



Réf. : **A19 00753** | Indice : **A** | Date : **24/02/2020**

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

SITE ROCKEFELLER - CHEMINÉE

DIAGNOSTIC

Identification du document

<i>Client</i>	UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1			
<i>Ouvrage</i>	SITE ROCKEFELLER - CHEMINÉE			
<i>Intitulé</i>	DIAGNOSTIC			
<i>Référence</i>	<i>Nature</i>	<i>Indice</i>	<i>Nb pages</i>	<i>Nb annexes</i>
A19 00753	Diagnostic	A	22	3

Liste des annexes

Annexe 1	Plans
Annexe 2	Reportage photographique
Annexe 3	Méthodologie des essais en laboratoire

Suivi des indices

<i>Indice</i>	<i>Date</i>	<i>Modifications</i>	<i>Rédaction</i>	<i>Vérification</i>
A	24/02/2020	1 ^{ère} édition	K. CANDOTTI A. BACHELIER	A. BACHELIER

Diffusion

<i>Entité</i>	<i>Destinataire</i>	<i>Nombre et type d'exemplaires</i>
Université Claude Bernard Lyon 1	Monsieur D. LAMBERMONT Monsieur D. TINE	1 exemplaire, version PDF

SOMMAIRE

I - OBJET.....	4
I.1 - CONTEXTE.....	4
I.2 - CONTENU DE LA MISSION	4
I.2.1 - Essais sur site	4
I.2.2 - Rapport.....	4
I.3 - CONDITIONS D'INTERVENTION	4
II - DONNÉES D'ENTRÉE	4
III - DESCRIPTION DE L'OUVRAGE.....	5
III.1 - LOCALISATION DE LA CHEMINÉE	5
III.2 - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE	6
IV - INVESTIGATIONS IN SITU	7
IV.1 - DIAGNOSTIC	7
IV.1.1 - Tête de Cheminée.....	7
IV.1.2 - Milieu de Cheminée.....	9
IV.1.3 - Pied de Cheminée.....	11
IV.2 - DESCRIPTION DES DÉSORDRS.....	13
V - RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE.....	14
V.1 - LISTE DES ESSAIS	14
V.2 - RÉPARTITION DES ESSAIS	14
V.3 - RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SUR BÉTON	15
V.4 - MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU	15
V.5 - PROFONDEUR DE CARBONATATION	16
V.6 - ESTIMATION DE LA TENEUR EN LIANT HYDRAULIQUE.....	16
V.7 - DOSAGE DES IONS HYDROSOLUBLES	17
VI - SYNTHESE.....	19
VI.1 - DU DIAGNOSTIC DES MATÉRIAUX	19
VI.1.1 - Concernant la zone en tête de cheminée :.....	19
VI.1.2 - Concernant la zone au milieu de la cheminée :	19
VI.1.3 - Concernant la zone en pied de cheminée :	20
VI.1.4 - Profils de pollution :	20
VI.2 - DES DÉSORDRS VISIBLES.....	20
VI.3 - CONCLUSION	21
VII - PRECONISATIONS	21

I - OBJET

I.1 - Contexte

Une cheminée désaffectée est présente sur le site Rockefeller de l'Université Claude Bernard Lyon 1 dans le 8^{ème} arrondissement de Lyon. Le maître d'ouvrage souhaite s'assurer de son état au travers d'un diagnostic structure.

I.2 - Contenu de la mission

I.2.1 - Essais sur site

La mission comprend les investigations suivantes. Chaque groupe d'investigation a été effectué en trois hauteurs de la cheminée : en tête, à mi-hauteur et en pied de cheminée.

- Relevé géométrique des parties extérieures
- Détection au radar des aciers verticaux et horizontaux
- Sondage destructif pour mettre en évidence les aciers présents.
- Carottage traversant pour mesurer l'épaisseur de la paroi et déterminer sa composition.

I.2.2 - Rapport

Le présent rapport comprend :

- La description de l'ouvrage,
- La synthèse des observations et désordres relevés,
- Les résultats d'investigation in situ,
- Les résultats des essais en laboratoire,
- Un avis sur l'état des matériaux et l'état structurel de la cheminée,
- Une proposition de travaux de réparation.

I.3 - Conditions d'intervention

Une équipe de la société SIXENSE Concrete constituée de K. CANDOTTI et G. CHAT, techniciens supérieurs, B. WATRIPONT, ingénieur en formation et A. BACHELIER, Ingénieur d'étude est intervenue du 21 au 22 aout 2019.

II - DONNÉES D'ENTRÉE

Aucun document n'est disponible dans le dossier d'ouvrage.

III - DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

III.1 - Localisation de la cheminée

La cheminée se trouve sur le site de l'université de médecine Claude Bernard Lyon 1, dans le 8^{ème} arrondissement de Lyon.

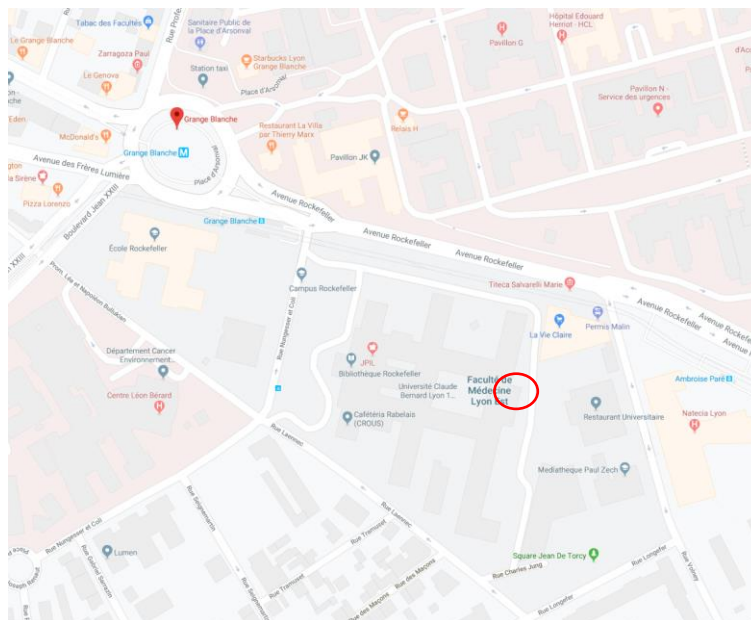


Figure 1 : Localisation de la cheminée (Google Maps)

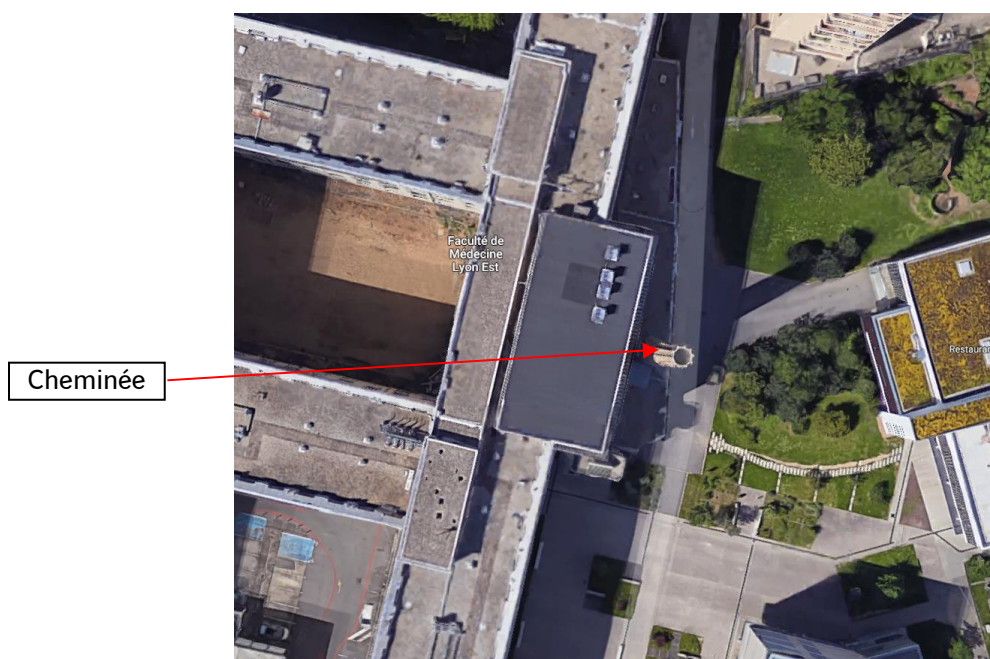


Figure 2 : Localisation de la cheminée (Google Maps)

III.2 - Description de la structure

Voir plans en Annexe 1.

