

ANNEXE 5 – EXAMEN CAROTTES BETON

- Rapport Université Gustave Eiffel

A Marne-la-Vallée le 1^{er} Mars 2021

RAPPORT XX3-P21704

Titre : Auscultation de deux échantillons de béton provenant d'une culée du barrage des Cambous

Auteurs : J-S Guédon

Université Gustave Eiffel / Département GERS / Laboratoire SRO

Demandeur : GINGER CEBTP
Direction Nationale des Projets
Agence de Toulouse
2 Avenue de Flourens
31130 BALMA
A l'attention de Lilian Roche

Nos références Université Gustave Eiffel : XX3-P21704

Devis Université Gustave Eiffel: D2021 GERS SRO – 001 7 Janvier 2021

Bon de commande GINGER CEBTP : CDGP.L.0003-S du 14 Janvier 2021

1) Formulation de la demande par GINGER CEBTP :

Le but est d'ausculter deux carottes de béton provenant de la culée du barrage de Cambous, d'identifier d'éventuels désordres, en suivant la fiche de recommandations de l'IFSTTAR fournie en annexe de la demande.

Les essais retenus sont les suivants:

- Un examen lithologique à la binoculaire
- Un examen pétrographique sur lames minces
- Un examen au microscope électronique à balayage avec analyses élémentaires.

2) Devis :

Les prestations proposées au devis D2021 GERS SRO – 001 du 7 janvier 2021 sont les suivantes :

- Préparation des échantillons
- Examen lithologique à la loupe binoculaire
- Analyse pétrographique sur lames minces
- Analyse au microscope électronique à balayage avec analyses élémentaires sur cassures fraîches.

Le bon de commande de Ginger-CEBTP, n°CDGPL0003 est daté du 14 Janvier 2021.

3) Réception des échantillons :

Les échantillons ont été réceptionnés le 11 janvier 2021 sur le site de Marne-la-Vallée, sous la forme de deux carottes non numérotées. Elles ont été repérées I et II (ce dernier signe figurant sur l'une des carottes), aucune provenance n'a été indiquée dans le paquet. Ces deux carottes ont reçu le numéro de registre interne 1179 et sont présentées en figures 1 et 2.



Figure 1 : 2 carottes de béton référencées 1179.



Figure 2 : 2 carottes de béton référencées 1179. Le béton a été mouillé pour mettre en évidence les différents faciès pétrographiques présents.

4) Repérage macroscopique de différents faciès pétrographiques :

Une description macroscopique est d'abord réalisée à l'œil nu, puis à la loupe binoculaire. Ces deux techniques permettent une description de la texture et une première identification des faciès pétrographiques présents dans les carottes.

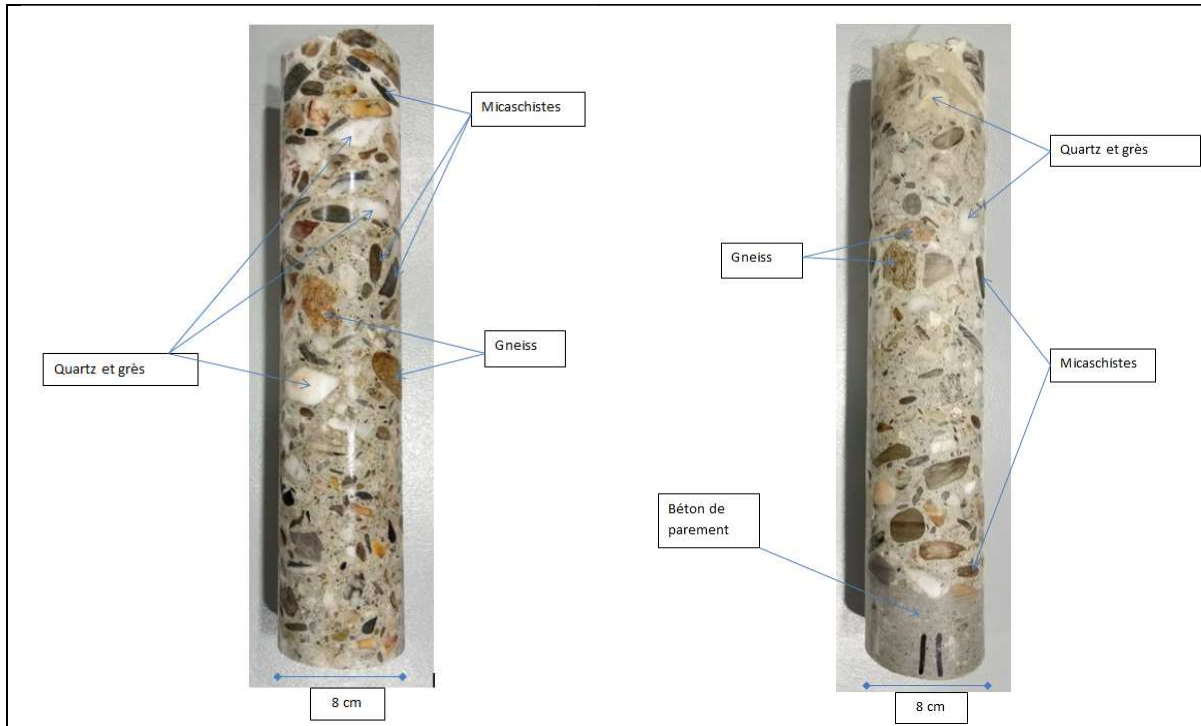


Figure 3 : observation à l'œil nu de la carotte 1179-I avec repérage macroscopique de quelques faciès pétrographiques reconnus et à confirmer.

