

DIAGNOSTIC
CHEMINEE DE CHAUFFERIE
HOPITAL D'INSTRUCTION DES ARMEES BEGIN
SAINT-MANDE



A la demande et pour le compte de :

ESID IDF
Monsieur URVOIT Timothee

Direction Régionale Ile de France

Agence d'Élancourt

Département Diagnostic Pathologie Structure

12 avenue Gay Lussac
78990 Élancourt

Affaire suivie par Salim KURCHI

☎ : 06 15 38 78 17

✉ : s.kurchi@groupeginger.com

Sommaire

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE LA MISSION.....	5
1.1. Contexte	5
1.2. Missions.....	5
2. DESCRIPTION DE LA MISSION.....	5
2.1. Description succincte de l'ouvrage.....	5
2.2. Investigation réalisées sur site	6
2.3. Investigation réalisées en laboratoire.....	7
2.4. Implantation des sondages	9
3. RESULTATS DES INVESTIGATIONS IN SITU	10
3.1. Inspection visuelle.....	10
3.2. Sondages destructifs	13
3.3. Mesure des potentiels de corrosion.....	15
4. RESULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRES	17
4.1. Mesure de profondeur de carbonatation	17
4.2. Recherche de pathologie au microscope électronique :.....	19
4.3. Dosage en sulfates	20
5. CONCLUSION GENERALE.....	21
5.1. Rappel des objectifs.....	21
5.2. Résultats des investigations.....	21
5.3. Préconisation	22
ANNEXE 1 : RELEVÉ DE DESORDRES.....	23
ANNEXE 2 : RAPPORT DES ESSAIS EN LABORATOIRE.....	38

GINGER CEBTP 12 Avenue Gay Lussac 78990 ELANCOURT T : 01.30.85.21.66 / F : 01.30.85.21.83 / Email : v.castel@groupeginger.com				
DIAGNOSTIC CHEMINEE DE CHAUFFERIE ESID IDF				
Dossier : BDP7.L.193-2			s.kurchi@groupeginger.com	
Indice	Date	Rédigé par : Chargé d'affaires Service Diagnostic Pathologie Structure	Vérifié par : Chef de service Service Diagnostic Pathologie Structure	Contenu
1.0	20/01/2022	Salim KURCHI	Thibaud DUVAL	60 pages
2.0	21/01/2022	 Salim KURCHI	 Thibaud DUVAL	58 pages

A compter du paiement intégral de la mission, le client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser à condition de respecter et de faire respecter les limites d'utilisation des résultats qui y figurent et notamment les conditions de validité et d'application du rapport.

Sans autorisation préalable, il n'est utilisable à des fins commerciales ou publicitaires qu'en reproduction intégrale. Les résultats obtenus ne valent que pour l'objet soumis à essai, dans les conditions de réalisation de celui-ci. Ils ne sont pas généralisables.

Sauf demande écrite, les échantillons seront éliminés un mois après l'envoi du rapport.

Préambule

GINGER CEBTP est une société spécialisée dans l'expertise des matériaux qui constitue les ouvrages et leur pathologie.

Les spécialistes de GINGER CEBTP étudient, chacun dans leur domaine, les matériaux et les ouvrages afin de réaliser des analyses / investigations ou d'établir des diagnostics sur l'origine des désordres et proposer des solutions de réparation.

La mission objet de ce contrat s'appuie sur des données scientifiques obtenues à partir d'essais et d'analyses qui, en raison de leurs hautes technicités, comportent une incertitude.

GINGER CEBTP met donc tous les moyens spécifiques répondant aux exigences de l'évolution technologique du secteur pour répondre le plus précisément possible aux questions posées par le client.

1. Contexte et objectif de la mission

1.1. Contexte

Suite à l'apparition de désordres sur une cheminée de chaufferie située à l'Hôpital d'Instruction des Armées Bégin, l'ESID de l'Île-de-France représentée par Mr URVOIT Timothée, a demandé à l'agence d'Elancourt de réaliser une mission de diagnostic d'une cheminée de chaufferie.

1.2. Missions

Les objectifs de la mission sont de donner un avis sur l'état d'altération de la cheminée et de fournir des principes généraux de réparation ou d'études complémentaires.

2. Description de la mission

2.1. Description succincte de l'ouvrage

L'ouvrage concerné par la mission est une cheminée d'évacuation de fumées de chaufferie de l'hôpital. La cheminée est divisée en trois voies d'évacuation, deux des trois évacuations ne sont plus en fonctionnement. Sa structure est composée d'anneaux en béton armé de 4 m de diamètre extérieur et de 1,4 m de hauteur. Elle dispose d'une échelle à crinoline ancrée dans la structure.



Figure 1: vue de la cheminée

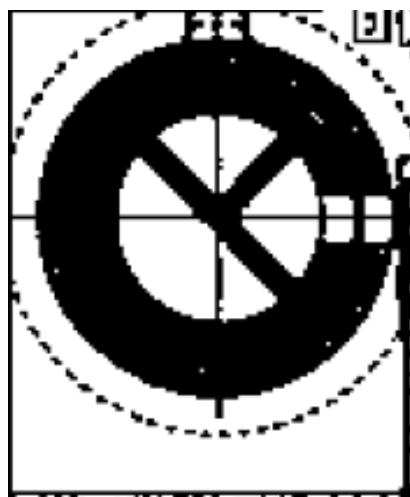


Figure 2: voies d'évacuations de la cheminée

2.2. Investigation réalisées sur site

- **Sondages destructifs et non destructifs:**

Des sondages destructifs ont été réalisés afin de reconnaître les armatures de la cheminée, identifier leur nuance, leur diamètre et surtout leur état vis-à-vis de la corrosion. Ils ont également servi à prélever des échantillons de béton pour réaliser des analyses en laboratoire interne et ont permis de faire les mesures de potentiels de corrosion. Pour bien cibler les sondages au niveau des armatures, un repérage des armatures au radar a été réalisé avant chaque sondages destructif.

4 sondages destructifs ont été réalisés.

- **Prélèvement d'échantillons par carottage/sciage :**

Des prélèvements d'échantillons ont été réalisés sur site par carottage et sciage. Ces prélèvements ont été analysés en laboratoire interne pour identifier d'éventuelles pathologies.

4 prélèvements ont été réalisés.

- **Mesure du potentiel de corrosion des armatures :**

La corrosion des armatures et son importance peuvent être décelées par la méthode de mesures de potentiels qui se créent entre 2 points de corrosion, dus à l'hétérogénéité du métal. Cette méthode a permis de visualiser l'étendue de la corrosion sur des maillages de 50 cm X 50 cm. Les mesures ont été réalisées en surface du parement après dégagement d'une armature qui a servi d'anode au système de mesures.

2 mesures ont été réalisées : une mesure en zone saine et une mesure en zone dégradée (zone de fissuration). Chaque mesure est réalisée à l'aide d'une électrode de référence Cu/CuSO4.

- **Inspection visuelle :**

Une inspection visuelle de l'extérieur de la cheminée a été réalisée afin d'apprécier l'état de la structure et relever les différents désordres ou anomalies de la structure pour les classer par indice de gravité. Les indices de gravité sont classés comme suit :

- Indice **B** : Défauts sans conséquence importante autres qu'esthétique.
- Indice **C** : Défauts qui indiquent qu'une évolution risque de se faire anormalement. Ces défauts doivent être surveillés. Nécessité d'intervention à moyen terme.
- Indice **D** : Défauts révélateurs de dégradation, ils sont rangés en deux classes :
 - **DA** : Défauts qui indiquent un début d'évolution. Ils doivent être surveillés régulièrement et des mesures doivent être prises en cas d'évolution. Nécessité d'intervention à court terme.
 - **DB** : Défauts qui indiquent une évolution avancée. Des mesures de renforcement ou de remplacement doivent être prises. Nécessité d'intervention à très court terme.
- Indice **E** : Défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage. Des mesures doivent être prises dans les plus brefs délais.
- Indice **F** : Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage. Nécessité d'intervention immédiate.

Les différents désordres relevés sont décrits dans le paragraphe 3.1.
Aucune inspection interne de la cheminée n'a été réalisée.

2.3. Investigation réalisées en laboratoire

- **Profondeur de carbonatation :**

Parmi les échantillons prélevés sur site, 2 échantillons de béton ont été soumis à des mesures de profondeur de carbonatation, par la méthode d'aspersion d'une solution de phénolphthaléine sur une coupe fraîche de béton. Cette méthode vise à caractériser l'épaisseur de béton carbonaté en peau d'un élément d'ouvrage, en vue d'estimer les risques de corrosion des armatures. La carbonatation commence depuis la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) du matériau.

Après aspersion de la solution de phénolphthaléine, la détermination de la profondeur de carbonatation dépend de la couleur observée. Si la zone aspergée est colorée en violet (pH > ou = 9), cette zone est considérée comme non carbonatée. Si la zone aspergée reste incolore, on conclura que celle-ci est carbonatée.

- **Examen au Microscope Electronique à balayages (MEB) et sonde d'analyse EDS pour recherche de pathologie :**

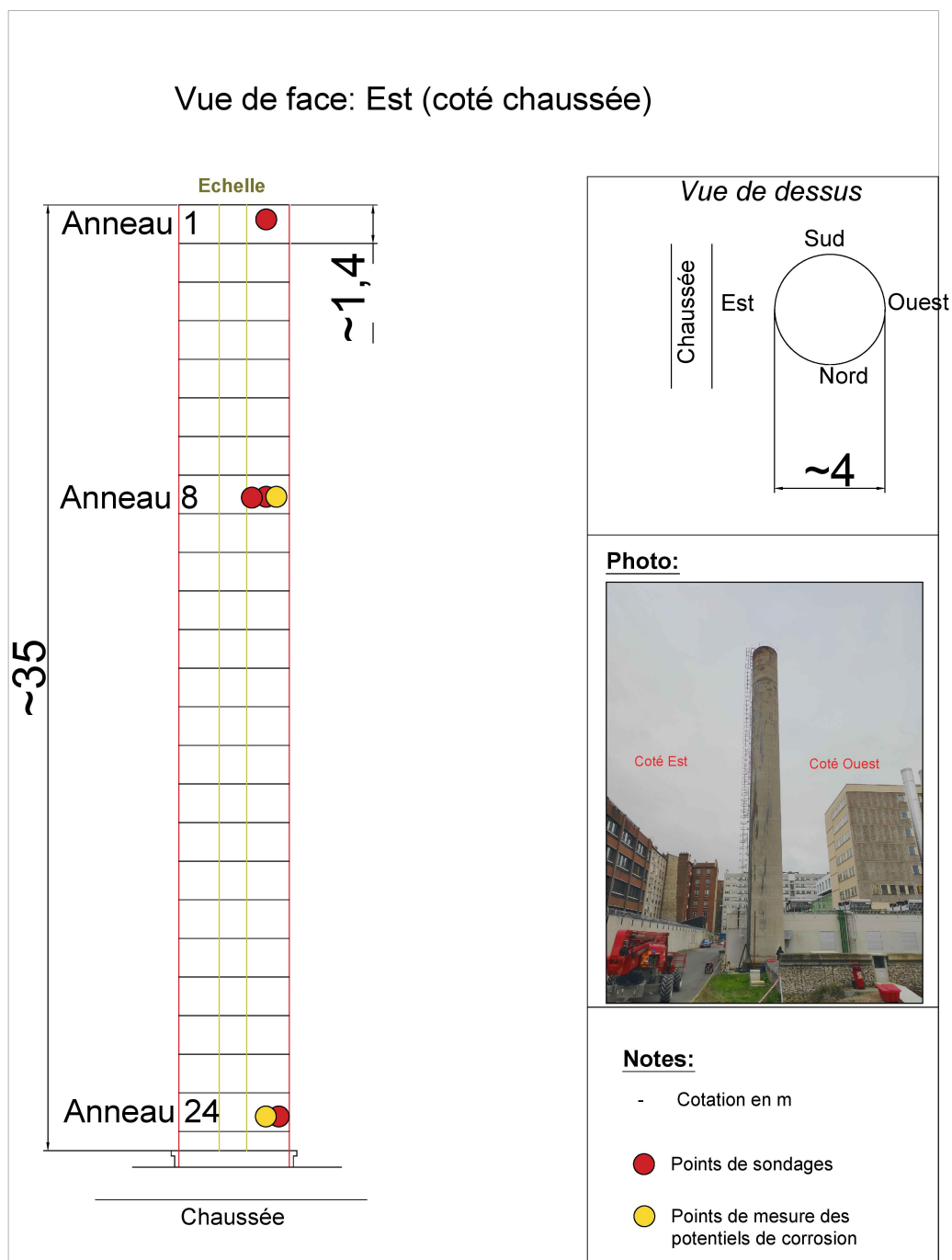
2 examens au microscope électronique à balayage couplés à un spectromètre à sélection d'énergie ont été réalisés en comparatif sur 2 échantillons de béton prélevés sur site : un échantillon prélevé en zone saine et un échantillon prélevé en zone dégradé (zone de fissuration).

Chaque examen a pour finalité de décrire l'état microstructural des constituants du matériau et de détecter d'éventuelles pathologies.

