

Rapport de stage de Master

Février à juillet 2017

Master Ingénierie de la Durabilité – Recherche et Innovation en Matériaux et Structures
(ID-RIMS)

Diagnostic du phare de l'Île Vierge



Etudiant : Thomas Druot
Encadrant pédagogique : Nathalie Domède
Maître de stage en entreprise : Hervé Ditchi

J'ai eu plaisir à travailler au sein du groupe Ouvrages d'Art du CEREMA Ouest à Nantes, pour la réalisation de ce stage de master autant intéressant qu'atypique. Je tiens donc à remercier M Hervé Ditchi de m'avoir accueilli au sein de son équipe.

Je remercie Mme Nathalie Domède pour m'avoir permis de travailler sur ce projet.

Je remercie M Nicolas Fady pour son aide apportée lors de mon séjour à Brest, ainsi qu'à tous les acteurs de Plouzané, Brest et Saint-Brieuc qui ont participé à la logistique pendant ce stage.

Je tiens également à remercier M Dany Sanquer, M Louis Chauris et M Fortuné, que nous avons pu rencontrer pendant la période du stage, pour leurs explications concernant la pierre de Kersanton, son extraction et sa géologie.

Un grand merci également à l'équipe du laboratoire LMDC de Toulouse pour m'avoir guidé lors de la réalisation des tests mécaniques et chimiques.

Sommaire

Introduction.....	5
1. Travail de recherche historique sur la construction du phare	6
1. 1. Synthèse sur la recherche bibliographique	6
1. 2. Le projet de construction du Phare de l'Île Vierge [1].....	7
1. 3. La maçonnerie du Phare de l'Île Vierge.....	10
1. 3. 1. Les blocs de maçonnerie	11
1. 3. 2. Le mortier constituant les joints.....	15
2. Caractérisation de la pierre de Kersanton.....	17
2. 1. Détermination de la masse volumique réelle et apparente de la pierre de Kersanton.....	18
2. 1. 1. Masse volumique réelle.....	18
2. 1. 2. Masse volumique apparente.....	20
2. 2. Analyse chimique et minéralogique de la pierre de Kersanton	21
2. 2. 1. Analyse chimique.....	21
2. 2. 2. Analyse DRX	25
2. 3. Essais de compression.....	26
2. 4. Détermination du module d'élasticité de la pierre de Kersanton.....	33
2. 4. 1. Module d'élasticité	33
2. 4. 2. Essais de compression jusqu'à rupture avec relevé des déformations.....	36
2. 4. 3. Module d'élasticité dynamique	40
2. 4. 4. Synthèse sur le module d'élasticité	41
2. 5. Essai de flexion 3 points	42
2. 5. 1. Détermination de la résistance à la traction de la pierre de Kersanton	42
2. 5. 2. Estimation de E en traction	43
2. 6. Confrontation des résultats de la campagne d'essai	44

3. Surveillance des désordres et instrumentation du phare	47
3. 1. État actuel du phare (02/2017)	47
3. 2. Analyse du comportement de la lanterne dans le temps	49
3. 2. 1. Instrumentation de la murette de la lanterne	49
3. 2. 2. Traitement des premiers résultats de l'instrumentation du phare.....	54
4. Modalisation de la murette du phare	59
4. 1. Choix de la géométrie.....	60
4. 2. Choix des paramètres des matériaux.....	61
4. 3. Modélisation sur ST1	63
Conclusion générale	67
Références.....	70
Annexes	73
Annexe A : Extraits du cahier des charges, le 8 janvier 1897	74
Annexe B1 : Relevé des fissures sur la murette ; déroulé.....	83
Annexe B2 : Relevé des fissures sur la murette ; plan et coupe	84
Annexe C : Relevé des fissures sur la murette ; plan et coupe	85
Annexe D1 : Relevé des températures extérieures.....	86
Annexe D2 : Relevé des températures intérieures	87
Annexe D3 : Relevé des températures T7 et 78, et des déplacement D5.....	88
Annexe D4 : Relevé des températures T7 et 78, et des déplacement D6.....	89
Annexe D5 : Relevé des températures T9 et 710, et des déplacement D3.....	90

Introduction

Cette étude s'intéresse à l'un des plus remarquables phares d'Europe, emblème du pays des Abers et situé à la séparation entre la Manche et l'Atlantique, il s'agit du Phare de l'Île Vierge. Il est le plus grand d'Europe et le plus grand du monde en pierre de taille. L'objectif final souhaité par le CEREMA en charge de l'entretien des Phares et Balises est de comprendre quelle est l'origine des dommages apparents sur la murette de la lanterne au sommet du phare, avant d'engager des travaux de maintenance. Lors de la recherche bibliographique qui a précédé le stage, nous avons récolté des indices importants relatifs au phare et à l'étude des maçonneries.

Ce stage s'est déroulé en quatre phases principales : une première phase de recherche historique consistant à consulter les archives départementales en rapport avec la construction du phare, réalisé à Plouzané près de Brest. Une deuxième phase de caractérisation mécanique et chimique de la pierre de Kersanton, réalisée au LMDC de Toulouse. Une troisième phase de pose d'instruments de mesure in-situ pour estimer l'évolution des désordres au cours du temps. Une quatrième et dernière phase de modélisation qui a pour but de modéliser de façon simplifiée la murette du phare de l'Île Vierge avec le logiciel ST1 du CEREMA, réalisé à Nantes.

Ce rapport est construit sur le même principe, en suivant la chronologie des phases. Le travail de bibliographie a permis de récolter de nombreuses informations relatives au projet de construction, les acteurs, les matériaux et les techniques. La campagne d'essais a permis d'étudier la résistance de la pierre de Kersanton en compression et en traction, d'en déduire un module d'élasticité en compression, une valeur de porosité, une masse volumique apparente et une masse volumique absolue. Les tests de caractérisation chimique et minéralogique ont permis d'identifier la composition de la roche. L'instrumentation a pour but d'être exploitée sur une durée minimale de 1 an. La modélisation sera l'occasion de réfléchir sur les causes probables des désordres en prenant en compte autant de paramètres qui auront été déterminés grâce aux trois phases précédentes.