Figure 4 : observation à l'œil nu de la carotte 1179-II avec repérage macroscopique de quelques faciès pétrographiques reconnus et à confirmer.

Conclusions sur les aspects macroscopiques :

*Les gravillons présents dans les deux carottes sont d'origine alluvionnaire, leur habitus est arrondi.

*L'identification macroscopique sera confirmée par l'analyse pétrographique au microscope optique polarisant mais les faciès identifiés macroscopiquement sont des gneiss, des micaschistes, du quartz et des grès.

*Pour la phase sableuse elle semble issue d'une étape de concassage rendant les grains anguleux.

*Le liant est clair ce qui est très fréquent dans le cas d'un béton de barrage.

5) Examen lithologique à la loupe binoculaire :

Différentes cassures ont été réalisées dans le but de réaliser cette observation à la loupe binoculaire.



Figure 5 : échantillon 1179-I : fragment de la carotte I permettant de voir le déchaussement des granulats dû à l'obtention de la cassure fraîche et une fissuration.



Figure 6: échantillon 1179-I détail à la loupe binoculaire du rectangle ci-contre. La fissure contourne le grain de sable et tapisse l'empreinte.

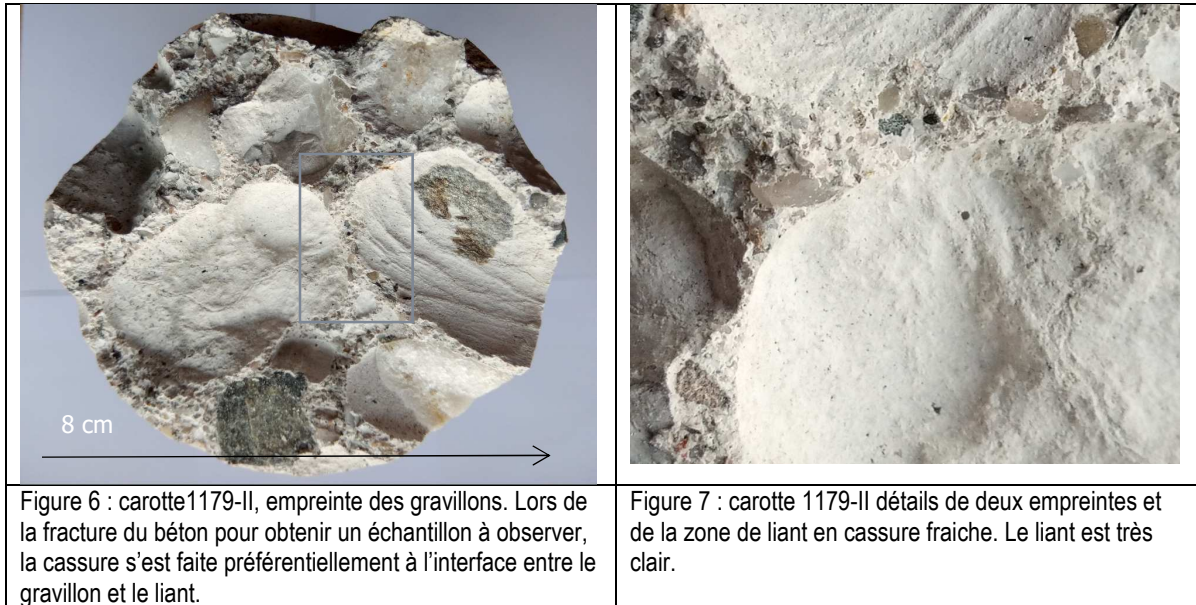


Figure 6 : carotte 1179-II, empreinte des gravillons. Lors de la fracture du béton pour obtenir un échantillon à observer, la cassure s'est faite préférentiellement à l'interface entre le gravillon et le liant.

Figure 7 : carotte 1179-II détails de deux empreintes et de la zone de liant en cassure fraîche. Le liant est très clair.

Conclusions issues des observations à l'œil nu et la loupe binoculaire:

- *L'observation à la loupe binoculaire a montré que lorsque l'échantillon est rompu, la cassure se fait préférentiellement à l'interface entre le gravillon et le liant, montrant des empreintes de gravillons.
- * Le liant est confirmé clair.

6) Panel des lames minces et sections polies, fabrication des lames minces:

Après le repérage des différents faciès, un panel de lames minces et de sections polies a été sélectionné et est présenté en figure 8. Le nombre d'échantillons a été déterminé par l'intérêt des gravillons représentés et leur diversité.