- **Détermination de dosages en sulfates :**

Des dosages en sulfates sont réalisés sur 2 échantillons de béton : un échantillon en zone saine et un échantillon en zone dégradé, en peau de béton (0-3 cm). Les sulfates sont dosés par spectrométrie d'émission atomique après mise en solution par attaque acide selon le mode opératoire GranDuBé. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport au ciment ; pour cela la teneur en silice soluble est déterminée par spectrométrie pour estimer la teneur en ciment de la phase cimentaire.

2.4. Implantation des sondages



3. RESULTATS DES INVESTIGATIONS IN SITU

3.1. Inspection visuelle

L'inspection visuelle a consisté à observer et relever des désordres ou anomalies. Les fiches de relevé des désordres sont disponibles en **annexe 1**.

Pour rappel, les défauts et dégradations sont affectés d'un indice de gravité classé comme suit :

- **Indice B** : Défauts sans conséquence importante autres qu'esthétique.
- **Indice C** : Défauts qui indiquent qu'une évolution risque de se faire anormalement. Ces défauts doivent être surveillés. Nécessité d'intervention à moyen terme.
- **Indice D** : Défauts révélateurs de dégradation, ils sont rangés en deux classes :
 - **DA** : Défauts qui indiquent un début d'évolution. Ils doivent être surveillés régulièrement et des mesures doivent être prises en cas d'évolution. Nécessité d'intervention à court terme.
 - **DB** : Défauts qui indiquent une évolution avancée. Des mesures de renforcement ou de remplacement doivent être prises. Nécessité d'intervention à très court terme.
- **Indice E** : Défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage. Des mesures doivent être prises dans les plus brefs délais.
- **Indice F** : Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage. Nécessité d'intervention immédiate.

Le relevé des désordres a été effectué sur le parement extérieur de la cheminée, sur les endroits visibles et accessibles. Pendant le relevé, on a constaté des désordres portant atteinte à la solidité de l'ouvrage et à sa pérennité ; certains désordres remettent en cause la sécurité des passants au droit de la cheminée. Les différents désordres constatés sont décrits ci-après :

- **Désordres 1:** structure en très mauvais état en tête de cheminée : **Indice : F**

- Description :

Des éclatements de béton coloré à la rouille ont été observés en tête de cheminée. Une perte de section importante des armatures en tête est également constatée. Ci-après quelques photos pour illustration des désordres :



- Origine probable :

La corrosion est le résultat d'un phénomène d'oxydation de l'acier. Cette oxydation peut être la conséquence d'une passivation insuffisante des armatures ou d'une attaque des armatures par élément polluant dans le béton. L'éclatement de béton est provoqué par le foisonnement de la rouille des armatures.

- **Désordre 2:** Fissures sur la cheminée : **Indice : E**

- Description :

Une fissuration généralisée a été observée sur le parement extérieur de la cheminée. Certaines fissures ont un front de fissure de 2 cm environ (front de fissure constaté sur l'anneau 8) ; les fissures sont majoritairement présentes sur la face Est de la cheminée. Ci-après une photo pour illustration :



- Origine probable :

Ces fissures semblent être le résultat de réactions de gonflement interne du béton.

- **Désordre 3** : corrosion des ancrages de l'échelle de la cheminée ainsi que des équipements métalliques en tête de cheminée : **Indice : DA**

- Origine probable :

La corrosion de ces éléments est causée par le manque de revêtements passivant de l'acier.

- **Désordre 4** : Efflorescences blanchâtres : **Indice B**

- Description :

Il s'agit d'efflorescences observées sur le parement de la cheminée.

- Origine :

Ces efflorescences semblent être causées par la lixiviation de la chaux du béton.

- **Désordre 5** : mousses vertes : **Indice C**

- Origine probable :

Ecoulement et stagnation d'eau et de poussières.

3.2. Sondages destructifs

Les sondages destructifs réalisés sur la cheminée ont permis de constater les éléments suivants :

- Des armatures à ronds lisse de diamètre 12 mm (sens vertical) ou 8 mm (sens horizontal),
- Des armatures en bon état vis à vis de la corrosion sur 2 anneaux : l'anneau 8 (en zone dégradée) et l'anneau 24 (en zone saine) en partant du haut (voir implantation au **par. 2.4**),

- Des armatures mises à nue et très corrodées en tête de cheminée avec des pertes de sections importantes.

Ci-après les photos des armatures prises lors des sondages destructifs :

Vue du sondage sur l'anneau 24 (zone basse de la cheminée) :



Vue du sondage sur l'anneau 8 (zone haute de la cheminée) :



Vue du sondage en tête de cheminée:



3.3. Mesure des potentiels de corrosion

Des mesures de potentiels de corrosion ont été réalisées sur 2 zones de mesures: sur l'anneau 8 (en zone dégradée) et l'anneau 24 (en zone saine). Sur les deux zones de mesures, on a constaté des faibles gradients de potentiels. Cependant, on a constaté des potentiels différents sur les deux zones.

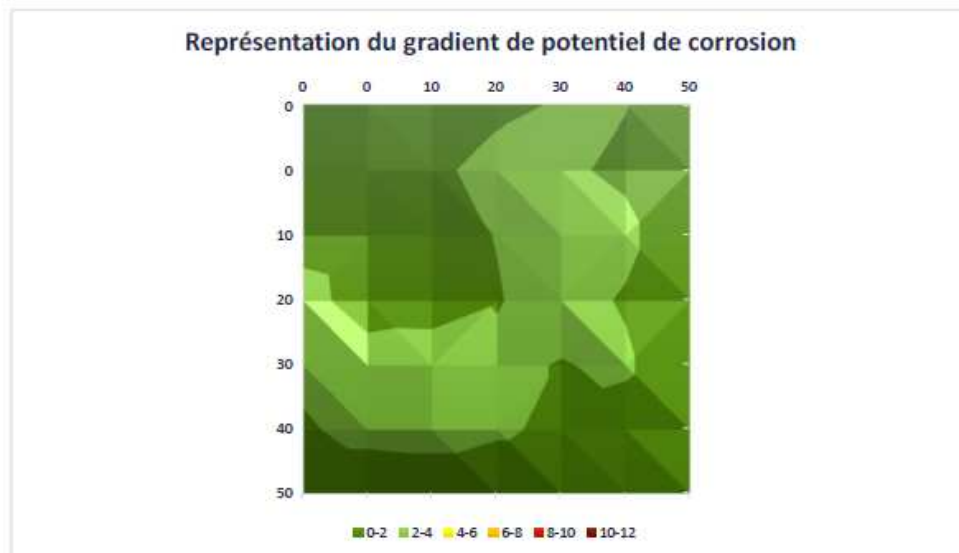
- **Zone saine :**

Résultats des mesures de potentiels en zone saine :

0	0	10	20	30	40	50
0	- 245.5	- 250.2	-245	- 257.5	-262	- 282.7
10	-239	-249	-232	-244	- 267.2	- 266.4
20	- 238.5	-239	-236	-248	-247	-255
30	-225	-235	-235	-229	-219	-237
40	- 251.5	- 229.5	-224	-234	-233	-252
50	-253	-258	- 255.5	-258	-244	-247

L'intervalle de mesure est de 10 cm.

Représentation des gradients de potentiels en zone saine :



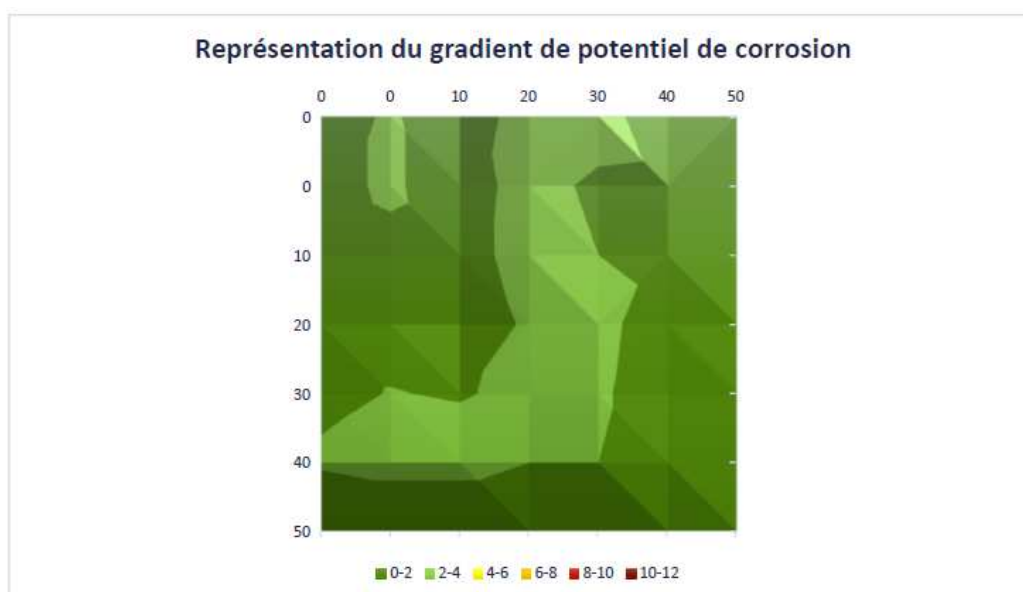
• **Zone dégradée :**

Résultats des mesures de potentiels en zone dégradée :

0	0	10	20	30	40	50
0	-389	-388	399.5	408.5	-435	-431
10	-403	409.5	406.5	400.2	417.5	-434
20	-	-427	-412	-407	-427	-441
30	-434	-434	-423	-429	441.6	-443
40	-430	-438	-419	-418	-441	-443
50	-	-436	-409	-416	-436	434.5

L'intervalle de mesure est de 10 cm.

Représentation des gradients de potentiels en zone dégradée :



Le gradient de couleur des cartographies peut varier du rouge, zone sujette à une forte activité de corrosion, au vert, zone sujette à une activité faible de corrosion. On retiendra que les cartographies présentées ci-dessus mettent en évidence des gradients de potentiels négligeables au sein d'une même zone (< 8 mv/cm). Néanmoins une différence de potentiels importante est observée entre les 2 zones.

4. RESULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRES

Le rapport des essais en laboratoire est reporté en annexe 2.

4.1. Mesure de profondeur de carbonatation

2 prélèvements ont été réalisés sur l'anneau 8 et l'anneau 24. Sur l'anneau 8, on a prélevé l'échantillon en zone dégradée (zone de fissuration) et sur l'anneau 24, on a prélevé l'échantillon en zone saine.

Les résultats de mesure des fronts de carbonatation sont présentés ci-après :

Echantillon	Profondeur de carbonatation	Photo de l'échantillon	Enrobage réel au droit du prélèvement (mm)
Béton n°1 (zone saine)	<u>Profondeur moyenne de carbonatation depuis la surface du béton : 19 mm</u> <u>Profondeur maximum de carbonatation depuis la surface du béton : 28 mm</u>		45
Béton n°2(zone dégradée)	<u>Profondeur moyenne de carbonatation depuis la surface du béton : 33 mm</u> <u>Profondeur maximum de carbonatation depuis la surface du béton : 35 mm</u>		45

On constate que les aciers ne sont pas situés en zone carbonatée pour la zone saine (anneau 24) et pour la zone dégradée (anneau 8). L'enrobage précisé ci-dessus est l'enrobage réel au droit du prélèvement. Cet enrobage a été comparé aux enrobages visualisés au radar au droit des prélèvements.

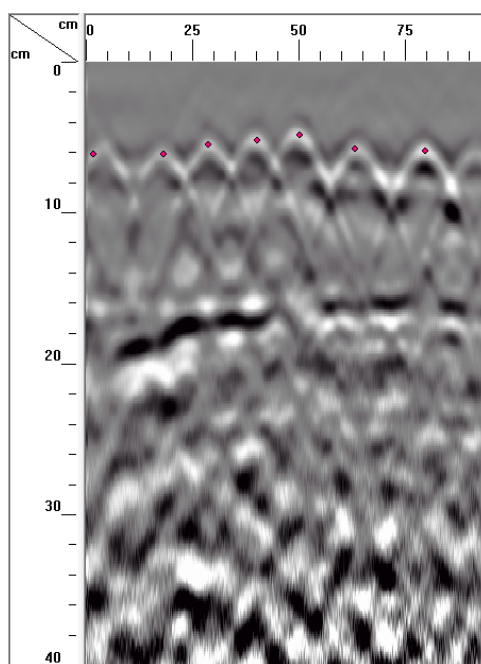


Figure 3 : radargramme récolté sur la cheminée (les armatures du premier lit correspondent aux points rouges)

4.2. Recherche de pathologie au microscope électronique :

Suite aux examens microstructuraux des deux échantillons prélevés sur la cheminée en zone saine (AN.24) et en zone dégradée (AN.8), les deux échantillons sont d'aspects assez proches. On a constaté sur ces deux échantillons :

- De l'étringite en ilots voire en petites zones d'aiguilles comprimées sur fracture à cœur,
- Des zones riches en formations de gypse puis des zones de liant riche en élément S (soufre) en fracture surface.
- La présence de l'élément Cl (chlore) sous forme de petites traces dans certaines analyses du liant de l'échantillon et d'hydrates sur fracture à cœur.

