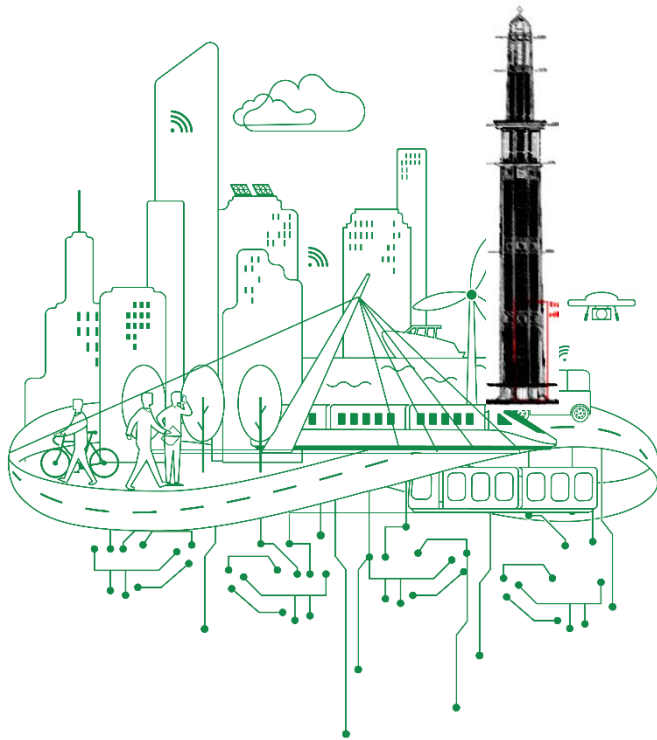




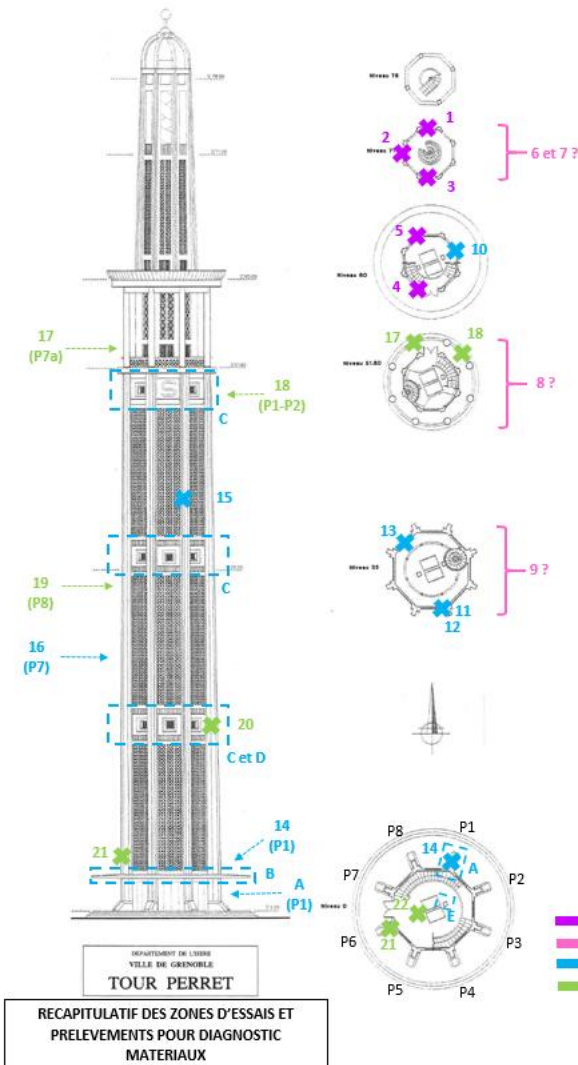
Tour Perret Grenoble

Mission de diagnostic
des bétons

bernard.quenee@setec.com

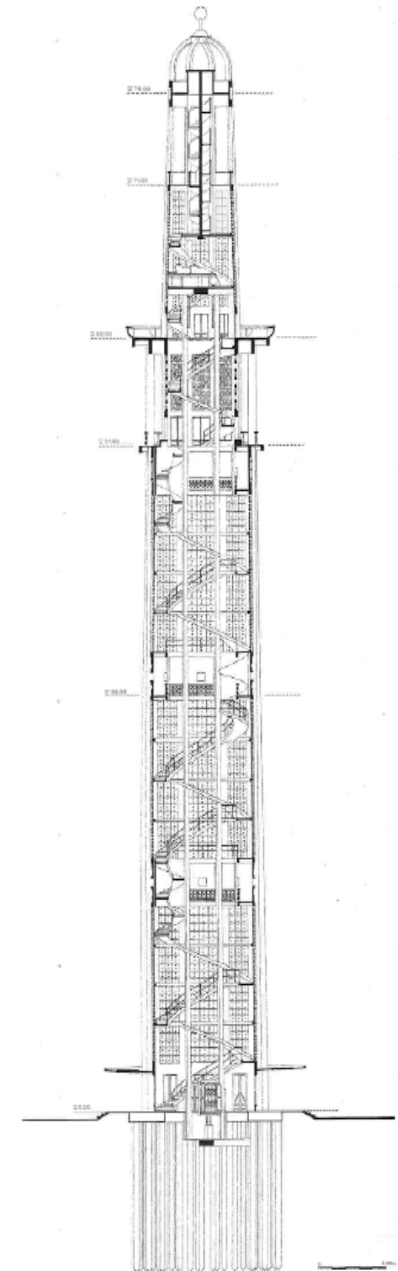
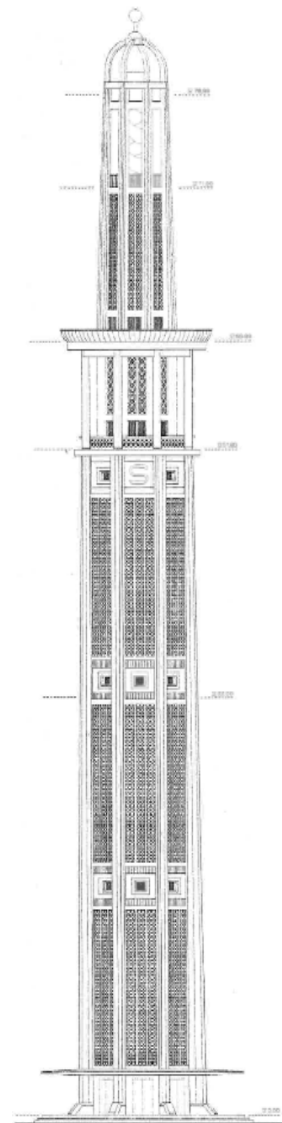
Journée technique AFGC
Grenoble – 31/01/2025

Campagnes de diagnostic des bétons réalisées :



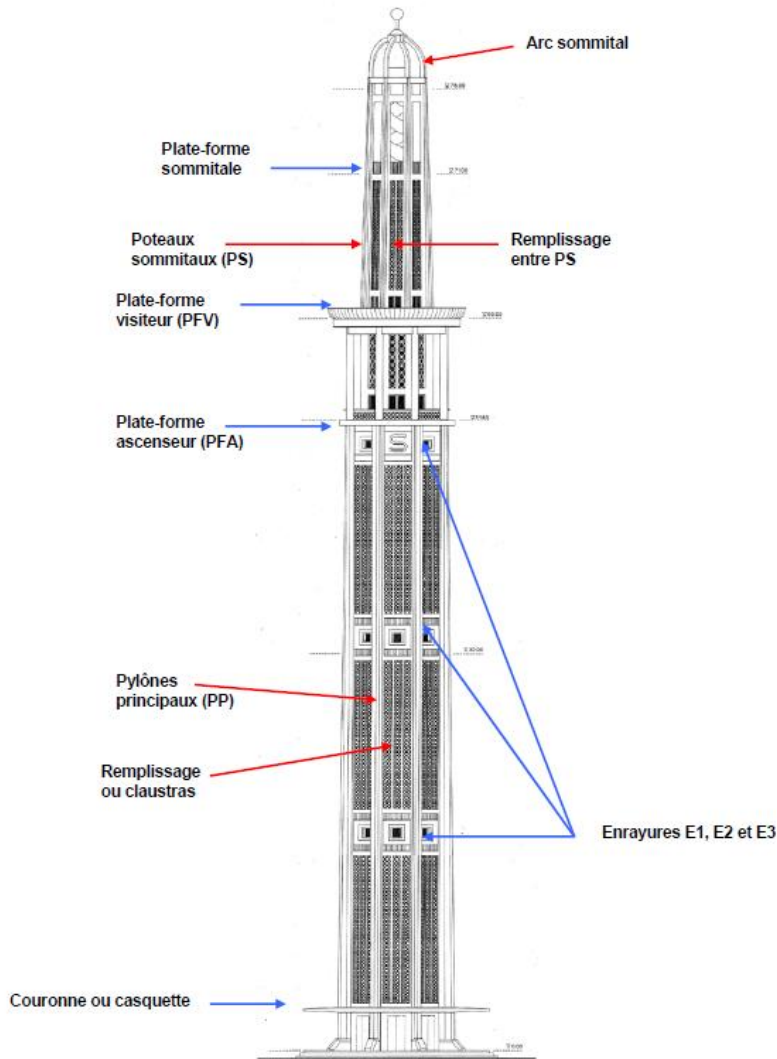
- 1 Vicat -Rapport d'étude texturale et minéralogique - janvier 1996
- 2 LERM - caractérisation chimique et minéralogique des bétons avril - 1996 *
- 3 Etude LERM bilan des alcalins -juin 2011*
- 4 Etude LERM bilan des alcalins additif-octobre 2011*
- VERITAS : diagnostic solidité – juin 2004* annexe EP Tillier
- 5 Etude préalable de monsieur Alain Tiller (ACMH) 2005 + annexes+plan
- 6 ABCYSS Rapport inspection visuelle 2010-2011
- 7 OXAND analyse structurale et stratégie de maintenance- nov 2011 *
- 8 VERITAS ° synthèse assistance technique (rapport de synthèse) + instrumentation - oct 2011
- 9 VERITAS °étude analyse structurale lot 1(rapport de synthèse d'assistance technique) – déc 2011
- 10 Etude complémentaire de monsieur Benjamin Mouton (ACMH) 2012
- 11 GRAHAL étude historique 2003-2005 : vol 1 documents textuels -vol 2 documents iconographiques
- 12 « l'ordre du béton » Cédric Avenier 2015