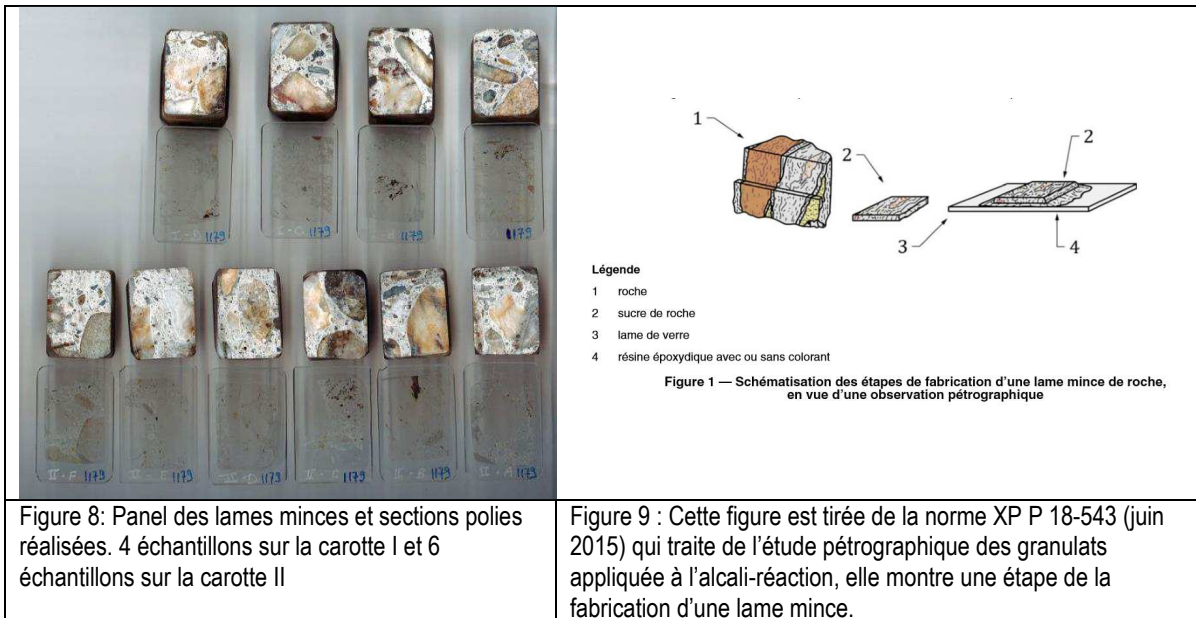


Figure 8: Panel des lames minces et sections polies réalisées. 4 échantillons sur la carotte I et 6 échantillons sur la carotte II

Figure 9 : Cette figure est tirée de la norme XP P 18-543 (juin 2015) qui traite de l'étude pétrographique des granulats appliquée à l'alcali-réaction, elle montre une étape de la fabrication d'une lame mince.

La fabrication des lames minces se fait selon la norme XP P 18-543 (juin 2015) – « Granulats – Etude pétrographique des granulats appliquée à l'alcali-réaction ». L'échantillon de roche est collé sur une lame de verre par une résine Epoxydique. L'ensemble sucre de roche/lame de verre est ensuite usé sur un plateau de fonte avec un abrasif de 9 µm jusqu'à une épaisseur d'échantillon de 30µm. Cette épaisseur de 30µm est contrôlée grâce aux propriétés optiques des minéraux mais aussi grâce à un comparateur précis au µm. Un polissage final rend les lames minces aptes à une bonne observation.

7) Matériel utilisé en accord avec la norme XP P 18-543 (juin 2015).

Le microscopie optique polarisant est l'outil essentiel à la détermination pétrographique. Cette technique est basée sur l'identification des caractéristiques optiques des minéraux contenus dans les échantillons de roches examinés.

Le matériel utilisé à l'Université Gustave Eiffel est un microscope optique polarisant NIKON Optiphot 2-pol.

Cette technique d'observation est réalisée en lumière transmise et nécessite la fabrication de lames minces de 30µm d'épaisseur (épaisseur nécessaire et suffisante pour rendre toute roche cristallisée transparente aux rayons lumineux) selon le schéma présenté en figure 9.

Les observations peuvent se faire en lumière polarisée non analysée (LPNA) et en lumière polarisée analysée (LPA).

Pour des sections polarisant très peu, ou pour une meilleure mise en évidence des pores et des fissures il est possible de superposer au trajet du rayon lumineux une lame auxiliaire de retard optique connu (par exemple d'une longueur d'onde λ , on emploie alors un quartz teinte sensible), le vide de la porosité (ou de la fissure) prend alors une couleur rose vif.

Pour compléter le diagnostic sur les minéraux opaques, des images en lumière réfléchie (LR) seront présentées. L'observation en lumière réfléchie diffère de celle réalisée au microscope optique polarisant par le fait que les échantillons à étudier sont des sections polies (poli spéculaire) (présentées figure 8) puis illuminées perpendiculairement à la surface. Le faisceau lumineux est partiellement absorbé et partiellement réfléchi par le minéral, avec des intensités variant selon les espèces. Cette technique a été utilisée dans cette étude pour mettre en évidence la pyrite qui, cristallisant dans le système cubique, est difficile à identifier au microscope optique polarisant. Ce minéral pouvant être à l'origine de réactions internes dans le béton il est utile de l'identifier et de mettre en évidence son type de cristallisation (cubique ou bien framboïdal).

Les résultats de ces observations sont présentés sous la forme d'images légendées, comprenant le grossissement (entre x50 et x400) et le type de lumière utilisée (LPNA : lumière polarisée non analysée ; LPA : lumière polarisée analysée ; LPA + λ : lumière polarisée analysée avec l'adjonction d'une lame teinte sensible ; LR : lumière réfléchie).

Les images présentent les échantillons issus de la carotte I sur la colonne de gauche et les échantillons issus de la carotte II sur la colonne de droite.