Ces constats semblent indiquer des réactions sulfatiques interne du béton. Cela expliquerait la présence des fissures multidirectionnelles constatées sur le parement de la cheminée. Par ailleurs, la présence de chlore est à éviter dans le béton armé (peut provoquer la corrosion des armatures). Seules des analyses complémentaires afin de déterminer le taux de chlorures permettrait d'identifier un éventuel dépassement de seuil.

4.3. Dosage en sulfates

Les teneurs en sulfates obtenues, ainsi que ces mêmes teneurs exprimées par rapport au ciment, sont présentées, en pourcentage massique, dans le tableau suivant :

	% silice	% ciment*	% SO ₃	% SO ₃ / ciment
Béton n°3 (0-3 cm) (zone saine, AN.24)	3,62	13,9	0,93	6,68
Béton n°4 (0-2,5 cm) (zone dégradé, AN.8)	2,64	10,2	0,75	7,39

Teneurs en sulfates sur les échantillons n°3 et n°4

* : La teneur en ciment est calculée par la méthode de la silice soluble conformément à GranDuBé en émettant l'hypothèse que le ciment titre 26 % de silice soluble (cas d'un ciment au laitier ; on note en effet, la présence, en quantité importante, de sulfures caractéristiques du laitier de haut fourneau).

Afin de s'assurer du type de ciment exact employé à la construction et envisager une éventuelle résistance aux environnements agressifs, il serait nécessaire de réaliser un dosage en ciment et une étude de formulation.

5. Conclusion générale

5.1. Rappel des objectifs

Suite à l'apparition de désordres sur une cheminée de chaufferie située à l'Hôpital d'Instruction des Armées Bégin, l'ESID de l'Île-de-France représentée par Mr URVOIT Timothée, a demandé à l'agence d'Elancourt de réaliser une mission de diagnostic d'une cheminée de chaufferie.

Les objectifs de la mission sont de donner un avis sur l'état d'altération de la cheminée et de fournir des principes généraux de réparation ou d'études complémentaires.

5.2. Résultats des investigations

Les investigations sur site ont permis d'observer les éléments suivants :

- Des armatures en bon état vis à vis de la corrosion sur les 2 anneaux sondés: l'anneau 8 et l'anneau 24 (voir implantation au par. 2.1),
- Une tête de cheminée (anneau 1) en très mauvais état, qui présente des éclatements de béton et des pertes de section importante des armatures,
- Des fissures multidirectionnelles avec des fronts de fissures de 2 cm sur l'anneau 8,
- La présence d'efflorescences blanchâtres qui peuvent correspondre à de la calcite,
- La présence de mousse verte en bas de cheminée,
- La corrosion des ancrages de l'échelle de la cheminée et de la structure en acier présente en tête de cheminée.

Afin de rechercher les origines probables des désordres constatés, des investigations ont été réalisées en laboratoire. Les essais réalisés ont permis d'établir que :

- Les fissures multidirectionnelles semblent résulter de réactions sulfatiques internes du béton et/ou du foisonnement de la rouille d'armatures très oxydées,
- Les profondeurs de carbonatation obtenues sur les échantillons prélevés sur l'anneau 8 et l'anneau 24 sont inférieures aux enrobages respectifs,
- Les échantillons de béton prélevés sur l'anneau 8 et l'anneau 24 présentent des teneurs en sulfates supérieures au seuil des 4 %.

Il est probable que le soufre apporté par les fumées de la cheminée ait pénétré le béton et engendré des réactions sulfatiques internes. Ces réactions gonflantes créent des réseaux de microfissurations et fissurations qui représentent des chemins préférentiels pour le passage

de l'eau (infiltration) et de l'air (CO_2). La présence de l'eau et de l'air permet d'activer la corrosion des armatures et d'accentuer les phénomènes d'expansions observés.

5.3. Préconisation

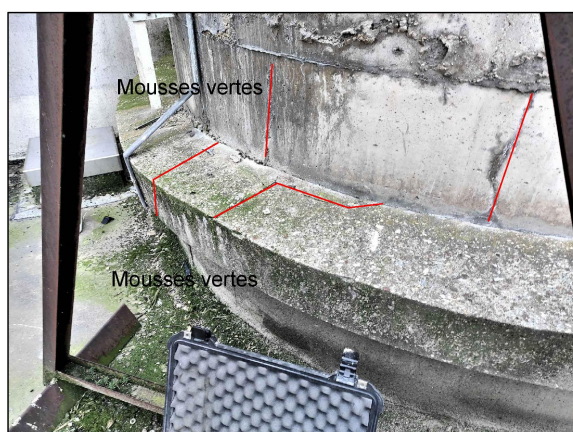
- Il est recommandé sans délai de faire réaliser une purge des éclats de béton en formation afin de garantir la sécurité du personnel pouvant circuler à proximité. Cette purge devra être réalisée tous les 6 mois à 1 ans. De plus, un périmètre de sécurité doit être établi afin de limiter l'approche de la cheminée au personnel non autorisé.
- Les investigations ont mis en évidence des dégradations visibles principalement sur la face Est et en partie haute de la cheminée. Néanmoins, la concordance des résultats des essais réalisés en comparatif (zone saine, zone dégradée) ont traduit une potentielle apparition de ces dégradations en pied de la cheminée. De ce fait, nous recommandons à court terme la destruction/reconstruction de la cheminée.

Annexe 1 : Relevé de désordres

Fiche de reconnaissance n°5-A

Zone : Bas de cheminée

Coté : Nord-Est



— Fissures

Désordres constatés:

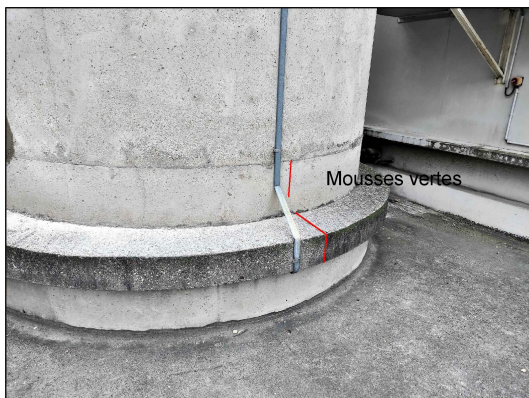
- Fissures,
- Mousses vertes.



Fiche de reconnaissance n°5- B

Zone : Bas de cheminée

Coté : Nord-Ouest



Mousses vertes

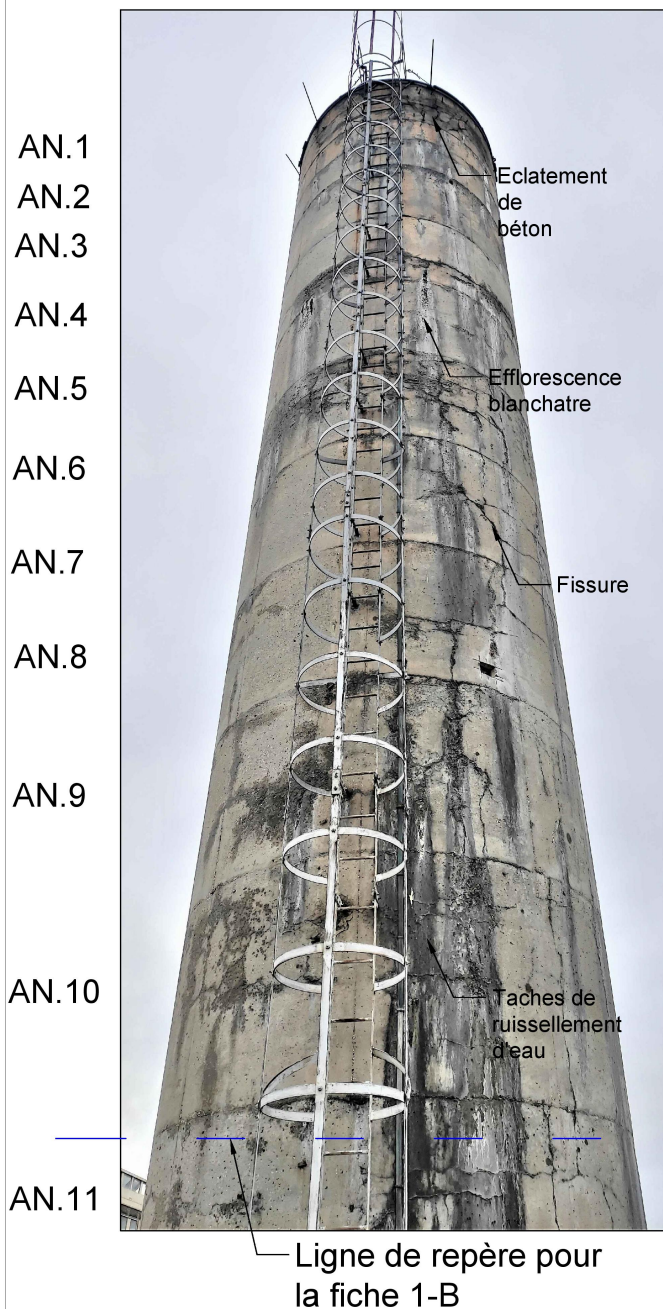


Mousse

Fissures

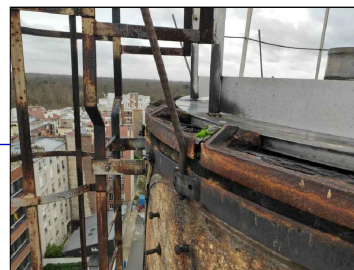
Désordres constatés:

- Fissures,
- Mousses vertes.

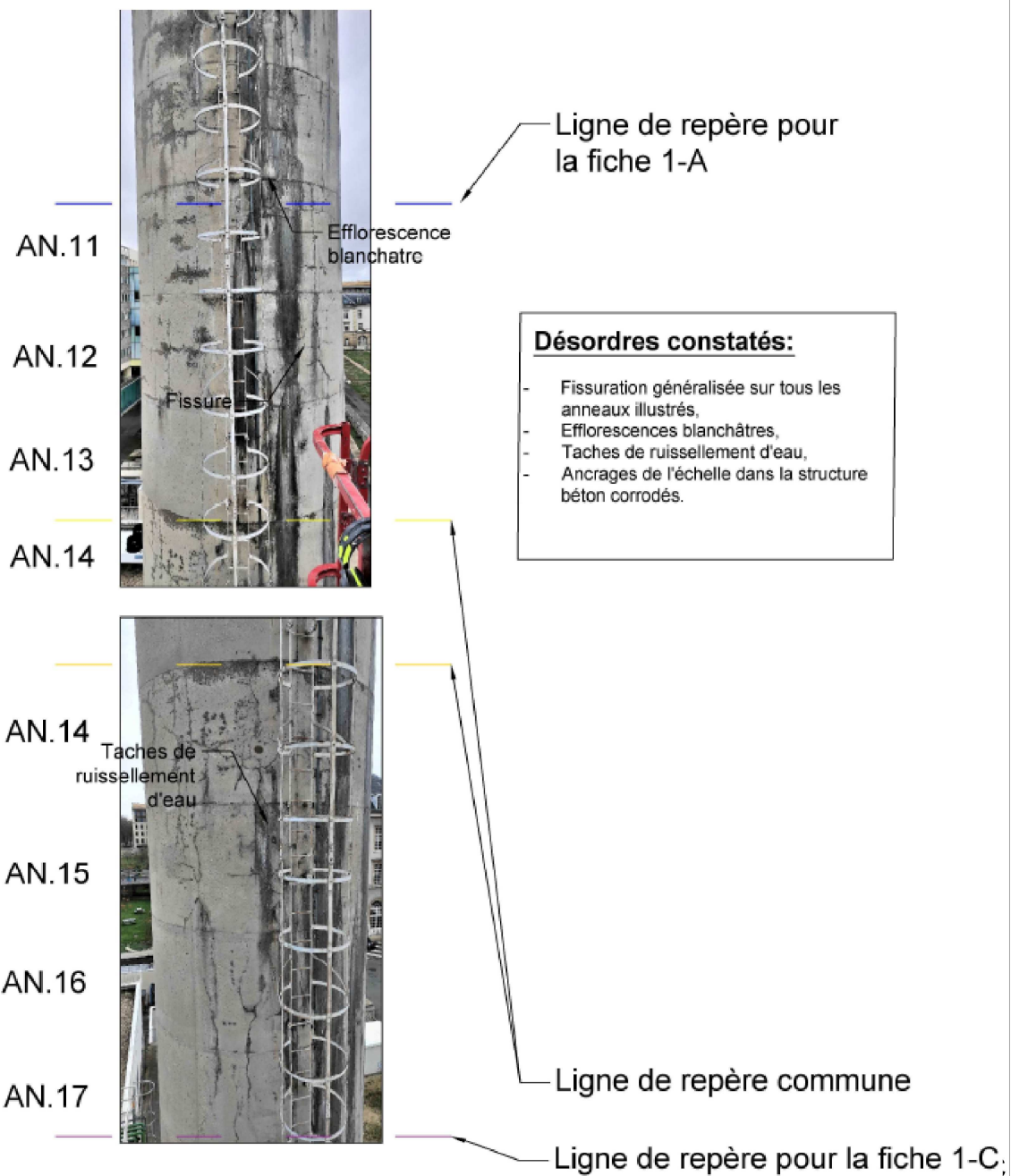


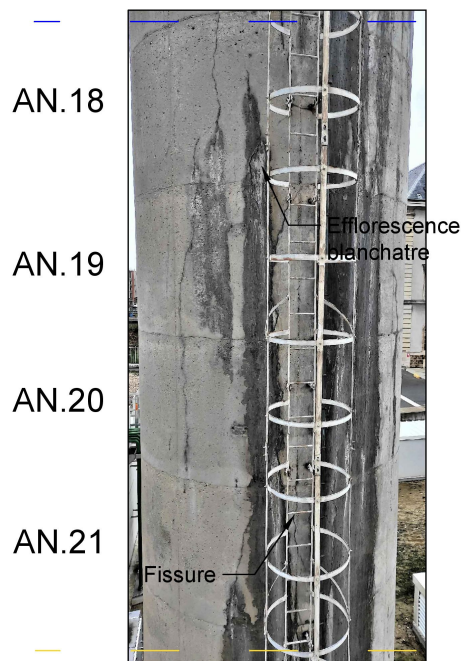
Désordres constatés:

- Fissuration généralisée sur tous les anneaux illustrés (coté Nord),
- Efflorescences blanchâtres, "
- Taches de ruissellement d'eau,
- Ancrages de l'échelle dans la structure béton corrodés,
- Eclatement de béton en tête de cheminée,
- Armatures à nu corrodées en tête de cheminée,
- Eléments métalliques en tête de cheminée corrodés .