1. Travail de recherche historique sur la construction du phare

Le but de ce travail est de comprendre au mieux le contexte dans lequel le phare a été réalisé, d'identifier les matériaux utilisés et leur provenance, et de s'informer sur les conditions et techniques de mise en œuvre. Après une courte synthèse sur les découvertes effectuées lors de la recherche bibliographique d'avant-stage, nous nous intéresserons aux archives du projet. Les archives sont consultables aux Archives Départementales du Finistère, elles sont les sources principales pour les informations données dans les parties qui suivent.

1. 1. Synthèse sur la recherche bibliographique

D'une forme générale tronconique, le phare est constitué d'un soubassement de 12,40 m de hauteur et 16 m de diamètre à la base. Ce soubassement est posé sur un socle en pierre de Kersanton de 1 m de hauteur et 15 m de diamètre lui-même posé sur un massif de fondation en maçonnerie allant jusqu'à 2,80 m de profondeur au centre de la section, et avec un diamètre de plus de 16 m. Pour accéder à la porte d'entrée, il y a 5 marches d'escalier en pierre de taille, chacune mesurant 0,20 m de hauteur et 0,30 m de largeur. Le soubassement est surmonté d'un fût tronconique de 53,10 m de hauteur, avec un diamètre de 11 m à la base. Au sommet se trouve un couronnement de 4,5 m de hauteur qui permet de supporter une lanterne. Cette lanterne se compose d'une verrière à ossature métallique, composée de 16 montants en acier reliée par des entretoises en bronze et d'une coupole en cuivre rouge. La verrière est soutenue par une murette circulaire de 3,42 de hauteur et de 6 m de diamètre, en maçonnerie de pierre de Kersanton, dans laquelle sont encastrés 16 ancrages verticaux de section rectangulaire ($30 \times 120 \text{ mm}^2$) en aciers sur toutes la hauteur de la murette. La focale de l'appareil d'éclairage culmine à 75,18 m au-dessus du sol. Dix fenêtres sont réparties sur la hauteur du phare. On en compte une dans le soubassement, sept dans le fût, et deux dans le couronnement au sommet du fût. À l'intérieur de la tour, se trouve un vide cylindrique occupé par un escalier suspendu de 360 marches permettant d'accéder au palier de la chambre de service. Les marches mesurent 0,18 m de hauteur et 0,93 m de largeur, et sont chacune taillée dans un seul bloc de Kersanton.

Nous avons évoqué les causes possibles de la fissuration sur la murette de cette lanterne en mettant en évidence :

- Les différences entre les coefficients de dilatation thermique du bronze des entretoises et de la pierre granitique (pierre qui se rapproche le plus de la Kersantite du point de vue de la composition minéralogique)
- Les cycles de chargement qui pourraient être causées par le vent comme le décrit le rapport de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Comportement structurel des phares en mer, Étude historique et analyse du comportement dynamique du phare de l'île Vierge
- Les facteurs aggravant qui pourraient être : la corrosion expansive des ancrages des montants de la lanterne, ou l'altération progressive de la pierre exposée à l'environnement.

1. 2. Le projet de construction du Phare de l'Île Vierge [1]

L'inspecteur général, M. Bourdelles remplacé par M. Quinette de Rochemond en 1900, du service central des Phares et Balises, étaient chargé de l'étude des dispositions de l'appareil d'éclairage et de la surveillance des travaux. Les travaux ont été dirigés par M. Considère, ingénieur en chef, M. Pigeaud et M. Vicaire, ingénieurs ordinaires, et M. Heurté, conducteur des ponts et chaussées. M. Gustave Corre puis son fils M. Adolphe Corre à partir de 1899, ont dirigé l'entreprise de maçonnerie [5] du même nom chargée de l'extraction, de l'approvisionnement et de la mise en œuvre des pierres de taille. La construction commence le 28 juillet 1897 et le phare sera inauguré le 1^{er} mars 1902. Le Tableau 1 montre la chronologie de la construction selon une coupe verticale disponible aux archives départementales :

Tableau 1. Chronologie de la construction

Ouvrage	Date
Haut de la Murette	1 août 1901
Haut du fût et moitié du couronnement	31 décembre 1900
Haut du Soubassement	11 juin 1898
Haut des Fondations	23 août 1897
Début	29 juillet 1897

Le sable à fournir a été évalué à 1700m³ en admettant un volume de maçonnerie de 4080m³, en considérant qu'il représente 40 % de ce volume de maçonnerie et en prenant en compte les pertes

éventuelles. L'ingénieur propose de fournir le sable plusieurs mois à l'avance pour le laver du sel de mer. Par la suite, il est décidé par l'administration que les 1700m³ de sable prévu pour la confection du mortier, proviendront de bancs situés au nord de l'île Wrac'h et seront entreposés sur l'île Vierge hors de portée de la mer. La première moitié de la fourniture est livrée avant le 1^{er} mars 1897 (près de 4 mois avant le début des travaux), et la seconde moitié avant le 1^{er} juin 1897.

Selon les informations de la base de données Mérimée disponible sur le site culture.gouv.fr : « Au tout début du chantier, Gustave Corre se heurte à une difficulté imprévue. Lors du creusement des fondations, les terrassiers découvrent à seulement 50 centimètres de la surface " une sorte de faille remplie de tuf assez dur, de sable et granit décomposé ". Ne pouvant bâtir une tour aussi haute sur un sous-sol aussi instable il faudra éliminer cette veine inopportun et la combler. ». Les plans de fouilles de fondation révèlent en effet la présence de différents types de roches dont le tuf, une roche qu'il a fallu remplacer par de la maçonnerie ordinaire en granit de l'île Vierge.