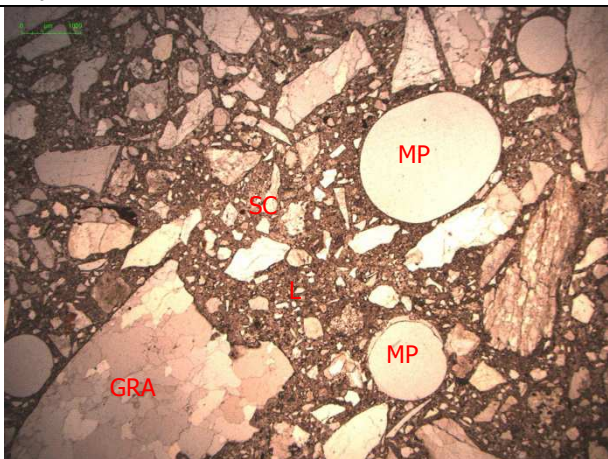
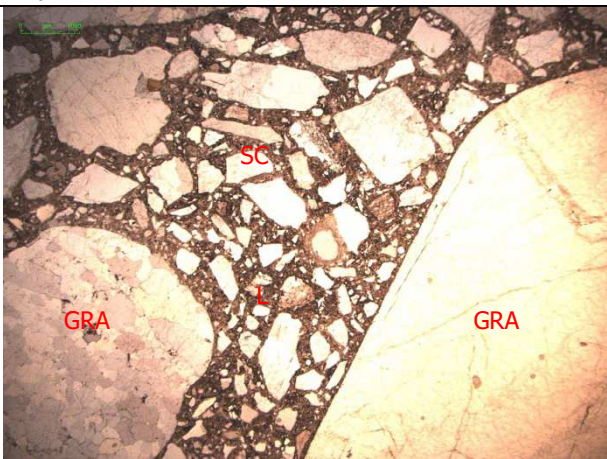


Examen de la texture du béton	
1179-I	1179-II
	
Figure 10 : LPNA (x10) : gravillons arrondis probablement d'origine alluvionnaire (GRA), sable concassé (SC), macroporosité importante (MP), liant de couleur marron en LPNA (L)	Figure 11 : LPNA (x10) : Pas de différences notables entre les deux carottes
Etat du liant	
1179-I	1179-II
	
Figure 12 : (x100) (LPNA) Le liant est homogène, le ciment de couleur marron, les grains de sable sont quartzueux et concassés	Figure 13 : (x100) (LPNA) Idem



Figure 14 : (x100) (LPA) la fraction sable est constituée de grains de quartz majoritaires, anguleux donc probablement issus d'un processus de concassage.

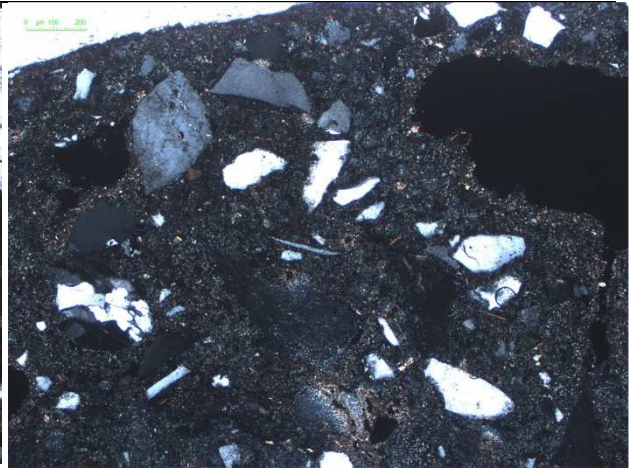


Figure 15 : (x50) idem

Composition minéralogique des gravillons	
1179-I	1179-II
<p>Figure 16 : (x50) (LPA) Micaschiste riche en lattes de muscovite qui soulignent le litage. (apparaissant en bleu turquoise sur l'image)</p>	<p>Figure 17 : (x50) LPA) calcaire à bioclastes (au centre de l'image), rare, identifié qu'à deux reprises.</p>
<p>Figure 18 : (x50) (LPA) grés</p>	<p>Figure 19 : (x50) (LPA) grés avec quelques cristaux de muscovite (en couleurs vives) (psammite ?)</p>

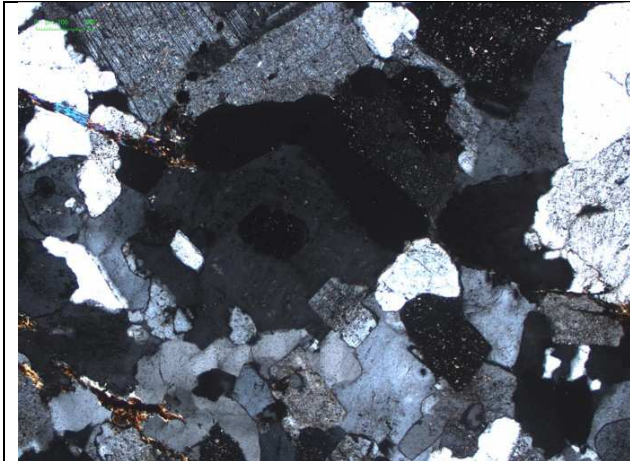


Figure 20: (x50) (LPA) gneiss contenant du quartz, des feldspaths altérés selon leur maclé, muscovite (en couleurs vives)



Figure 21 : (X50) (LPA) gneiss entièrement chloritisé. La chlorite apparait en teintes vives.