Voir Reportage photographique en Annexe 2.

La hauteur de la cheminée est d'environ 36 m. Elle est constituée d'éléments préfabriqués en béton armé, en forme de « clé » comportant une partie cloison (épaisseur 13 cm) et une partie formant les raidisseurs verticaux. Chaque élément mesure 25 cm de haut. La cheminée en compte 119. Les éléments sont jointoyés entre eux au mortier. Les éléments d'une même rangée sont posés de telle sorte que les joints verticaux sont alternés entre les rangées superposées (photo 2).

De plus, 20 cerclages métalliques sont installés sur l'ensemble de la hauteur, tous les 6 rangs d'éléments préfabriqués, à l'exception des cerclages supérieur et inférieur qui sont situés à 5 éléments préfabriqués des extrémités haute et basse (photo 1).

La date de construction n'est pas connue.

Les informations transmises font état d'une hauteur initiale de la cheminée plus haute qu'aujourd'hui.

Une partie de la tête de la cheminée a été démolie et des renforts par cerclages métalliques mis en œuvre à cette occasion.

IV - INVESTIGATIONS IN SITU

IV.1 - Diagnostic

L'implantation des investigations est présentée en Annexe 1

IV.1.1 - Tête de Cheminée

IV.1.1.1 - Mesures d'enrobages

Profondeur (mm)	Aciers Horizontaux		
	Nombre d'aciers	Nombre cumulé	% cumulé
0-10	0	0	0%
10-20	2	2	20%
20-30	6	8	80%
30-40	2	10	100%
40-50	0	10	100%
50-60	0	10	100%
60-80	0	10	100%
>80	0	10	100%
Nombre total	10		
Enrobage min (mm)	18		
Enrobage moy (mm)	26		
Profondeur de carbonatation (mm)	112		

Figure 3 : Mesure des enrobages des armatures (cloisons)

Les mesures ont été réalisées sur les faces extérieures des cloisons des éléments préfabriqués.
La profondeur de carbonatation est supérieure à l'enrobage moyen des armatures sur l'ensemble de la zone investiguée.

IV.1.1.2 - Mesures des potentiels d'électrodes

	Cloison					Raidisseur		Cloison				
m	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65
0,00	-405	-405	-405	-395	-390	-355	-375	-365	-395	-395	-385	-400
0,15	-400	-400	-405	-310	-400	-365	-390	-375	-400	-405	-400	-395
0,30	-315	-325	-360	-375	-375	-395	-385	-400	-415	-415	-400	-385
0,45	-320	-340	-370	-370	-370	-370	-390	-435	-420	-415	-390	-370
0,60	-375	-370	-370	-370	-375	-390	-400	-420	-420	-410	-370	-375
0,75	-380	-375	x	-380	-375	-395	-410	-425	-410	-400	-385	-375

x	Sondage de connexion aux armatures
---	------------------------------------

Echelle de potentiels d'électrodes Cu/CuSO ₄ (mV)																
150	100	50	0	-50	-100	-150	-200	-250	-300	-350	-400	-450	-500	-550	-600	-650

Valeurs des mesures de potentiels	Min (mV)	Max (mV)	Ecart (mV)
	-435	-310	125
Observations	Les potentiels mesurés sont homogènes et mettent en évidence une zone anodique sur l'ensemble de la zone investiguée.		

IV.1.1.3 - Sondage



Figure 4 : Sondage de reconnaissance sur armatures en partie courante d'une cloison

État des aciers : corrosion avec forte perte de section allant jusqu'à la dissolution.

IV.1.2 - Milieu de Cheminée

IV.1.2.1 - Mesures d'enrobages

Profondeur (mm)	Aciers Horizontaux		
	Nombre d'aciers	Nombre cumulé	% cumulé
0-10	0	0	0%
10-20	0	0	0%
20-30	6	6	60%
30-40	3	9	90%
40-50	0	9	90%
50-60	1	10	100%
60-80	0	10	100%
>80	0	10	100%
Nombre total	10		
Enrobage min (mm)	24		
Enrobage moy (mm)	33		
Profondeur de carbonatation (mm)	115		

Figure 5 : Mesure des enrobages des armatures (cloisons)

Les mesures ont été réalisées sur les faces extérieures des cloisons des éléments préfabriqués.
La profondeur de carbonatation est supérieure à l'enrobage des armatures sur l'ensemble de la zone investiguée.

IV.1.2.2 - Mesures des potentiels d'électrodes

	Cloison					Raidisseur		Cloison				
m	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65
0,00	-430	-415	-405	-390	-330	-350	-400	-425	-415	-415	-420	-420
0,15	-430	-415	-400	-380	-335	-355	-390	-415	-415	-410	-415	-415
0,30	-420	-415	-405	-385	-310	-360	-385	x	-435	-425	-420	-415
0,45	-420	-415	-410	-385	-335	-370	-405	-435	-425	-415	-410	-410
0,60	-420	-420	-425	-400	-350	-380	-410	-415	-415	-415	-415	-410
0,75	-425	-425	-425	-415	-370	-390	-420	-420	-415	-415	-415	-410

x	Sondage de connexion aux armatures
---	------------------------------------

Echelle de potentiels d'électrodes Cu/CuSO ₄ (mV)																
150	100	50	0	-50	-100	-150	-200	-250	-300	-350	-400	-450	-500	-550	-600	-650

Valeurs des mesures de potentiels	Min (mV)	Max (mV)	Ecart (mV)
	-435	-310	125
Observations	Les potentiels mesurés sont homogènes et mettent en évidence une zone anodique sur l'ensemble de la zone investiguée.		

IV.1.2.3 - Sondage



Figure 6 : Sondage de connexion sur armature
État des aciers : corrosion par piqûres sans perte de section

IV.1.3 - Pied de Cheminée

IV.1.3.1 - Mesures d'enrobages

Profondeur (mm)	Aciers Horizontaux		
	Nombre d'aciers	Nombre cumulé	% cumulé
0-10	0	0	0%
10-20	0	0	0%
20-30	3	3	33%
30-40	5	8	89%
40-50	1	9	100%
50-60	0	9	100%
60-80	0	9	100%
>80	0	9	100%
Nombre total	9		
Enrobage min (mm)	25		
Enrobage moy (mm)	35		
Profondeur de carbonatation (mm)	34		

Figure 7 : Mesure des enrobages des armatures (cloisons)

Les mesures ont été réalisées sur les faces extérieures des cloisons des éléments préfabriqués. La profondeur de carbonatation est inférieure à l'enrobage moyen des armatures sur la zone investiguée, cependant un tiers des armatures se situent dans une zone carbonatée.

IV.1.3.2 - Mesures des potentiels d'électrodes

	Cloison				Raidisseur		Cloison					
m	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	
0,00	-185	-140	-135	-155	-135	-150	-140	-135	-145	-120	-185	
0,15	-195	-150	-120	-125	-125	-135	-140	-145	-160	-190	-150	
0,30	-175	-150	-125	-115	-120	-135	-145	-150	-185	-205	-125	
0,45	-170	-135	-130	-120	-115	-130	-145	-155	-185	-210	-120	
0,60	-165	-125	-120	-125	-95	-120	-155	-160	-175	-190	-95	
0,75	-125	-105	-75	-90	-95	-120	-160	-165	-170	-190	-120	

x	Sondage de connexion aux armatures
---	------------------------------------

Echelle de potentiels d'électrodes Cu/CuSO ₄ (mV)																
150	100	50	0	-50	-100	-150	-200	-250	-300	-350	-400	-450	-500	-550	-600	-650

Valeurs des mesures de potentiels	Min (mV)	Max (mV)	Ecart (mV)
	-210	-75	135
Observations	Les potentiels mesurés sont homogènes et ne mettent pas en évidence de zone anodique sur la zone investiguée.		

