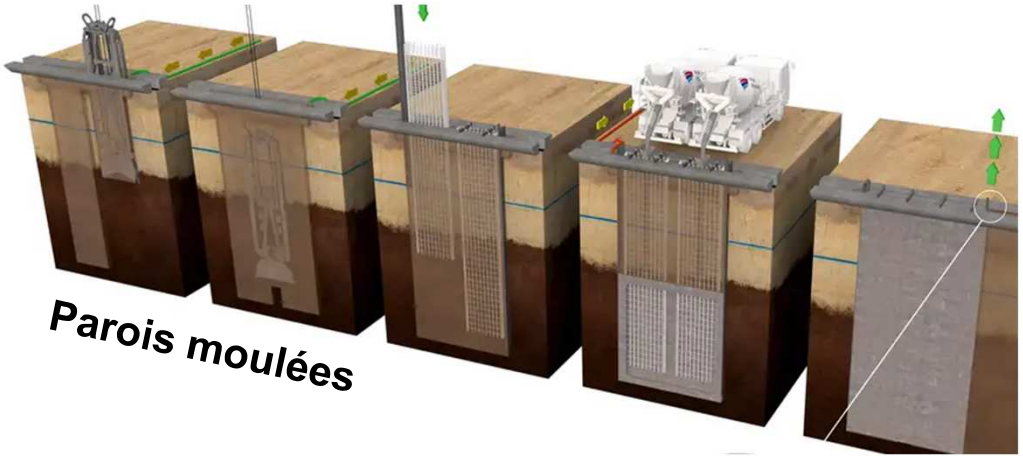
Franki Foundations

Les techniques de fondation

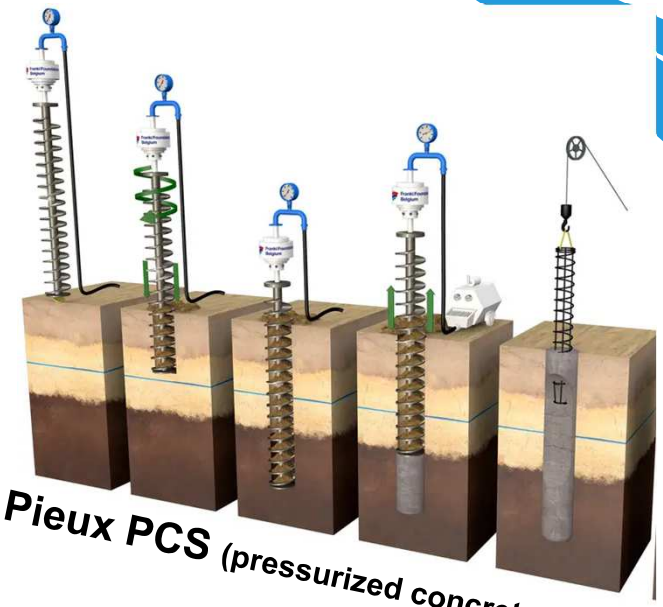
SANS refoulement



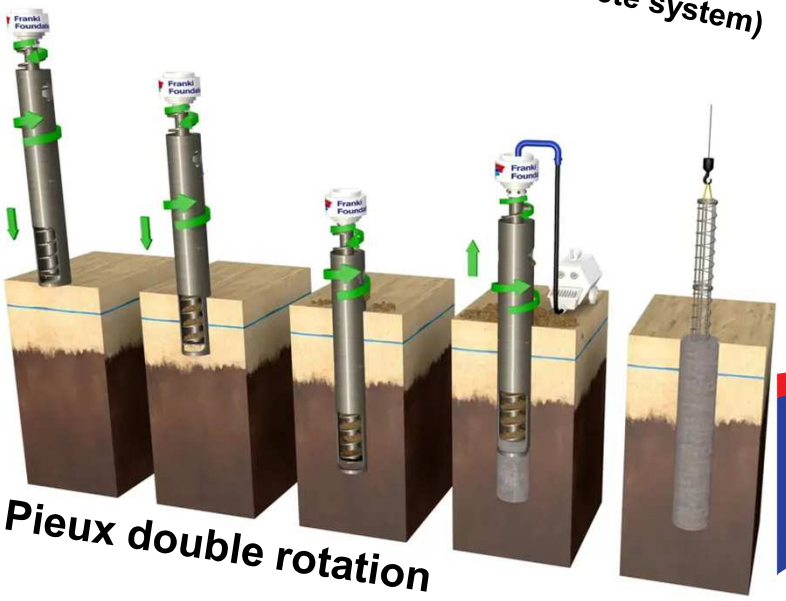
Pieux forés “Kelly”



Parois moulées



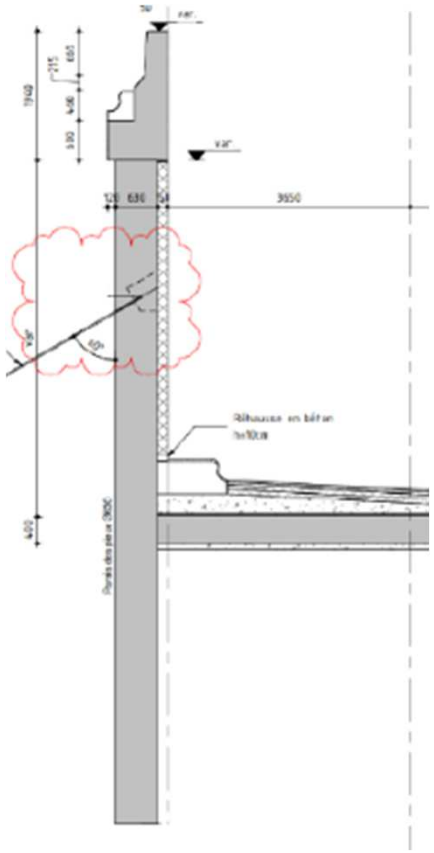
Pieux PCS (pressurized concrete system)



Pieux double rotation

La base, le cahier spécial des charges « CSC »

Osez remettre en question !

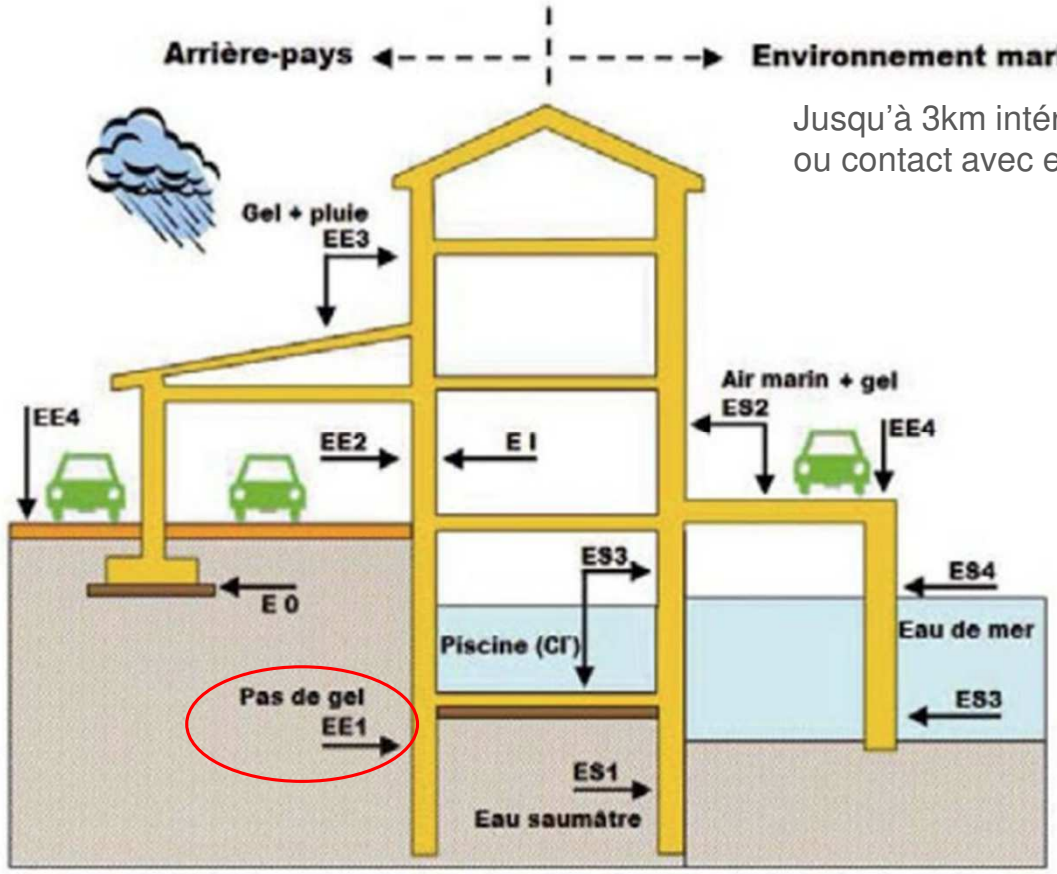


Extrait CSC pour une paroi de pieux sécants pour un tunnel

QUALITE DES BETONS:	Classe de résistance	Domaine d'utilisation	Classe d' environnement	Ciment	WAI	Enrobage nominal
Béton des pieux:	C35/45	BA	EE4	LA - LH	(0.45)	75 mm

La base, classe environnementale

Osez remettre en question !



Jusqu'à 3km intérieur des terres
ou contact avec eau saumâtre

SIMPLIFICATION
des classes d'exposition

+ si environnement agressif EA1/ EA2 / EA3

- Site pollué, industrie chimique, agricole, agro-alimentaire
- Eaux souterraines
  - Sulfates SO_4^{2-}
  - pH; NH_4^+; Mg^{2+}
- Sols
  - Sulfates SO_4^{2-}
  - Acidité

Franki Foundations

Osez remettre en question !

Classes d'exposition vs classe d'environnement

1	Aucun risque de corrosion ni d'attaque
X0	Pour le béton non armé ou sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf l'abrasion, l'attaque chimique ou par le gel-dégel. Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec.