Fissuration et porosité 1179-I	1179-II
<p>Figure 22: (x100) (LPA + λ) Fissure traversant le liant d'une ouverture d'environ 200 μm, ressortant en rose au centre de l'image. Cette fissure est exempte de produits de réaction.</p>	<p>Figure 23 : (x200) (LPA) : microfissure reliant un grain de quartz (anguleux à gauche) et un pore (à droite), sans que ce dernier ne soit tapissé de produits de réaction.</p>
<p>Figure 24 : (x200) (LPA + λ) : fissure longeant le bord du gravillon</p>	<p>Figure 25 : (x50) (LR) pores de forme amiboïde (gris sombre) en quantité importante dans cet échantillon.</p>

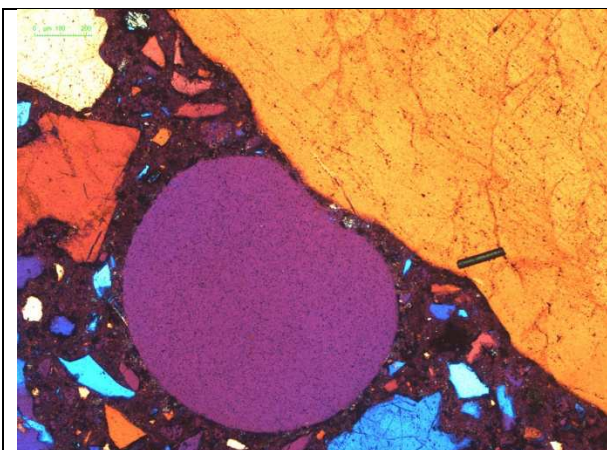


Figure 26 : (x50) (LPA + λ) pore de plusieurs millimètres de diamètre (en rose au centre de l'image).

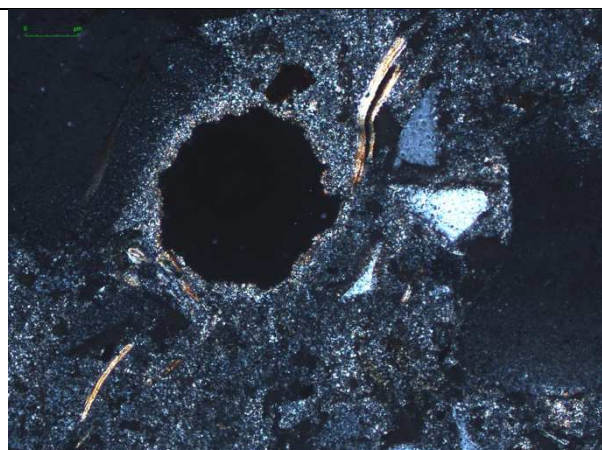


Figure 27 : (x50) (LPA + ↵). Porosité diffuse autour du pore (au centre de l'image) le liant n'a pas une teinte homogène.

Minéraux particuliers	
1179-I	1179-II
<p>Figure 28 : (x200) (LR) cristal de pyrite présent dans la fraction sable, apparaissant en blanc grâce à l'utilisation de la lumière réfléchie. Il a un habitus cubique, classique, et réputé non délétère.</p>	<p>Figure 29 : (x400) (LR) cristaux de pyrite aussi présents au sein d'un gravillon gneissique. Leur habitus est cubique, classique.</p>

Conclusions issues des observations réalisées en microscopie optique :

Texture du béton :

*La texture du béton est similaire entre les deux carottes.

*On y distingue (figures 10 et 11) des gravillons arrondis probablement d'origine alluvionnaire, du sable concassé de nature quartzuse majoritairement, une macroporosité importante, des fissures traversant le liant ou bien à la limite du gravillon et du liant, un liant de couleur clair macroscopiquement et homogène.

Etat du liant :

*Liant homogène, ciment de couleur marron en LPNA, la fraction sable est principalement constituée de grains de sable quartzueux concassé (figures 12 à 15).

*Quelques cubes de pyrite sont détectés (figure 28).

*Des fissures d'ouverture de 100 à 200 μm, sont présentes, soit elles traversent le liant (figure 22) soit elles bordent le gravillon (figure 24), ceci confirme ce qui avait été vu macroscopiquement et à la loupe binoculaire.

*Différentes tailles de porosité (figures 26 et 27) de diamètres de quelques dizaines de micromètres à plusieurs millimètres, émaillent le liant, ces pores peuvent être circulaires à amiboïdes. La figure 25 présente des pores de forme amiboïdes en grand nombre donnant à cette zone du béton une certaine fragilité, néanmoins la surface occupée par ces pores particuliers ne représente aucun danger pour le béton en général.

Sur la figure 27 on voit que la porosité à proximité du pore n'est pas homogène.

Composition pétrographique :

*Les gravillons (figures 16 à 21) sont des micaschistes, des gneiss, des quartz, des grès et deux exemples de calcaires à bioclastes.

*Ces gravillons très arrondis témoignent de leur nature alluvionnaire, ils sont probablement issus d'un dragage et ont été utilisés tels-que.

*Les grains de sables sont par contre issus d'un concassage et ont une composition majoritairement quartzeuse.