IV.1.3.3 - Sondage



Figure 8 : Sondage de connexion sur armature
État des aciers : sains

IV.2 - Description des désordres

Voir Reportage photographique en Annexe 2.

La cheminée est dans un mauvais état général apparent. Les principaux désordres sont :

- Fractures et fissures le long des raidisseurs verticaux sur de grandes hauteurs (photos 3 et 4), en particulier sur le quart inférieur où les fissures sont visibles sur toute la périphérie de la cheminée,
- Fractures et fissures sur le parement des cloisons (photo 5),
- Éclats avec aciers apparents sur les cloisons des éléments préfabriqués, de taille importante notamment en partie haute de la cheminée (photos 6-7-8),
- Présence généralisée de petits éclats avec aciers apparents sur les raidisseurs verticaux (photo 4),
- Érosion ou lacune du mortier de jointoiment entre éléments préfabriqués (photos 9),
- Présence généralisée d'amorce d'éclats sur les cloisons (photo n°10),
- Boulonnerie des cerclages corrodée (photo 11),
- Dégradation du revêtement de protection et corrosion (ponctuel) des cerclages métalliques (photo 12 et 13),
- Présence ponctuelle de réparation par ajout de plats métalliques soudés sur les cerclages métalliques (photo 14),
- Défaut de contact ponctuel des cerclages métalliques avec la structure (photo n°15).

Outre les désordres traduisant le vieillissement des matériaux de la structure (éclats de béton et armatures corrodées), le défaut principal concernant la cheminée est la présence des fractures verticales continues le long des nervures, sur toute la périphérie. Ce désordre, qui modifie le comportement mécanique de l'ouvrage car il supprime le monolithisme du fût de cheminée, est de nature à remettre en question la stabilité de l'ouvrage. Il est probable que ce désordre soit ancien et que les cerclages métalliques aient été disposés comme confortement.

V - RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

V.1 - Liste des essais

Il a été réalisé les essais suivants sur les prélèvements réceptionnés au laboratoire :

- Mesure de la résistance à la compression (selon la norme NF EN 12390-3),
- Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau (selon la norme NF P 18459),
- Mesure de la profondeur de carbonatation de la pâte de ciment (selon la norme NF EN 14630),
- Dosage des ions chlorures et sulfates solubles dans l'eau (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).
- Estimation de la teneur en liant hydraulique (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).

V.2 - Répartition des essais

Zone	Échantillon	Dimensions échantillon Ø x L (mm)	Profondeurs d'essais (mm)				
			Rc*	Carbo*	D/P*	D/C*	Cl / S Libres*
Haut	C1	84 x 170	/	/	20 - 80	/	0 - 10 10 - 20 20 - 40 40 - 60 60 - 80
	C2	84 x 190	95 - 184	/	/	/	/
Milieu	C3	79 x 115	0 - 106	/	/	/	/
	C4	79 x 115	/	0 - 115	30 - 90	/	/
	C5	79 x 115	/	/	/	/	0 - 10 20 - 40 50 - 70 80 - 100 105 - 115
Bas	C6	79 x 140	0 - 129	/	/	/	/
	C7	79 x 135	/	/	/	/	0 - 10 30 - 50 60 - 80 100 - 120 125 - 135
	C8	80 x 135	/	0 - 135	50 - 90	50 - 90	/

Rc : Résistance à la compression / **carbo** : Carbonatation / **D-P** : Densité-Porosité / **D-C** : Dosage en ciment
Cl/S libres : Dosage en ion Cl-/S libres.

V.3 - Résistance à la compression sur béton

Nota (Rappel sur les recommandations de la norme NF EN 13791) :

Pour une zone d'essai donnée, l'évaluation de la résistance caractéristique à la compression des bétons doit reposer sur au moins 3 prélèvements. Ce nombre minimal de 3 éprouvettes se rapporte à des carottes ayant un diamètre d'au moins 100 mm.

Lorsque le diamètre des carottes est inférieur à 100 mm, la norme NF EN 13791 recommande d'augmenter le nombre de carottes. La recommandation repose sur le nombre de prélèvements à retenir en fonction du diamètre : $N = - (0,12 \times \varnothing) + 15$ avec \varnothing en mm.

Ex : pour $\varnothing = 74$ mm, un nombre minimum de 6 prélèvements doit être réalisé afin d'évaluer la résistance caractéristique à la compression des bétons selon les recommandations de la norme NF EN 13791.

Les valeurs de résistance à la compression des éprouvettes sont corrigées selon les recommandations de la norme NF EN 13791. Cependant, la résistance caractéristique à la compression des bétons en place ne peut être calculée (nombre insuffisant d'éprouvettes par zone de prélèvement).

Les modes de rupture des éprouvettes sont considérés comme corrects au sens de la norme.

Description		Caractéristiques des éprouvettes				Résistances à la compression		
Zone	Ech.	Diamètre \varnothing (mm)	Hauteur H (mm)	Elance-ment (H / \varnothing)	Masse (g)	Valeur brute (MPa)	Facteur de correction	Valeur corrigée (MPa)
Haut	C2	84	89	1,06	1084	28,3	0,8019	22,7
Milieu	C3	79	106	1,34	1166	41,9	0,8520	35,7
Bas	C6	79	129	1,63	1418	36,4	0,8991	32,7

V.4 - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

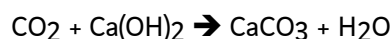
Zone	Prélèvement	Profondeur (mm)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Porosité accessible à l'eau (%)
Haut	C1	20 - 80	2105	17,9
Milieu	C4	30 - 90	2246	13,2
Bas	C8	50 - 90	2106	17,2

Rappel :

- La masse volumique d'un béton normal est comprise entre 2000 et 2600 kg/m³ (selon la norme NF EN 206-1),
- La masse volumique communément admise pour un béton standard est de 2300 kg/m³,
- Les valeurs de porosité communément admises pour un béton standard sont de l'ordre de 11 à 13 %.

V.5 - Profondeur de carbonatation

La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le pH de la solution interstitielle à une valeur telle que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film passif se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide. Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates, et principalement avec la portlandite, pour donner du carbonate de calcium comme produit final :



Pour le suivi de l'évolution de la carbonatation à l'intérieur du béton, on utilise une solution alcoolique de thymolphthaléine (changement de couleur à des pH entre 9,3 et 10,5). La partie carbonatée du béton reste incolore et la partie non carbonatée prend une coloration bleue. L'essai est réalisé selon la procédure suivante :

- Fendage ou sciage de l'échantillon dans le sens de sa longueur,
- Application de la solution de thymolphthaléine,
- Mesure de la profondeur de carbonatation.

Les profondeurs de carbonatation sont mesurées en 5 points.

Zone	Prélèvement	Côté	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)
Milieu	C4	Parement	> 115	> 115	> 115	> 115	> 115	> 115
Bas	C8	Parement	25	29	36	39	39	34
		fond	33	33	33	33	36	34

V.6 - Estimation de la teneur en liant hydraulique

Les paramètres obtenus par les méthodes de la silice soluble et des inertes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Localisation	Ech.	Prof (mm)	Teneur en silice soluble (%)	Insolubles (%)	Teneur en CO ₂ (%)	Perte au feu entre 80 et 975°C (%)
Bas	C8	50 - 90	3,40	72,76	4,33	6,84

Compte tenu de la teneur en CO₂ (> 1), la formule 1 (voir méthodologie en Annexe 3) a été choisie pour le calcul de la teneur en liant hydraulique pour la méthode des inertes.

Les teneurs en liant hydraulique des bétons ont été calculées sur la base des ciments suivants (données fournies par le GranDuBé, 2007) :

- ciment de type CEM I : teneur en silice de 20,5 ± 2 %,
- ciment de type CEM II/A-S (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de 23,0 ± 1,5 %,
- ciment de type CEM III/A (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de 26,0 ± 3 %,
- ciment de type CEM III/B (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de 27,5 ± 1,5 %,
- ciment de type CEM III/C (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de 31,5 ± 1,5 %.