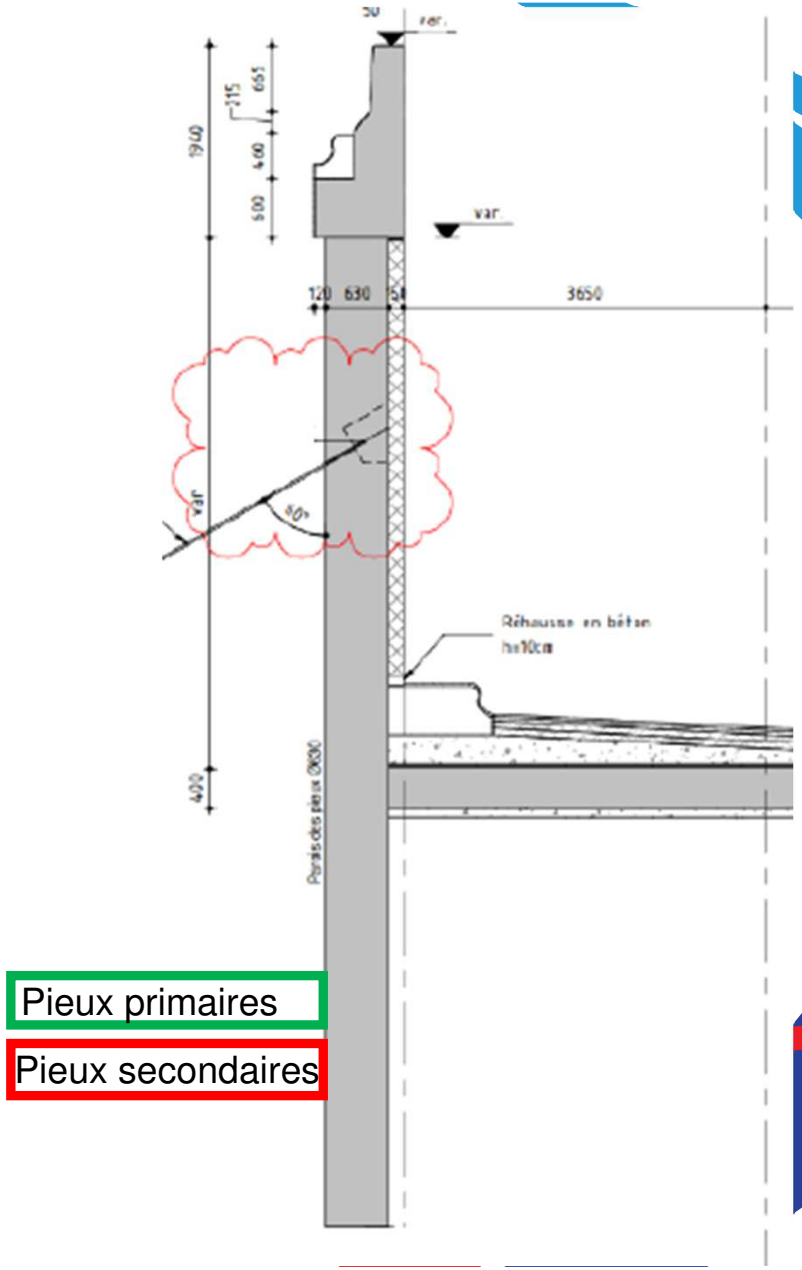
2	Corrosion par carbonatation
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyé d'exposition doivent être définies comme suit :	
XC1	Sec ou humide en permanence
XC2	Humide, rarement sec
XC3	Humidité modérée
XC4	Alternance d'humidité et de séchage

3	Corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyé des chlorures d'origine autre que marine, y compris ceux des sels doivent être définies comme suit :	
XD1	Humidité modérée
XD2	Humide, rarement sec
XD3	Alternance d'humidité et de séchage

4	Corrosion par les chlorures de l'eau de mer
Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noy de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les classes	
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer
XS2	Immergé en permanence
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns

5	Attaque par le gel-dégel avec ou sans agent de dévergla
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à de classes d'exposition doivent être définies comme suit :	
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage
XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage
XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage
XF4	Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage ou eau de mer

6	Attaque chimique
Lorsque le béton est soumis à une attaque chimique par les sols d'exposition doivent être définies comme suit :	
XA1	Environnement à faible agressivité chimique
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée
XA3	Environnement à forte agressivité chimique



Pieux primaires

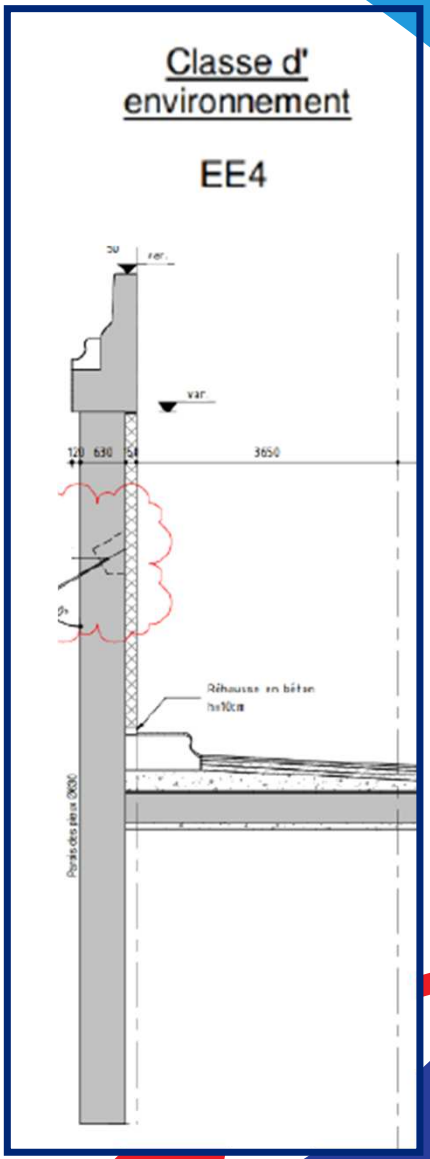
Pieux secondaires

Osez remettre en question !

Classes d’exposition vs classe d’environnement

- Pieux primaires non armés (BNA)
  - Côté extérieur de la paroi (=côté terre)
    - X0
  - Côté intérieur de la paroi (=côté fouille)
    - XF1

- Pieux secondaires armés (BA)
  - Côté extérieur de la paroi (=côté terre)
    - XC2
  - Côté intérieur de la paroi (=côté fouille)
    - XC3 ; XD1 ; XF1



Osez remettre en question !

Classes d'exposition vs classe d'environnement

- Pieux primaires non armés (BNA)
  - Côté extérieur de la paroi (=côté terre)
    - X0
  - Côté intérieur de la paroi (=côté fouille)
    - XF1

- Pieux secondaires armés (BA)
  - Côté extérieur de la paroi (=côté terre)
    - XC2
  - Côté intérieur de la paroi (=côté fouille)
    - XC3 ; XD1 ; XF1

Tableau F.2-ANB — Exigences de durabilité

Classe d'exposition	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1
Type de béton	T(1,00)	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,50)	T(0,50)	T(0,50)	T(0,45)	T(0,50)
Exigences complémentaires	(a)								
Classe d'exposition	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Type de béton	T(0,45)	T(0,45)	T(0,55)	T(0,50) ou T(0,55)A	T(0,50) ou T(0,55)A	T(0,45) ou T(0,50)A	T(0,55)	T(0,50)	T(0,45)
Exigences complémentaires	(b)			(e)	(e)	(e)	(c)	(d)	(d)

Tableau F.1-ANB — Types de béton

Désignation	T(1,50)	T(1,00)	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,55)A	T(0,50)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Rapport maximal eau-ciment	1,50	1,00	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45
Teneur minimale en ciment	-	-	260	280	300	300	320	320	340	340
Classe de résistance à la compression minimale (a)(b)	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C20/25	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37

Osez remettre en question !

Classes d’exposition vs classe d’environnement

- Pieux primaires non armés (BNA)
  - Classe de résistance : **C25/30**
  - Classe d’environnement : **EE2**
  - Teneur en ciment > 300 kg/m³

- Pieux secondaires armés (BA)
  - Classe de résistance : **C30/37**
  - Classe d’environnement : **EE3**
  - Teneur en ciment > 320 kg/m³

QUALITE DES MATERIAUX

QUALITE DES BETONS:	Classe de résistance	Domaine d'utilisation	Classe d' environnement	Ciment	WAI	Enrobage nominal
Béton des pieux:	C35/45	BA	EE4	LA - LH	(0.45)	75 mm

Franki Foundations

Osez remettre en question !

Les ciments et le WAI

QUALITE DES MATERIAUX

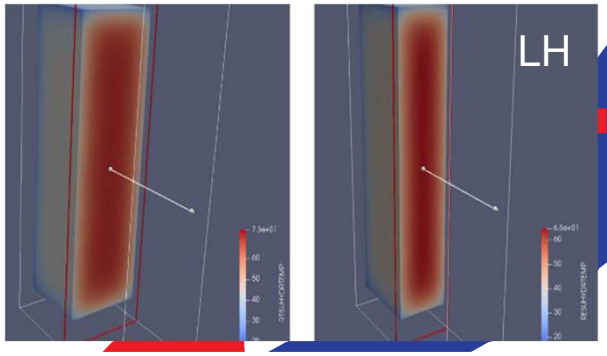
QUALITE DES BETONS:	Classe de résistance	Domaine d'utilisation	Classe d' environnement	Ciment	WAI	Enrobage nominal
Béton des pieux:	C35/45	BA	EE4	LA - LH	(0.45)	75 mm

Franki Foundations

Osez remettre en question !