Altérations éventuelles du béton :

*Mis à part son état de fissuration qui n'est pas exceptionnel pour un béton ancien, aucun produit de réaction de nature délétère n'a été trouvé dans les échantillons de béton prélevés sur les carottes reçus (pour le microscope optique 10 échantillons ont été analysés). Cette porosité a été observée avec attention car elle est en général le lieu de développement de produits de réaction de type alcali-réaction. La figure 23 montre une fissure reliant un grain de quartz et un pore, cette fissure est exempte de produit de réaction.

*Compte-tenu de la présence de pyrite dans la phase sableuse, un examen en lumière réfléchie (figure 28) a été ajouté afin de déterminer la morphologie des pyrites qui, quand elles présentent un habitus framboïdal, peuvent occasionner une réaction sulfatique. Les pyrites observées sont cubiques et restent rares, elles proviennent probablement d'un concassage car on les retrouve sur la figure 29) au sein d'un gneiss. Elles sont cubiques et ne présentent pas de caractère susceptible d'occasionner de réaction.

8) Etude au microscope électronique à balayage (M.E.B.) :

Dans le cas de cette étude, le microscope électronique à balayage a été utilisé pour mettre en évidence l'état du liant et les produits de réaction éventuellement présents.

En général, ce type d'observation permet de constater la nature polycristalline des grains, l'état d'usure de ceux-ci, leur état de pollution, d'altération, ainsi que la fraîcheur de la cassure dans le cas des grains concassés.

Il permet, de plus, l'observation des cristaux microniques qui seraient totalement inobservables en microscopie optique (l'épaisseur de la lame mince étant de 30µm il est impossible de faire de détermination pétrographique sur des cristaux d'une taille inférieure à cette épaisseur).

Enfin, ce type de microscope donne aussi accès à une information de composition, en effet une analyse élémentaire de la zone observée peut être obtenue grâce à la sonde EDAX équipant le microscope.

L'étude a été réalisée à l'aide d'un microscope FEI Company Quanta 400 équipé d'un détecteur d'électrons rétro-diffusés. Ce microscope est associé à une microsonde EDAX (à dispersion d'énergie) qui permet d'obtenir une analyse élémentaire de la zone bombardée. Plusieurs préparations et observations ont été faites par échantillon (3 pour chaque) : les échantillons de béton ont été observés en surface de rupture fraîche.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les images, leur interprétation et l'analyse élémentaire sous la forme d'un spectre X où apparaissent les pics des principaux éléments chimiques présents dans la zone considérée. Cette analyse élémentaire est donnée lorsque celle-ci était déterminante pour le diagnostic. Les éléments les plus fréquemment analysés sont:

Symbole de l'élément	Elément	Symbole de l'élément	Elément
O	Oxygène	S	Soufre
Al	Aluminium	K	Potassium
Si	Silicium	Ca	Calcium

Similitudes macro-micro



Figure 30: (vue à la loupe binoculaire) le liant est blanchâtre, il présente des fissures dans l'empreinte laissée par la cassure due à la préparation de l'échantillon.

Figure 31 : (vue au MEB) zone similaire à celle-ci-contre, les grains de sable du liant de l'empreinte sont des grains concassés.