George de Joly, ingénieur du service central, a écrit le 29 juin 1896 : « Toutes les grandes tours de l'époque de M. Reynaud, telles que celle de Calais [...], construites au mortier de chaux hydraulique, sont fendues suivant un plan diamétral perpendiculaire à la direction des vents dangereux ». C'est une constatation qui a été faite sur plusieurs phares, et cette observation a été réutilisée par M. Bourdelles Ingénieur général Directeur du Service des Phares et Balises le 6 novembre 1896, pour justifier l'utilisation du ciment Portland dans le mortier, en remplacement ou en addition des ceintures de fer traditionnellement utilisées. Il dit : « la flexion de l'ouvrage, sous l'effet des rafales de vent et des vibrations, a pour conséquence de transformer la section circulaire en une ellipse dont le petit axe est dans le plan du vent de tempête. ». Les tours subissent un phénomène de flexion générale, qui se traduit par un phénomène de cisaillement. Dans les sections transversales d'une poutre bi-symétrique en flexion simple, on sait que le cisaillement est à son maximum au niveau de l'axe neutre. Les fissures en question semblent bien apparaître dans les zones les plus sollicitées en cisaillement. C'est l'augmentation de résistance et la rapidité de durcissement qui a motivé l'emploi de mortier de ciment Portland pour l'édification du nouveau phare de l'Île Vierge.

Le 17 mars 1897, l'inspecteur général transmet une étude de stabilité de la tour, et propose d'augmenter le dosage du ciment en partie haut de la tour. L'étude de stabilité est réalisée le 13 février 1897, par la méthode d'Augustin Fresnel, et obtient un coefficient de stabilité de 10,8. La méthode de Fresnel permet d'obtenir un coefficient de stabilité en faisant le rapport entre le moment de stabilisation (poids du fut par le rayon de la section la plus exposée à la rupture) et le moment de renversement

(résultante des effets du vent par la distance qui la sépare de la section la plus exposée à la rupture). La résultante des effets du vent est estimée à l'aide des hypothèses de Fresnel, tel que l'écrit George de Joly en 1923 dans un cours de l'ENPC [50] : « Le Service des Phares a adopté dès 1831, à la suite des recherches de [Léonor] Fresnel en vue de la construction du grand phare de Belle-Ile, la pression maximum de 275 kilogrammes par mètre carré de surface plane frappée normalement. Fresnel admettait en outre que la pression s'exerçant sur une surface plane frappée obliquement était réduite proportionnellement au carré du sinus de l'inclinaison. ». La résultante des effets du vent est donc supposée être égale aux 2/3 de la pression qui serait exercée sur un plan diamétral de la tour. En comparaison avec ceux des phares considérés comme les plus hardis, le coefficient de 10,8 est le plus élevé. De plus, il est indiqué que lorsque le coefficient est supérieur à 4, les maçonneries sont supposées ne pas travailler en traction. Par la suite, les ingénieurs utilisent la méthode classique, qui consiste à établir les courbes représentant les effets du poids des maçonneries et les pressions du vent avec les hypothèses de Fresnel, d'en calculer la résultante, et d'en déduire les zones de maçonnerie tendues ou comprimées. Les ingénieurs ont calculé qu'il n'y avait pas d'effort de traction dans l'ouvrage, et que les efforts de compression ne dépassaient pas les 10,48 kg/cm² avec le vent, et 8,78 kg/cm² en comptant le poids seul. La densité admise pour la maçonnerie est de 2400 kg/m³. Cette étude a été complétée par une étude admettant les mêmes hypothèses et appliquée à d'autres ouvrages existants, afin de comparer les résultats. Ainsi, il a été constaté que cette méthode donnait des valeurs de contraintes notablement supérieures à la réalité, donc sécuritaire. Concernant les oscillations possibles du phare, elles sont difficilement mesurables. Elles sont à l'origine de l'apparition de fissures verticales comprises dans un même plan diamétral et partant du haut de la tour vers le bas. Une comparaison est faite avec d'autres constructions, en notant que les oscillations deviennent imperceptibles pour le Phare de Planier de la même époque, haut de 59 m, et construit en moellon calcaire avec un mortier de chaux de « qualité médiocre ».

Le 5 juillet 1897, la Société Anonyme des Ciments Français écrit à M. Pigeaud au sujet de la livraison du ciment, on admet donc que cette société a été le premier fournisseur du chantier. À la lecture du procès-verbal de rebut datant du 13 septembre 1899 et rédigé par M. Heurté, il est possible d'identifier la Société Darsy, Lefebvre, Stienne et Lavocat comme fournisseur de ciment, pour l'année 1899. Sur une étude de 1999, disponible sur un site de la région de la nouvelle Aquitaine, on trouve une description de la fabrication du ciment Portland selon le livret publié par la Société Lavocat et Cie et imprimé par Paul Gaultier à Boulogne-sur-Mer (sans date). La matière première est constituée par des marnes dures dont la composition varie entre : 15 et 20 % d'argile, et 80 à 70 % de carbonate de chaux. C'est après régularisation artificielle de la composition de la terre à ciment, et après cuisson de la nouvelle pâte renfermant 20 à 23 % d'argile que l'on obtient le ciment Portland.

1. 3. La maçonnerie du Phare de l'Île Vierge

On rappelle que la maçonnerie est en matériau composite, c'est l'association de différents matériaux, des blocs (pierres, briques...) assemblés entre eux à l'aide d'un liant (mortier de chaux, de ciment...). Dans l'histoire, on a utilisé la maçonnerie comme matériau de construction en profitant de ses caractéristiques, sa solidité et sa facilité d'emploi. Il existe deux grandes familles de maçonnerie, le blocage et l'appareillage. Le blocage est une maçonnerie de remplissage composée d'éléments non taillés, entre les parements en pierres ou moellons tallés. Les pierres appareillées constituent les parements, chaque élément est équarri ou taillé pour s'adapter et occuper une place déterminée, et de façon à minimiser au maximum le volume des joints. Leur disposition peut être variable d'un ouvrage à l'autre.