Les types de ciment

Ciment	Risque	Solution
LA Low Alcali	Réaction RAS (gonflement du béton)	- Ciment LA - Bilan alcali du béton
(H)SR (High) Sulfate Resisting	Formation éttringite (éclatement du béton) **SI** sulfates (SO_4^{2-}) Eau > 600 mg/l Sol > 3000 mg/kg	- CEM III/B = CEMIII/B HSR - CEM III/C - CEM V/A
LH Low Heat	Forùmation d'éttringite différée **SI** T > 65°C dans le béton Risque ↑ si épaisseur > 1m	- Possibilité de simulation - Ciment LH



Osez remettre en question !

Le béton WAI « Water Absorption Index »

- WAI Water Absorption Index
- Application Structures étanches (piscines, bassins de rétantion, stations d'épurations)

- NBN B15-001 annexe 0

  « ne donnent qu'une **indication grossière** de la durabilité potentielle du béton. En aucun cas, ils ne donnent une preuve d'étanchéité du béton à l'eau ou aux liquides »

Osez remettre en question !

Le béton WAI « Water Absorption Index »

- WAI Water Absorption Index

- Risque avec application au béton de fondation

  - Très peu d'eau → usage important d'adjuvants
    → impact négatif sur l'ouvrabilité et stabilité du béton

  - Ségrégation
  - Ressuage

  } Qualité de surface médiocre → impact négatif sur le durabilité

  ➢ Risque de défauts majeurs sur la fondation
  ➢ Aucune garantie sur l'étanchéité ou la durabilité de la structure

Rappel utile : Annexe D (EN206)

Teneur minimale en ciment et en fines

Tableau D.1-ANB — Teneurs minimale en ciment et en fines du béton destiné aux pieux forés et aux pieux à refoulement de sol exécutés en place

Teneur en ciment :		
Mise en place dans des conditions sèches		≥ 325 kg/m³
Mise en place dans des conditions d'immersion (sous eau ou fluides stabilisateurs)		≥ 375 kg/m³
Teneur en fines[a] :		
Gravillon	D_{max} > 8 mm	≥ 400 kg/m³
Gravillon	D_{max} ≤ 8 mm	≥ 450 kg/m³
[a] Fines: taille des particules ≤ 0,125 mm (additions et ciment inclus)		

Tableau D.2 · Teneur minimale en ciment pour le béton destiné aux parois moulées

D_{max} mm	Teneur minimale en ciment kg/m³
32	350
22,4	380
16	400

⬅ Pieux à refoulement/PCS/DR

➡ Bétonnage avec tubes plongeurs ONLY !

} Aide contre bleeding, Lessivage, ségrégation

Conditions immergées
≠
présence d'une nappe d'eau

Franki Foundations

Rappel utile : Normes et certificats

	Belgique	France	Pays-Bas
Norme(s)	EN206 (**Annexe D**)		
	NBN EN206:2013 + A2:2022	NF EN206 + A2:2022	NEN EN206:2014 + A2:2021
	NBN B15-001:2025	NF EN206 +A2/CN	NEN 8005
Certificat	BENOR LA QUALITÉ EN CONFIANCE	NF PAR AFNOR CERTIFICATION (Afnor)	KOMO® (Komo)

Certification n'est pas une obligation

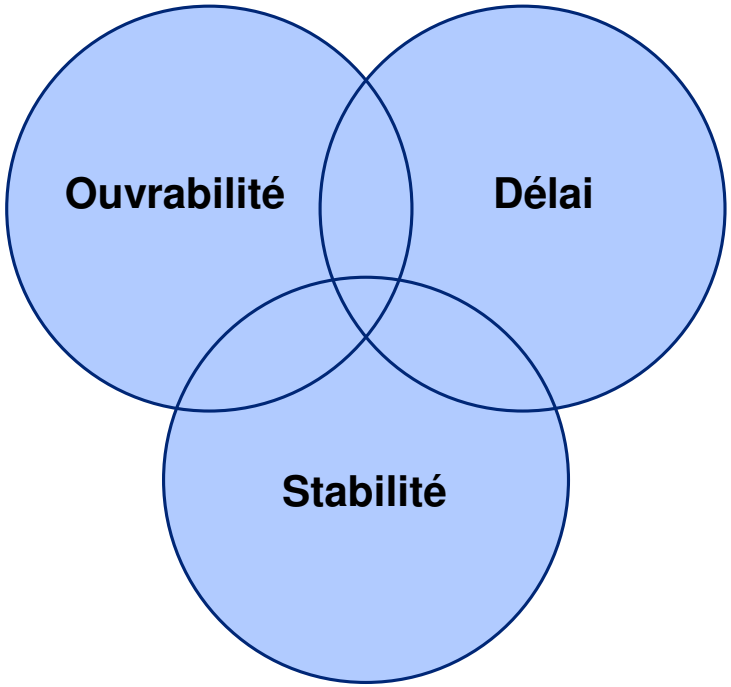
- Conforme aux **normes**
- **Caractéristiques** techniques garanties
  - Résistance
  - Durabilité (ex: E/C)
- Contrôle par un organisme **tiers**
- Contrôle **interne** à la centrale

WOLTMAN
10u5

Franki Foundations

Sur chantier, on teste les paramètres à risque

Dépendant de la technique



- Mise en place du béton frais
  - **Ouvrabilité** Fluidité
  - **Délai** Délai garanti de mise en œuvre
  - **Stabilité** Résistance à la ségrégation

Franki Foundations

Sur chantier, on teste les paramètres à risque

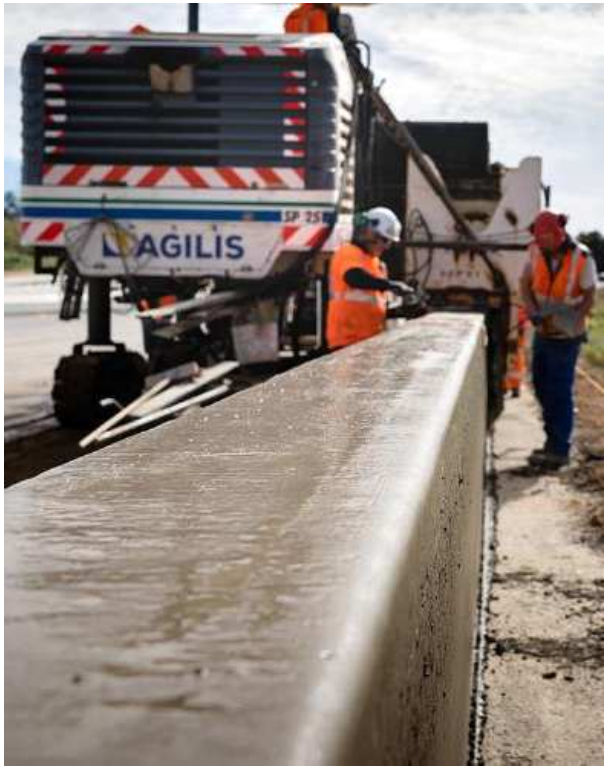
Quels risques pour quelle technique

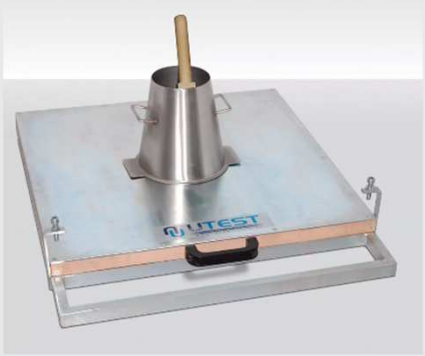
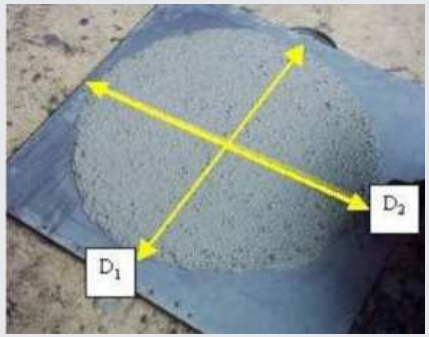
Risque	Refoulement		Caractéristiques
	Avec	Sans	
Bleeding (interne)	Moyen à Élevé	Moyen	Stabilité-Compacité
Lessivage (externe)	Élevé	Faible à Moyen	Stabilité-Compacité
Déformation plastique (poussée des terres)	Élevé	Faible	Ouvrabilité
Ségrégation	Moyen	Moyen à Élevé	Stabilité
Gauffrage	Faible	Moyen à Élevé	Ouvrabilité
Discontinuité	Faible à Moyen	Moyen à Élevé	Délai-Continuité

* Avec : Atlas, Omega. (vissé-tube : protection du tubage)
  Sans : Double rotation, PCS, Kelly, Parois moulées

Franki Foundations

Ouvrabilité ? L'important, c'est d'avoir la (bonne) classe

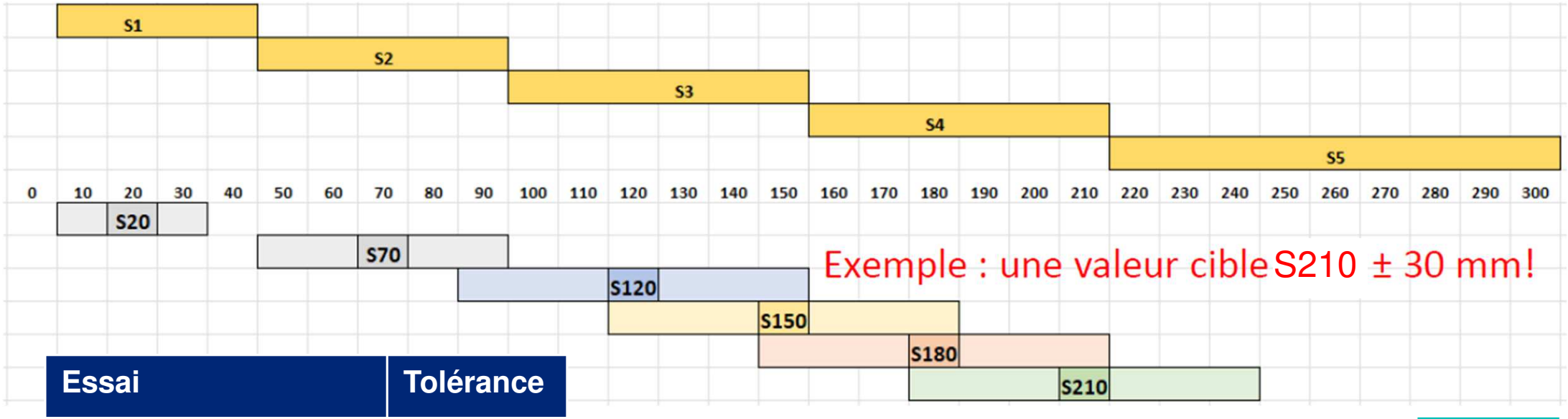


Slump – S	Ecoulement – F	Slump Flow – SF
EN 12350-2	EN 12350-5	EN 12350-8
~~Autoplaçant~~ (≤ S4)	~~Autoplaçant~~ (≤ F5)	Autoplaçant et grande ouvrabilité
Cône d'Abrams	Table à chocs	Cône d'Abrams
		