Etat macroscopique, présence de fissures

Echantillon 1179-I

Echantillon 1179-II

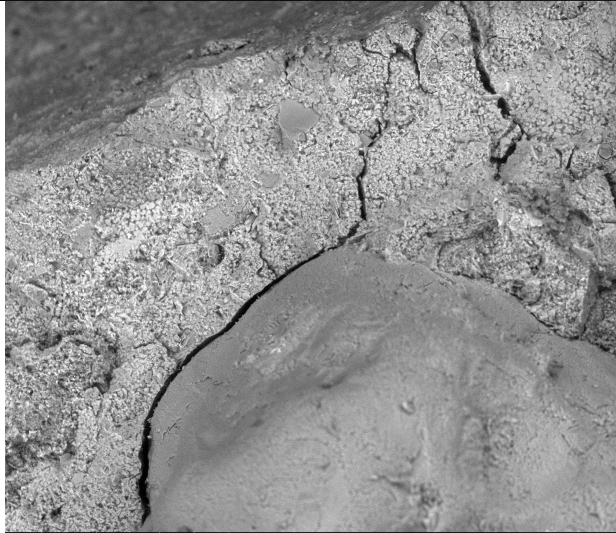
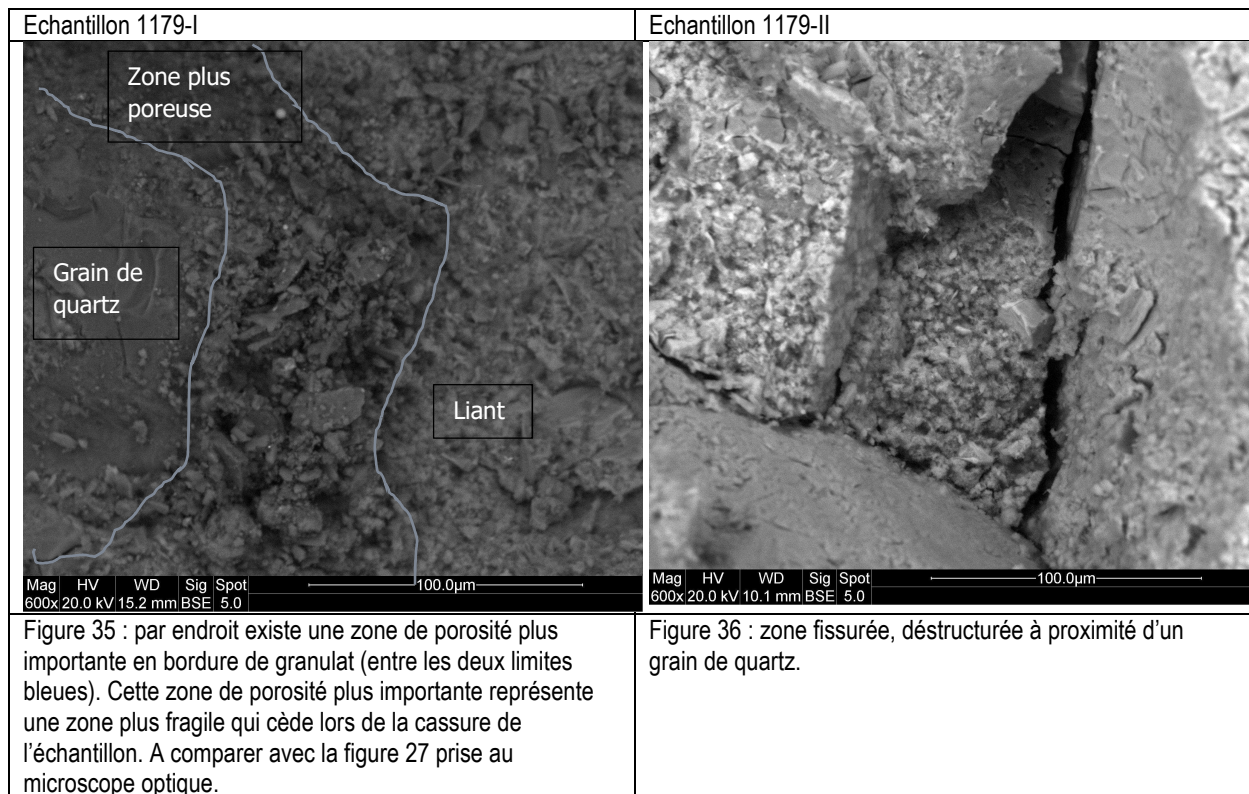
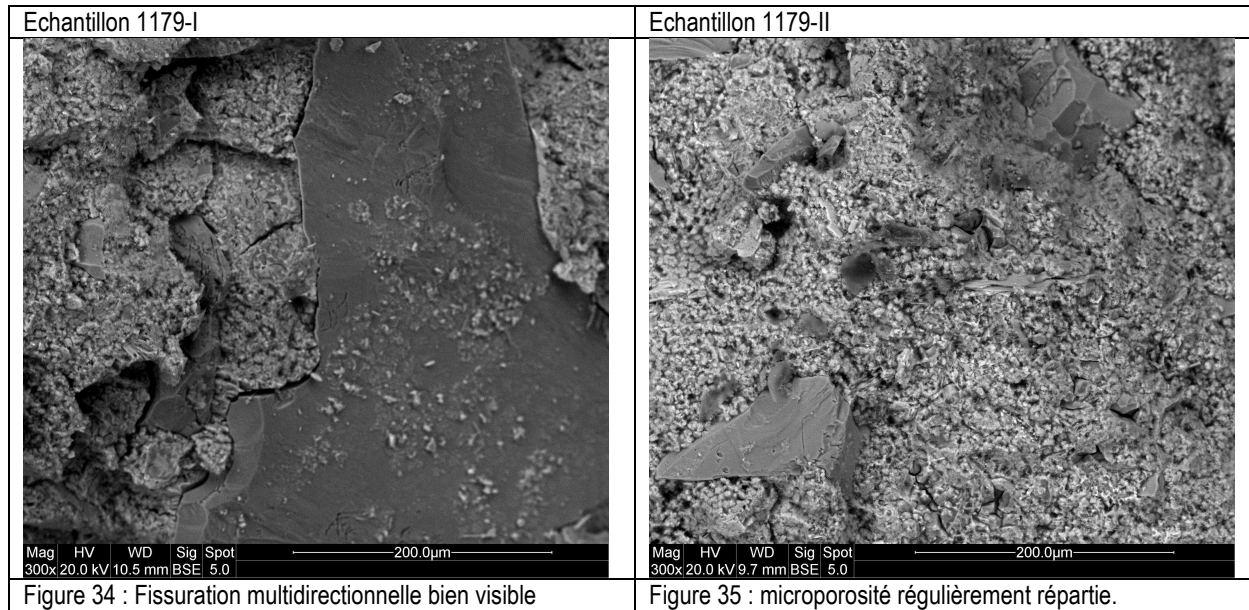