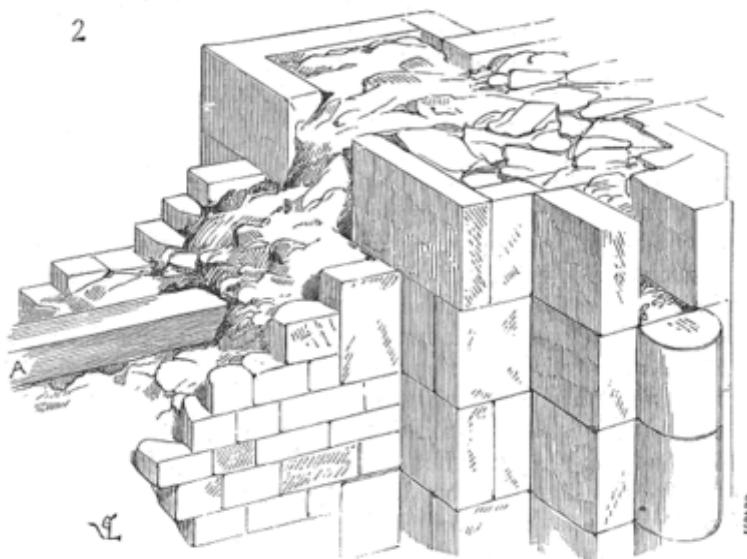


Figure 1. Maçonnerie de blocage entre parements de pierre taillée

1. 3. 1. Les blocs de maçonnerie

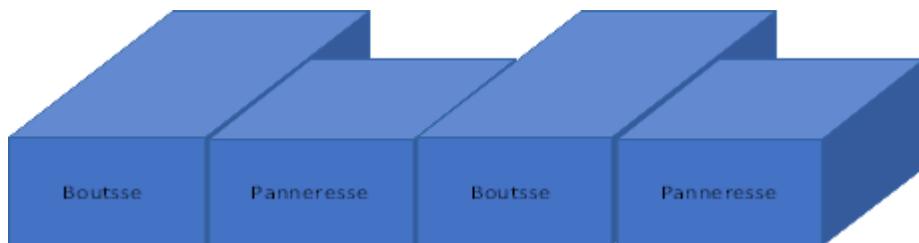
Plusieurs éléments de maçonnerie [42] entrent en jeu dans la construction de cet édifice. Les pierres de taille ainsi que les moellons piqués sont en Kersanton, et proviennent des carrières de Logonna, situées en bordure de la rivière de l'Hopital Camfrout, dans le district de la rade de Brest. En revanche, les moellons ordinaires proviennent des carrières de granit d'anatexie de l'Île Vierge [51]. La pierre de taille est une pierre dont toutes les faces sont taillées par un tailleur de pierre, pour obtenir des plans parfaits, et minimiser l'épaisseur des joints. On appelle « moellons » les pierres propres à bâtir, généralement plus petites et moins parfaites que les pierres de taille. Les moellons piqués sont taillés avec de vives arêtes, à la hachette, ou au marteau par les tailleurs de pierre. La queue d'une pierre de maçonnerie représente la profondeur d'une pierre de parement entrant dans la paroi.

Selon le cahier des charges dressé le 8 janvier 1897 par M. Pigeaud ingénieur ordinaire : « sera exécutée en maçonnerie de moellons ordinaires avec mortier de ciment, toute la tour (y compris les fondations) sauf les exceptions ci-après » (voir Annexe A). Cette remarque, qui introduit la partie sur la nature des ouvrages à exécuter, est intéressante dans la mesure où elle permet de préciser que le phare est principalement constitué de moellons ordinaires en granit provenant de l'île même. Les moellons ordinaires constituent une grosse partie de la paroi du fut. Ils ont une hauteur de 0,15 m, une queue moyenne de 0,25 m à l'intérieur de la paroi, et une queue allant de 0,30 m à 0,45 m pour le parement intérieur de la tour. En étudiant l'Avant Métré des Travaux [41] du 8 janvier 1897 par M. Pigeaud, on relève les volumes de maçonnerie présentés dans le Tableau 2, et sur lequel on peut déduire que la maçonnerie ordinaire représente 67 % de la maçonnerie du phare, contre 33 % de pierre de Kersanton.

Tableau 2. Volumes et surfaces de maçonnerie selon l'Avant Métré des Travaux, M. Pigeaud (1897)

Maçonnerie	Volume (m ³)	Parement vue (m ²)	Part par rapport au total
Total	4099,977		
Pierre de taille	460,647	1211,70	11%
Maçonnerie de bossage	150,223	227,07	4%
Moellons piqués	724,835	1508,87	18%
Moellons ordinaires	2764,272	1065,30	67%

Le parement extérieur de la tour est réalisé en pierre de taille et en moellon piqué extraits des carrières de Kersanton, tel que l'indique le cahier de charges, et permet de compléter la structure de l'édifice et de protéger la partie en moellons ordinaires. Le parement extérieur est lié aux moellons ordinaires en alternant régulièrement une pose de pierre en panneresse et en boutisse, en gardant une queue moyenne de 0,50 m et une queue minimale de 0,40 m.



La maçonnerie de moellons piqués avec mortier de ciment constitue le parement extérieur du fût, avec les voûtes de toutes les fenêtres et de la porte principale. Les moellons piqués constituant le parement extérieur du fût ont une hauteur de 0,25 m, et une queue moyenne de 0,50 m vers l'intérieur des parois. Les autres moellons piqués ont des dimensions spécifiques indiquées sur les plans et les coupes.

La pierre de taille en Kersanton avec mortier de ciment, est le matériau constitutif des marches de l'escalier intérieur et de l'entrée, du socle du soubassement, du soubassement, de la corniche, du parapet, de la murette, de la guérite (ou échauguette), et des appuis et linteaux des fenêtres du fût. Les pierres de taille constituant le soubassement ont une hauteur de 0,50 m et une queue moyenne de 0,70 m.