Un écart inférieur à 10% de la moyenne des 2 méthodes (silice soluble et inertes) est validé pour les dosages en ciment présenté dans le tableau ci-après (cf. GranDuBé, 2007). La teneur en silice moyenne retenue est de 21 %. Cette teneur est compatible avec un ciment de type CEM I.

Localisation	Ech.	Prof (mm)	Type de ciment	Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m ³)
Bas	C8	50 - 90	CEM I	16,2	16,2	16,2	341 ± 34

Nota : l'erreur estimée sur le calcul du dosage en ciment est de l'ordre de 10 %.

V.7 - Dosage des ions hydrosolubles

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorures libres (Cl⁻) ont un rôle important dans le processus de dépasseivation et de corrosion des armatures. Ce sont ces chlorures libres qui migrent et qui sont responsables de la dépasseivation des armatures, par dissociation aux chlorures totaux (= chlorures libres + chlorures piégés).

Au sein d'un béton, les ions chlorures libres ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- Diminution de la résistivité de l'enrobage de béton, ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre,
- Amorçage plus rapide de la corrosion par dépasseivation de la couche d'oxydes protectrice de l'acier. Plus la concentration en ions chlorures libres au niveau des armatures est élevée, plus la vitesse de corrosion est importante.

En termes de concentration en ions chlorures libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à **0,4 % d'ions chlorures libres en masse par rapport au ciment (soit 0,06 % en masse par rapport à un béton « standard » dosé à 350 kg de ciment par m³)**, est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

Les teneurs en ions chlorures libres données en % par rapport à **la masse de ciment** ont été calculées en prenant en compte les masses volumiques et les dosages en ciment mesurés pour :

- Haut (C1), Milieu (C5), Bas (C7) : dosage en ciment de C8 (341 kg/m³).

Les teneurs en ions chlorures libres présentées en rouge dans le tableau ci-dessous dépassent le seuil limite de dépassement des aciers (0,4 % d'ions chlorure en masse de ciment pour un béton contenant des armatures).

Zone	Ech.	Prof. (mm)	Teneur en ions chlorures libres (% masse béton)	Teneur en ions chlorures libres (% masse ciment)	Teneur en ions sulfates solubles (% masse béton)
Haut	C1	0 - 10	0,035	0,214	0,363
		10 - 20	0,029	0,177	0,127
		20 - 40	0,028	0,170	0,115
		40 - 60	0,030	0,184	0,118
		60 - 80	0,027	0,167	0,149
Milieu	C5	0 - 10	0,190	1,171	0,748
		20 - 40	0,338	2,090	0,102
		50 - 70	0,563	3,479	0,115
		80 - 100	0,402	2,484	0,127
		105 - 115	0,435	2,687	0,487
Bas	C7	0 - 10	0,085	0,526	0,538
		30 - 50	0,026	0,162	0,105
		60 - 80	0,043	0,268	0,116
		100 - 120	0,074	0,457	0,148
		125 - 135	0,064	0,398	0,406

Nota pour l'analyse des chlorures et des sulfates :

- Limite de détection = 0,005% masse béton,
- Erreur sur la mesure < 2 %,
- Les sulfates sont donnés sous la forme SO₃.

VI - SYNTHÈSE

VI.1 - Du diagnostic des matériaux

L'étude de diagnostic des bétons de la Cheminée présente sur le site Rockefeller de l'université Lyon 1, a permis de mettre en évidence les points suivants :

VI.1.1 - Concernant la zone en tête de cheminée :

- L'enrobage moyen des armatures des cloisons des éléments préfabriqués est de 26 mm,
- La profondeur de carbonatation est très importante (112 mm) ; elle affecte les armatures et peut initier un phénomène de corrosion.
- Les teneurs en ions chlorures libres mises en corrélation avec les mesures d'enrobage des armatures indiquent que celles-ci ne sont pas dépassivées. En effet, aucune pollution par les ions chlorures (teneur au-delà du seuil de 0,4% en masse de ciment) n'est constatée dans les différentes tranches analysées).
- Un enrichissement en ions sulfates solubles sur la tranche 125-135 mm avec une teneur de 0,406%.
- Une masse volumique apparente de 2105 kg/ m³.
- Une porosité accessible à l'eau importante de 17,9 %.
- Une résistance à la compression simple corrigée de 22,7 MPa.
- La présence de zone anodique généralisée sur la cartographie de potentiel.
- Un sondage destructif au droit d'une armature qui met en évidence une corrosion généralisée, au faciès caractéristique de corrosion par carbonatation, avec perte de section allant jusqu'à la dissolution au droit des aciers présentant un défaut d'enrobage.

VI.1.2 - Concernant la zone au milieu de la cheminée :

- L'enrobage moyen des armatures des cloisons des éléments préfabriqués est de 33 mm,
- La profondeur de carbonatation est importante (115 mm) ; elle affecte les armatures et peut initier un phénomène de corrosion.
- Les teneurs en ions chlorures libres mises en corrélation avec les mesures d'enrobage des armatures indiquent que celles-ci sont dépassivées. En effet, une pollution par les ions chlorures (teneur au-delà du seuil de 0,4% en masse de ciment) est constatée dans les différentes tranches analysées).
- Un enrichissement en ions sulfates solubles sur la tranche 0-10 mm avec une teneur de 0,748%.
- Un enrichissement en ions sulfates solubles sur la tranche 105-115 mm avec une teneur de 0,487%.
- Une masse volumique apparente de 2246 kg/ m³.
- Une porosité accessible à l'eau satisfaisante de 13,2 %.
- Une résistance à la compression simple corrigée de 35,7 MPa.
- La présence de zone anodique généralisée sur la cartographie de potentiel.
- Un sondage destructif au droit d'une armature qui met en évidence une corrosion des aciers par piqûre, liée à la forte concentration en ions chlorures.

VI.1.3 - Concernant la zone en pied de cheminée :

- L'enrobage moyen des armatures des cloisons des éléments préfabriqués est de 35 mm,
- La profondeur de carbonatation de 34 mm (sur les deux faces) n'affecte pas les armatures.
- Les teneurs en ions chlorures libres mises en corrélation avec les mesures d'enrobage des armatures (côté extérieur de la cheminée) indiquent que celles-ci ne sont pas dépassivées. En effet, aucune pollution par les ions chlorures (teneur au-delà du seuil de 0,4% en masse de ciment) n'est constatée dans les différentes tranches analysées).
- Un enrichissement en ions sulfates solubles sur la tranche 105-115 mm avec une teneur de 0,487%.
- Une masse volumique apparente de 2106 kg/ m³.
- Une teneur en liant hydraulique de l'ordre de 341 kg/ m³
- Une porosité accessible à l'eau importante de 17,2 %.
- Une résistance à la compression simple corrigée de 32,7 MPa.
- Une absence de zone anodique sur la cartographie de potentiel, en face extérieure.
- Un sondage destructif au droit d'une armature qui met en évidence un acier sain.

VI.1.4 - Profils de pollution :

On note que le niveau de pollution par les ions chlorures et les niveaux d'enrichissement en ions sulfates diffèrent selon la hauteur de mesure.

Les niveaux de pollution ou d'enrichissement par les ions chlorures sont :

- plus importants à « mi-hauteur » de la cheminée, aussi bien en parement extérieur qu'intérieur ;
 - plus faibles en partie basse mais avec toujours des bétons pollués par les chlorures depuis l'intérieur ;
- et l'on note l'absence de pollution notable par les chlorures en partie haute, aussi bien en parement intérieur qu'extérieur.

Concernant les sulfates, les teneurs mesurées ne mettent pas en évidence de pathologie liée mais les fortes concentrations en parement extérieur et intérieur indiquent un enrichissement, probablement dû aux gaz de combustion.

VI.2 - **Des désordres visibles**

On note des désordres généralisés sur les éléments constitutifs de la structure (éclats de béton et armatures corrodées). Le diagnostic

Parallèlement à ces défauts qui traduisent le vieillissement du matériau béton armé, le défaut principal concernant la cheminée est la présence des fractures verticales continues le long des nervures, sur toute la périphérie. Ce désordre structurel, qui modifie le comportement mécanique de l'ouvrage car il supprime le monolithisme du fût de cheminée, est de nature à remettre en question la stabilité de l'ouvrage.