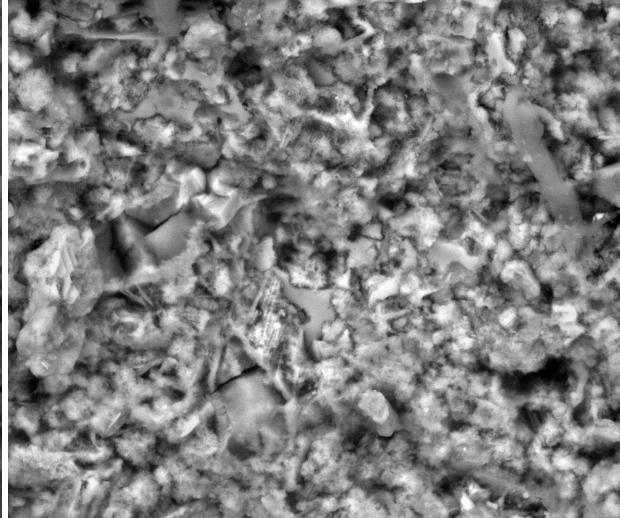

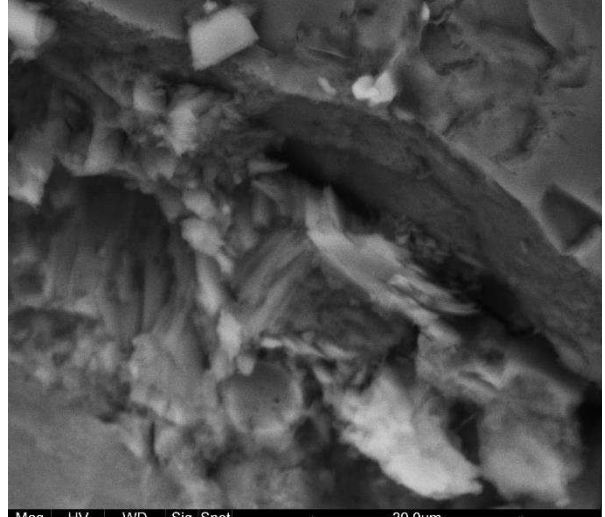
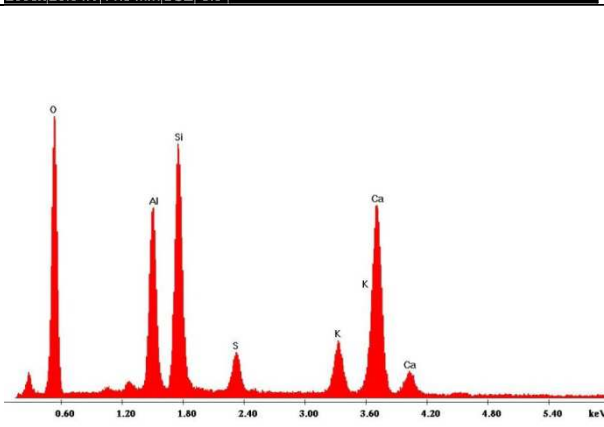
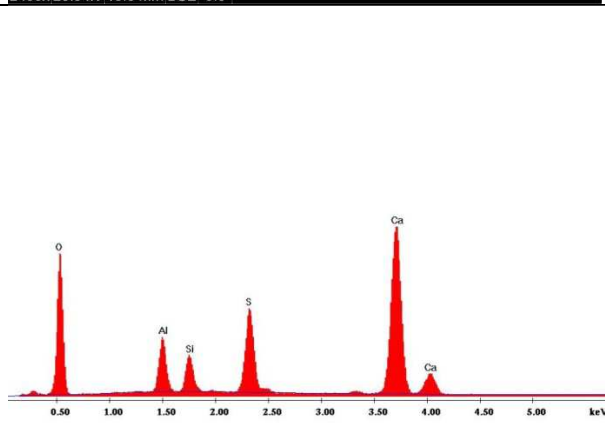


Figure 32 : fissures contournant un grain de quartz puis traversant le liant. L'espace laissé libre entre le granulat est le liant est d'environ une dizaine de μm . Le granulat est probablement de nature alluvionnaire (forme arrondie) celui présenté ici est un grain de quartz.

Figure 33 : aspect identique sur l'échantillon 1179-II. A noter l'espace libre entre le grain de quartz et le liant traduit une mauvaise adhérence granulat/liant.



Etat de la microposité	
Echantillon 1179-I	Echantillon 1179-II
	
Mag HV WD Sig Spot 1200x 20.0 kV 15.0 mm BSE 5.0	Mag HV WD Sig Spot 1200x 20.0 kV 9.7 mm BSE 5.0
50.0µm	50.0µm
Figure 37 : microposité du granulat de type micaschiste présentant de nombreux micas feuilletés.	Figure 38: aspect du liant microporeux contenant quelques plaquettes de portlandite.
Présence de produits de réaction	
Echantillon 1179-I	Echantillon 1179-II
	
Mag HV WD Sig Spot 2600x 20.0 kV 11.5 mm BSE 5.0	Mag HV WD Sig Spot 2400x 20.0 kV 13.6 mm BSE 5.0
20.0µm	20.0µm
	
0.60 1.20 1.80 2.40 3.00 3.60 4.20 4.80 5.40 keV	0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 3.50 4.00 4.50 5.00 keV
Figures 39 : présence d'aiguilles visibles dont l'analyse élémentaire est compatible avec de l'ettringite. La présence dans l'analyse de silicium et de potassium ainsi que la teneur élevée (pour une ettringite) en aluminium, vient du substrat.	Figures 40 : même type d'analyse même si la morphologie des aiguilles d'ettringite est moins typique. Les aiguilles étant plus trapues elles ont permis une analyse avec moins de silicium et pas de potassium venant du liant.