Le mortier de ciment utilisé dans la construction est préparé sur place, et ses constituants (sable et ciment) sont fournis par l'administration. Le cahier des charges stipule l'utilisation impérative de l'eau douce pour la fabrication du mortier. Les maçonneries sont montées avec un mortier composé de 400 kg de ciment par m^3 de sable. Les mortiers de rejoints sont composés de 800 kg de ciment par m^3 de sable. Les lits de mortier sont de 0,010 m d'épaisseur, et les joints verticaux de 0,008 m. Le cahier de charges fait une description précise des techniques permettant d'obtenir une parfaite cohésion des pierres entre elles, en utilisant un minimum de mortier et en imposant la qualité de la pierre et de ses surfaces. Autant de précisions pour prévenir au maximum les erreurs de mise en œuvre, assurer la qualité de la structure et la cohésion parfaite des éléments entre eux. Les articles en question sont cités dans l'Annexe A, et voici quelques points importants qui intéressent ce projet :

De manière générale, on retient que les pierres doivent être parfaitement homogènes, pleine et d'un grain égal. Le mortier doit être fabriqué à l'eau douce, à couvert, à l'aide d'un manège à roue. Le ciment et le sable sont mélangés à sec, puis l'eau est ajoutée avec un arrosoir à pomme juste pour obtenir une pâte ferme. Il est interdit de ramollir le mortier par l'addition d'eau. L'espace entre les moellons doit être le plus fin possible, mais il doit toujours y avoir du mortier interposé. Les moellons sont toujours posés à recouvrement sur les moellons de l'assise inférieure. Pour chaque moellon, toutes les surfaces de pose qui doivent être en contact avec le mortier sont préalablement nettoyées. La pose de la taille est faite à bain de mortier, ajustée et tassée en tous sens à coups de masse en bois. Vers la queue des moellons et pierres de taille, les vides sont garnis avec des éclats de pierre. Les pierres sont arrosées à l'eau douce une demi-heure avec leur pose. Il n'y a pas de pose pendant les périodes de gelée. Les pierres de taille lisses sont taillées à la boucharde. Les parements vus sont râgrés, nettoyés et rejoignoyés par l'application d'un mortier fin serré fortement contre la pierre.

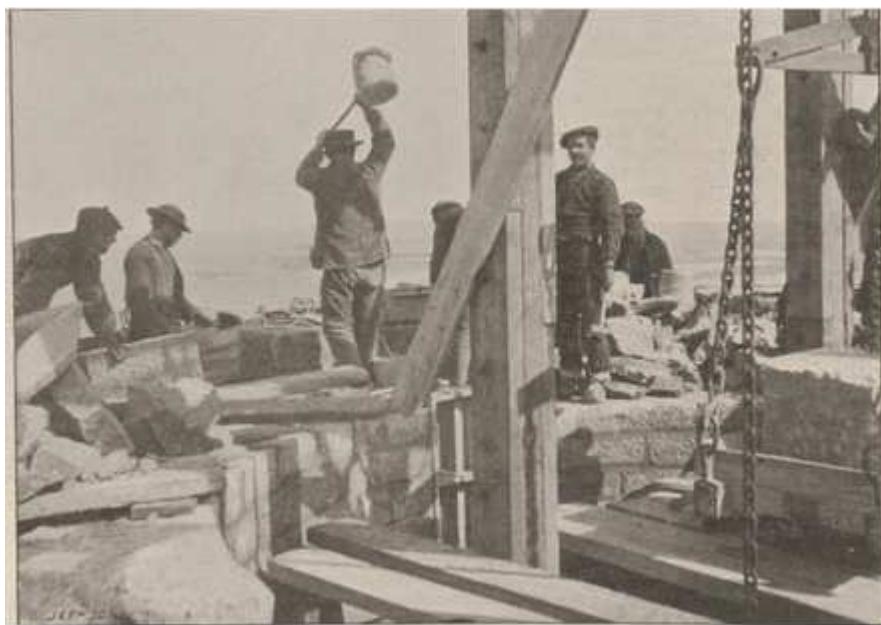


Figure 2. Le Monde Illustré, 31/12/1899. Photo d'Émile Hamonic, lors de la construction du phare de l'île Vierge, à 45 m de hauteur [22]

Le parement intérieur de la tour est caché par une épaisseur en brique fine permettant de garder une lame d'air dans la paroi. Cette surface de brique est revêtue d'environ 12 500 plaques d'opaline ($\approx 1000 \text{ m}^2$), c'est un verre à l'aspect blanc laiteux qui recouvre l'intégralité du cylindre intérieur de la tour. Décorative et fonctionnelle, l'opaline permet à la lumière de pénétrer par réflexion dans ce cylindre creux. Avant les travaux de réparation, on trouvait des boiseries dans la salle de veille et dans la salle de la cuve à mercure.