Il est probable que ce désordre soit ancien et que les cerclages métalliques aient été disposés comme confortement, afin d'empêcher le flambement des nervures ainsi désolidarisées. Toutefois, les cerclages réalisent le confinement des nervures uniquement dans le sens de la poussée vers l'extérieur.

VI.3 - Conclusion

Les essais en laboratoire et les investigations in-situ réalisées sur les éléments en béton armé de la cheminée mettent en évidence la présence d'un béton avec des caractéristiques hétérogènes.

Il a été notamment mis en évidence :

- Une forte porosité,
- Une carbonatation très importante en parement extérieur,
- Une pollution par les ions chlorures libres, variant selon la hauteur, sur les parements intérieur et extérieur,
- Un enrichissement en ions sulfates, variable selon la hauteur, sur les parements intérieur et extérieur.

Ces caractéristiques couplées à l'environnement régulièrement humide (pluie) et aéré favorisent le développement de la corrosion des armatures ; ce qui explique la présence de nombreux éclats de béton avec aciers apparents corrodés. Une activité de corrosion est donc en cours. Celle-ci a été mise en évidence par la réalisation de sondages de reconnaissance et par l'inspection visuelle des parements extérieurs de l'ouvrage.

La corrosion entraîne des réductions de section d'armatures et des défauts d'adhérence acier/béton, ce qui tend à fragiliser les éléments constitutifs de la cheminée.

D'autre part, il a été constaté des défauts structurels d'ordre mécaniques :

- La présence de fractures verticales le long de raidisseurs témoigne d'un fonctionnement mécanique anormal de la structure,
- La disparition plus ou moins importante du mortier de jointoiement entre éléments participe également à fragiliser l'édifice.

Ces défauts structurels sont susceptibles de remettre en cause la stabilité de la cheminée, même si les renforts par cerclages métalliques ont probablement été mis en place afin de la consolider.

De plus, il est à noter la présence ponctuelle de défauts de contact entre les cerclages métalliques de renfort et la structure qui de ce fait ne remplissent plus leur fonction de façon optimale.

En outre, les éclats de béton, en plus de fragiliser la structure, présentent un risque pour les personnes circulant en pied de la cheminée.

VII - PRECONISATIONS

Compte tenu de l'ampleur des désordres observés, qui remettent en question :

- la durabilité de la structure (corrosion des armatures des éléments préfabriqués avec éclatement du béton, corrosion des renforts par cerclage métallique)
- et également la solidité de l'édifice (réduction des sections d'acier, fractures verticales le long des raidisseurs traduisant probablement un défaut de résistance vis-à-vis du flambement, fractures verticales dans les cloisons) ;

compte tenu en outre du risque pour les usagers en pied de bâtiment, en cas de chute d'éclats de béton ; la cheminée nécessite une remise en état qui vise à des renforcements structurels sur toute la hauteur, la réfection de plus de la moitié des éléments préfabriqués, et la mise en place de dispositions permettant d'assurer la durabilité des réparations.

Les réparations structurales devront inclure :

- la purge des bétons non adhérents et de faible compacité,
- le traitement des armatures corrodées,
- la reconstitution des sections d'armatures disparues,
- la reconstitution des sections de béton,
- le traitement des fissures verticales (par couture, scellement ou ceinturage) ou par pontage en matériau composite ;

D'autre part, afin d'assurer la durabilité des réparations et de l'édifice dans son ensemble, la mise en œuvre de protections complémentaires est indispensable. Compte tenu des teneurs localement très importantes en ions chlorures et de la forte carbonatation, la mise en place d'un système de protection cathodique par courant imposé doit être envisagée. Ce dispositif nécessite d'assurer une continuité électrique sur l'ensemble des éléments à traiter ce qui pourra s'avérer fastidieux compte tenu du mode constructif de la cheminée ; cette protection cathodique s'accompagne d'un système de « monitoring » en continu. Enfin, l'application d'un revêtement de protection, de type LHM, visant à limiter les échanges entre le béton et l'atmosphère doit être prévue.

Ces travaux sont décrits sur la base du diagnostic qui se limite aux parements extérieurs ; en l'absence d'information sur l'état des parements intérieurs, ainsi que des éventuelles dispositions à prendre en cas de présence de polluants potentiellement dangereux pour la santé des travailleurs, l'estimation du coût de ces travaux pourrait être comprise entre 450 000 et 600 000 € hors taxes.

La cheminée n'étant plus exploitée, une déconstruction de l'édifice est à privilégier ; c'est la solution que nous préconisons. Une étude spécifique de démantèlement est à prévoir mais le coût sera inférieur à l'enveloppe des travaux de réparation annoncée ci-dessus.

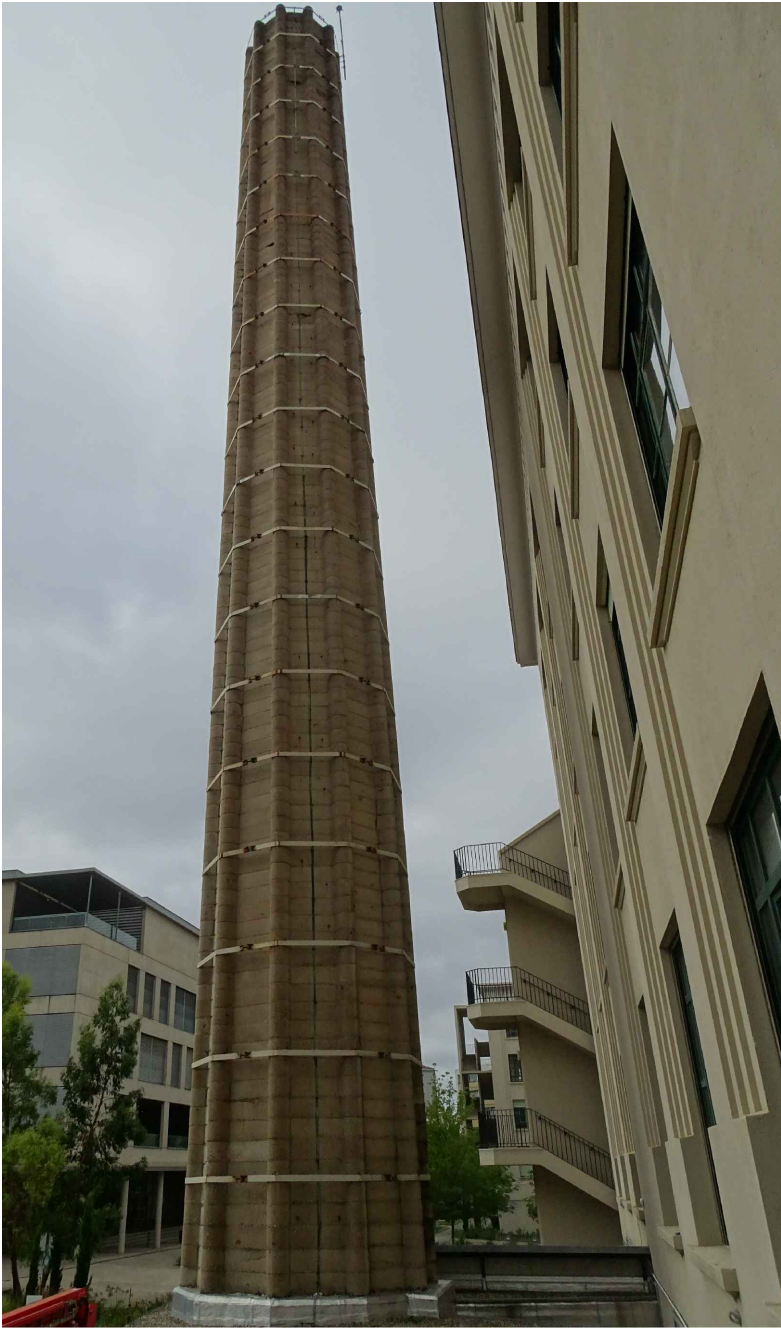
À court terme et dans l'attente de réparations ou d'un démantèlement de la cheminée, des dispositions visant à empêcher la chute d'éclats de béton sur les personnes circulant en pied d'ouvrage sont recommandées : mise en place de filets de rétention ou au minimum la réalisation de purges périodiques des éléments instables.