Vues de la tête de cheminée

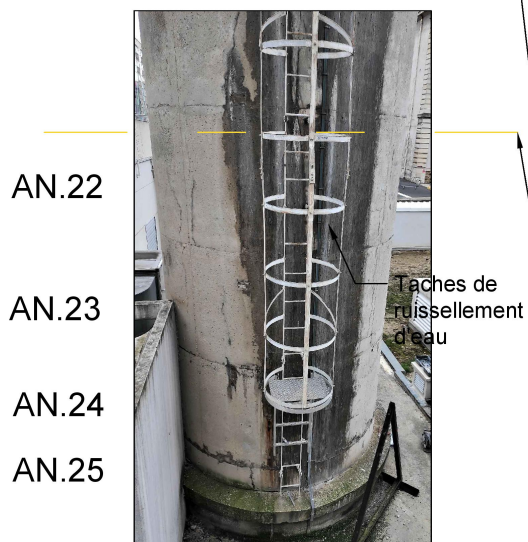




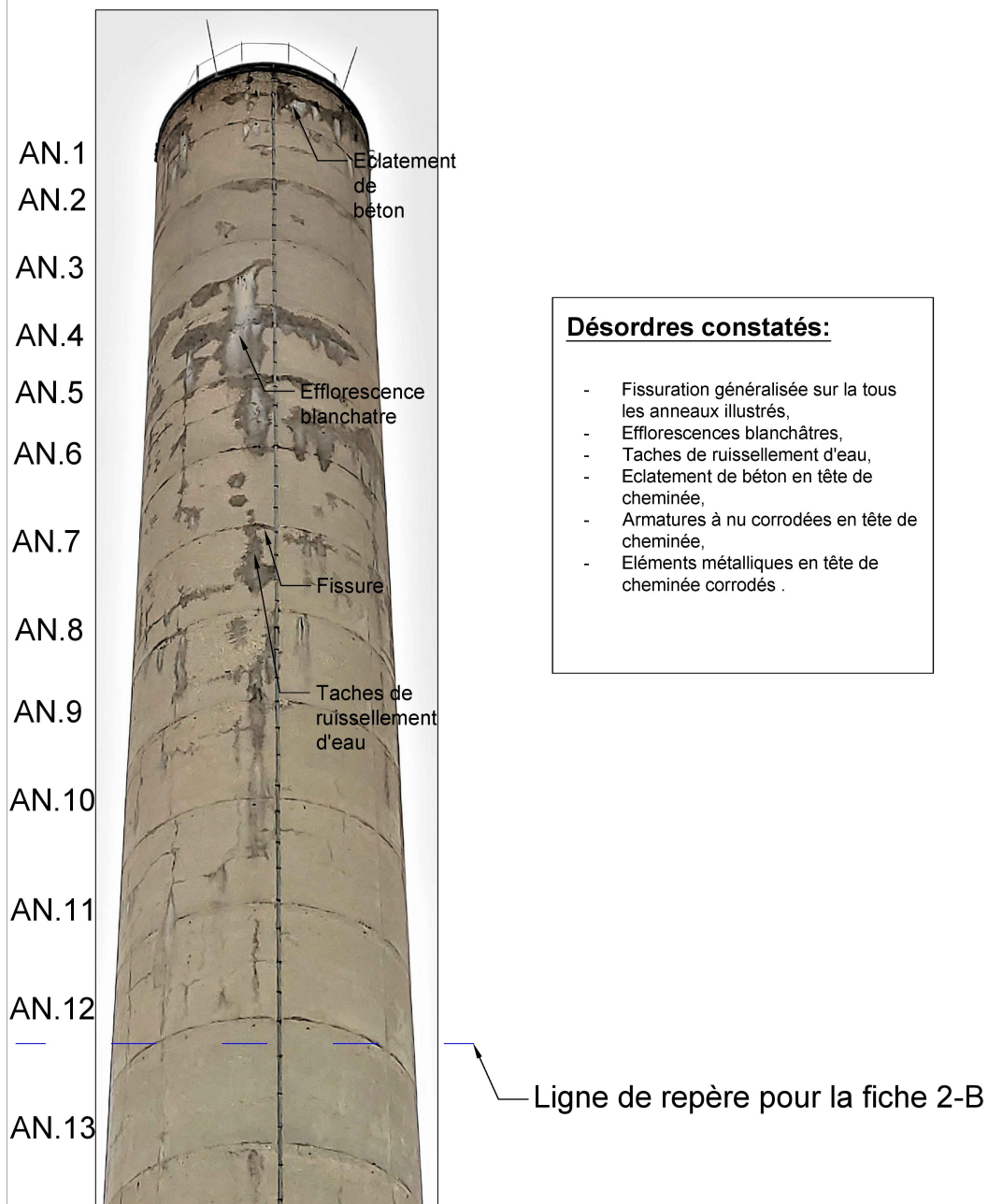
Ligne de repère pour la fiche 1-B

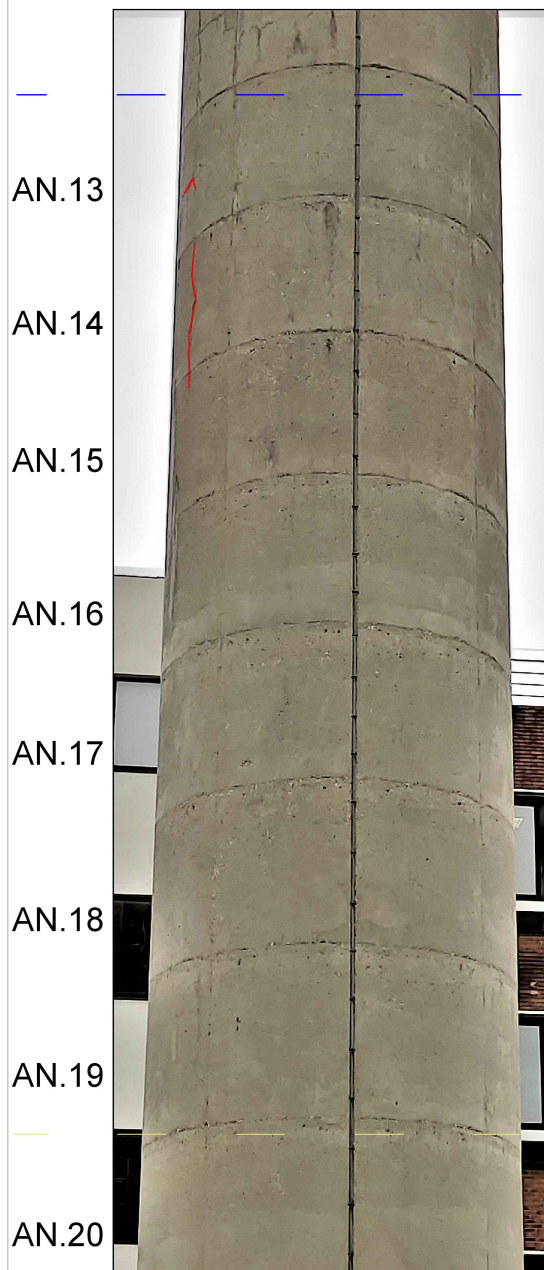
Désordres constatés:

- Fissuration généralisée sur la tous les anneaux illustrés,
- Efflorescences blanchâtres,
- Taches de ruissellement d'eau,
- Ancrages de l'échelle dans la structure béton corrodés.



Ligne de repère commune





Ligne de repère pour la fiche 2-A

Désordres constatés:

- Quelques fissures sur certains anneaux (13 & 14)

Ligne de repère pour la fiche 2-C

Fiche de reconnaissance n° 2- C

Côté : OUEST

Partie 3

AN.20

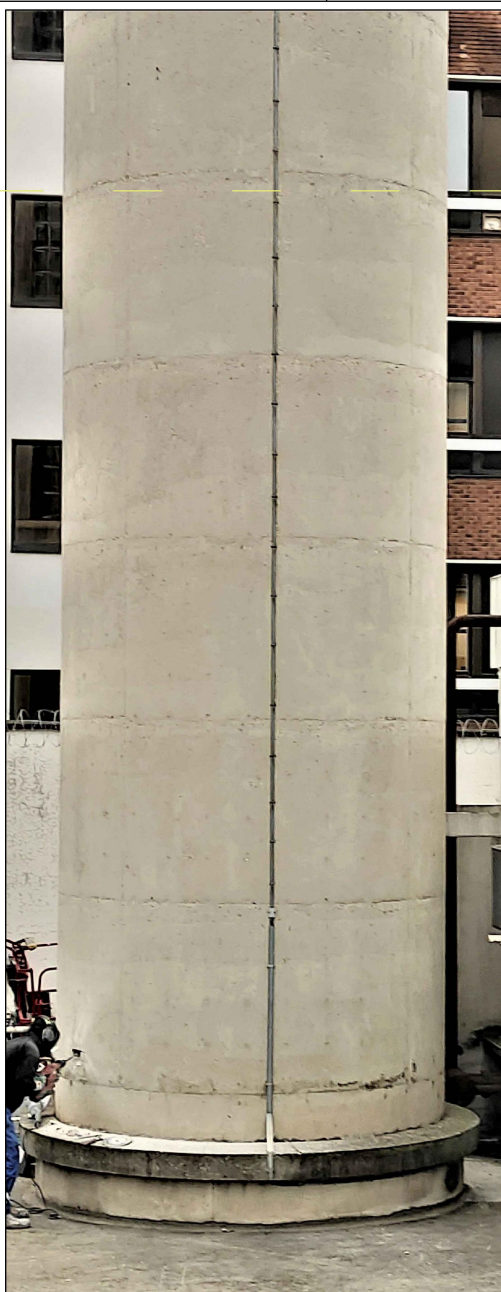
AN.21

AN.22

AN.23

AN.24

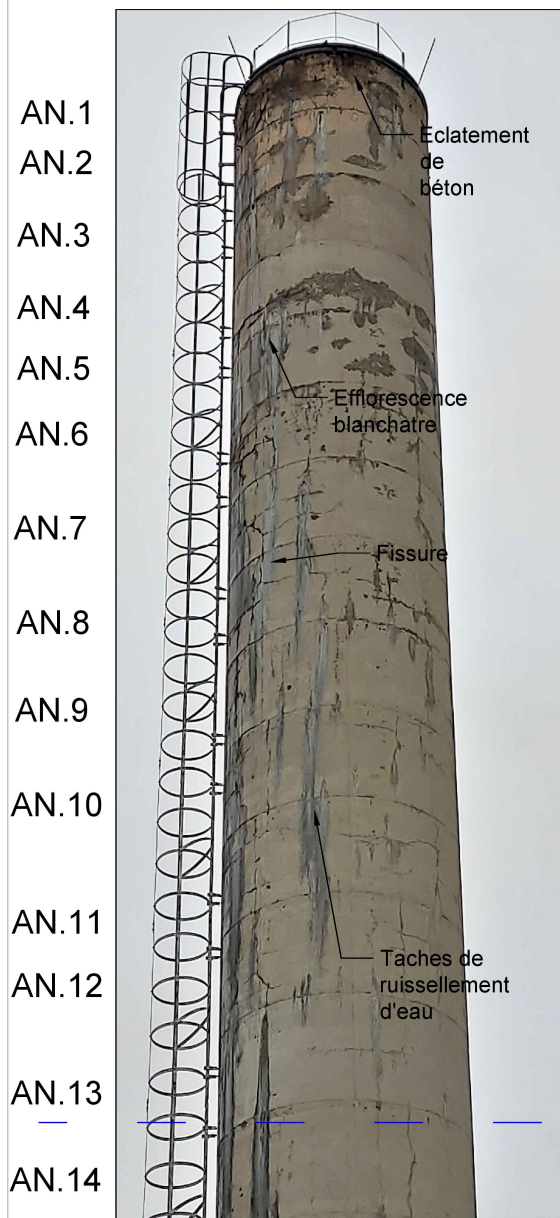
AN.25



Ligne de repère pour la
fiche 2-B

Désordres constatés:

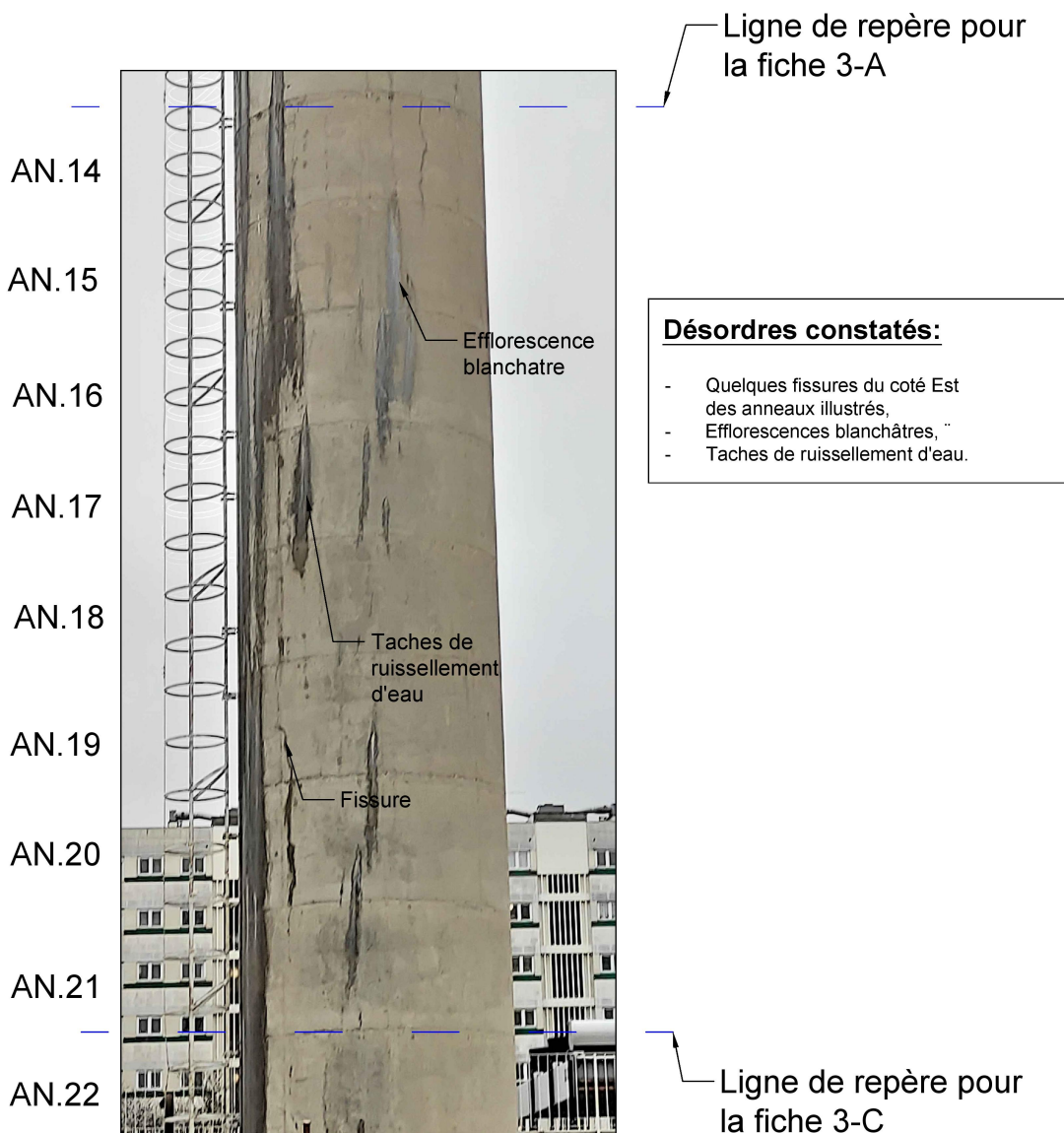
- RAS du côté Sud des anneaux
illustrés



Désordres constatés:

- Fissuration généralisée sur tous les anneaux illustrés,
- Efflorescences blanchâtres, "
- Taches de ruissellement d'eau,
- Ancrages de l'échelle dans la structure béton corrodés,
- Eclatement de béton en tête de cheminée,
- Armatures à nu corrodées en tête de cheminée,
- Eléments métalliques en tête de cheminée corrodés.

Ligne de repère pour la fiche 3-B



GINGER CEBTP Agence d'Elancourt AFFAIRE: BDP7.L.193 - Diagnostic de la cheminée - Hôpital d'Instruction des Armées Bégin		
Fiche de reconnaissance n°3- C	Coté : NORD	Partie 3
Ligne de repère pour la fiche 3-B AN.22 AN.23 AN.24 AN.25 Désordres constatés: - Quelques fissures du coté Est des anneaux illustrés, - Efflorescences blanchâtres, " - Signes de ruissellement d'eau.		

AN.1

AN.2

AN.3

AN.4

AN.5

AN.6

AN.7

AN.8

AN.9

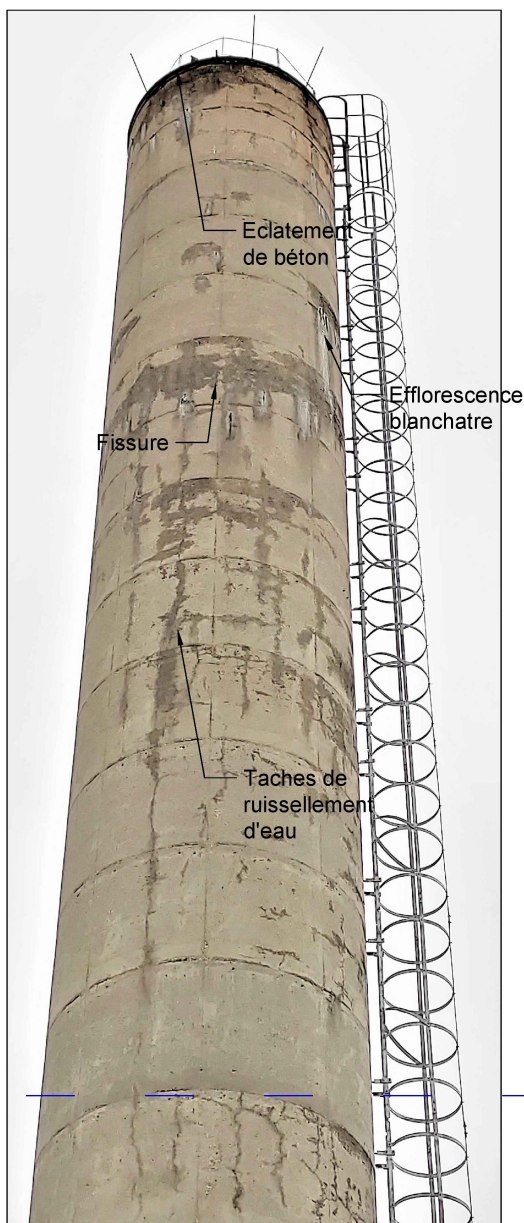
AN.10

AN.11

AN.12

AN.13

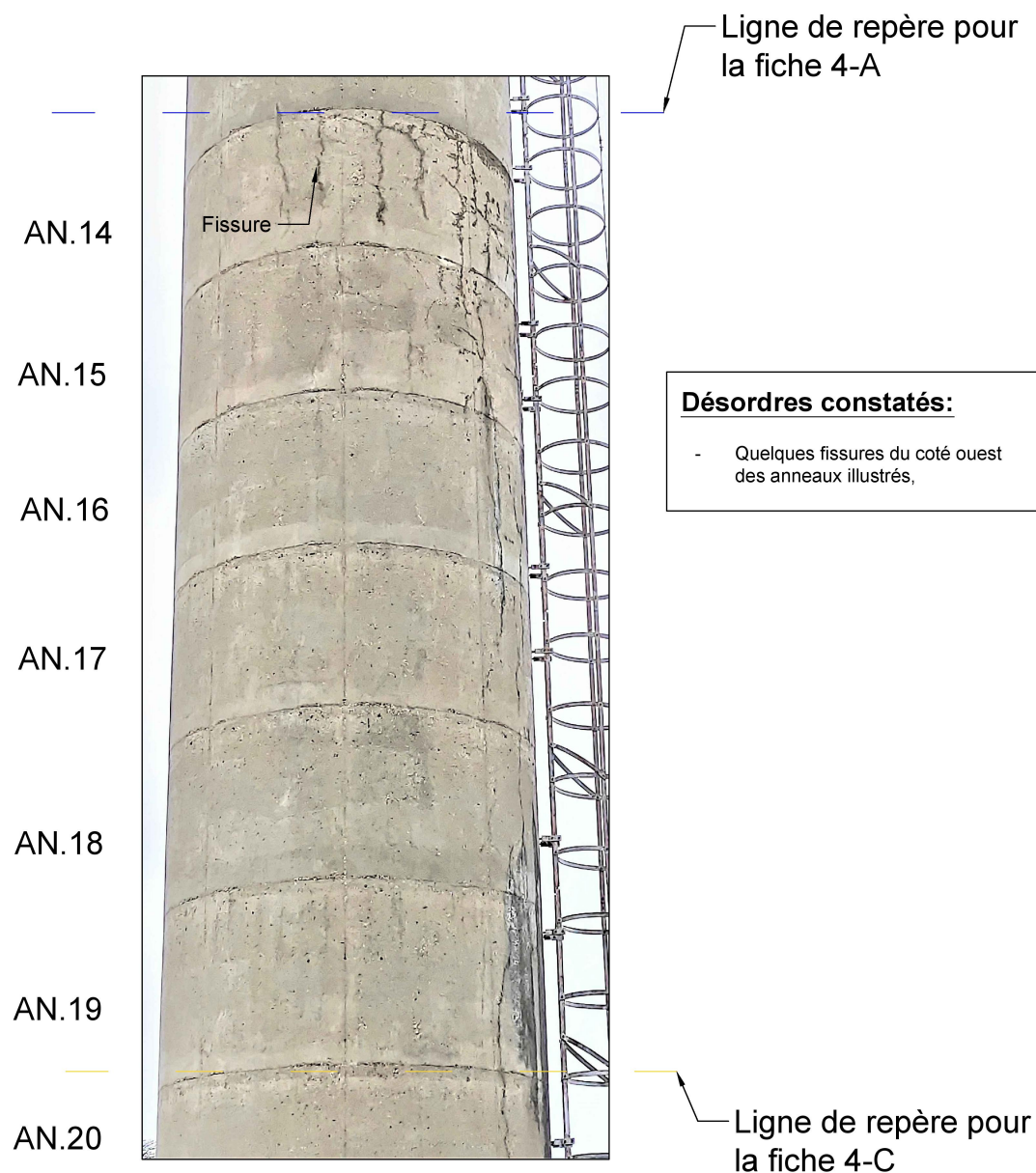
AN.14



Désordres constatés:

- Fissuration généralisée sur tous les anneaux illustrés,
- Efflorescences blanchâtres, ..
- Taches de ruissellement d'eau,
- Ancrages de scellement de l'échelle dans la structure béton corrodés,
- Eclatement de béton en tête de cheminée,
- Armatures à nu corrodées en tête de cheminée,
- Eléments métalliques en tête de cheminée corrodés.

Ligne de repère pour la fiche 4-B



GINGER CEBTP Agence d'Elancourt AFFAIRE: BDP7.L.193 - Diagnostic de la cheminée - Hôpital d'Instruction des Armées Bégin		
Fiche de reconnaissance n°4-C	Coté : OUEST	Partie 3

AN.20

AN.21

AN.22



Ligne de repère pour la fiche 4-B

Désordres constatés:

- RAS du coté Ouest des anneaux illustrés

Annexe 2 : Rapport des essais en laboratoire

I- ECHANTILLONS

Références du Demandeur : 6 fragments de béton numérotés de 1 à 6

Affaire : Hôpital d'instruction des Armées Bégin – Saint-Mandé (94) – Cheminée de chaufferie

N° de réception à GINGER CEBTP à Elancourt (78) : 144318 du 04/01/2022

II- PROGRAMME D'ESSAIS

Objet de la demande :

- Examen visuel préalable à l'examen MEB sur les échantillons n°5 et n°6.
- Examen au microscope électronique à balayage pour la recherche de pathologies sur les échantillons n°5 et n°6.
- Mesure de la profondeur de carbonatation sur les échantillons n°1 et n°2.
- Détermination de la teneur en sulfates sur les échantillons n°3 et n°4.

Réf. : ELAN-IMAT-ED08 v1 du 28/08/2020

Observations : Le présent rapport comprend 19 pages.

Sans autorisation préalable, il n'est utilisable à des fins commerciales ou publicitaires qu'en reproduction intégrale. Les résultats obtenus ne valent que pour l'objet soumis à essai, dans les conditions de réalisation de celui-ci. Ils ne sont pas généralisables.

Sauf demande écrite, les échantillons seront éliminés un mois après l'envoi du rapport.