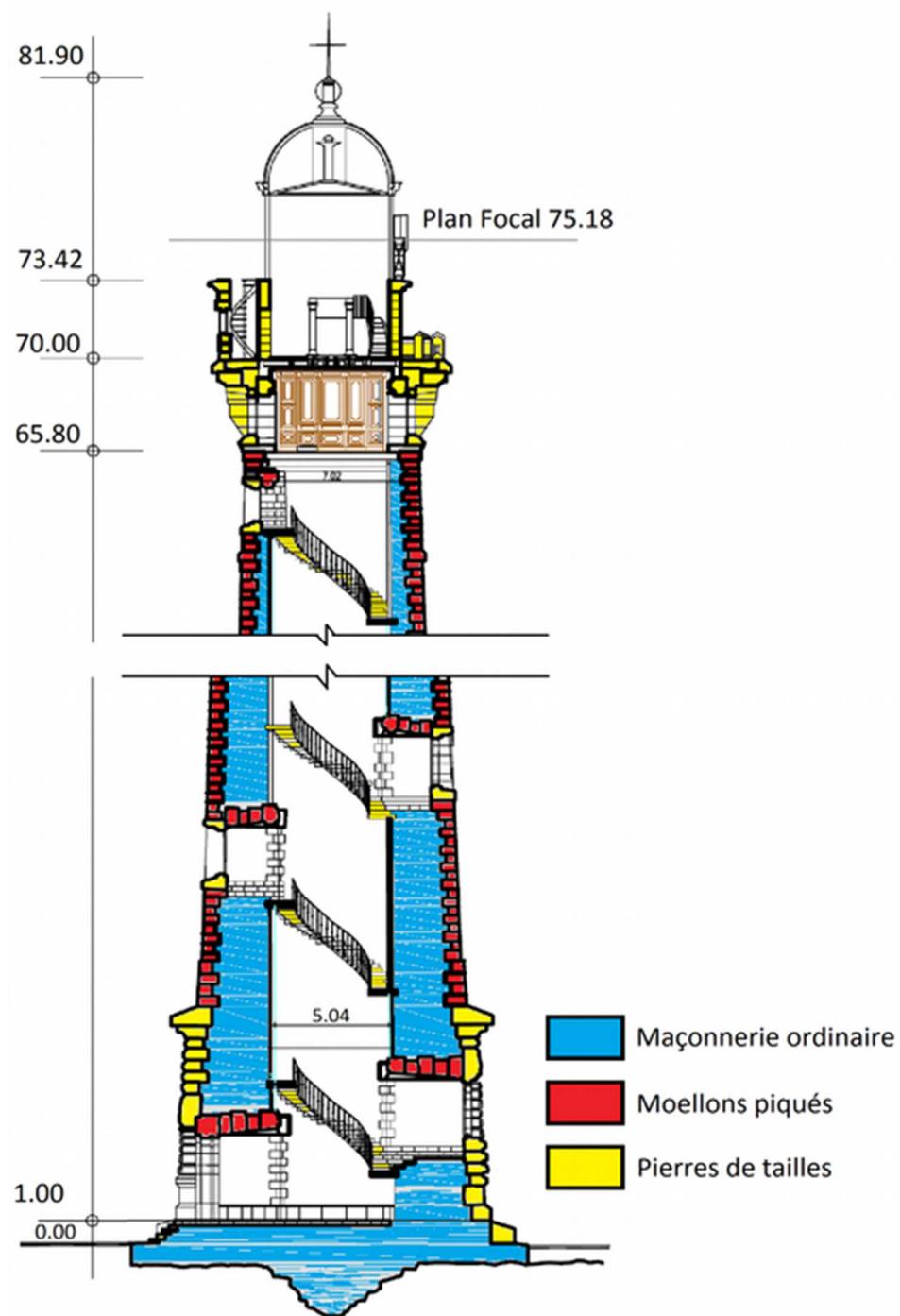


Figure 3. Répartition des différents types de maçonneries [38]

1. 3. 2. Le mortier constituant les joints

Dans le dossier de soumission [40] rédigé le 26 novembre 1898, se trouvent les conditions à respecter pour assurer la qualité du mortier lors de la fourniture de 350t de ciment Portland. Les conditions de livraison et les tests à réaliser pour approuver son utilisation sont décrits avec une grande précision. On apprend que les ciments contenant plus de 1 % d'Acide sulfurique sont refusés, et que ceux contenant plus de 4 % d'Oxyde de fer sont déclarés suspects. Les articles décrivent les modalités pour la confection des briquettes de test qui sont réalisées à l'eau de mer. Deux types d'éprouvettes sont réalisés, des briquettes de ciment pur et des briquettes de mortier au sable quartzeux. Pour les briquettes de ciment pur, la proportion en eau est déterminée en fonction de la consistance de la pâte fraîche. Pour les briquettes de mortier, elles sont faites d'une portion de ciment pour trois portions de sable, et d'une quantité d'eau égale à 12 % de la quantité totale de ciment et de sable. Les valeurs de résistance à respecter sont les résultats d'essais de traction. Il y a 6 essais pour chaque échéance, la valeur retenue est la moyenne des trois meilleures parmi chaque série de 6 essais. Le Tableau 3 regroupe les valeurs seuils à respecter pour chaque échéance et pour chaque type de briquette.

Tableau 3. Limites de résistance des éprouvettes de contrôle (1)

	Briquettes			
	Ciment pur kg/cm ²	MPa	Mortier kg/cm ²	MPa
R ₁₇	20	2	8	0,8
R ₁₂₃	35	3,5	15	1,5
	et > à R ₁₇ + 5		et > à R ₁₇ + 2	
R ₁₂₄	45	4,5	18	1,8
	et > à R ₁₂₃ si R ₁₂₃ < 55		et > à R ₁₂₃	

Grâce au Tableau 4 [00], nous avons des raisons de poser l'hypothèse selon laquelle la résistance à la compression du mortier du phare de l'Île Vierge correspond à 5 fois sa résistance en traction.

Tableau 4. Caractéristiques des mortiers, CEREMA, 2015

Type de mortier	Résistance en compression [N/mm ²]	Résistance en traction [N/mm ²]	Module d'élasticité [N/mm ²]
Mortier de chaux aérienne	0.5 - 3	0.3 - 0.7	1000 - 3000
Mortier de chaux hydraulique	1 - 6	1 - 1.5	3000 - 5000
Mortier de chaux pouzzolanique	1 - 6	1 - 1.5	3000 - 5000
Mortir mixte	4 - 15	1 - 3	3000 - 8000
Mortier de ciment	10 - 20	2 - 4	6000 - 9000

Il est donc raisonnable de dresser le tableau de valeurs suivant (Tableau 5) :

Tableau 5. Limites de résistance des éprouvettes de contrôle (2)

jours	Résistance traction		Résistance compression	
	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa
7	8	0,8	40	4
28	15	1,5	75	7,5
84	18	1,8	90	9

2. Caractérisation de la pierre de Kersanton

Tous les essais ont été effectués au LMDC de l'INSA de Toulouse. Quatre blocs de pierre de Kersanton ont été prélevés à la carrière anciennement responsable de la livraison des pierres de taille pour la construction du phare de l'Île Vierge. Il s'agit aujourd'hui de la carrière de Dany Sanquer, située à la pointe de la rivière de l'Hopital Camfrout. Ces quatre blocs proviennent d'un stock de pierre exposée à l'air extérieur et en contact avec le sol. Les blocs ont montré des degrés de vieillissement différents, mais les âges de leur extraction sont inconnus. Il faut donc garder cela à l'esprit en analysant les résultats globaux.