Franki Foundations

Ouvrabilité ? L'important, c'est d'avoir la (bonne) classe

Possibilité de demander une valeur cible



Essai	Tolérance
S – Slump (≥100mm)	± 30mm
F – Etalement	± 40mm
SF – Slump Flow	± 50mm

NBN EN 206:2013+A2:2021 (*tab 23*)

Buildwise

Franki Foundations

La bonne classe ? Ok mais faut que ça dure

Temps de consistance et délai de mise en œuvre garanti

Délai MOG

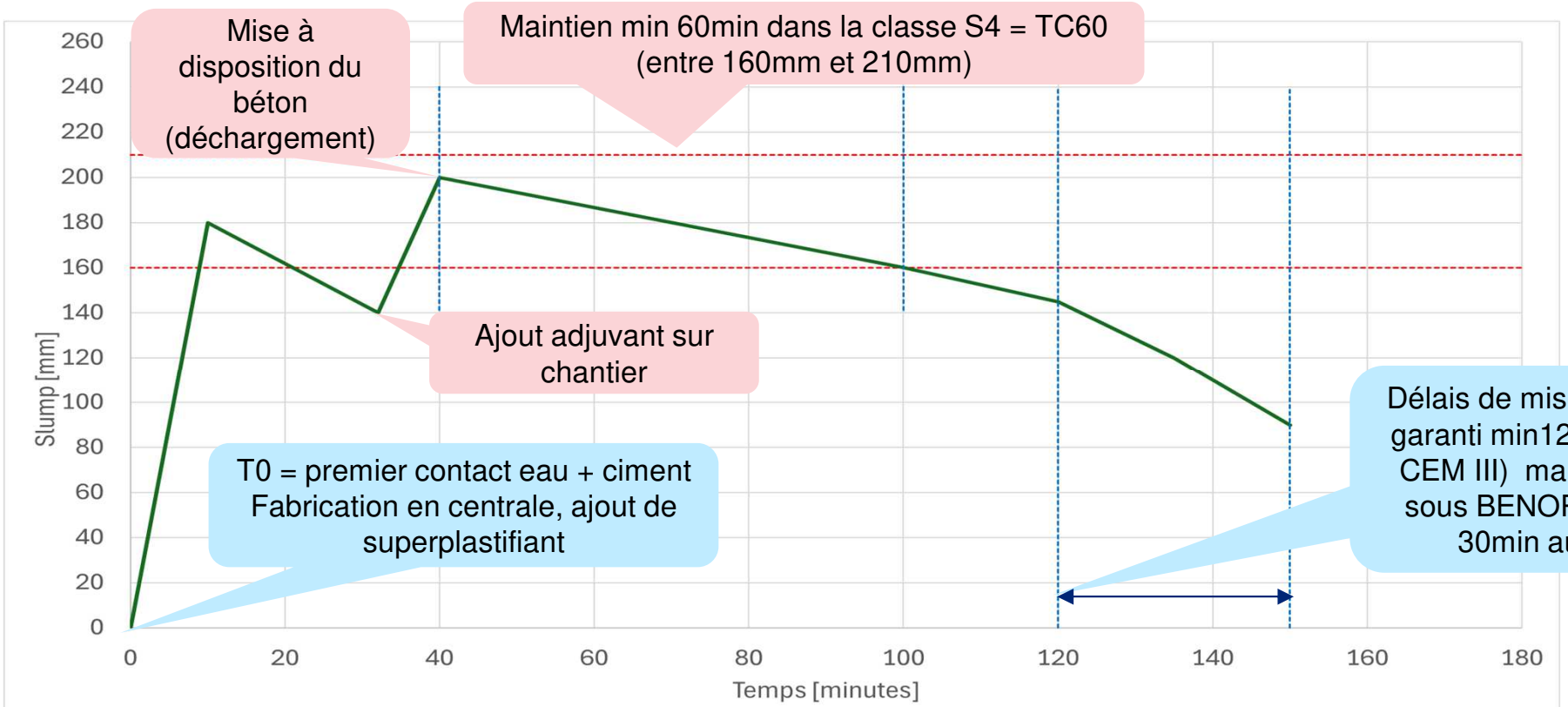
Délai de mise en œuvre garanti

TC : Temps de consistance

Maintien de la consistance

Temps de consistance et délai de mise en œuvre garanti

Pieu Atlas : S4 – TC60

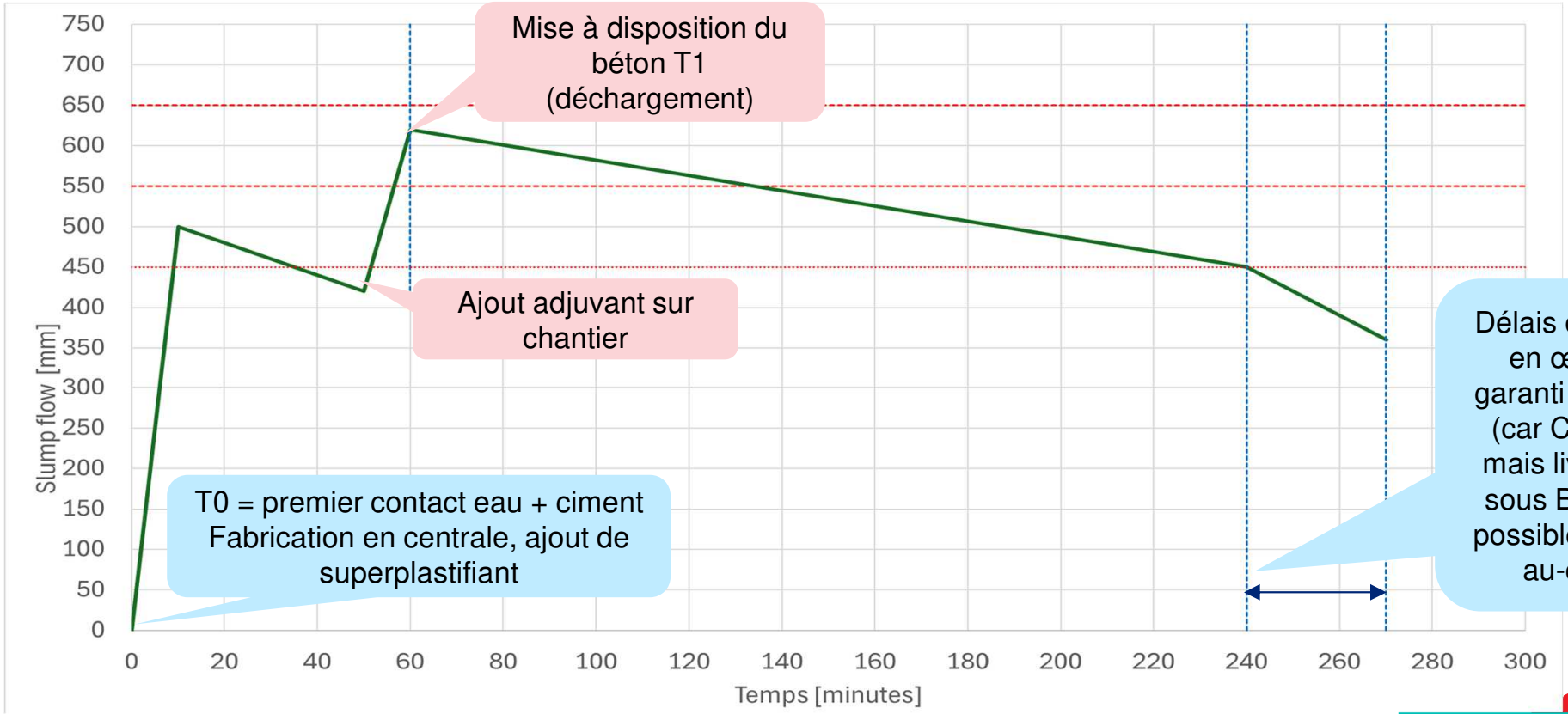


Délai MOG

Consistance

La bonne classe ? Ok mais faut que ça dure

Parois moulées : SF600 – délai MOG 240min - SF min 450mm à 240min



Délai MOG

Consistance

+ 30min sous conditions

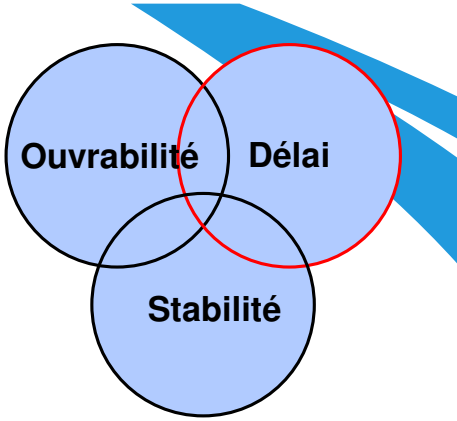
- Possibilité de livrer sous BENOR au delà du temps de mise en œuvre garanti