+ étude complémentaire LERM 2019



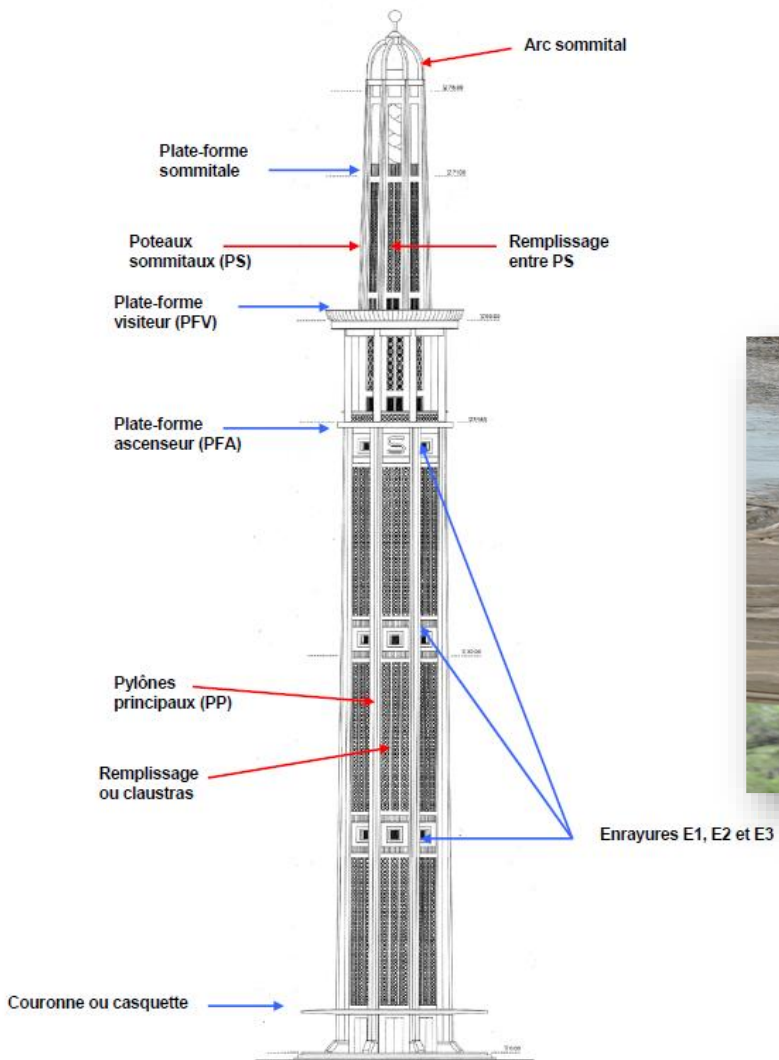
3

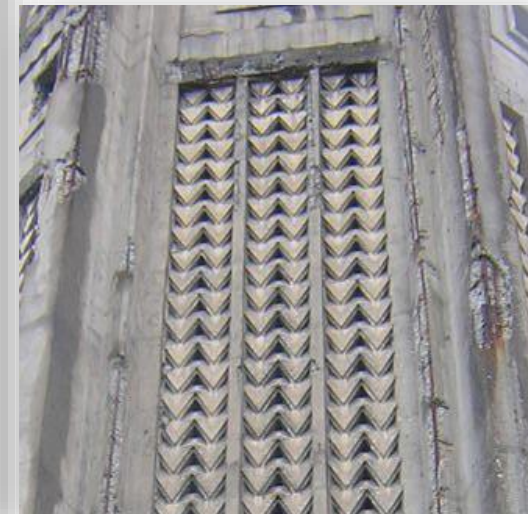
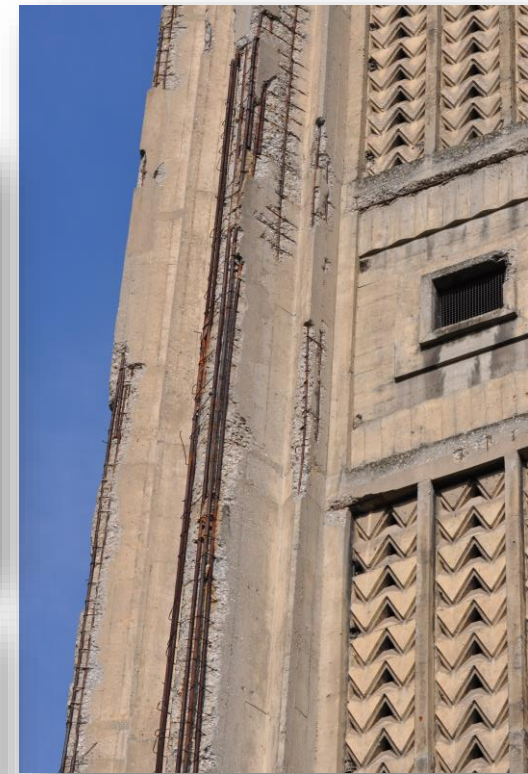
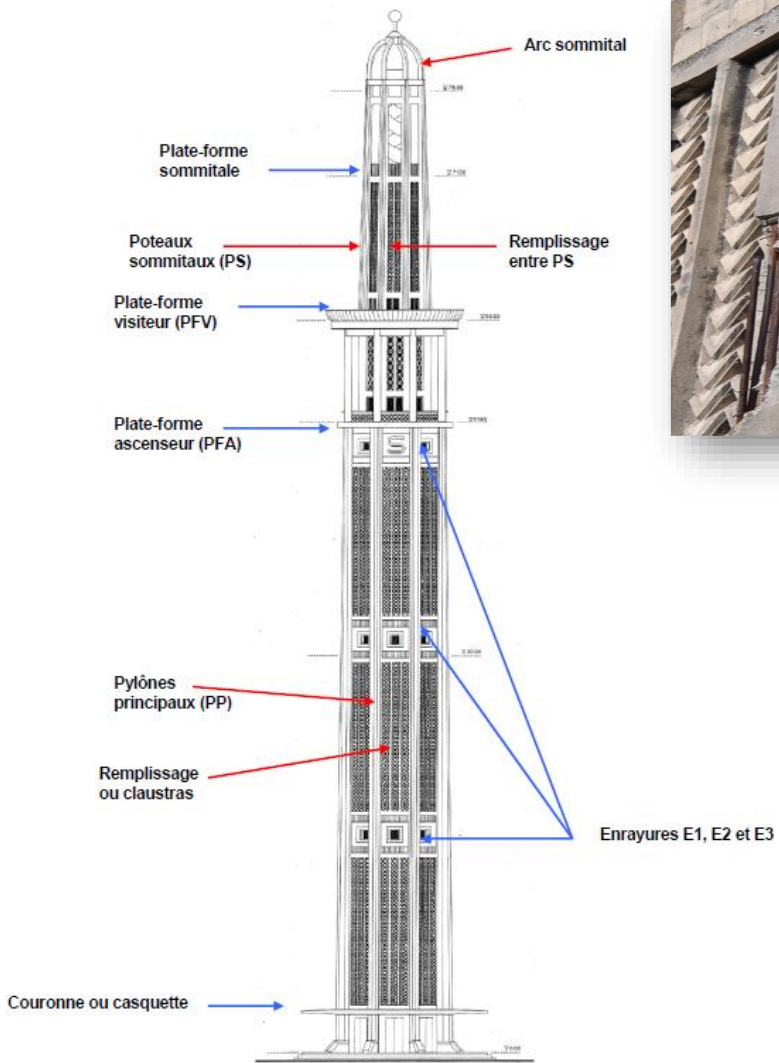
Examen visuel – Etat des pathologies visibles

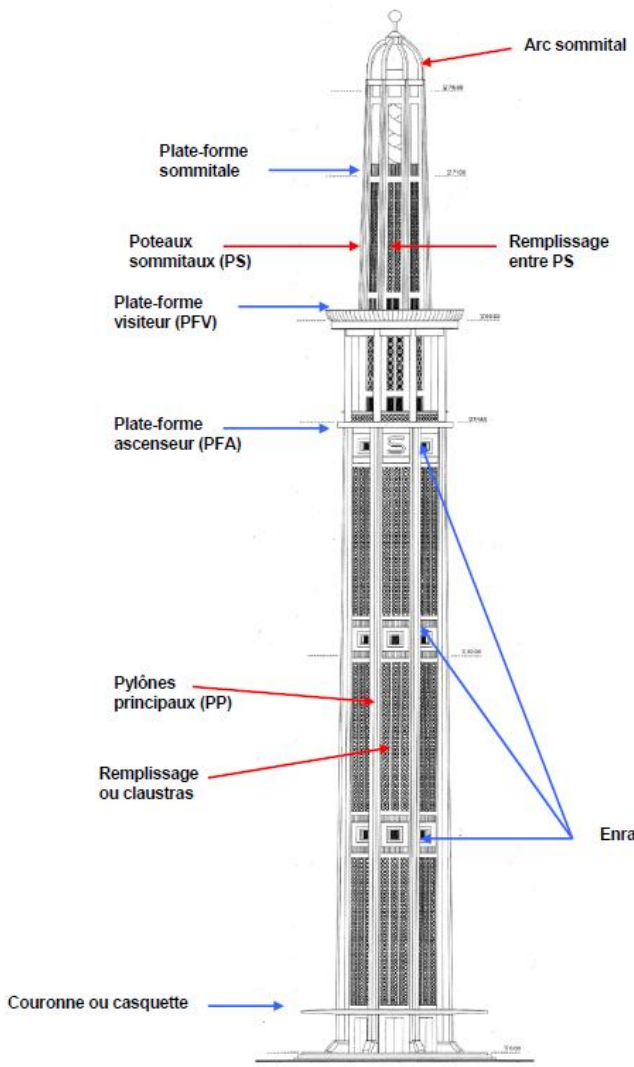


Etat sanitaire :