La roche ne présente pas de plan d'anisotropie visible, cependant, la présence possible de failles imperceptibles dans la pierre à l'état brut, ont pu être observées sur les blocs 1 et 4 lors du débitage des éprouvettes. Le bloc 4 qui semble avoir été le plus altéré a également montré des degrés d'altération différents entre le cœur de la pierre et la zone proche de l'extérieur (Figure 4). Il semble en effet que, comme tout matériau exposé à un environnement naturel extérieur, il y ait pénétration d'un front d'altération dans la pierre de Kersanton, depuis les surfaces exposées vers le cœur du matériau. Lorsque les conditions le permettaient, les essais ont été réalisés séparément pour les zones du cœur et de l'extérieur afin de les comparer.

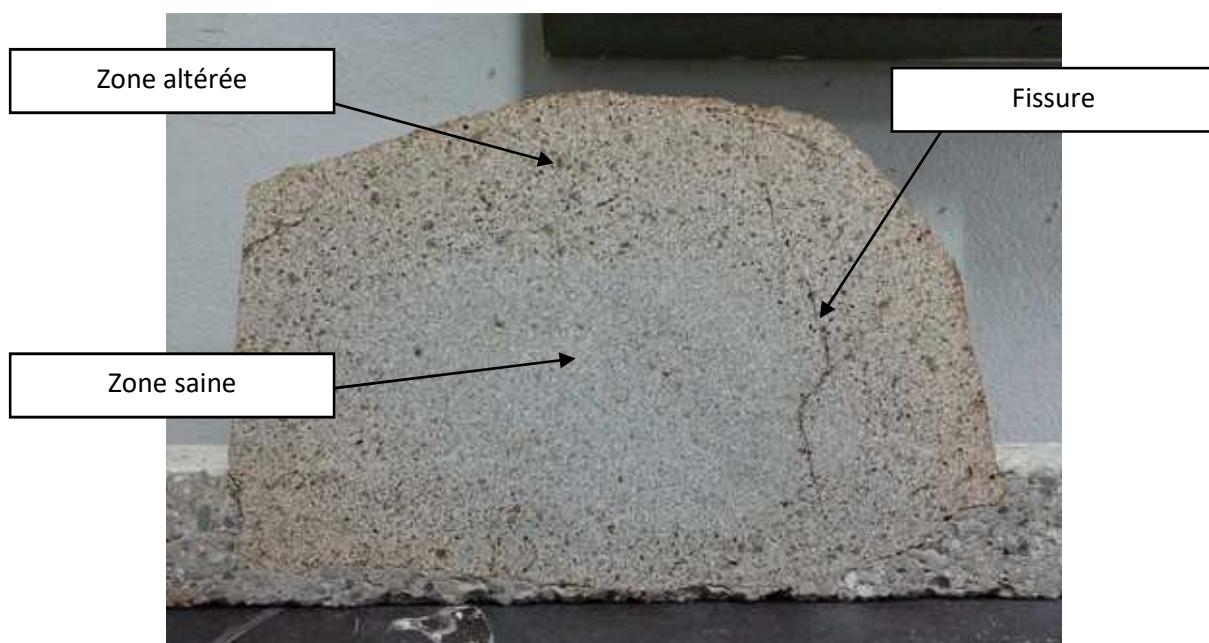


Figure 4. Mise en évidence de l'état de dégradation du bloc B4 après sciage

2. 1. Détermination de la masse volumique réelle et apparente de la pierre de Kersanton

Les essais ont été réalisés le 20 mars 2017 selon les méthodes utilisées au LMDC.

2. 1. 1. Masse volumique réelle

La détermination de la masse volumique réelle a été réalisée sur deux poudres (une pour le Cœur et une pour l'Extérieur), broyées à la machine, et tamisées à 63 µm.

La masse volumique réelle est obtenue à partir de la pesée hydrostatique de la poudre dans un liquide. Le liquide utilisé est un distillat de pétrole de dénomination commerciale « Garosolve D70 » et de masse volumique connue de 0,816 g/cm³ au moment de l'essai. Après la pesée à vide et la pesée de la poudre à l'air, la poudre est imbibée de Garosolve et placée dans un appareillage à vide, constitué d'une pompe à vide (de marque Baudoin) et d'une chambre à vide transparente en polyméthacrylate. Le but est de vider la poudre de l'air emprisonné entre ses grains. La balance utilisée est une Sartorius LP6200S avec une précision de ±0,001 g équipée pour une pesée hydrostatique. Le bain d'immersion est constitué d'un bêcher en verre contenant le liquide d'immersion. La mesure a été effectuée sur 6 échantillons au total, trois échantillons de 5 grammes environ pour chaque poudre, afin d'obtenir une valeur représentative.

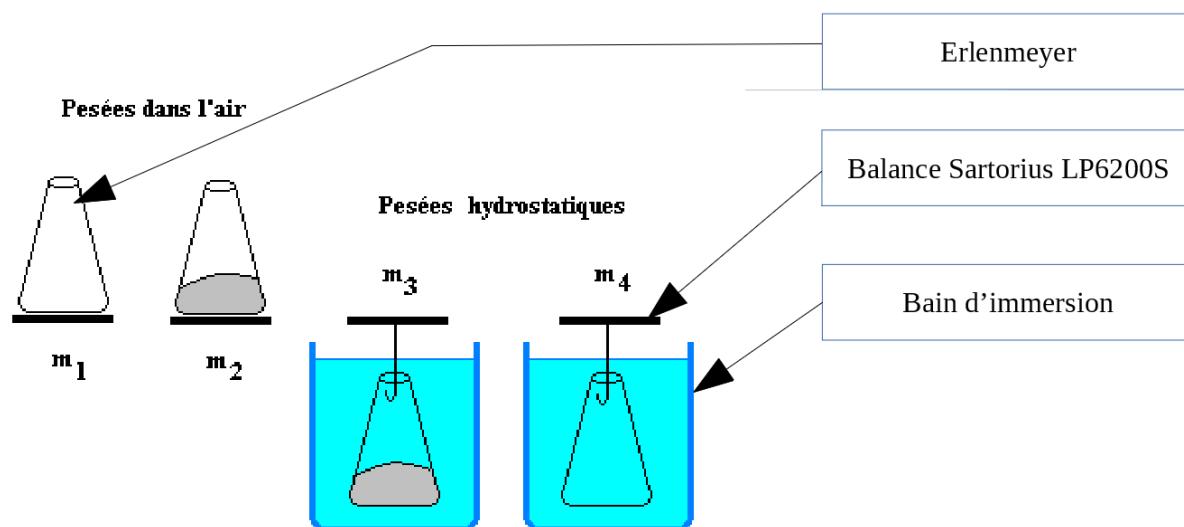


Figure 5. Schéma des 4 pesées servant à la détermination de la masse volumique absolue d'une poudre