- Le béton peut être travaillé pendant 30min si :
  - Appréciation favorable du béton par le chauffeur
  - Accord de l'entrepreneur
  - Enregistrement sous le bon de livraison
  - AUCUN AJOUT pendant ces 30minutes

- Délais de mise en œuvre garanti min :
  - Min 120min pour béton à base de CEM III/ CEM V

Franki Foundations

Délai MOG et temps de consistance



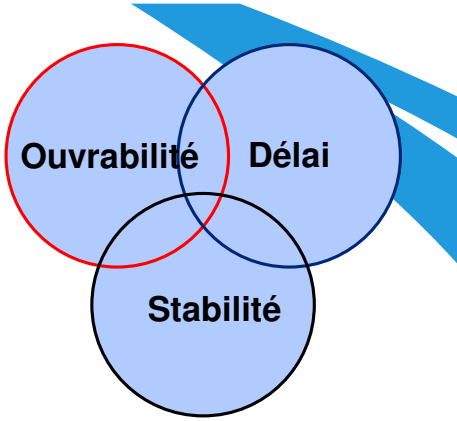
- Délai de mise en œuvre garanti
  - Premier contact eau-ciment
  - Délai de mise en œuvre garanti (T=20°C)
    - Pas de réaction chimique
    - Caractéristiques principales garanties (Résistance, Durabilité)
  - Extension du délai possible : 30min max

- Temps de consistance - TCxx
  - Maintien de la consistance dans un slot
  - Base = 30min
  - Départ : mise à disposition sur chantier

Franki Foundations

Tests sur béton frais

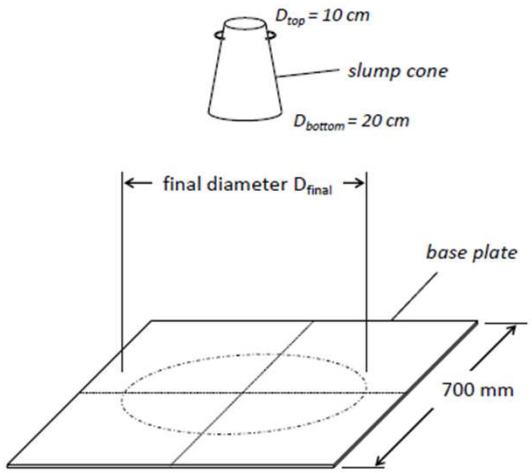
Ouvrabilité



- Slump – Slump Flow – Ecoulement

- Vitesse d'écoulement (béton à grande ouvrabilité)
  - SFVT – Slump Flow Velocity Test
    - SF < 550mm
    - $SFVT = \frac{(D_{final} - 200)/2}{Tfinal} \quad \frac{[mm]}{[sec]}$
    - SFVT ≥ 32 mm/sec

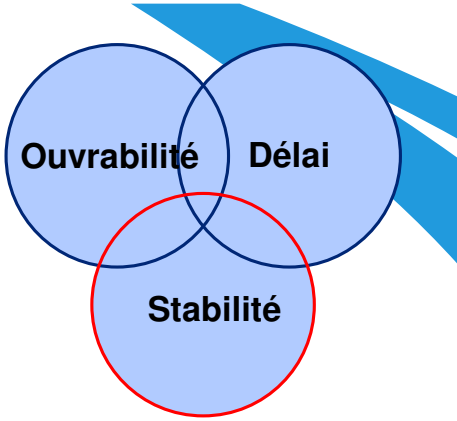
  - FTS – Finale Time of Spreading
    - SF ≥ 550mm
    - FTS 550 = T_{final} pour D_{550mm}
    - FTS 550 ≤ 5 sec



Franki Foundations

Test sur béton frais

Stabilité



- VSI – Visual Stability Index (ASTM C1611)
  - En même temps que le Slump Flow

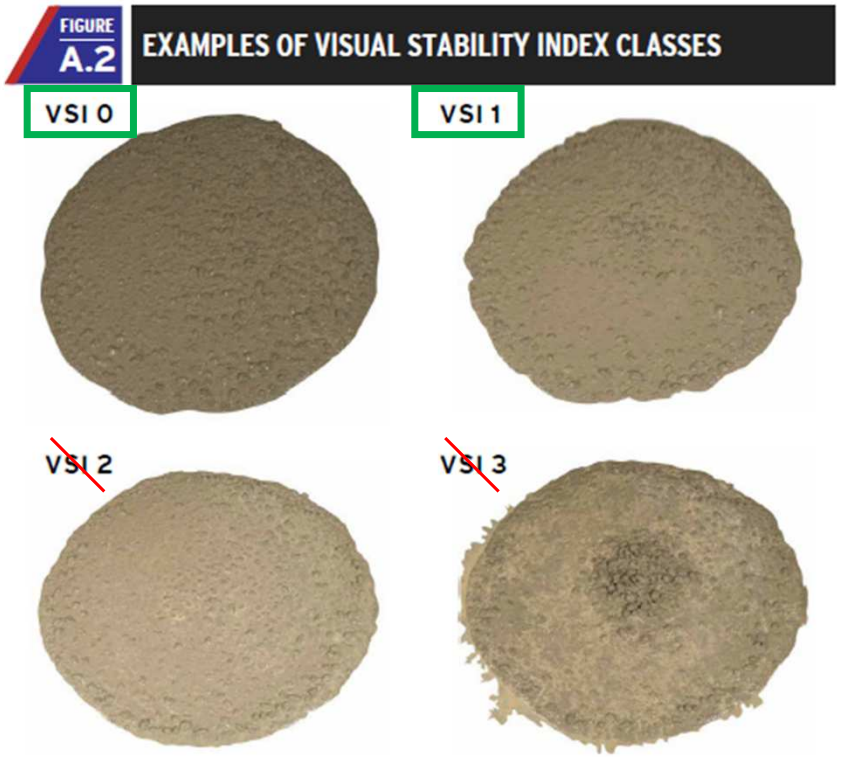


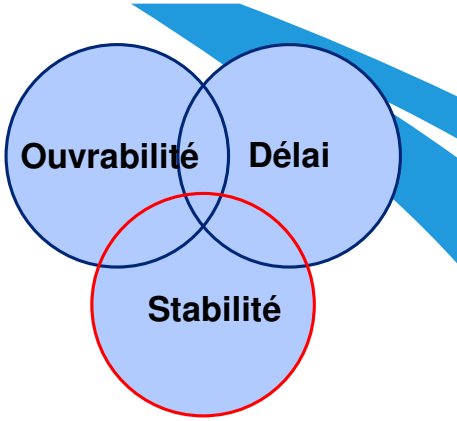
TABLE A.1 VISUAL STABILITY INDEX VSI CLASSES (ACCORDING TO ASTM C1611)

VSI VALUE	CRITERIA
0 = Highly Stable	No evidence of segregation or bleeding
1 = Stable	No evidence of segregation and slight bleeding observed as a sheen on the concrete mass
2 = Unstable	A slight mortar halo ≤ 10 mm [½ in] and/or aggregate pile in the center of the concrete mass
3 = Highly Unstable	Clearly segregating by evidence of a large mortar halo > 10 mm [½ in] and/or a large aggregate pile in the centre of the concrete mass

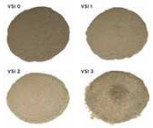
Franki Foundations

Test sur béton frais

Stabilité



- VSI – Visual Stability Index (ASTM C1611)



- Bleeding test (ressuage) (EN 480-4 & NF XP P18468)
  - Essai stabilité statique (un seau sur chantier)
  - ≤ 0,1 ml/min

FIGURE A.6 SCHEMATIC SET-UP TO DETERMINE BLEED DUE TO GRAVITY

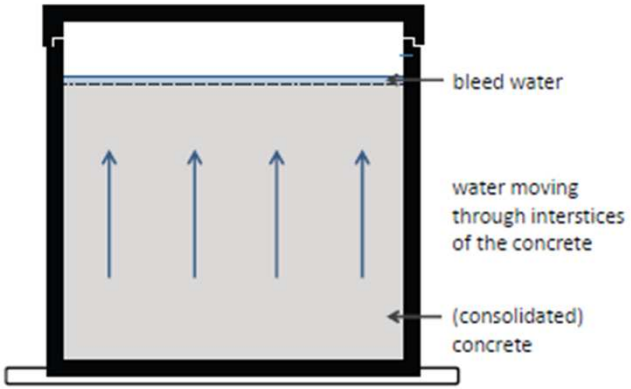
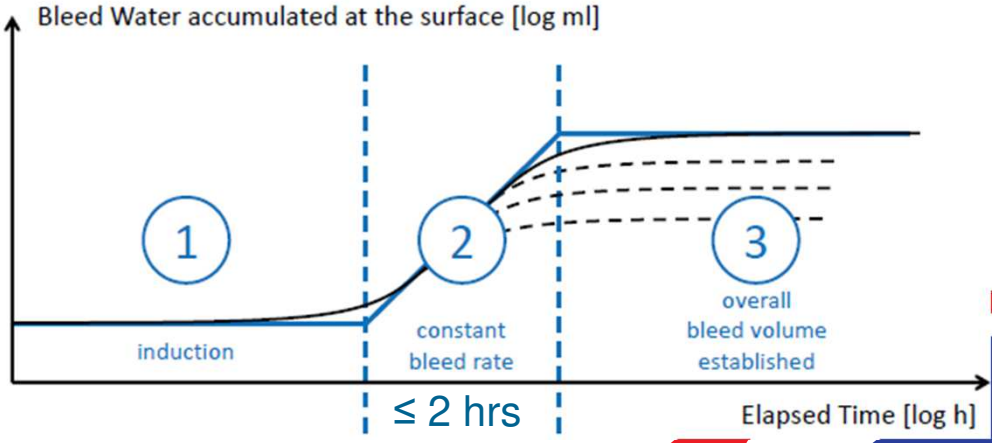