- dépôts, salissures urbaines (croûtes noires), végétalisation, tags...
- pertes de matière (béton) très importantes
- altérations de surface
- fissuration du béton / désaffleurements / faïençage
- **épaufures**, éclats du béton et **mise à nu des armatures** / diminution voire rupture des armatures
- **majoritairement surfaces extérieures, peu de désordres à l'intérieur**
- **pylônes principaux : éléments les plus dégradés**
=> deux piliers principaux, le pilier D, identifié comme le plus dégradé (SE) et le pilier connexe E, moins dégradé (localement, 75 à 80 % de la surface de ces pylônes est dégradée)
- **claustras** très peu dégradées, excepté en partie haute de la tour
- **poteaux sommitaux, garde-corps et arc sommital** dégradés
- **absence de pathologies structurelles majeures visibles**

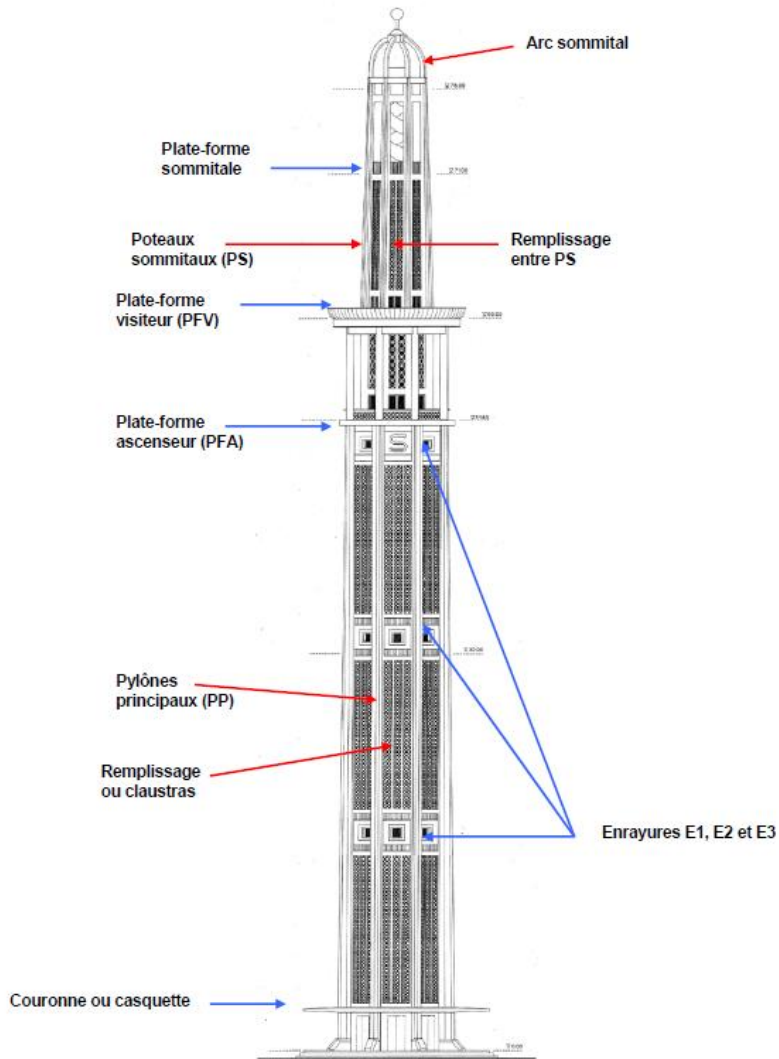








Investigations réalisées sur site



- mesures d'enrobage des armatures
- reconnaissances de ferrailage
- mesures du potentiel de corrosion des armatures, mesures de vitesse de corrosion et de résistivité du béton
- observations de l'état des armatures
- prélèvements d'armatures et carottages béton pour analyses en laboratoire

Mesures d'enrobage par radar

- enrobages extérieurs des **poteaux principaux** compris entre **0 et 20 mm** avec très nombreux aciers apparents
- enrobages des **poteaux principaux** en intérieur de la tour compris entre **0 et 35 mm**
- Indépendance avec altimétrie et orientation de la zone
- enrobages des arcs sommitaux faibles, compris entre **0 et 25 mm**

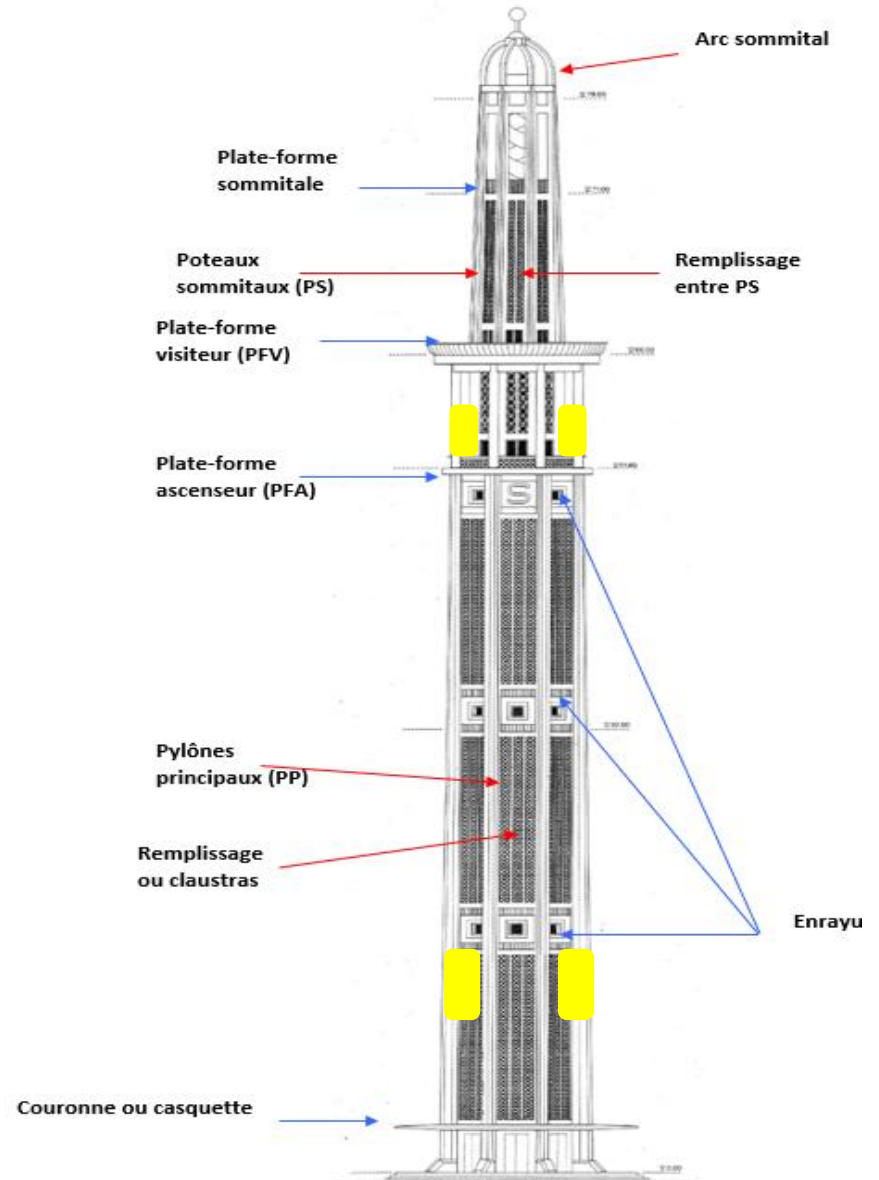
Mesures de corrosion des armatures



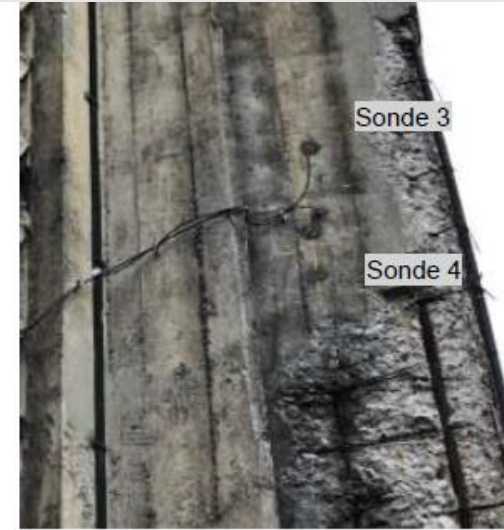
Nombreuses campagnes de mesures du potentiel de corrosion des armatures, résultats contrastés, peu exploitables au final

=> mise en place d'une instrumentation expérimentale de la tour pour un suivi in-situ de la corrosion durant **2 années** par 4 sondes Diamond ® et 2 centrales d'acquisition Captae ® (LERM) :

- ✓ 2 poteaux à environ 10m de haut (poteau SE (C ou D) + W/NW – au-dessus des zones de tests
- ✓ 2 poteaux sommitaux (accès depuis la plateforme ascenseur) en 2 orientations dont une SE



Installation de 8 sondes Diamond ®

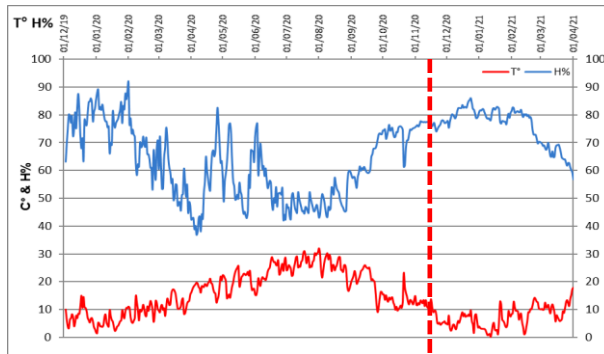


Pour les 8 sondes localisées en 4 zones, ont été mesurés :