Rapport établi le 24/02/2020

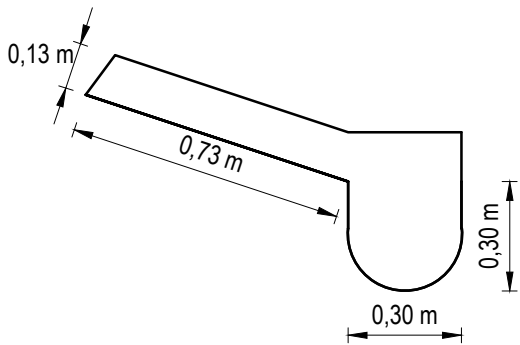
K. CANDOTTI

A. BACHELIER

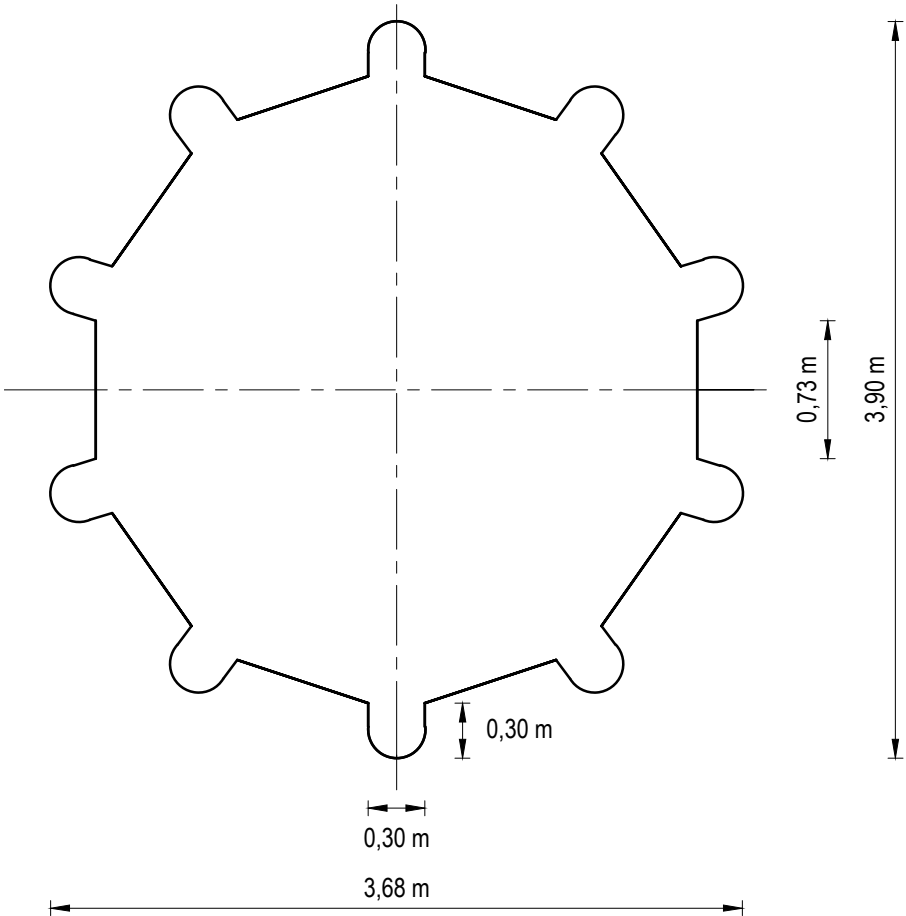
ANNEXE 1 : PLANS



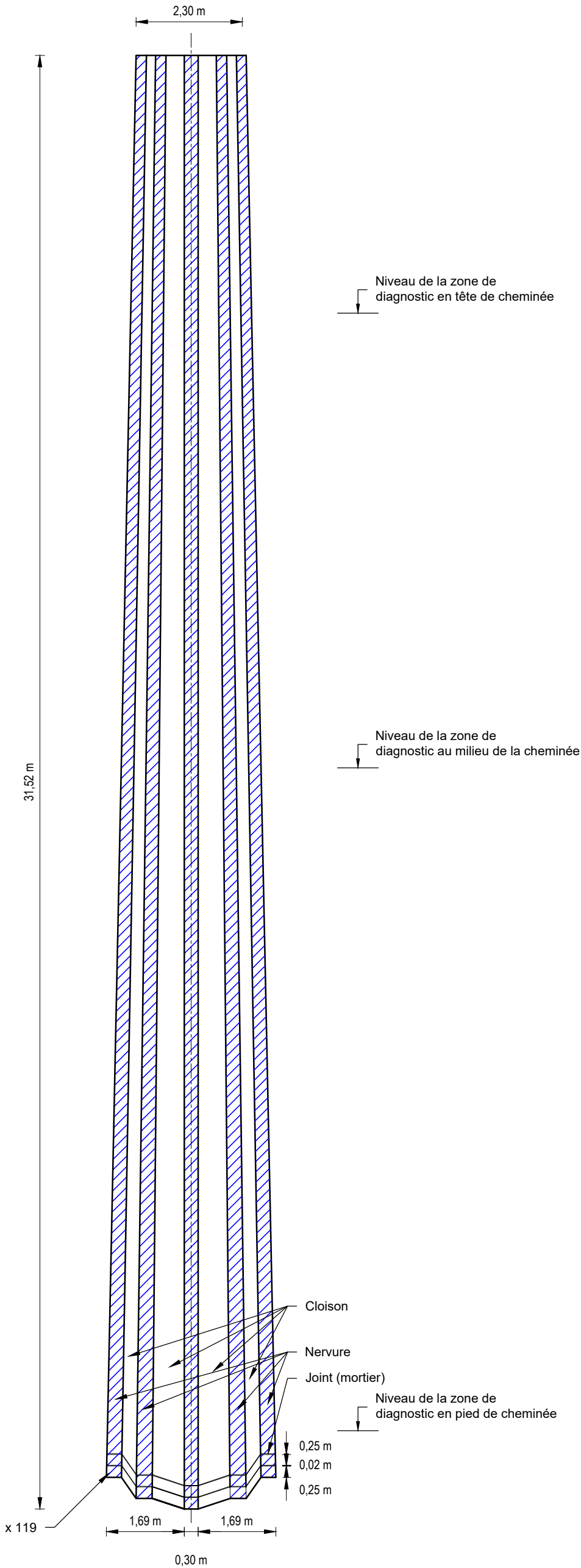
- VUE EN PLAN D'UN ELEMENT PREFABRIQUE -
Ech : 1/10



- COUPE TRANSVERSALE EN PIED -
Ech : 1/40



- ELEVATION -
Ech : 1/100



ANNEXE 2 : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE



Photo 1

Vue générale de la cheminée

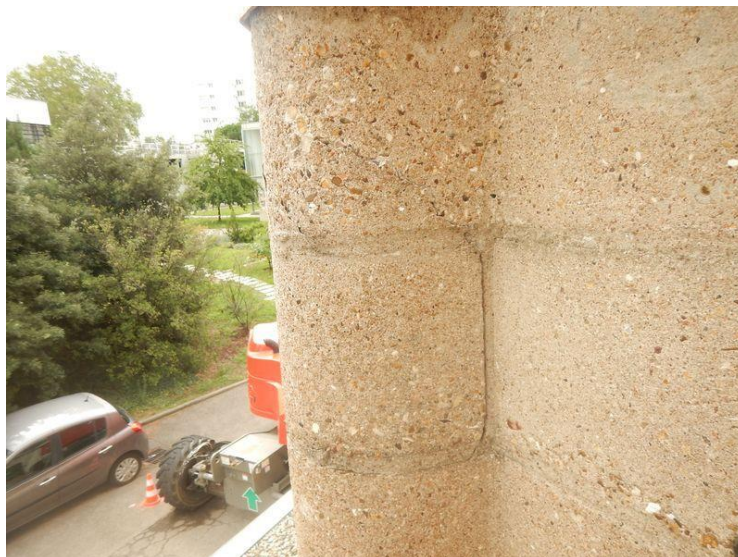


Photo 2

Positionnement des joints verticaux entre éléments préfabriqués alternés entre rangées superposées