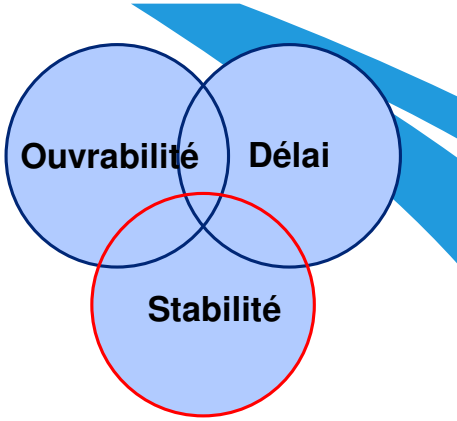
FIGURE 08 CONCEPTUAL DIAGRAM ON THE BLEEDING PROCESS IN CEMENT PASTES (BASED ON MASSOUSSI ET AL, 2017), WITH POSSIBLE INTERRUPTION OF BLEEDING DUE TO STIFFENING



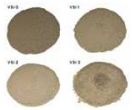
Franki Foundations

Test sur béton frais

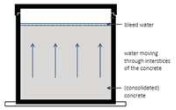
Stabilité



- VSI – Visual Stability Index (ASTM C1611)

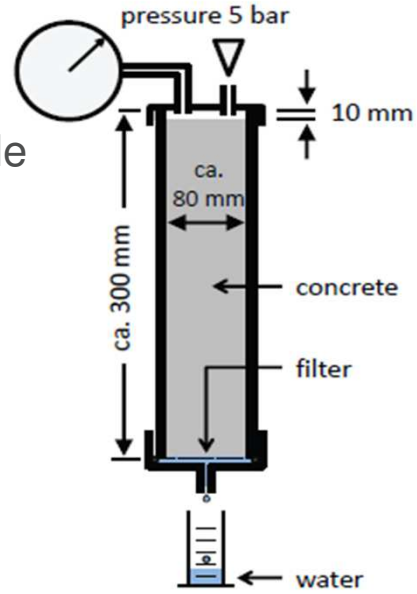


- Bleeding test (ressuage) (EN 480-4 & NF XP P18468)



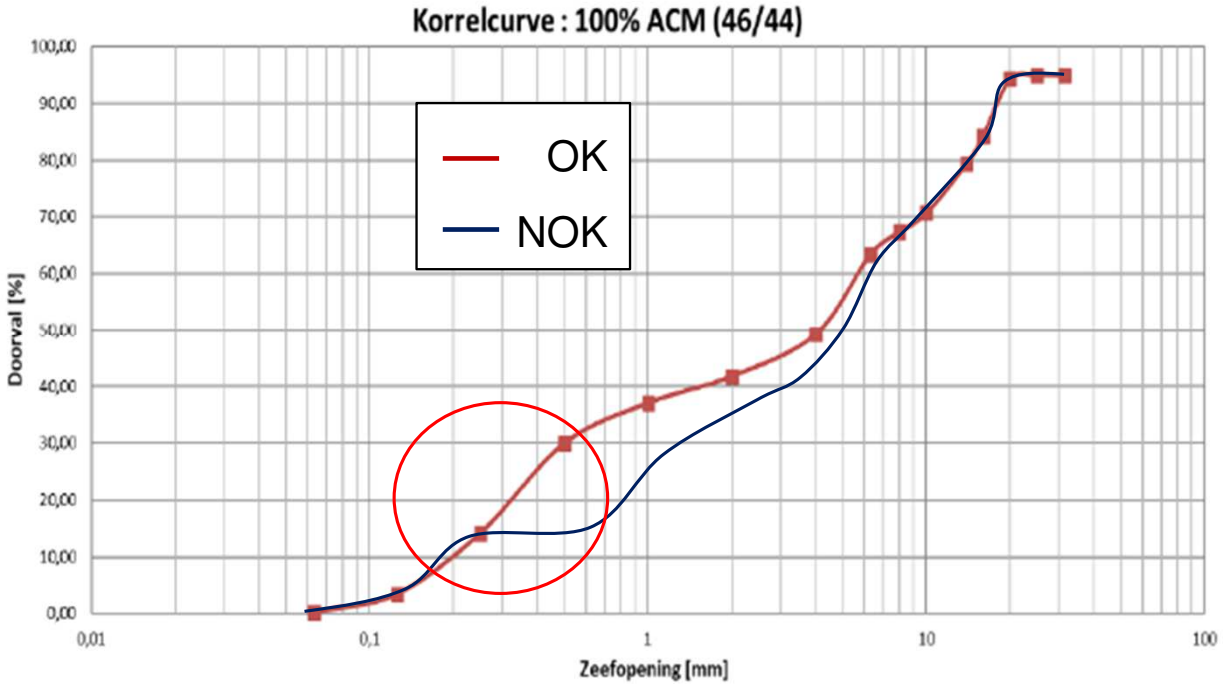
- Bauer test (ressuage)
  - Essai stabilité sous pression
    - 5 bars pendant 5 min
  - Pieu à refoulement dans terrain non perméable
  - Pieu kelly / paroi moulée >15m de profondeur
  - ≤ 22 ml

FIGURE A.7 TEST ARRANGEMENT TO DETERMINE WATER LOSS FROM PRESSURIZED FRESH CONCRETE (BAUER)



Stabilité - Compacité et courbe granulométrique

Une courbe granulométrique continue



- Ségrégation, Bleeding, Lessivage ?
  → Bonne courbe granulo
  → Courbe continue (pas de plateau)

- Bonne compacité ?
  → Fraction 0,25-0,50mm > 30 %

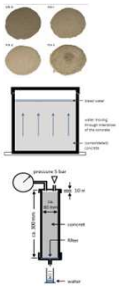
Bon pour stabilité
contre Bleeding & Lessivage

Franki Foundations

Tests sur béton frais

En résumé

- VSI – Visual Stability Index (ASTM C1611)
- Bleeding test (ressuage) (EN 480-4 & NF XP P18468)
- Bauer test (ressuage)

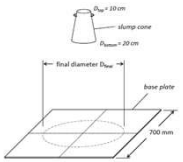


Stabilité

- SlumpFlow (EN 12350-8)
- Slump (EN 12350-2)
- Flow – Ecoulement (EN 12350-5)

Ouvrabilité

- Slump Flow Velocity test – SFVT
- Final time of Spreading – FTS550

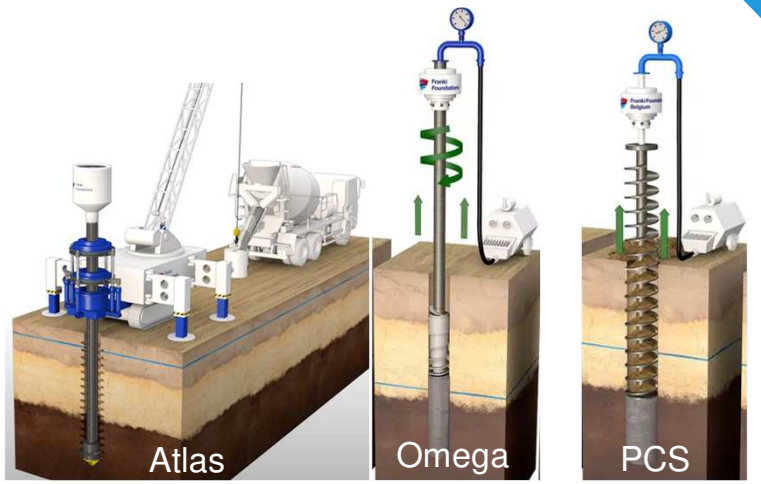


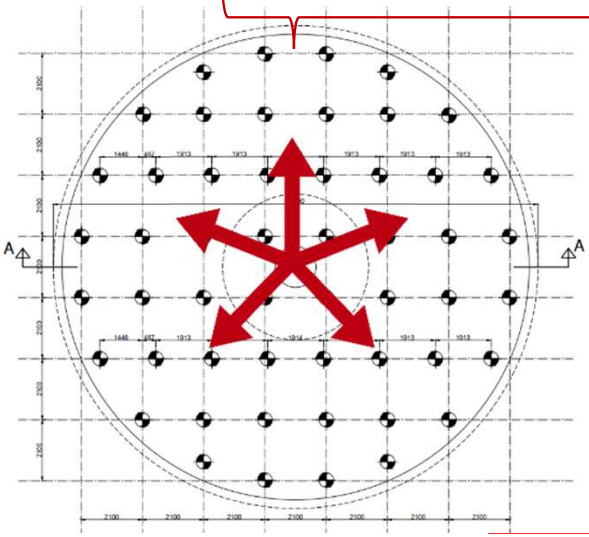
Délai

On le coule mais correctement

Quelques règles de bonne pratique

- **Bétonnage à la tarière**
  - Travail en continu
  - Surpression avant retrait de la tarière (aussi PCS)
  - Pieux à refoulement
    - Béton max S4
    - Du centre vers l'extérieur

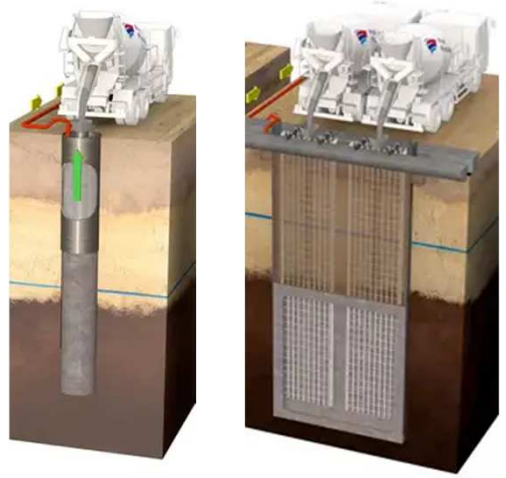




Franki Foundations

On le coule mais correctement

Quelques règles de bonne pratique



- **Bétonnage à la trémie ou tube plongeur**
  - Rhéologie du béton en fonction du design (pieu/cage)
    - Délai de mise en œuvre garanti
    - Ouvrabilité
  - Bétonnage le plus vite rapidement possible après creusement
  - Processus discontinu
    - Un bon amorçage
    - Immersion continue du tube plongeur
      - Min 3m
        2m pour pieux forés (D<1,2m)
      - Max 9m