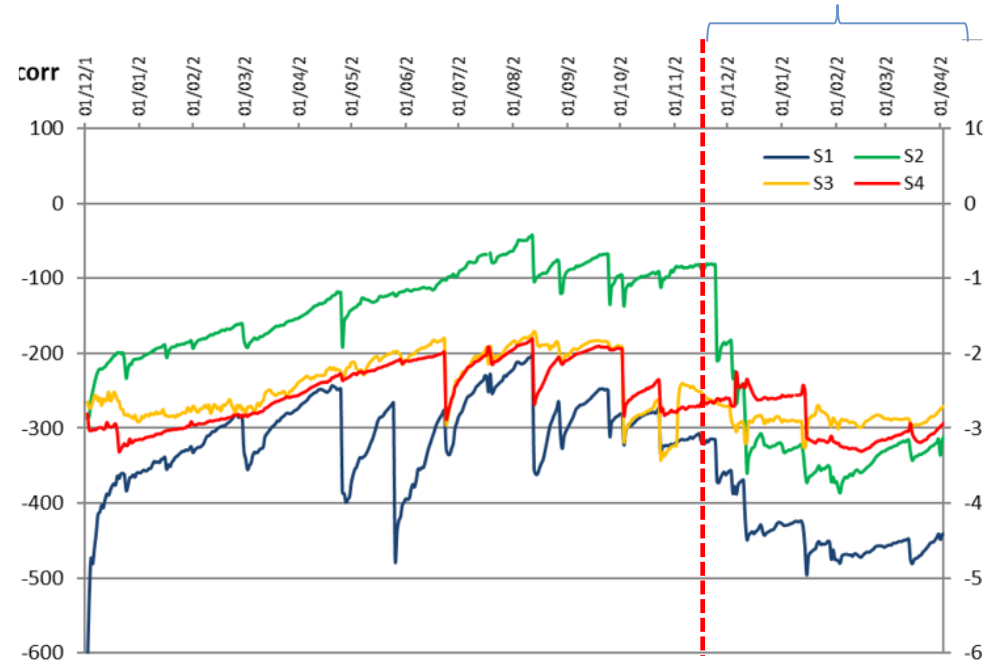
- ✓ Le potentiel de corrosion E_{corr} (mV)
- ✓ La résistivité du béton (Ohm.m)
- ✓ La vitesse de corrosion ($\mu\text{m/an}$)
- ✓ La température ($^{\circ}\text{C}$) et l'humidité relative (%)