Ginger CEBTP – S.A.S.U. au capital de 2 597 660 €
Siège social : 12, avenue Gay Lussac – ZAC la Clef Saint Pierre – 78990 Elancourt – Tél. : 01 30 85 24 00
RCS Versailles B 412 442 519 – Code APE 7112 B – N°T.V.A : FR 31 412 442 519
Email : cebtp.idf@groupe-cebtp.com – Site internet : www.groupe-cebtp.com

Principes des essais :**Principe de l'examen visuel**

L'examen visuel consiste en des observations à l'œil des échantillons. Celles-ci sont généralement réalisées sur les échantillons, à leur réception, exempts de toute préparation. Une description générale comportant les paramètres principaux des échantillons d'étude est alors réalisée.

Principe de l'examen au MEB

Cet essai consiste à étudier la microstructure du matériau et d'en rechercher les pathologies (ettringite comprimée, alcali-réaction, etc.). Le microscope électronique utilisé est un JEOL JSM 840 A. Le spectromètre à sélection d'énergie est un IMIX-PC - Princeton Gamma-Tech. Grâce à sa grande profondeur de champ, le microscope électronique à balayage (M.E.B.) est particulièrement adapté à l'examen des surfaces et fournit une vision tridimensionnelle de l'échantillon sur une très large gamme de grossissements. Le MEB est couplé avec un spectromètre à sélection d'énergie (EDS) qui, permettant de détecter les photons X émis, fournit une analyse élémentaire quasi ponctuelle du matériau ou une cartographie montrant la répartition des éléments chimiques dans la zone observée au microscope. Cette détection est cependant limitée aux éléments de numéro atomique $Z \geq 5$ (Bore, B), pour un volume minimal analysé d'environ 1 micron cube, et une limite de détection de l'ordre de 1% relatif. Avant examen, les échantillons sont séchés et métallisés au carbone. Cet examen est effectué conformément aux documents GINGER CEBTP référencés ELAN/IMAT/I08, ELAN/IMAT/I13 et ELAN/IMAT/I20 et ELAN/IMAT/I46.

Principe de la mesure de la profondeur de carbonatation

La mesure de la profondeur de carbonatation est réalisée par pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur une fracture fraîche du béton selon la norme NF EN 14630.

Principe du dosage des sulfates

Le dosage des sulfates (SO_3) est établi par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (ICP) après attaque acide.

Principe du dosage en silice

Le dosage de la silice soluble (SiO_2) est réalisé par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (ICP) selon le mode opératoire recommandé par GranDuBé ; il permet d'estimer la teneur en ciment des matériaux afin d'exprimer les résultats des dosages en sulfates par rapport au ciment.

Date des essais : Janvier 2022

III- RESULTATS**III-1- Résultats de l'examen visuel et de l'examen au microscope électronique à balayage**

Les résultats de ces examens sont donnés sous forme de fiches et de planches photographiques ci-après.

Echantillon n°5 – Examen visuel et examen MEB en surface



Photo n°1 Réf. : Banc photographique
Vue générale de la sous face du fragment



Photo n°2 Réf. : MEB
Aspect de la surface

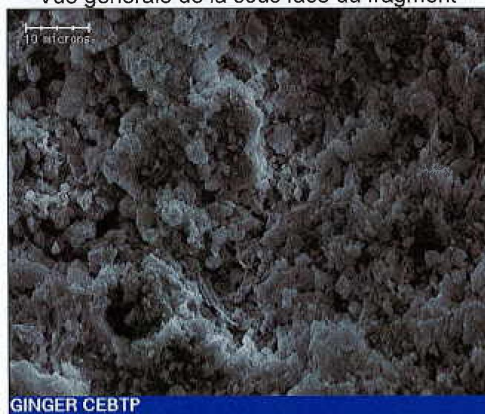
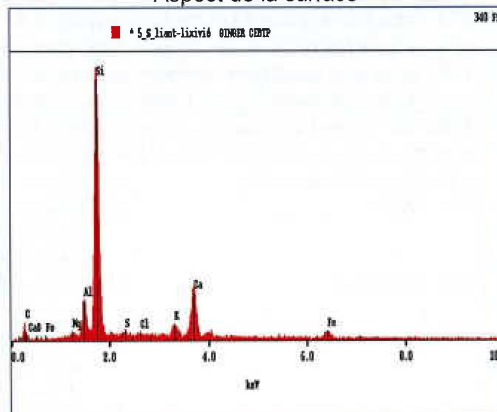


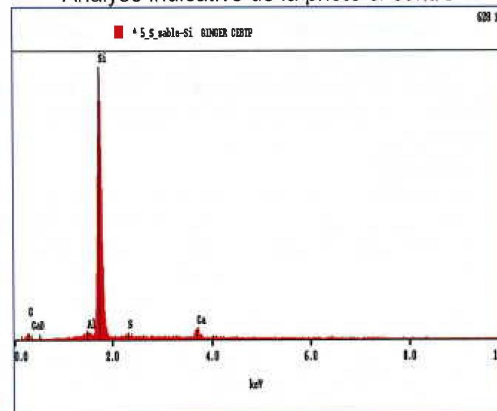
Photo n°3 Réf. : MEB
Aspect du liant



Spectre n°1 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°4 Réf. : MEB
Grain de sable apparent

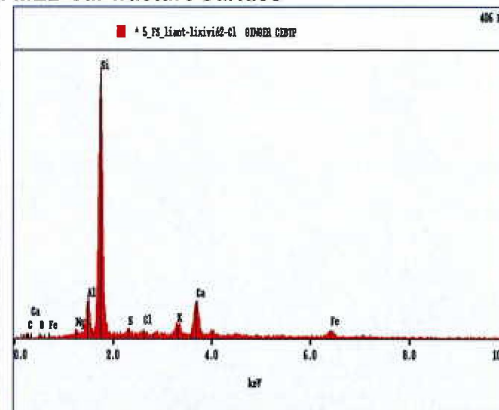


Spectre n°2 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°5 – Examen MEB sur fracture surface



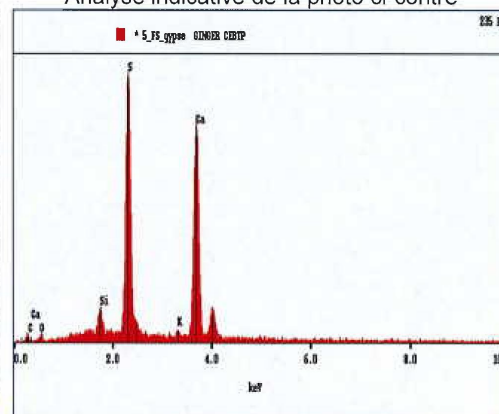
Photo n°5 Réf. : MEB
Aspect du liant en extrême surface



Spectre n°3 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



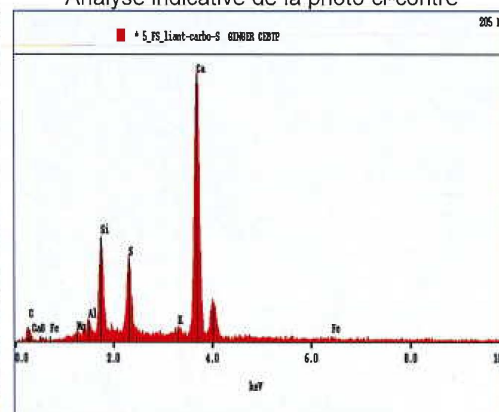
Photo n°6 Réf. : MEB
Zone riche en formations de gypse



Spectre n°4 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°7 Réf. : MEB
Liant riche en élément S

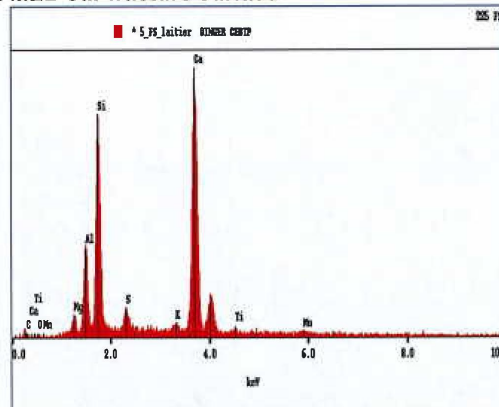


Spectre n°5 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°5 – Examen MEB sur fracture surface



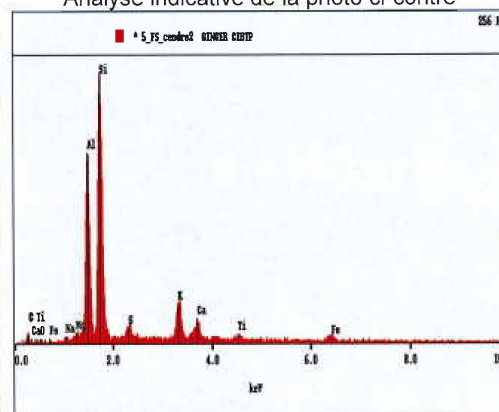
Photo n°8 Réf. : MEB
Grain de laitier



Spectre n°6 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



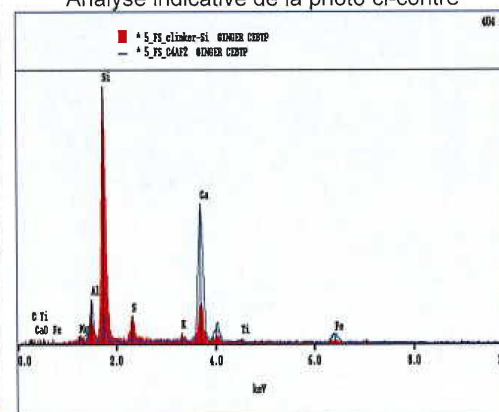
Photo n°9 Réf. : MEB
Petite cendre



Spectre n°7 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°10 Réf. : MEB
Clinker résiduel

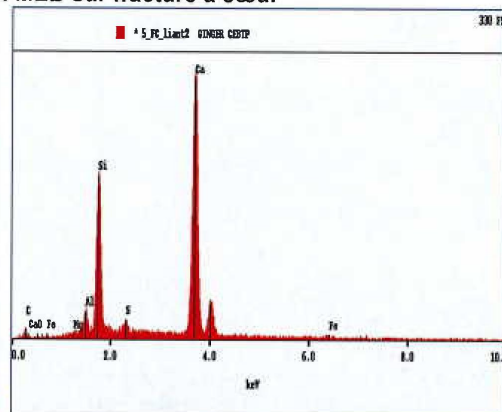


Spectre n°8 Réf. : EDS
Analyses indicatives de la photo ci-contre

Echantillon n°5 – Examen MEB sur fracture à cœur



Photo n°11 Réf. : MEB
Aspect du liant



Spectre n°9 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

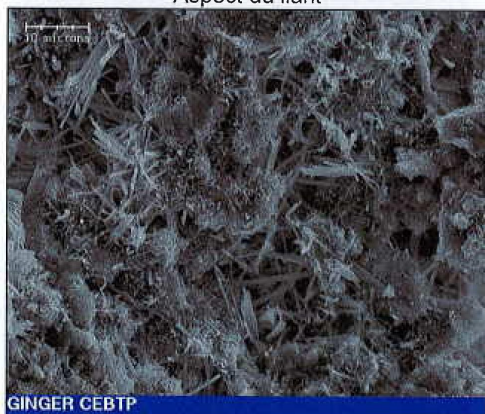
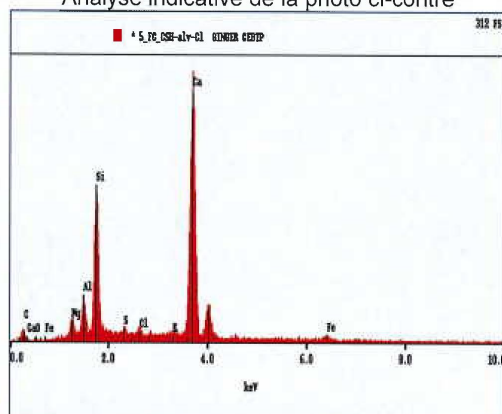


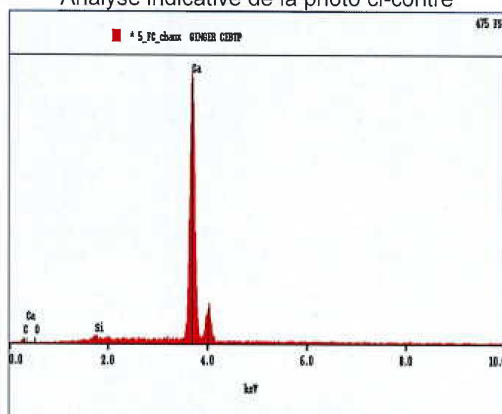
Photo n°12 Réf. : MEB
Zone de plus faible compacité



Spectre n°10 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°13 Réf. : MEB
Chaux hydratée