BG 33
BAUER
Franki
Foundations

Franki Foundations

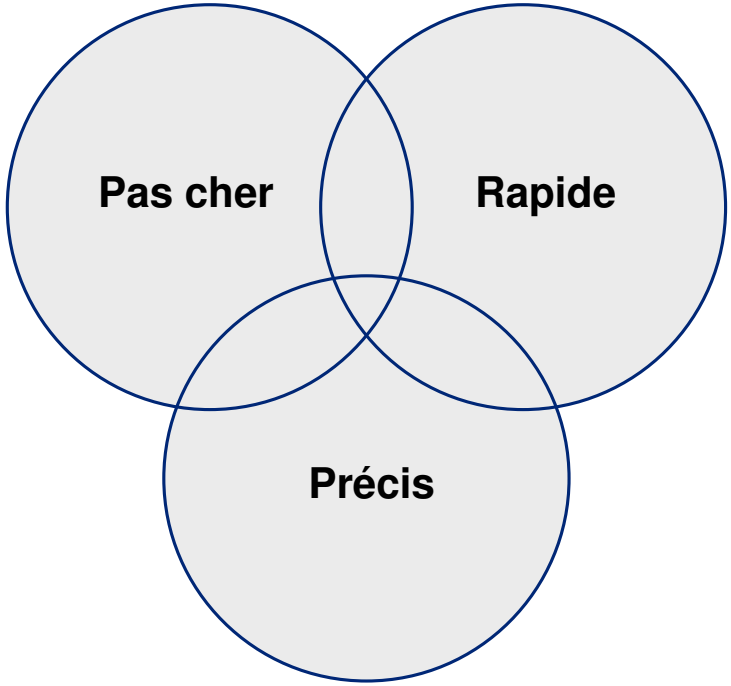
Vérifier l’intégrité d’un pieu

Zoom sur 2 tests

- **SIT**

Sonic Integrity test

“Marteau”



- **CSL**

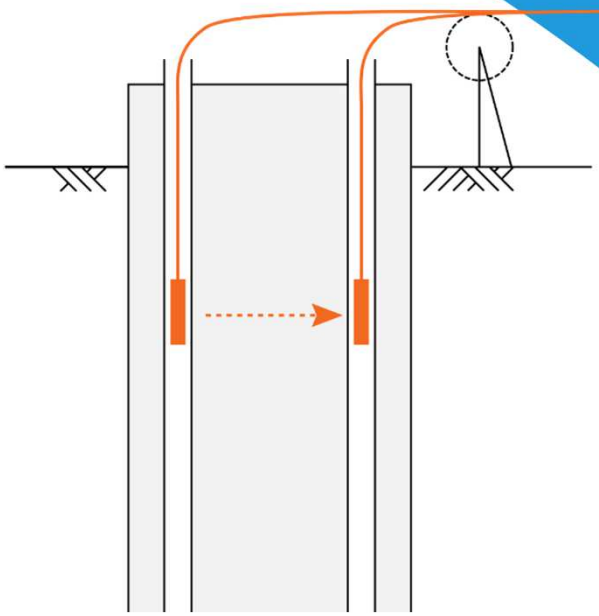
Cross Sonic Logging

“Transparance sonique”

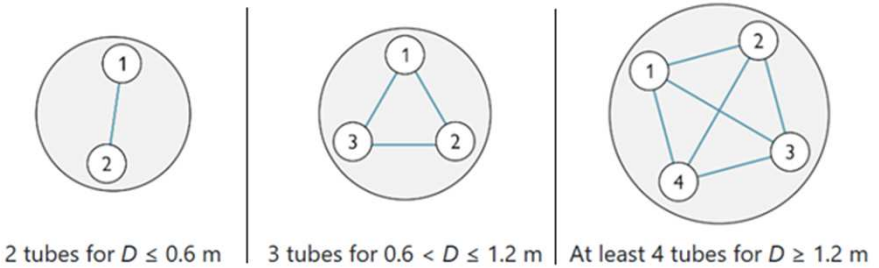
Vérifier l'intégrité d'un pieu - CSL

Cross sonic logging – Transparence sonique

- Contrôle de la qualité du béton
  - NF P94-160-1 et US D6760-16
- Onde ultrasonic
- Tubes d'auscultation placés dans la cage
  → Pas d'improvisation
- NF P94-160-1: distance entre tube 0,3 à 1,5m.
  - Au-delà, résultats sont beaucoup plus soumis à interpretation
  - Test de joint ? Oui mais, interpretation par répétitivité et comparaison



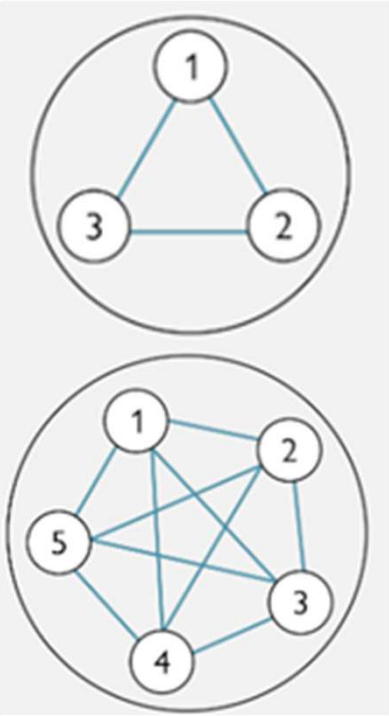
@fondytest



Vérifier l'intégrité d'un pieu - CSL

Points d'attention

- Contrôle seulement entre les tubes
  - Un défaut près du tube apparait large (ex: bleeding)
- Contrôle minimum 7 jours après bétonnage
- Avant recépage (dégâts)
- Tubes à remplir au grout après contrôle
- Pas de tubes en PVC (impact chaleur d'hydratation du béton) → **METAL**



Franki Foundations

Vérifier l’intégrité d’un pieu - CSL

1000 m/j de trajet

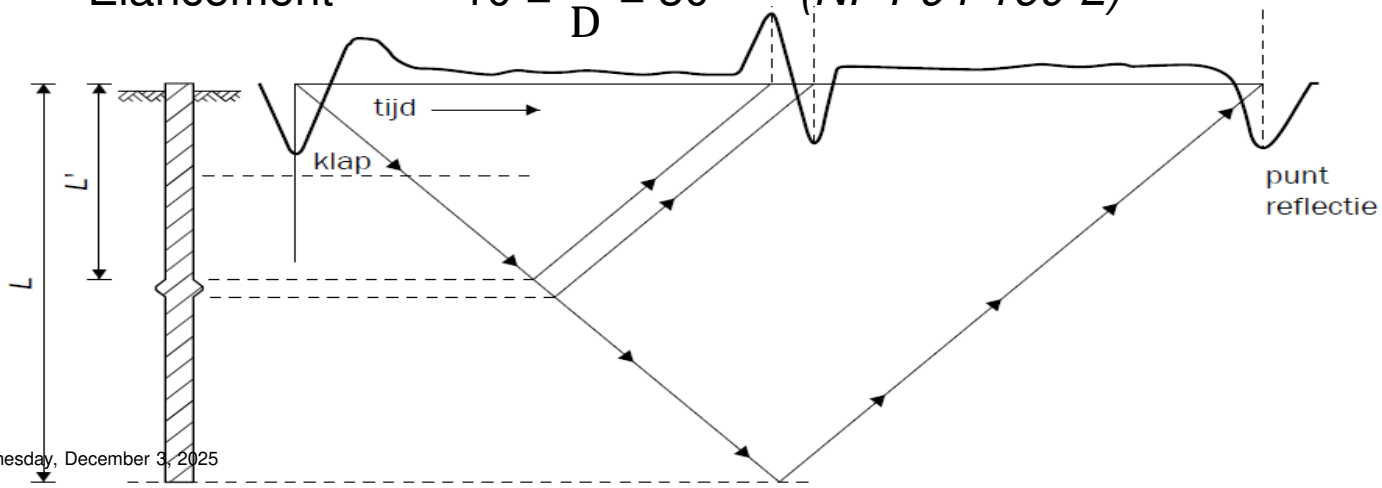
Vérifier l'intégrité d'un pieu - SIT

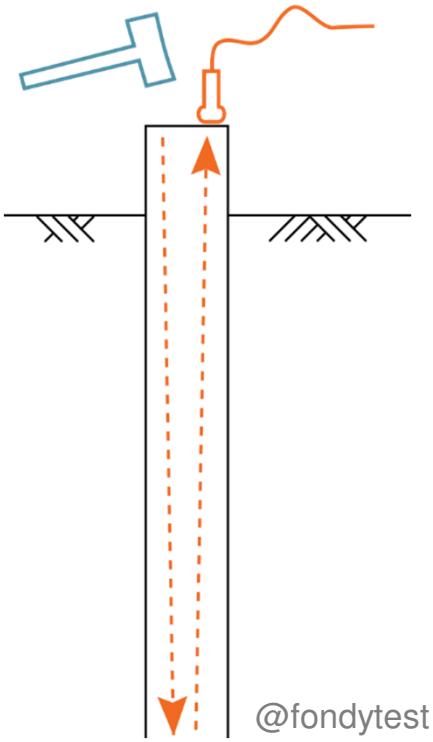
Sonic integrity test – "MARTEAU"