Potentiel de corrosion

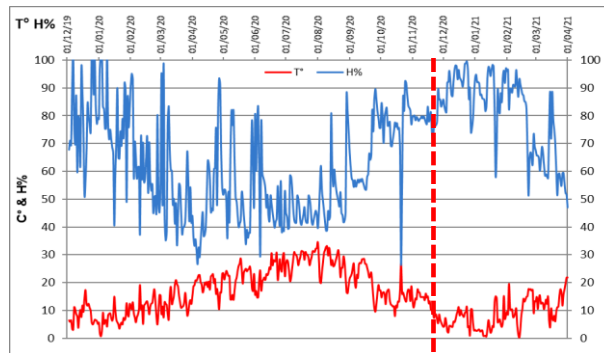
Partie basse de la tour



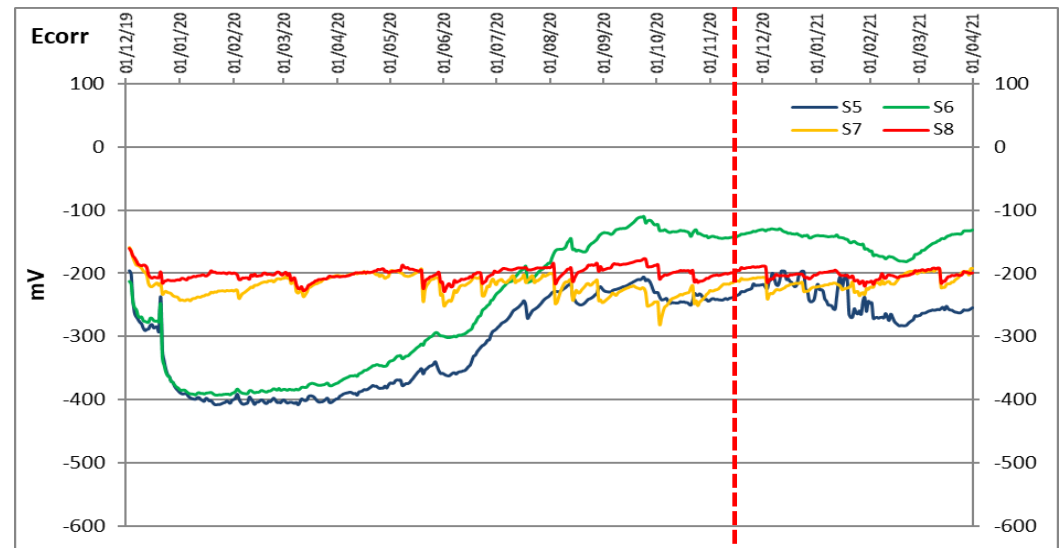
Température - Humidité



Sommet de la tour

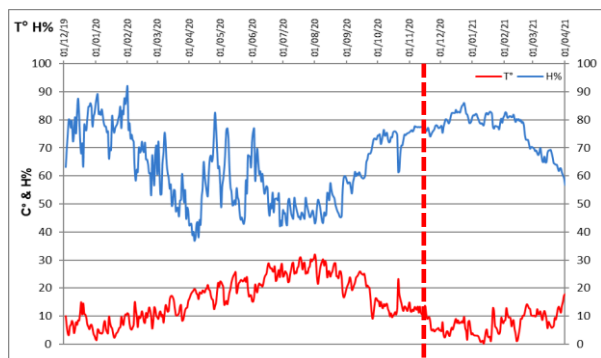


Température - Humidité

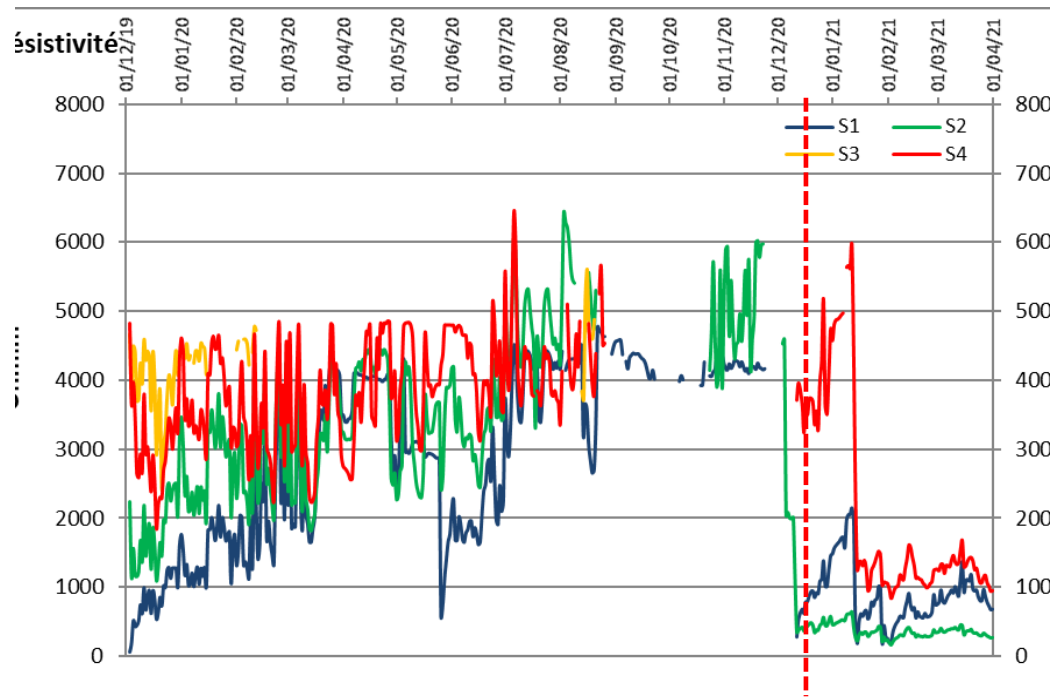


Résistivité

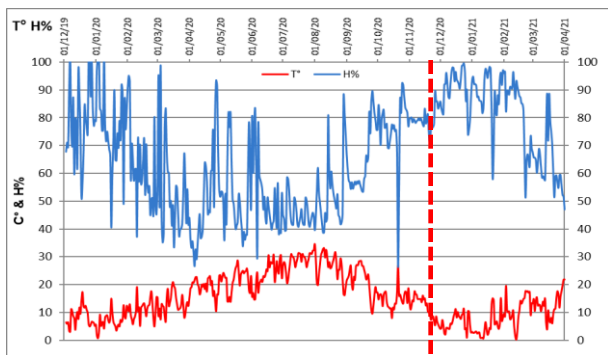
Partie basse de la tour



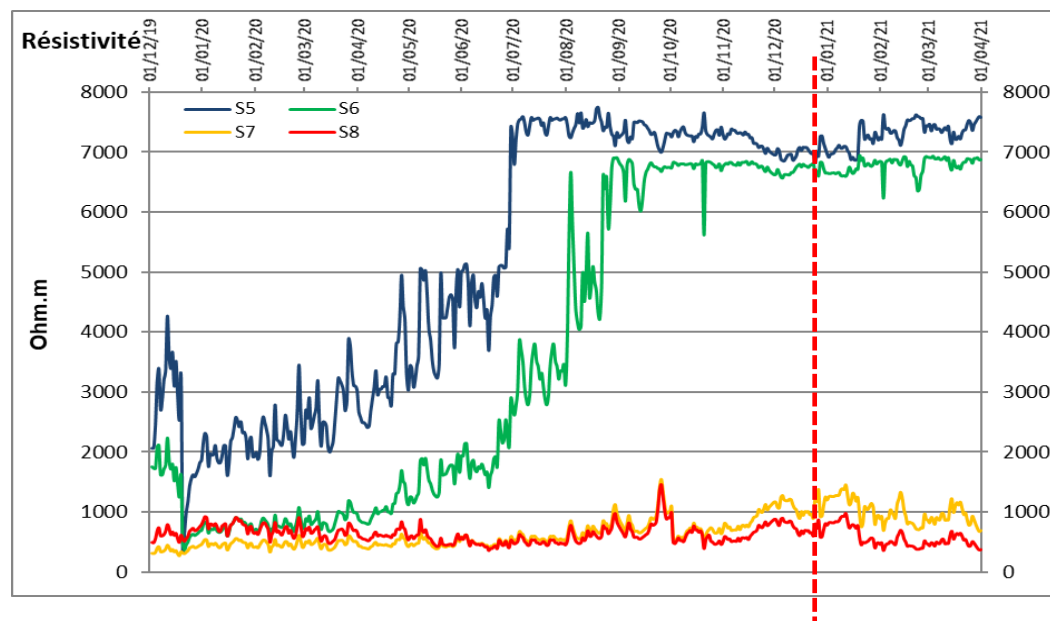
Température - Humidité



Sommet de la tour

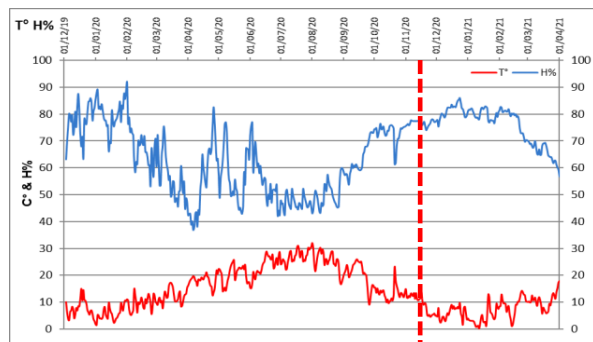


Température - Humidité

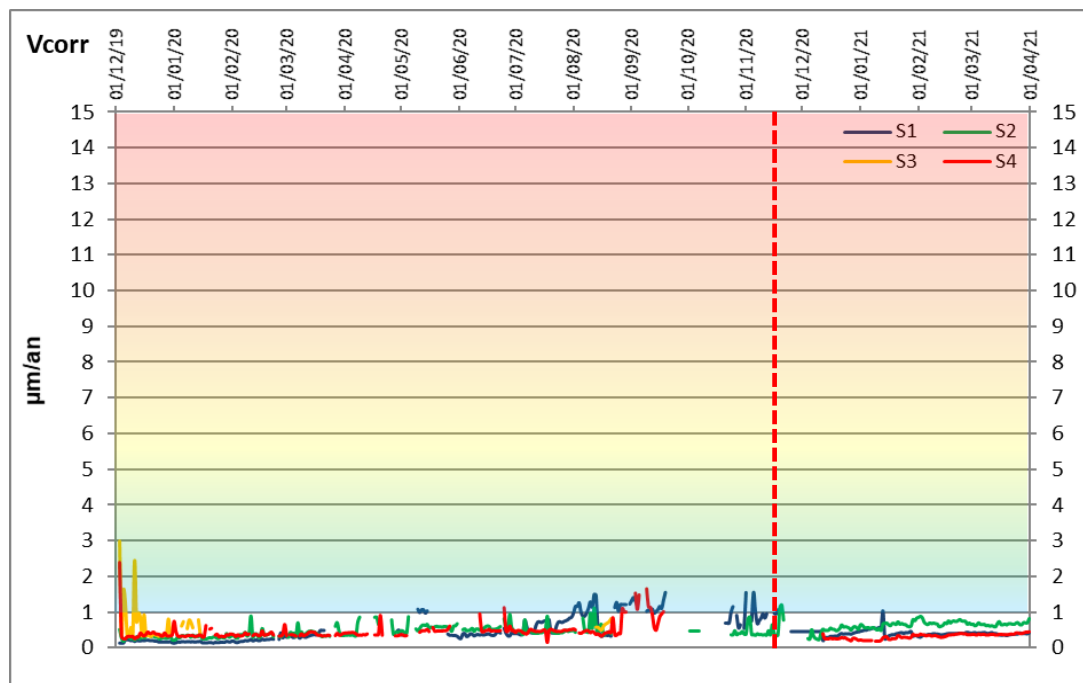


Vitesse de corrosion

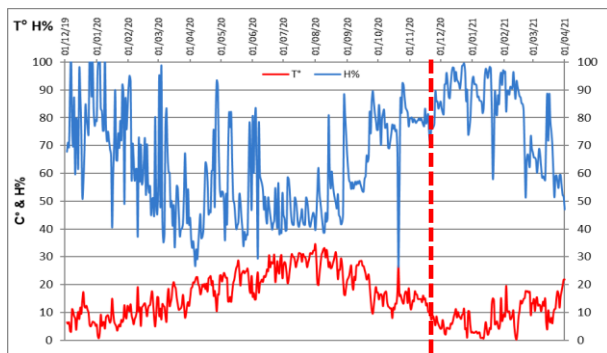
Partie basse de la tour



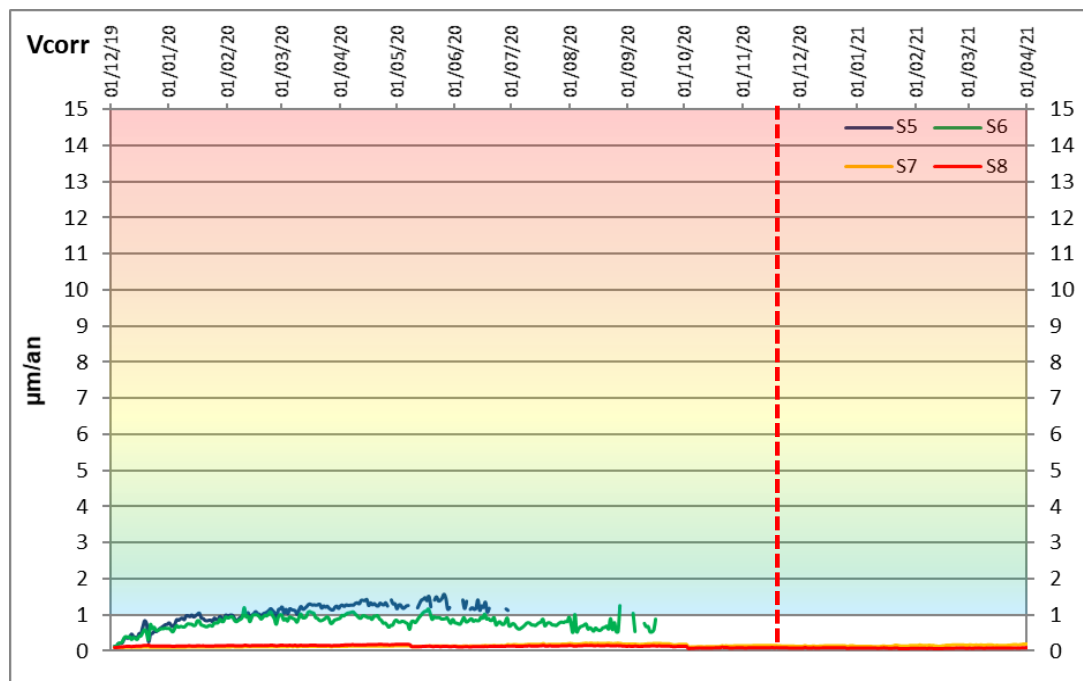
Température - Humidité



Sommet de la tour



Température - Humidité





Conclusion monitoring corrosion

- monitoring corrosion en 4 zones de la tour
- Présence d'une corrosion ralentie mais présente sur des zones non instrumentées
- carbonatation du béton élevée = barrière de protection (béton très résistif > 7000 Ohm.m)
- discontinuités électriques entre armatures probables
- fortes variations d'enrobage et hétérogénéité de la répartition de la corrosion sur la structure
- phénomène de corrosion qui semble plutôt stabilisé bien que très avancé en de multiples zones

La progression de la corrosion reste apparemment très lente dès lors que l'enrobage des armatures est suffisant, en l'absence de défauts ou dégradations locales du béton (nids de graviers, béton lessivé, fissures...), et ce malgré la carbonatation possible du béton : la diffusion de l'oxygène dans le béton est un phénomène qui s'atténue fortement avec le temps et la carbonatation, pouvant devenir quasi-nulle après 50 ans

Prélèvements

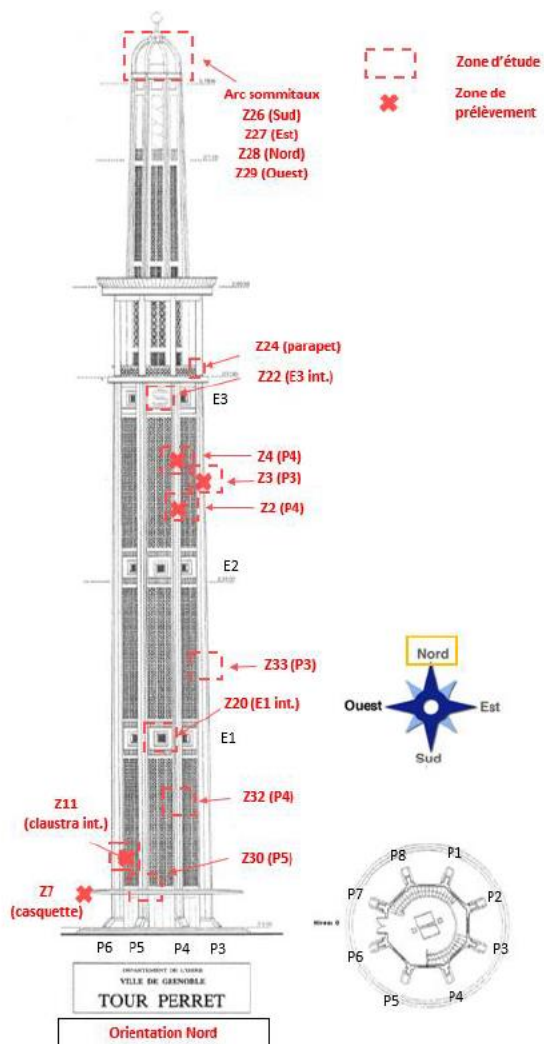


Figure 1 : Plan d'implantation des zones d'étude de la Tour Perret - Orientation Nord