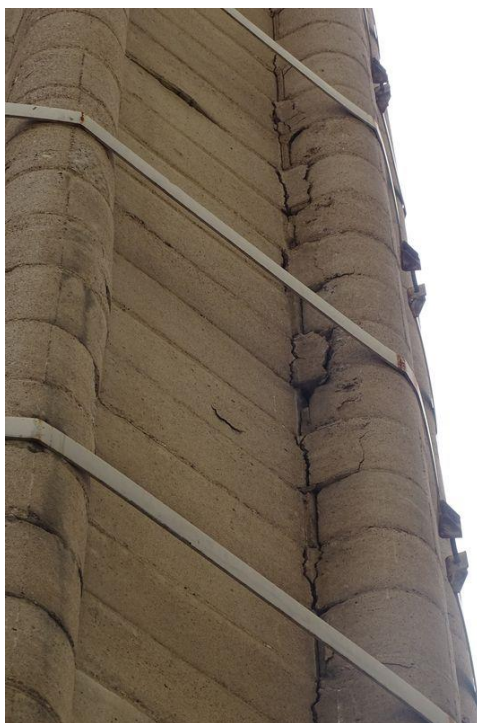
*Photo 3**Fracture le long des raidisseurs verticaux**Photo 4**Fracture le long des raidisseurs verticaux, éclats avec aciers apparents sur les raidisseurs*



Photo 5

Fracture verticale sur les cloisons



Photo 6

Éclats importants avec aciers apparents sur les cloisons



Photo 7

Vue générale de la tête de la cheminée - Présence d'éclats de taille importante avec aciers apparent

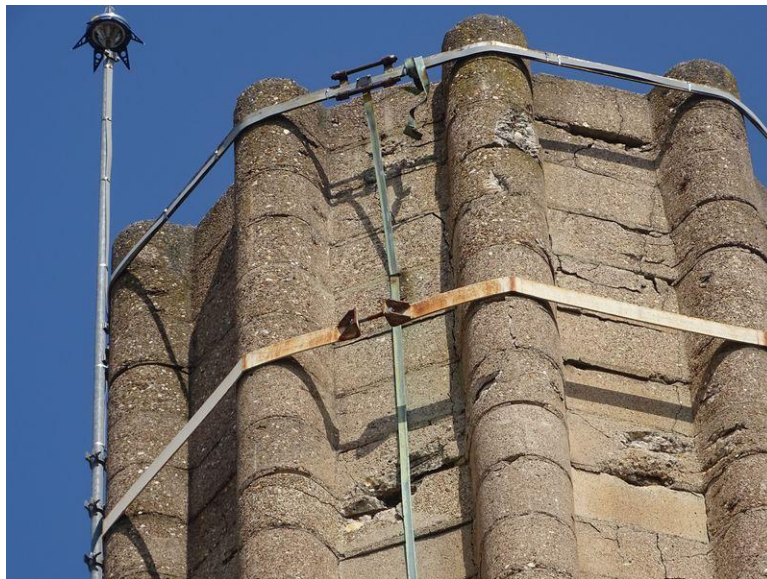


Photo 8

Vue générale de la tête de la cheminée - Présence d'éclats de taille importante avec aciers apparent

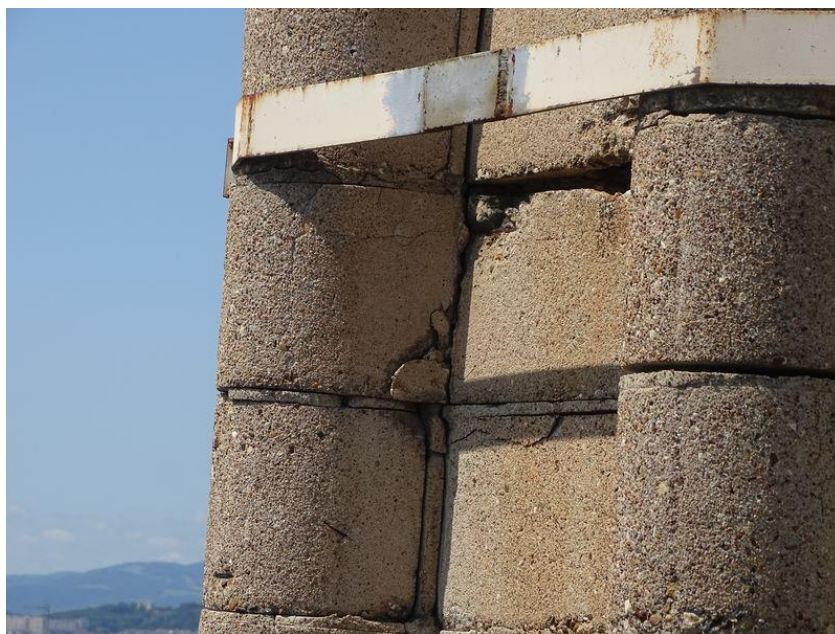
*Photo 9**Érosion ou lacune du mortier de jointoiment entre éléments préfabriqués**Photo 10**Amorce d'éclats sur les cloisons*



Photo 11

Boulonnerie des cerclages métalliques corrodée



Photo 12

Corrosion des cerclages métalliques

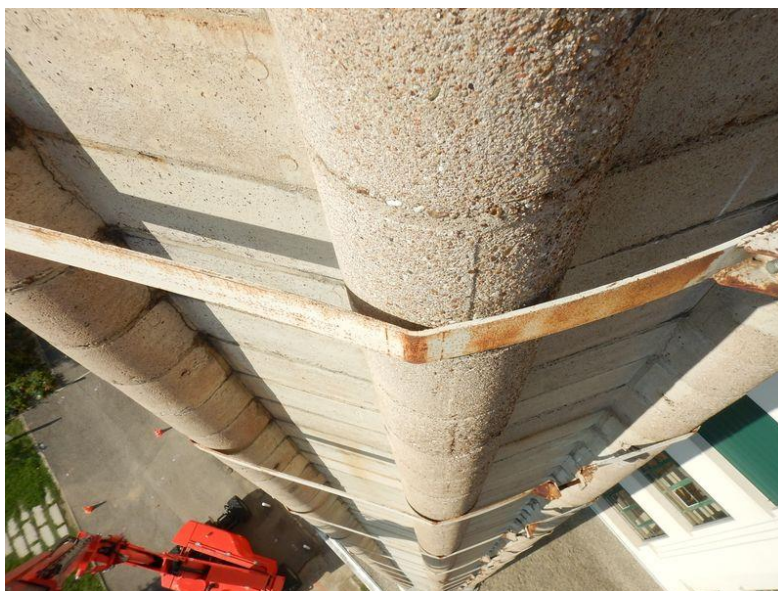


Photo 13

Corrosion des cerclages métalliques



Photo 14

Renfort par ajout de plats soudés



Photo 15

Défaut de contact ponctuel entre les cerclages métalliques et la structure

ANNEXE 3 : METHODOLOGIE

Mesure de la résistance à la compression simple

Cet essai est effectué selon la norme NF EN 12390-3.