- Contrôle de la **longueur** du pieu

  la **qualité** du béton

- Application
  - $D_{geotechnique}$ ≤ 600 à 1500 [mm]
  - Elancement $10 \leq \frac{L}{D} \leq 30$ *(NF P94-160-2)*





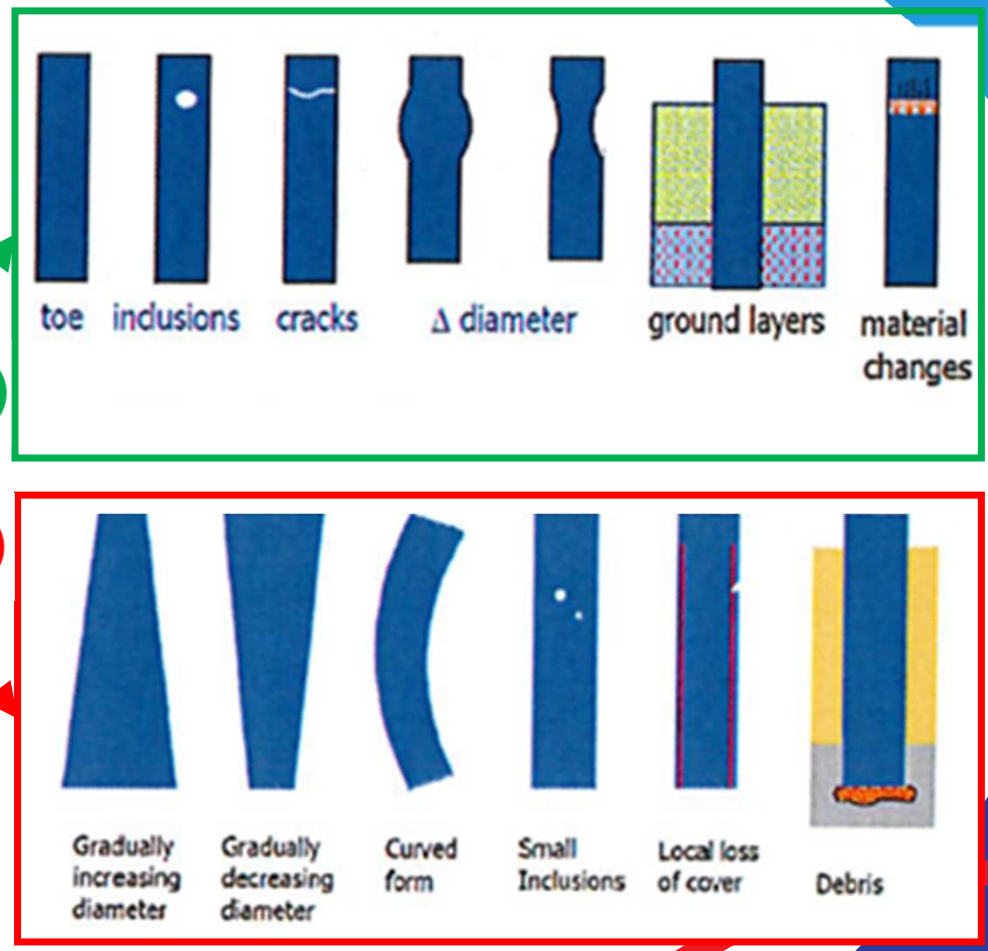
Répétition & Comparaison

Franki Foundations

Vérifier l'intégrité d'un pieu - SIT

Points d'attention

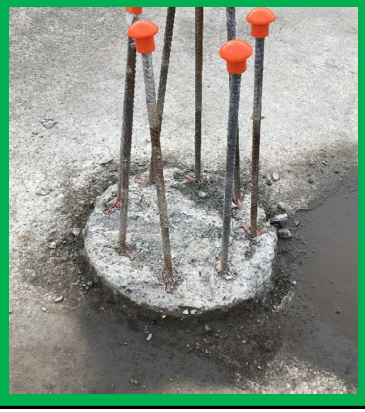
- Tolérance 10% sur longueur
  - Attention si encastrement en roche
- Gros défauts (>25% de la section)
- Recépage + préparation tête de pieu
- Influencé par la géotechnique

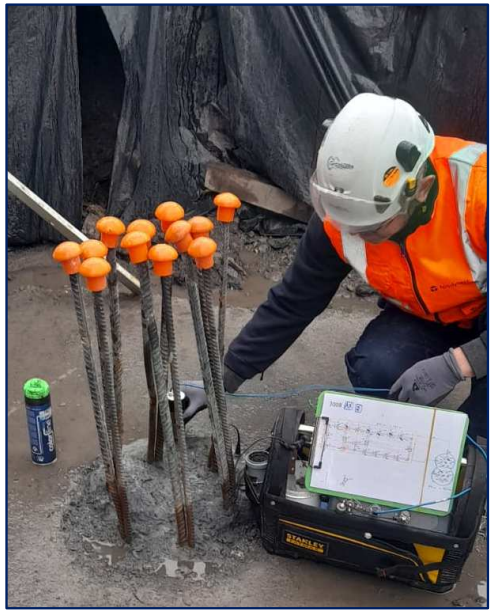


Franki Foundations

Vérifier l'intégrité d'un pieu - SIT

Préparation tête de pieu

Tête pas propre	Tête pas propre	!!!!
Eau	**OK**	**OK**
		



150 à 250 p/j

Franki Foundations

Résumé CSL et SIT

Critère	CSL (Transparence Sonique)	SIT (Marteau)
Principe	Mesure de la transmission des ondes sonores entre deux sondes dans des tubes noyés dans le béton.	Analyse de la propagation d'une onde générée par un choc à la tête du pieu.
Objectif	Vérifier la continuité interne du béton (détection de défauts, ségrégations, inclusions).	Contrôler la longueur du pieu et détecter des anomalies majeures (ruptures, gros défauts).
Matériel	Tubes d'essai intégrés dans le pieu + sondes émettrice/réceptrice + unité d'acquisition.	Marteau pour impulsion + capteur accélérométrique + unité d'acquisition.
Avantages	Très fiable pour détecter des défauts internes.	Rapide, économique, ne nécessite pas de tubes intégrés.
Limites	Nécessite des tubes prévus dès la conception, plus coûteux.	Moins précis, ne détecte pas les défauts fins ou internes.
Norme	NF P94-160-1 & US D6760-16	NF P94-160-2
Production	1000m de trajet par jour	150 à 250 pieux par jour

Franki Foundations

Béton recyclé, un filiale à développer

Impact et autorisation

- Pas d'impact CO2

- **Circularité** du secteur

- **Remplacement** d'une fraction **autorisé** *(NBN EN 206 et prNBN **B15-001:2025**)*

  - Granulat type B+ ≤ C20/25
  - Granulat type A+ ≤ C35/45 (vs C30/37)

  - Sable concassage béton A+ ≤ C30/37

Tableau 8-ANB — Pourcentage maximal de remplacement des gravillons (% volume) en fonction de la classe d'environnement pour du béton armé

Béton armé				
	Classes d'environnement			
	EI	EE1	EE2, EE3, EA1	EE4, ES1, ES2, ES3, ES4, EA2, EA3
Granulat de béton de type A+	30 %	30 %	20 %	0 %
Granulat mixte de type B+	20 %	0 %	0 %	

Tableau 7-ANB — Pourcentage maximal de remplacement des gravillons (classe d'environnement pour du béton non arm

Béton non armé			
	Classes d'environnement		
	E0, EI, EE1	EE2, EE3, ES1, ES2, ES3, EA1	EE4, ES4, EA2, EA3
Granulat de béton de type A+	50 %	20 %	0 %
Granulat mixte de type B+	20 %	0 %	0 %

Et si on veut ++ ?
OK si TESTS
d'aptitude à l'emploi

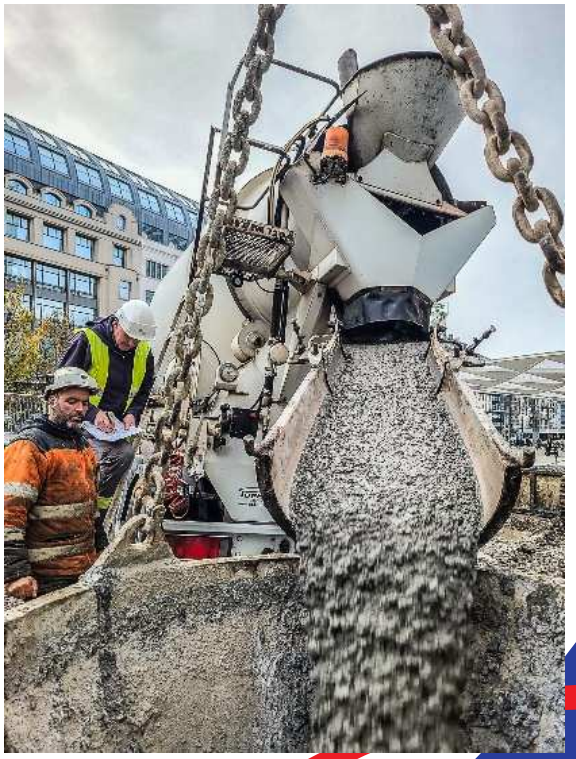
Béton recyclé, un filiale à développer

Chantier Crowne Plaza (BXL)

- Pieux forés Kelly
- Diamètre 1500-2000mm
- Longueur 52m

- C30/37 – EE1

- Slump Flow 550mm
- Tc 180min
- Délai MOG 240min



Franki Foundations

Béton recyclé, un filiale à développer

LEADER ou FOLLOWER ?

BREEAM®

CERTIFICATION HQE INFRASTRUCTURES DURABLES CERTIFIE PAR CERTIVEA

CERTIFIED cradle to cradle PRODUCTS PROGRAM

DGNB

GPR® GEBOUW

Une bonne fondation, un bon béton

Remise de prix avec les entrepreneurs généraux

Une exécution selon les bonnes pratiques

On teste et pas seulement en cas de doute

Franki Foundations