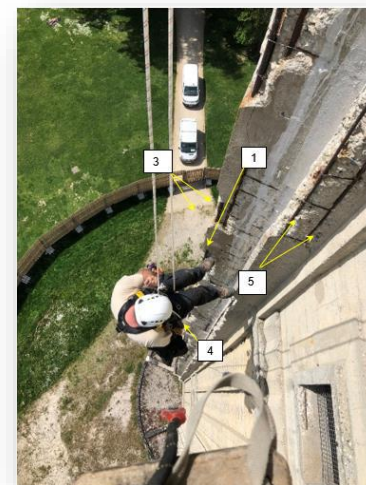
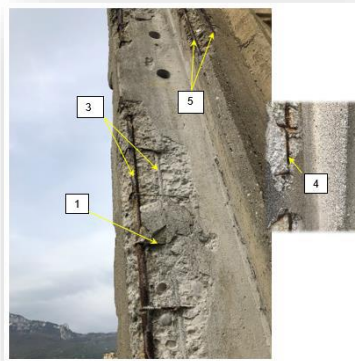




Fig. 1 : Illustration de l'échantillon 44715-1.1



Fig. 5 : Illustration des échantillons 44715-5.1 à 5.3



Fig. 7 : Illustration des échantillons 44715-7.1 à 7.4



Fig. 6 : Illustration des échantillons 44715-6.1 à 6.3

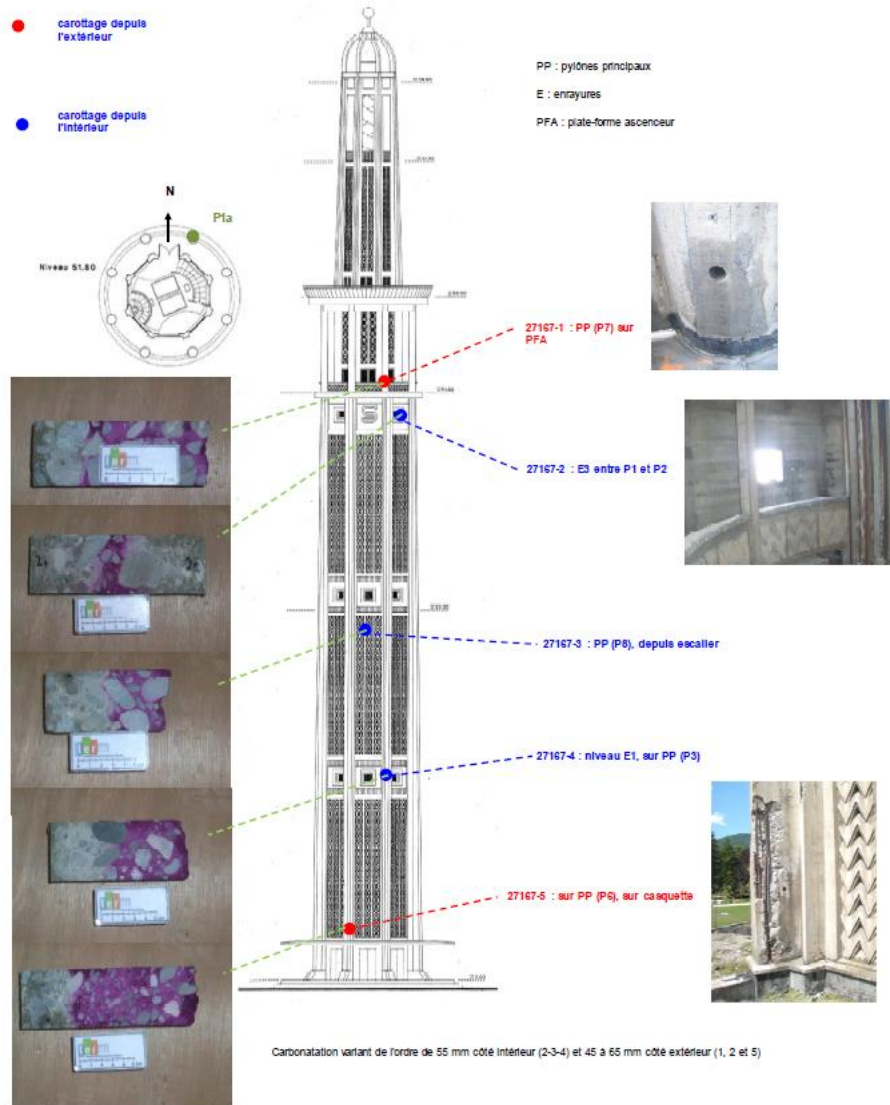


Fig. 3 : Illustration des échantillons 44715-3.1 à 3.3



Fig. 4 : Illustration des échantillons 44715-4.1 à 4.3

Mesures de carbonatation



Mesures de carbonatation

Réf LERM	Localisation	D _{moyen}	D _{max}	Profondeurs des fers dans les bétons
Poteaux Principaux				
44715-3.3	PP3	38 mm	38 mm	
44715-18.1	PP3 intérieur	67 mm	70 mm	rad106 Nombre total de mesures = 48 LERM
44715-19.1	PP4 intérieur	82 mm (Totalement carbonaté)		Rad106 Nombre total de mesures = 51 LERM
Poteau Ascenseur				
44715-12.2	Poteau Ascenseur	43 mm	45 mm	
Claustra				
44715-1.1	Claustra intérieur	100 mm (Totalement carbonaté)		rad215 Nombre total de mesures = 21 LERM
44715-11.2	Claustra intérieur	150 mm (Totalement carbonaté)		
44715-11.3	Claustra intérieur	144 mm (Totalement carbonaté)		enrobage Nombre total de mesures = 56 LERM

- **poteaux principaux côté extérieur :**
profondeur de carbonatation hétérogène,
variant de 0 à 150 mm (carotte totalement carbonatée)
- **poteaux principaux côté intérieur :** 67 mm
à 82 mm (carotte totalement carbonatée)
- **claustras intérieurs :** entre 100 et 150 mm
- **Dalle plate-forme :** 136 mm

Résultats des caractérisations physico-chimiques en laboratoire des bétons

- profondeurs de carbonatation élevées : **45 à 55 mm** (intérieur) et **45 à 65 mm** (extérieur)
 - nature du ciment : portland type **CEM I** (sauf claustra **CEM II A-S**)
 - origine du ciment : carrière de l'Estaque « Le Flamboyant », Marseille (piliers) et ciments Vicat (claustra pré-fabriquées)
 - dosage en ciment : **180 à 485 kg ciment / m³ de béton**
 - E/C : env. **0,4 à 0,8**
 - mélange granulaire alluvionnaire de composition calcaire, métagranite, schistes, micaschistes, quartz, avec charge siliceuse altérée et espèces minérales réactives type silice cryptocristalline et/ou amorphe (silexoïdes)
 - teneurs en alcalins : **1,57 à 9,94 kg/m³ de béton** (claustras en particulier)
 - porosité accessible à l'eau : **13 à 25 %**
 - résistance à la compression Rc : **30 à 45 Mpa** => bétons de classe **C30/37**
-
- teneurs en chlorures totaux : **0,07 à 0,21 %**
 - teneurs en sulfates : **1,79 à 15,25 %**

Réf. LERM	Localisation	Elaancement	Résistance à la compression mesurée (MPa)	Résistance à la compression corrigée (MPa)	Moyenne (MPa)
Poteaux Principaux					
44715-3.1	PP3	1,3	37*	31	31
44715-3.3	PP3	1,3	36	31	
44715-4.1	PP4	1,5	41*	36	33
44715-4.3	PP4	1,4	35*	30	
44715-8.1	PP1	2,0	13	12	14
44715-8.3	PP1	2,0	16*	15	
44715-9.1	PP7	1,2	39*	32	34
44715-9.2	PP7	1,4	41*	36	
44715-9.3	PP7	1,3	40*	34	
Remplissage PS					
44715-5.2	Rempl. PS	1,0	59**	45	39
44715-5.3	Rempl. PS	1,0	43**	33	
Casquette					
44715-7.1	Casquette	1,2	48**	49	52
44715-7.2	Casquette	1,4	63	54	
Enrayure					
44175-10.1	E1	1,1	34*	27	28
44715-10.2	E1	1,5	33*	29	
44715-10.4	E1	1,2	34	28	
Claustra					
44715-11.2	Claustra int	1,5	24	21	21
44715-11.3	Claustra int	1,4	25	21	
Poteau Ascenseur					
44715-12.1	P Ascenseur	2,0	19*	18	19
44715-12.2	P Ascenseur	2,0	21*	20	
44715-12.3	P Ascenseur	1,7	20	18	
Dalle					
44715-14.1	Dalle Asc	1,2	37*	30	29
44715-14.3	Dalle Asc	1,6	31*	27	
44715-15.1	Dalle	<1	42	-	45***
44715-15.2	Dalle	<1	40*	-	
44715-15.3	Dalle	<1	52	-	

Tableau 6 : Résultats des mesures de résistance à la compression sur les échantillons de béton 44715-3.1 ; 3.3 ; 4.1 ; 4.3 ; 5.2 ; 5.3 ; 7.1 ; 7.2 ; 8.1 ; 8.3 ; 9.1 ; 9.2 ; 9.3 ; 10.1 ; 10.2 ; 10.4 ; 11.2 ; 11.3 ; 12.1 ; 12.2 ; 12.3 ; 14.1 ; 14.3 ; 15.1 ; 15.2 ; 15.3.