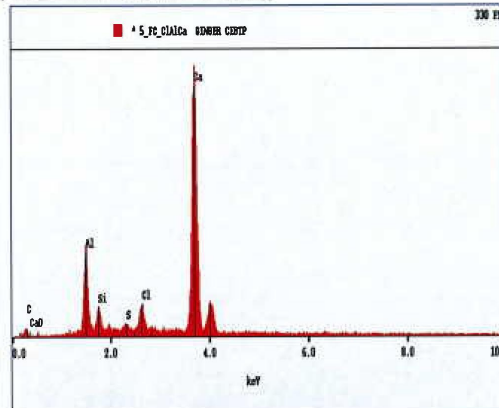


Spectre n°11 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°5 – Examen MEB sur fracture à cœur



Photo n°14 Réf. : MEB
Chloroaluminates de calcium hydratés



Spectre n°12 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



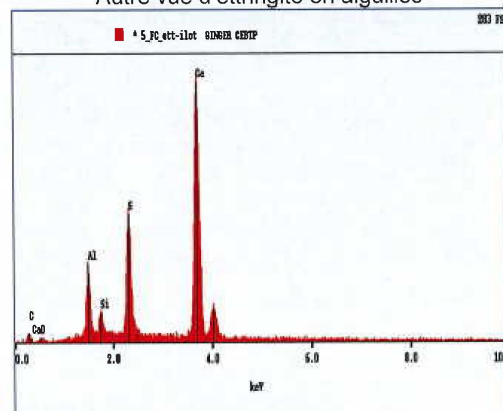
Photo n°15 Réf. : MEB
Ettringite en aiguilles



Photo n°16 Réf. : MEB
Autre vue d'ettringite en aiguilles



Photo n°17 Réf. : MEB
Ettringite en ilot d'aiguilles comprimées

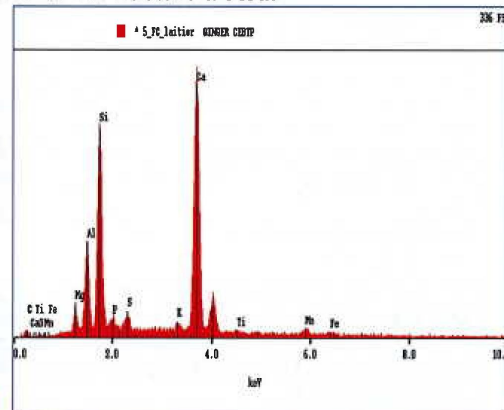


Spectre n°13 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°5 – Examen MEB sur fracture à cœur



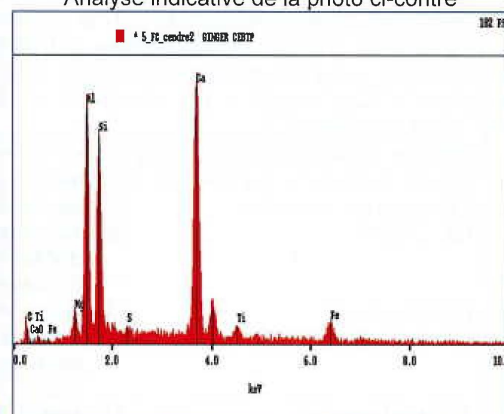
Photo n°18 Réf. : MEB
Grain de laitier



Spectre n°14 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°19 Réf. : MEB
Résidus d'une cendre



Spectre n°15 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°20 Réf. : MEB
Aspect des porosités



Photo n°21 Réf. : MEB
Interface sable calcaire/liant

Référence du prélèvement : n°6

Description : L'échantillon est un fragment de béton de dimensions de l'ordre de 26 x 75 pour une épaisseur d'environ 47 mm, séparé en deux morceaux (voir photo n°22). Sa surface est de couleur beigeâtre. Le liant, sur fracture, est de couleur grise et les gravillons de couleurs crème à beiges, de formes roulées à subanguleuses et d'un passant estimé à 12 mm. Sur une épaisseur submillimétrique à millimétrique, le liant en surface du béton est beige puis gris foncé. Profondeur de carbonatation : Un test à la phénolphthaléine n'indique pas de coloration du liant sur une profondeur de 10 à 22 mm par rapport à la surface. Au-delà, le liant est nettement coloré.

Zone de prélèvement :

- ☒ En surface
 ☒ Sur fracture à cœur
☒ Sur fracture à proximité de la surface
 ☐ Autre

Surface : La surface montre un aspect déstructuré et des grains de sable apparents (voir photo n°23). Ces derniers sont fréquemment siliceux (voir photo n°24 et spectre n°16). Le liant est granuleux et de compacité faible à moyenne (voir photo n°25). Ses analyses sont de type lixivié (voir spectre n°17).

Fracture de la surface : En extrême surface, le liant est d'aspect déstructuré et d'analyse de type lixivié (voir photo n°26 et spectre n°18). Au-delà, est observée une zone de liant riche en formations de gypse (voir photo n°27 et spectre n°19) laissant la place à un liant d'analyse plutôt carbonatée et très riche en élément S (voir photo n°28 et spectre n°20). A ce niveau, sont observés des grains de laitier (voir photo n°29 et spectre n°21) ainsi que quelques cendres (voir photo n°30 et spectre n°22). Les grains de clinker résiduel sont assez abondants (voir photo n°31 et spectre n°23).

Pâte de ciment à cœur : L'analyse générale de la phase liante comporte les pics des éléments Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca et +/- Fe (voir spectres n°24 et n°25).

Compacité d'ensemble :

☒ Faible

☒ Moyenne

☒ Importante

Principaux hydrates observés :

☒ Silicates de calcium hydratés de faciès granuleux à dense (voir photo n°32) voire alvéolaire ou en gros granules (voir photo n°33)

☐ Chaux hydratée en empilements de plaquettes

☒ Chloroaluminates de calcium hydratés en assez abondantes petites formations dans le liant (voir photo n°34 et spectre n°26)

☐ Monosulfoaluminates de calcium hydratés

Ajouts observés :

☐ Cendres volantes

☒ Laitier (voir photo n°38 et spectre n°28)

☐ Autres

☒ Trisulfoaluminates de calcium hydratés (ettringite) en aiguilles (voir photo n°35 et spectre n°27), parfois comprimées en petits ilots (voir photo n°36) voire en petites zones (voir photo n°37)

Autres observations à cœur : Quelques cendres (voir photo n°39 et spectre n°29) ont été détectés. Le béton comporte des zones de porosités/cavités.

Granulats :

Nature des gravillons : Siliceuse et calcaire

Nature du sable : Siliceuse (voir photo n°40 et spectre n°30), feldspathique (voir photo n°41 et spectre n°31), calcaire et micacée

Contact avec le liant : Direct ou présence d'espaces vides importants au niveau des porosités/cavités

Ruptures :

☐ Transgranulaires

☐ Intergranulaires

☒ Mixtes

Pathologies potentielles :

☒ Ettringite en ilots voire en petites zones d'aiguilles comprimées sur fracture à cœur

☒ Zone riche en formations de gypse puis zone de liant riche en élément en fracture surface

☐ Produits d'alcali-réaction

☐ Présence de grains de clinker résiduel

☒ Présence de l'élément Cl sous forme de petites traces dans certaines analyses du liant et d'hydrates sur fracture à cœur

Echantillon n°6 – Examen visuel et examen MEB en surface



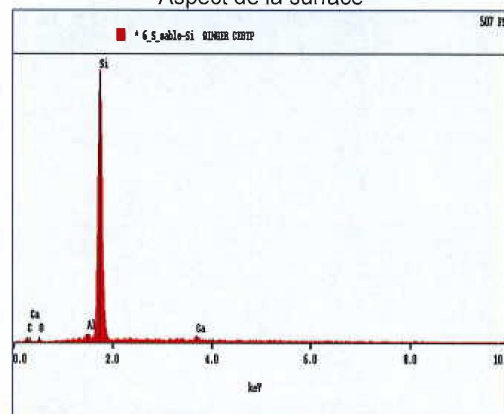
Photo n°22 Réf. : Banc photographique
Vue générale de la sous face du fragment



Photo n°23 Réf. : MEB
Aspect de la surface



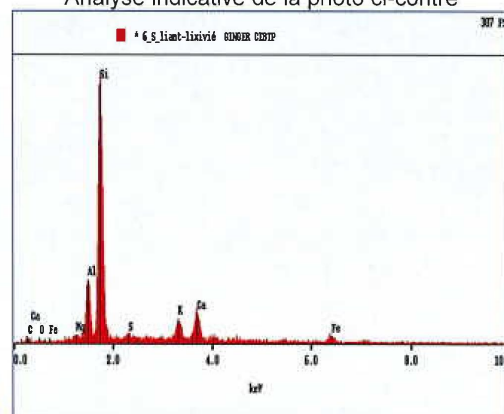
Photo n°24 Réf. : MEB
Grain de sable siliceux apparent



Spectre n°16 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°25 Réf. : MEB
Aspect du liant

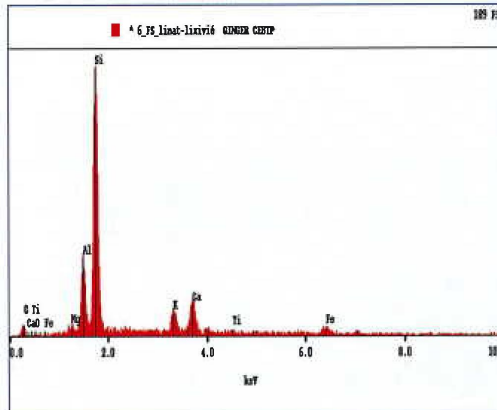


Spectre n°17 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°6 – Examen MEB sur fracture surface



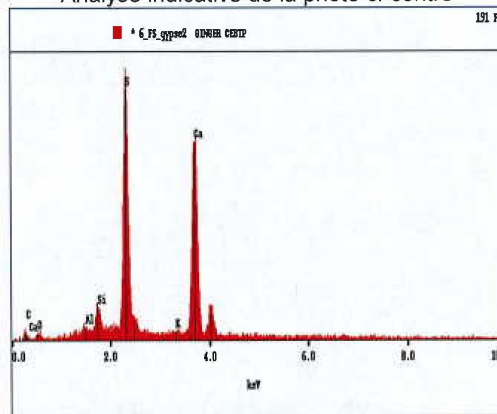
Photo n°26 Réf. : MEB
Aspect du liant en extrême surface



Spectre n°18 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



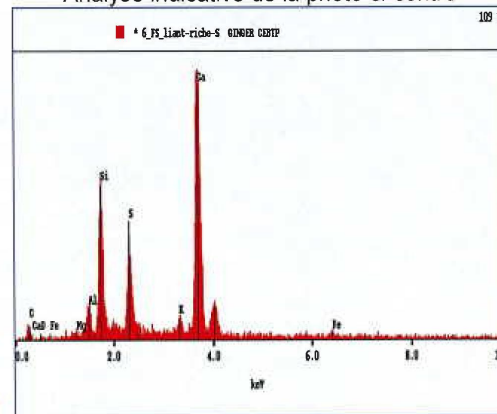
Photo n°27 Réf. : MEB
Zone riche en formations de gypse



Spectre n°19 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°28 Réf. : MEB
Liant riche en élément S

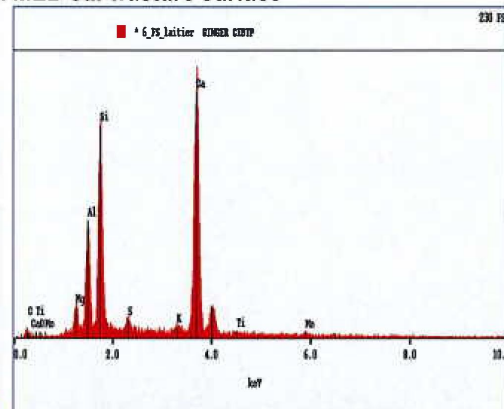


Spectre n°20 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°6 – Examen MEB sur fracture surface



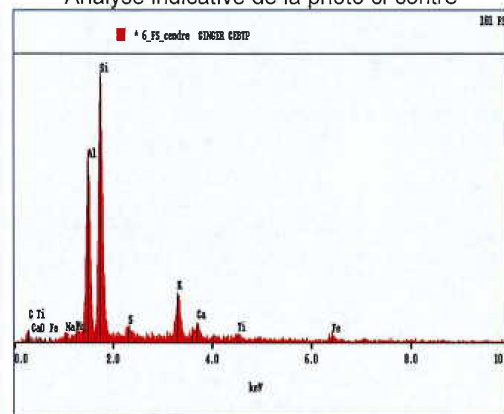
Photo n°29 Réf. : MEB
Grain de laitier



Spectre n°21 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



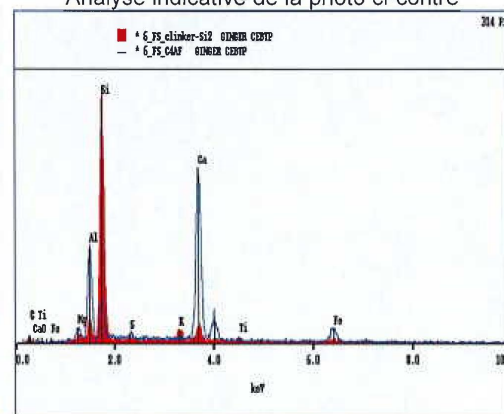
Photo n°30 Réf. : MEB
Petites cendres



Spectre n°22 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°31 Réf. : MEB
Grain de clinker