Les schémas de rupture des éprouvettes définis par la norme sont les suivants :

Page 8
EN 12390-3:2001

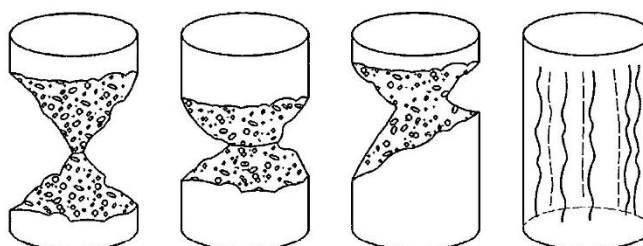


Figure 3 — Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques

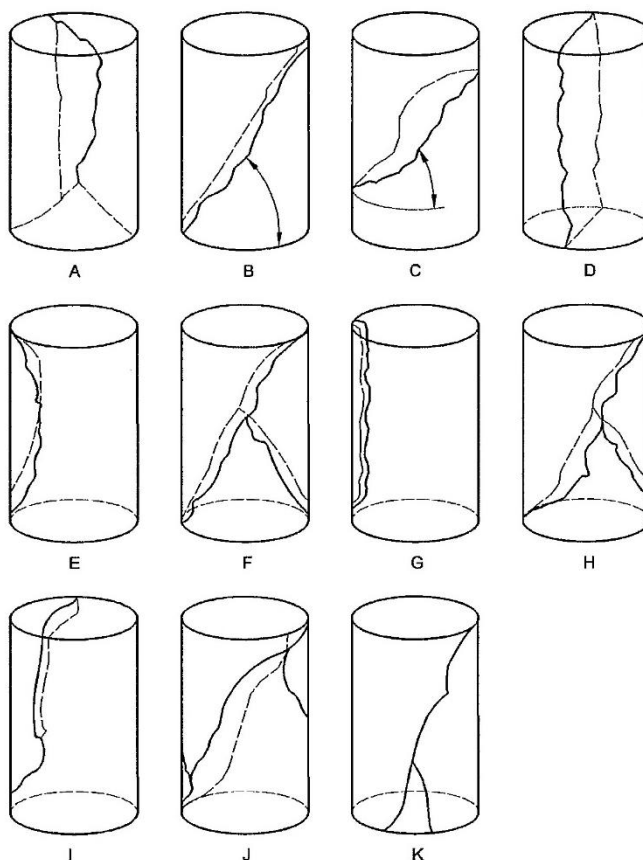


Figure 4 — Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques

Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau

Cet essai est effectué selon la norme NF P18-459.

Le protocole de cet essai est le suivant :

- l'échantillon est placé dans une cloche à vide pendant 4h,
- l'échantillon est imbibé d'eau sous vide pendant 44h,
- l'échantillon est pesé dans l'eau (pesée hydrostatique) et dans l'air,
- étuvage de l'échantillon à 105°C pendant 24h,
- pesée de l'échantillon dans l'air après 3h de refroidissement.

La masse volumique et la porosité sont calculées à partir des formules suivantes :

$$\text{Masse volumique apparente : } d = \frac{M_s}{M_a - M_a'} \text{ (en kg/m}^3\text{)}$$

Avec :

- M_s = masse sec après étuvage
- M_a = masse dans l'air après imbibition sous vide
- M_a' = masse dans l'eau après imbibition sous vide

$$\text{Porosité accessible à l'eau : } P(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_a'} * 100 \text{ (en \%)}$$

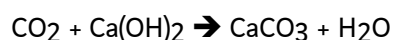
Avec :

- M_s = masse sec après étuvage
- M_a = masse dans l'air après imbibition sous vide
- M_a' = masse dans l'eau après imbibition sous vide

Mesure de la profondeur de carbonatation

Cet essai est effectué selon la norme NF EN 14630.

La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le pH de la solution interstitielle à une valeur telle que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film passif se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide. Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates, et principalement avec la portlandite, pour donner du carbonate de calcium comme produit final :



Pour le suivi de l'évolution de la carbonatation à l'intérieur du béton, on utilise une solution alcoolique de thymolphtaléine (changement de couleur à des pH entre 9,5 et 10,3). La partie carbonatée du béton reste incolore et la partie non carbonatée prend une coloration bleue. L'essai est réalisé selon la procédure suivante :

- fendage de l'échantillon dans le sens de sa longueur,
- application de la solution de thymolphtaléine,
- mesure de la profondeur de carbonatation.

Rappels sur les teneurs en ions chlorures

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorures libres (Cl^-) ont un rôle important dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures. Ce sont ces chlorures libres qui migrent et qui sont responsables de la dépassement des armatures, par opposition aux chlorures totaux (= chlorures libres + chlorures piégés).

Au sein d'un béton, les ions chlorures libres ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- diminution de la résistivité de l'enrobage de béton, ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre,
- amorçage plus rapide de la corrosion par dépassement de la couche d'oxydes protectrice de l'acier. Plus la concentration en ions chlorures libres au niveau des armatures est élevée, plus la vitesse de corrosion est importante.

En termes de concentration en ions chlorures libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à **0,4 % d'ions chlorures libres en masse par rapport au ciment (soit 0,06 % en masse par rapport à un béton « standard » dosé à 350 kg de ciment par m^3)**, est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

La mise en solution avant l'analyse par chromatographie ionique des ions chlorures libres s'effectue selon le protocole suivant (recommandations du GranDuBé, 2007) :

- mise en solution de l'échantillon de béton (broyé et tamisé à 315 μm) dans de l'eau déionisée,
- mise en suspension de l'échantillon par agitation magnétique pendant 3 minutes,
- ajout d'acide afin de stabiliser les ions mis en solution,
- filtrage de la solution avant analyse.

La mise en solution des sulfates solubles est réalisée selon le même protocole que les chlorures libres.

Estimation de la teneur en liant hydraulique

Le dosage en ciment est calculé à partir de :

- la masse volumique apparente (selon la norme NF P18-459),
- la teneur en silice soluble de la pâte de ciment (selon les recommandations du GranDuBé, 2007),
- la méthode des inertes (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).

Le dosage en ciment correspond à la moyenne de C1 (dosage par la méthode de la silice soluble) et C2 (dosage par la méthode des inertes).

La mise en solution pour le dosage de la silice soluble est le suivant (selon les recommandations du GranDuBé, 2007) :

- broyage d'une quantité de béton suffisante pour ne pas avoir d'erreur liée à une concentration trop faible ou trop forte de granulats,
- mise en solution de 1 g d'échantillon (broyé et tamisé à 315 µm) dans 100 ml d'eau déionisée,
- agitation magnétique pendant 2 min,
- ajout de 40 ml d'acide nitrique dilué (1,2 mol/l) et 60 ml d'eau déionisée,
- reprise de l'agitation pendant 30 min,
- filtrage de la solution et transfert dans une fiole jaugée de 250 ml,
- dosage de **la silice soluble** dans la fraction liquide par spectrométrie d'absorption atomique.

La teneur en ciment C1 est ensuite obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$C1 = \frac{SiO_2solB}{SiO_2solC} \times 100$$

avec :

- *C1 : teneur en ciment en %*,
- *SiO₂solB : silice soluble du béton en %*,
- *SiO₂solC : silice soluble du ciment en %*.

SiO₂solC est soit connue soit choisie parmi les teneurs en silice proposées par le GranDuBé (2007) et dans les fiches produits des cimentiers en fonction du type de ciment supposé (CEM I, CEM II/A au laitier ou CEM III/A, /B ou /C)

La méthode des inertes comprend :

- une mesure du pourcentage d'insoluble dans le béton obtenue par calcination à 975°C du résidu insoluble après mise en solution de l'échantillon dans de l'acide nitrique dilué),
- la perte au feu entre 80 et 550°C (teneur en eau liée),
- la teneur en CaO liée à l'anhydride carbonique (CO₂) obtenue par calcination et différence entre la perte au feu à 975°C et la teneur en eau liée.

En fonction de la teneur en CO₂, 2 formules de calcul peuvent être envisagées :

$$\text{si CO}_2 > 1 \% : \\ \text{C2 (\%)} = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu} + ((\text{CO}_2 - 1) \times 1,27)] \quad (1)$$

OU

$$\text{si CO}_2 < 1 \% : \\ \text{C2 (\%)} = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu}] \quad (2)$$

La formule de calcul de la perte au feu (=eau d'hydratation + CO₂ des granulats calcaires + CO₂ de carbonatation) est la suivante :

$$PAF = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100$$

avec :

- *m3* : masse de la prise d'essai,
- *m4* : masse après calcination à 975°C.

La teneur en CO₂ correspond à la perte de masse entre 550°C et 975°C soit :

$$\% \text{CO}_2 = \frac{m_5 - m_4}{m_3} \times 100$$

avec :

- *m3* : masse de la prise d'essai,
- *m4* : masse après calcination à 975°C,
- *m5* : masse après calcination à 550°C.

Le dosage en ciment est ensuite obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$D = \frac{C \times \rho \times 1000}{100}$$

avec :

- *D* : dosage en ciment en kg/m³,
- *C* : moyenne de C1 + C2,
- *ρ* : masse volumique du béton en g/cm³.