*le diamètre des échantillons de béton n'étant pas 3 fois supérieur au Dmax des granulats, la résistance à la compression peut être sous-estimée.

**présence d'armatures traversantes

***du au faible élaancement, la valeur de la résistance à la compression n'a pas été corrigée selon la norme NF EN 13791/CN et peut être surestimée.

Caractérisation des aciers doux

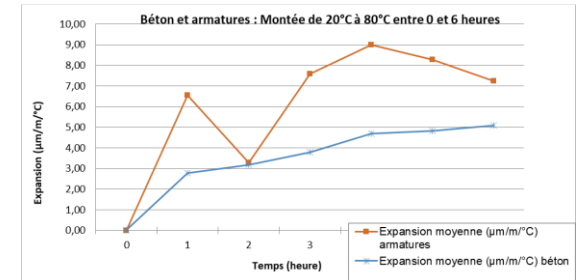
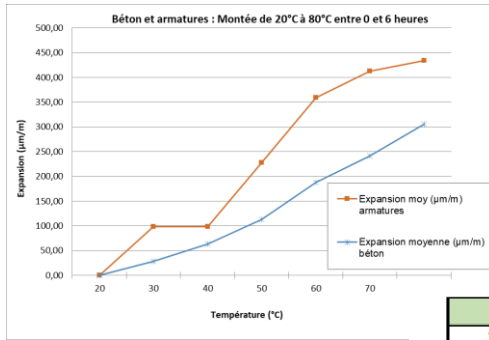
Réf. LERM	Localisation	Diamètre (mm)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Limite élastique $R_{p0,2}$ (MPa)	Allongement (%)	Localisation Rupture
44715-2.1	PP4	25	410 ± 5	303 ± 5	30,5 ± 1	Tiers externe
44715-2.2	PP4	6	389 ± 5	282 ± 5	28,0 ± 1	Tiers externe
44715-6.2	PP2	30	420 ± 5	310 ± 5	33,5 ± 1	Centre
44715-6.3	PP2	6	382 ± 5	286 ± 5	31,0 ± 1	Centre
44715-16.2	Jonction claustra/réparation	6	393 ± 5	312 ± 5	28,0 ± 1	Centre

Réf. LERM	Loc.	C	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Ti	V	Ceq
44715-2.1	PP4	<0,05	0,02 ±0,01	Base	0,37 ±0,01	<0,01	<0,005	0,05 ±0,01	0,040 ±0,005	>0,051	<0,12	<0,02	<0,03	0,10
44715-2.2	PP4	<0,05	0,02 ±0,01	Base	0,37 ±0,01	<0,01	<0,005	0,04 ±0,01	0,027 ±0,005	0,022 ±0,003	<0,12	<0,02	<0,03	0,10
44715-6.2	PP2	<0,05	0,03 ±0,01	Base	0,51 ±0,01	<0,01	<0,005	0,05 ±0,01	>0,041	>0,051	<0,12	<0,02	<0,03	0,14
44715-6.3	PP2	<0,05	0,03 ±0,01	Base	0,32 ±0,01	<0,01	<0,005	0,03 ±0,01	>0,041	0,022 ±0,003	<0,12	<0,02	<0,03	0,09
44715-16.2	Jonc.	<0,05	0,02 ±0,01	Base	0,40 ±0,01	<0,01	<0,005	0,04 ±0,01	0,033 ±0,005	0,023 ±0,003	<0,12	<0,02	<0,03	0,10

Réf. LERM	Localisation	Diamètre (mm)	Ceq	P	S	P + S	Aptitude à la soudabilité
44715-2.1	PP4	25	0,10	0,040 ±0,005	>0,051	>0,091	Médiocre
44715-2.2	PP4	6	0,10	0,027 ±0,005	0,022 ±0,003	0,049	Bonne
44715-6.2	PP2	30	0,14	>0,041	>0,051	>0,092	Médiocre
44715-6.3	PP2	6	0,09	>0,041	0,022 ±0,003	>0,063	Médiocre
44715-16.2	Jonction claustra/réparation	6	0,10	0,033 ±0,005	0,023 ±0,003	0,056	Bonne

Tests de dilatation thermique des aciers

Dilatation différentielle des armatures avec le béton



Evolution du comportement de dilatation du béton et des armatures en montée et chute des températures														
température	20	30	40	50	60	70	80	80	20	20	20	20	20	20
Béton	moyenne	0	28	63	113	188	241	306	0	-216	-264	-278	-271	-260
	(μm/m)	0	28	63	113	188	241	306	306	90	41	28	34	46
Armature	moyenne	0	98	98	228	359	413	434	0	-358	-444	-358	-446	-487
	(μm/m)	0	98	98	228	359	413	434	434	76	-10	76	-12	-53

Tableau 11 : Evolution du comportement de dilatation du béton et des armatures en montée et chute des températures

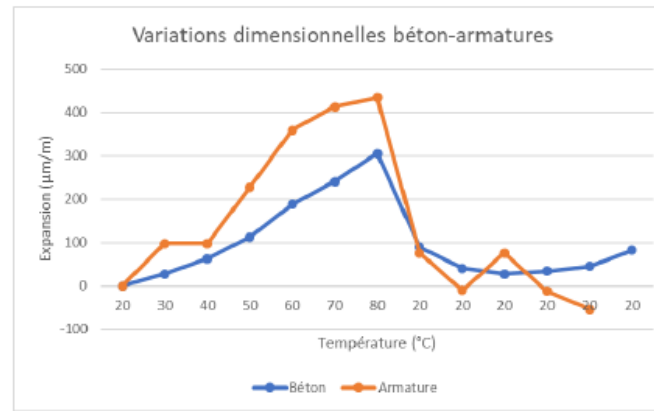
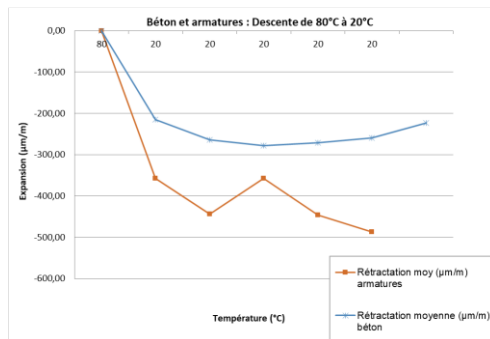
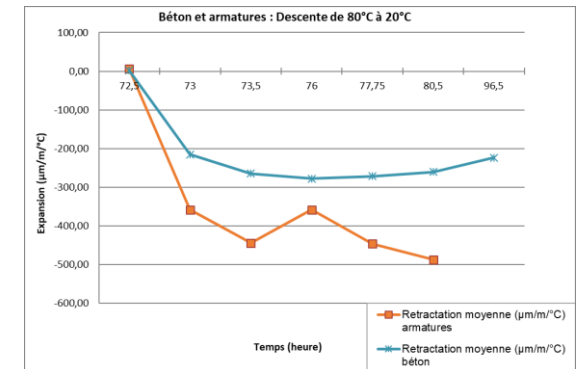


Figure 14 : Courbes représentant les variations dimensionnelles du béton et de l'acier



Tests de dilatation thermique des aciers

Dilatation différentielle des armatures avec le béton

- dilatation des armatures hétérogène
- coefficient de dilatation thermique expérimental α du béton inférieur au coefficient théorique, avec une moyenne approximative proche de $4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ contre une valeur théorique de $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
- coefficient de dilatation thermique expérimental α de l'acier du même ordre de grandeur que le coefficient théorique avec une valeur moyenne approximative de $9 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ contre une valeur théorique de $11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
- **les armatures en acier se dilatent plus que les carottes en béton tant lors de la montée en température que lors de la chute en température, avec des écarts maximaux de l'ordre de $170 \mu\text{m/m}$ en expansion et $230 \mu\text{m/m}$ en rétractation**
- les carottes en béton prennent plus de temps à revenir à leur dimension initiale que les armatures en acier
- la simulation extrême de la « pluie d'été » indique un écart maximal de $330 \mu\text{m/m}$, soit 0.33mm/m : pour des armatures filantes de **10ml**, l'expansion sera au maximum de **3,3 mm**

Examens au microscope optique des bétons

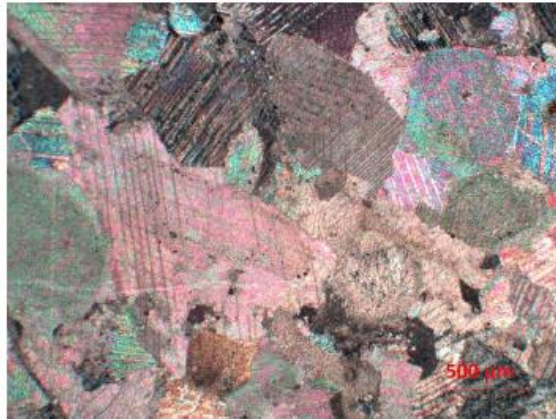


Fig. 16 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 44715-3.2 – Aspect général d'un calcaire sparitique

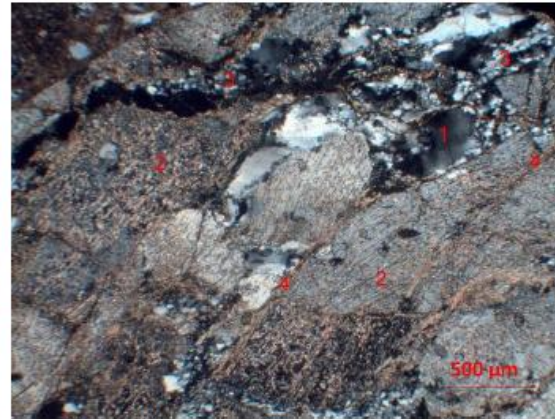


Fig. 17 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 44715-3.2 – Aspect général d'un méta-granite
1 : quartz polygonisé, 2 : feldspaths altérés, 3 : microquartz, 4 : joints argileux