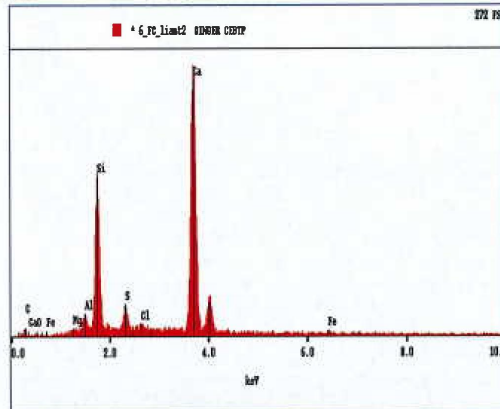


Spectre n°23 Réf. : EDS
Analyses indicatives de la photo ci-contre

Echantillon n°6 – Examen MEB sur fracture à cœur



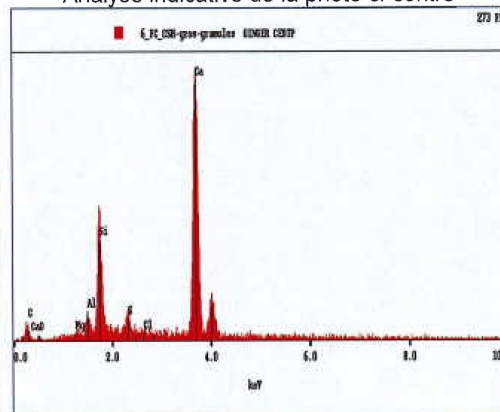
Photo n°32 Réf. : MEB
Aspect du liant



Spectre n°24 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



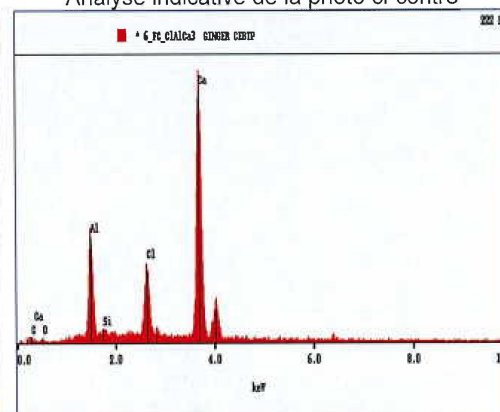
Photo n°33 Réf. : MEB
Zone de plus faible compacité



Spectre n°25 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°34 Réf. : MEB
Chloroaluminates de calcium hydratés

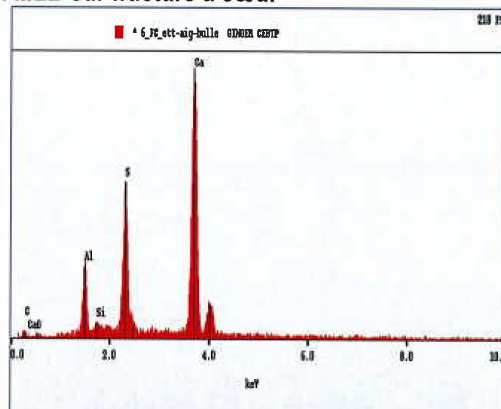


Spectre n°26 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°6 – Examen MEB sur fracture à cœur



Photo n°35 Réf. : MEB
Ettringite en aiguilles dans une bulle d'air



Spectre n°27 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



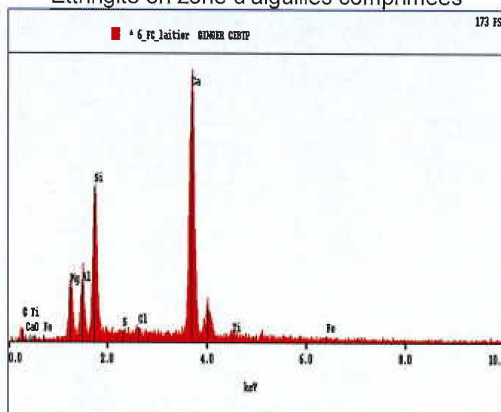
Photo n°36 Réf. : MEB
Ettringite en îlot d'aiguilles comprimées



Photo n°37 Réf. : MEB
Ettringite en zone d'aiguilles comprimées



Photo n°38 Réf. : MEB
Grain de laitier

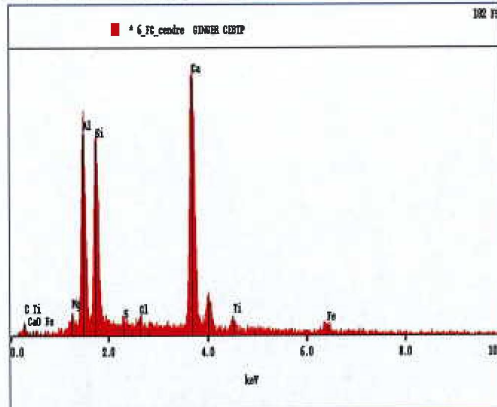


Spectre n°28 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

Echantillon n°6 – Examen MEB sur fracture à cœur



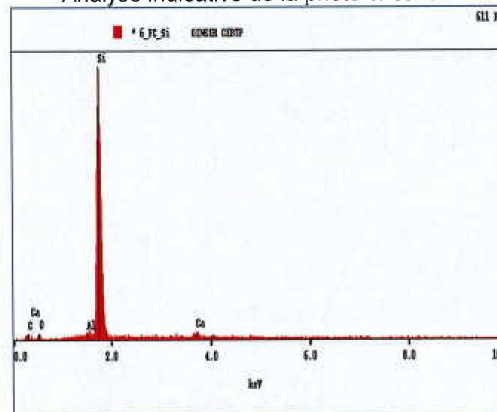
Photo n°39 Réf. : MEB
Petite cendre



Spectre n°29 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



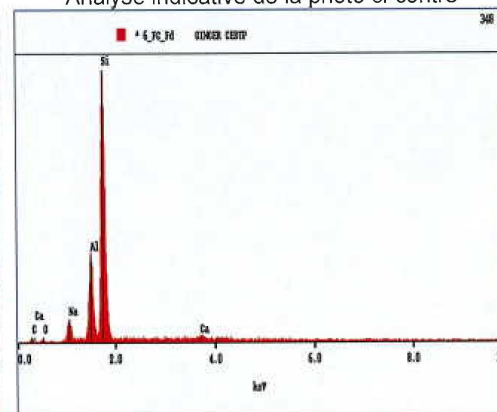
Photo n°40 Réf. : MEB
Grains siliceux à ruptures intergranulaires



Spectre n°30 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre



Photo n°41 Réf. : MEB
Grain de feldspath



Spectre n°31 Réf. : EDS
Analyse indicative de la photo ci-contre

III-2- Mesure de la profondeur de carbonatation sur les échantillons n° 1 et n° 2

Echantillon	Profondeur de carbonatation	Photo de l'échantillon
Béton n°1	Profondeur moyenne de carbonatation depuis la surface du béton : 19 mm Profondeur maximum de carbonatation depuis la surface du béton : 28 mm	
Béton n°2	Profondeur moyenne de carbonatation depuis la surface du béton : 33 mm Profondeur maximum de carbonatation depuis la surface du béton : 35 mm	

Test de carbonatation sur les échantillons n°1 et n° 2

III-3- Dosage des sulfates sur les échantillons n°3 et n° 4

Les teneurs en sulfates obtenues, ainsi que ces mêmes teneurs exprimées par rapport au ciment, sont présentées, en pourcentage massique, dans le tableau suivant :

	% silice	% ciment*	% SO ₃	% SO ₃ /ciment
Béton n°3 (0-3 cm)	3,62	13,9	0,93	6,68
Béton n°4 (0-2,5 cm)	2,64	10,2	0,75	7,39

Teneurs en sulfates sur les échantillons n°3 et n°4

* : La teneur en ciment est calculée par la méthode de la silice soluble conformément à GranDuBé en émettant l'hypothèse que le ciment titre 26 % de silice soluble (cas d'un ciment au laitier ; on note en effet, la présence, en quantité importante, de sulfures caractéristiques du laitier de haut fourneau).

IV- SYNTHESE

IV-1- Examens microstructuraux

Les deux échantillons n°5 et n°6 sont d'aspects assez proches avec :

- Une pellicule de surface avec un liant de type lixivié et des grains de sable apparent.
- Une zone, sous cette pellicule, renfermant d'abondantes formations de gypse.
- Un liant, sous-jacent à cette zone, d'analyses très riches en élément S.
- Un liant, sur fracture à cœur, de compacités très variables (selon le faciès des C-S-H) et renfermant de l'ettringite en aiguilles comprimées sous forme de quelques petits ilots pour l'échantillon n°5 et en ilots plus abondants ou en petites zones pour l'échantillon n°6.
- La présence de petites traces de l'élément Cl dans certaines des analyses du liant des échantillons et de leurs hydrates sur fracture à cœur.

Les analyses lixiviées du liant montrent une altération du béton qui peut être due au contact avec l'eau de pluie. Cette altération reste très surfacique.

L'enrichissement du liant en surface en élément S ou en formations de gypse est anormale. Ces éléments restent toutefois limités à la très proche surface du béton.

L'ettringite comprimée correspond à un faciès pathologique de cet hydrate. Sous forme de petits ilots, elle ne représente normalement que peu de conséquences sauf si ces ilots sont particulièrement abondants.

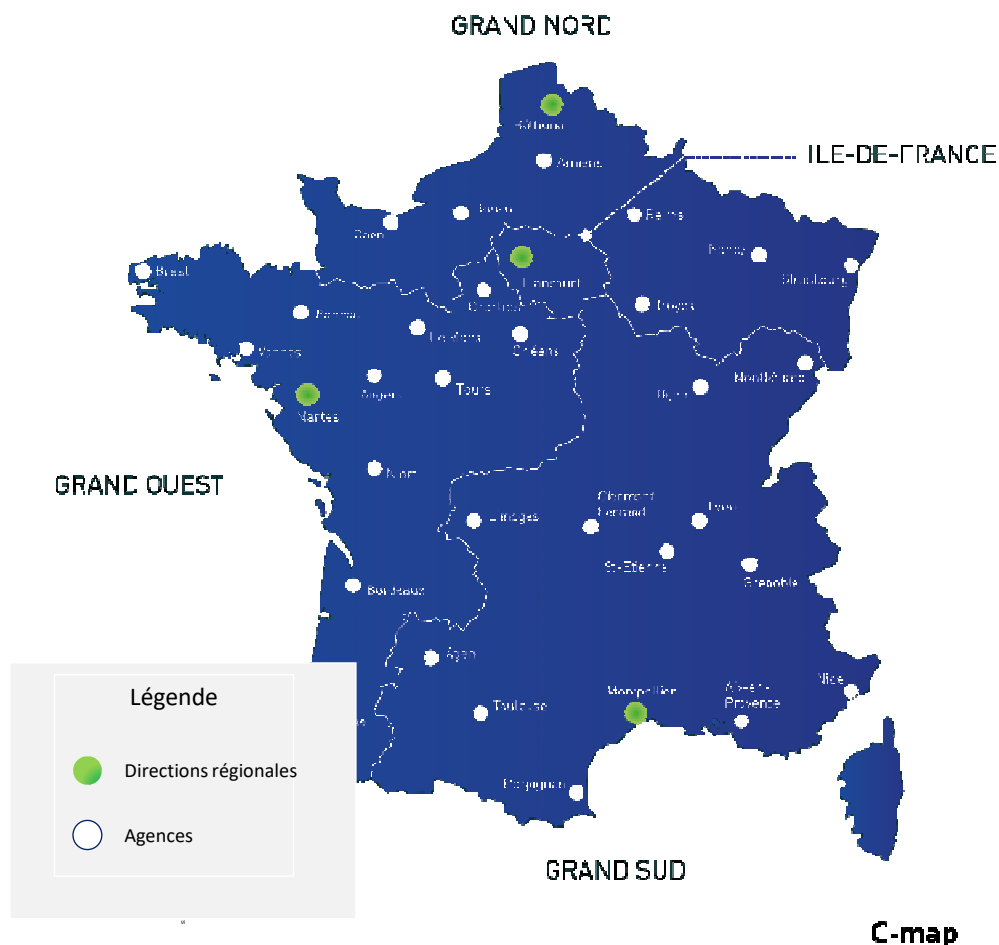
La présence de chlore est à éviter dans les bétons armés. Des dosages en cet élément peuvent indiquer si celui-ci est en une teneur acceptable ou non.

IV-2- Teneur en sulfates

Concernant les teneurs en sulfates, à titre indicatif, d'après la norme EN 197-1, la teneur en sulfates exprimée en % de SO₃ rapportée à la masse de ciment, ne doit pas dépasser la valeur de 3,5 ou 4 % selon la classe de résistance du ciment.

Dans le cas présent, les échantillons de béton présentent des teneurs en sulfates supérieures au seuil des 4 %.

Dossier rédigé par	
Hélène BARBIER Référente Microstructure 	Warda BEN MESSAOUD Chargée d'affaires 



CONTACT

Service Ingénierie des Ouvrages (IDF)

12 Avenue Gay Lussac

78990 Élancourt

Tél. : +33 (0)6 15 38 78 17

Fax. : +33 (0)1 30 85 21 83

www.groupe-cebtp.com