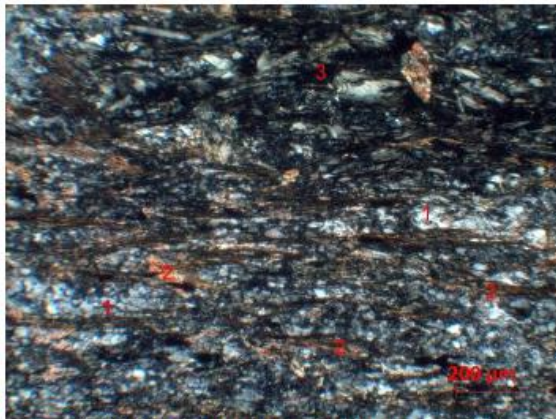


Fig. 18 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 44715-7.4– Détail d'un micaschiste à chlorite
1 : feuillets de quartz, 2 : feuillets de micas, 3 : feuillets chloriteux

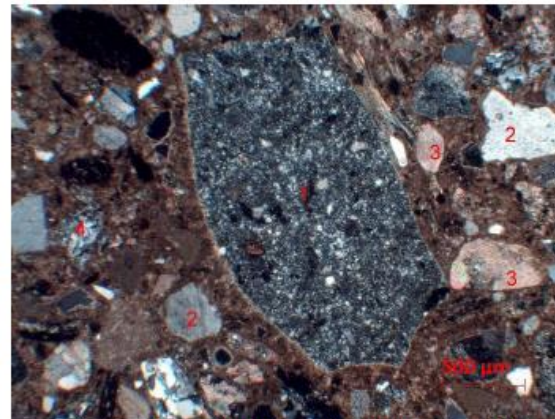


Fig. 19 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 44715-7.4– Aspect général du sable
1 : siliceux, 2 : quartz, 3 : calcaire, 4 : fragment de schiste quartzeux

Examens au microscope optique des bétons

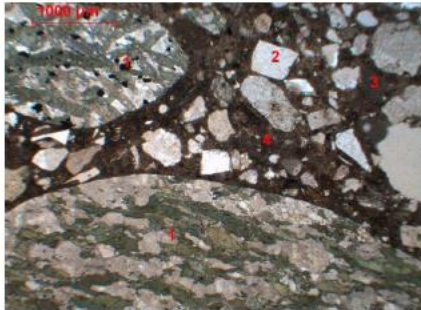


Fig. 16 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-2 (LPNA)

Aspect des granulats

- 1 = schiste à amphibole
- 2 = quartz
- 3 = calcaire
- 4 = matrice cimentaire

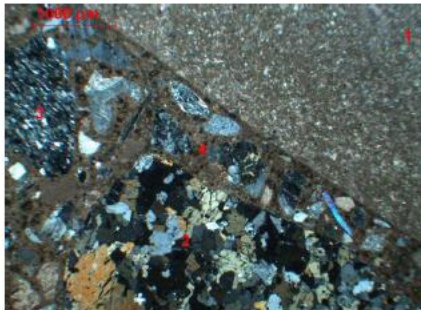


Fig. 17 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-2 (LPA)

Aspect général de l'échantillon

- 1 = granulat calcaire
- 2 = amphibolite
- 3 = schiste chloriteux
- 4 = matrice cimentaire

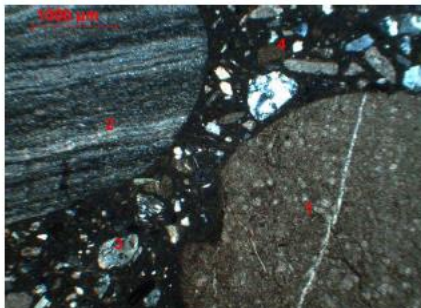


Fig. 18 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-3 (LPA)

Aspect général de l'échantillon

- 1 = gravillon calcaire
- 2 = schiste
- 3 = schiste chloriteux
- 4 = particule calcaire

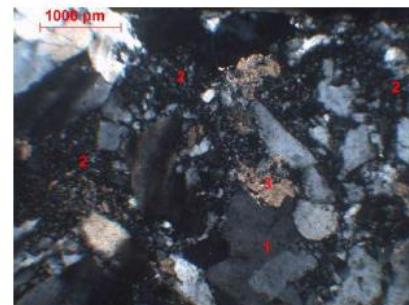


Fig. 13 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-1 (LPA)

Détail d'un granulat riche en silice cryptocrystalline

- 1 = quartz
- 2 = silice cryptocrystalline
- 3 = calcite

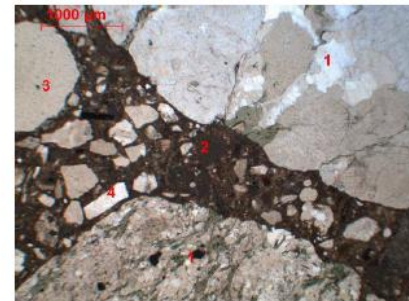


Fig. 14 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-1 (LPNA)

Aspect général du béton

- 1 = schiste chloriteux
- 2 = calcaire
- 3 = bulle d'air
- 4 = particule de quartz

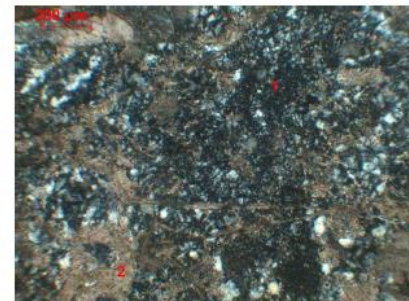


Fig. 15 : Microscopie optique en lumière transmise.
Echantillon 27167-1 (LPA)

Aspect d'un calcaire silicifié

- 1 = silice amorphe et/ou cryptocrystalline
- 2 = calcite

Examens au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des bétons

- matrice carbonatée en profondeur
- localement cristallisation de gypse en surface et d'ettringite fibreuse et/ou massive non expansive
- absence de cristallisations pathogènes associées à des fissures
- absence de gels d'alcali-réaction

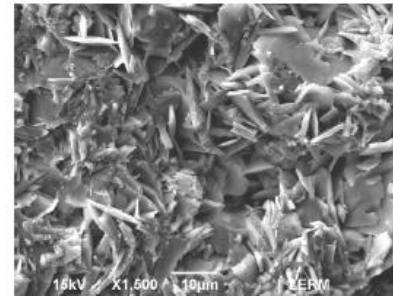


Fig. 31 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 44715-15.3
Détail des cristallisations de sulfates de calcium en surface de l'enduit

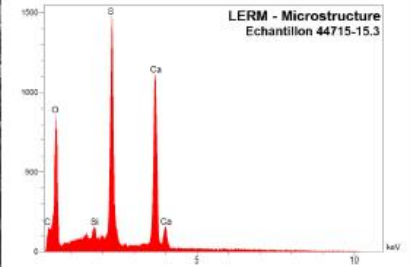


Fig. 32 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie de la figure précédente

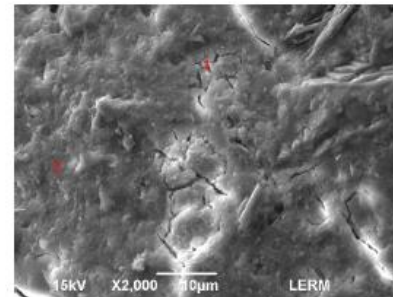


Fig. 33 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 44715-15.3
Détail des amas localisés d'ettringite massive (1) dans la matrice de l'enduit (2) en frange superficielle

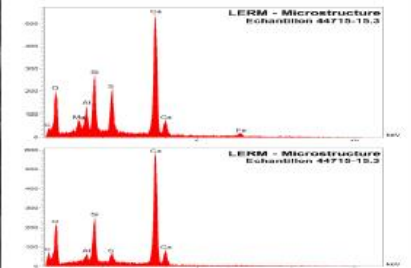


Fig. 34 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie aux points 1 et 2 de la figure précédente

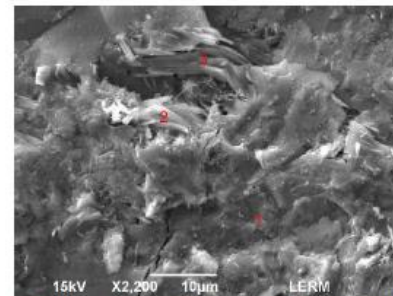


Fig. 35 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 44715-15.3
Détail de la matrice de l'enduit à cœur
1 : C-S-H, 2 : monosulfates de calcium, 3 : portlandite

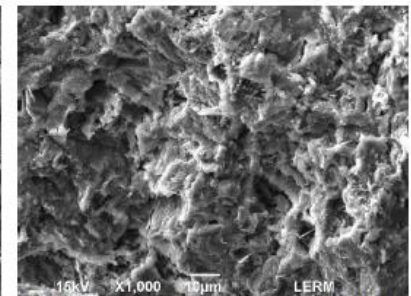


Fig. 36 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 44715-15.3
Détail de la microstructure microporeuse de la matrice du support

En conclusion...

Bétons de qualité globalement satisfaisante hors zones corrodées

Multiples éclatements et épaufrures, dégradations localement avancées

Absence de pathologies physico-chimiques prononcées

Carbonatation importante généralisée

Enrobages très insuffisants des armatures

Armatures globalement fortement corrodées selon zones (piliers et cadres des piliers en particulier) – Corrosion apparemment stabilisée

=> Hypothèse retenue d'une dégradation accentuée des piliers de la tour, en sus du phénomène de corrosion général, suite à la poussée au vide des fers longitudinaux des piliers, une fois libérés de la retenue des cadres, fortement corrodés et sous-dimensionnés

Effet aggravé par une dilatation différentielle entre armatures - béton et le basculement de la tour

Merci pour votre attention



setec