- M 1 : Masse de l'rlenmeyer vide dans l'air
- M 2 : Masse de l'rlenmeyer et de la poudre dans l'air
- M 3 : Masse de l'rlenmeyer et de la poudre dans le liquide
- M 4 : Masse de l'rlenmeyer vide dans le liquide
- M air : Masse du cylindre dans l'air
- M liquide : Masse du cylindre dans le liquide
- ρ : Masse volumique du liquide
- ρ_s : Masse volumique de la poudre

La masse volumique réelle est déterminée à partir de la formule suivante. Avec un écart de moins de 1 % entre le cœur et l'extérieur (Tableau 6), on peut dire que la masse volumique de solide est très peu impactée par la transformation chimique qui semble altérer la pierre.

$$\rho_{\text{real}} = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_1 + M_4 - M_3} \cdot \rho_{\text{garosolve}}$$

Tableau 6. Masse volumique réelle de la pierre de Kersanton

	M1	M2	M3	M4	Masse Volumique Garosolve ρ (g/cm ³)	Masse Volumique réelle ρ_s (g/cm ³)	Masse Volumique réelle ρ_s (kg/m ³)	
Cœur	1	15,59	20,038	13,102	9,991	0,816	2,71	2715
	2	14,779	20,004	13,045	9,388	0,816	2,72	2719
	6	25,165	29,333	18,879	15,953	0,816	2,74	2738
Extérieur	3	15,173	20,466	13,34	9,64	0,816	2,71	2711
	7	22,136	27,421	17,751	14,061	0,816	2,70	2704
	8	20,716	25,283	16,345	13,154	0,816	2,71	2708
					Masse Volumique réelle ρ_s (g/cm ³)	Masse Volumique réelle ρ_s (kg/m ³)		
					Moyenne	2,72	2724	
					Ecart type	0,01	13	
					Coef var	0,5%	0,5%	
					Moyenne	2,71	2708	
					Ecart type	0,00	4	
					Coef var	0,1%	0,1%	
					Masse Volumique réelle ρ_s (g/cm ³)	Masse Volumique réelle ρ_s (kg/m ³)		
					Moyenne	2,72	2716	
					Ecart type	0,01	12	
					Coef var	0,4%	0,4%	

2. 1. 2. Masse volumique apparente

La détermination de la masse volumique apparente a été réalisé sur quatre échantillons relativement petits (cubes de 4 cm de côtés environ) provenant du bloc 4. Deux échantillons du cœur et deux autres proches de l'extérieur. Les échantillons ont été placés dans un dessiccateur et maintenus dans le vide pendant 4 heures. Ensuite, l'eau d'immersion a été introduite jusqu'à recouvrir les échantillons d'au moins 20 mm. Le vide a été maintenu pendant plus de 2 jours. Pour déterminer la masse du corps immergé, on accroche une tige et un panier de pesée hydrostatique à une balance placée au-dessus d'un bain d'eau. On obtient ainsi la masse Meau des corps immergés. On détermine la masse du corps imbibé pesé dans l'air en essuyant rapidement et soigneusement le corps à l'aide d'un linge humide afin de retirer l'eau en surface sans toutefois retirer l'eau dans les pores. On obtient ainsi la masse Mair de l'échantillon imbibé. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve 60 °C jusqu'à masse constante. Enfin, on obtient la masse des éprouvettes sèches Msec lors de la dernière pesée. On peut constater à partir du Tableau 7 qu'il y a une perte de masse de 7 % et une porosité multipliée par 4 entre le cœur et l'extérieur de ce bloc.

Tableau 7. Masse volumique apparente et porosité de la pierre de Kersanton

		mh (g)	ms (g)	md (g)	V0 (mL)	Vb (mL)	Masse volumique apparente (kg/m3)	Porosité ouverte (%)
Cœur	Cœur 1	105,34	169,14	167,91	1,2	63,9	2628	1,9%
	Cœur 2	106,95	171,77	170,35	1,4	64,9	2624	2,2%
Extérieur	Ext 1	100,48	165,5	159,51	6,0	65,1	2450	9,2%
	Ext 2	98,93	162,88	157,57	5,3	64,0	2460	8,3%

$$\rho_{app} = \frac{md}{ms-mh} \cdot \rho_{eau}$$

	Masse volumique apparente (kg/m3)	Porosité ouverte (%)
--	--	-----------------------------

mh = masse immergée dans l'eau

ms = masse saturée dans l'air

md = masse sèche

V0 = volume des pores

Vb = volume apparent

	Masse volumique apparente (kg/m3)	Porosité ouverte (%)
Moy Cœur	2626	2,1%
Moy Extérieur	2455	8,8%
Moyenne total	2541	5,4%
Ecart Cœur/Ext	7%	76%

2. 2. Analyse chimique et minéralogique de la pierre de Kersanton

2. 2. 1. Analyse chimique

La Figure 8 permet de bien mettre en évidence la différence de coloration entre le cœur et l'extérieur. Les échantillons qui y sont représentés ont été utilisés pour la détermination de la masse volumique apparente et la porosité, et proviennent du bloc B4. Ceux utilisés pour la masse volumique réelle et pour l'analyse chimique ont été prélevé dans le même bloc sur la même tranche.

Pour cela, une technique d'analyse sur liquide a été utilisée. L'échantillon solide a préalablement été réduit en poudre et mis en solution. La poudre de pierre de Kersanton a été mise en fusion avec des borates de lithium à 1100 °C pendant 30 min. La perle obtenue a été dissoute dans de l'acide (HNO₃). Parmi les nombreuses techniques d'analyse de dosage, c'est une ICP-AES et une HPIC qui ont été utilisées dans ce cas. Le principe de la première est le suivant : les éléments présents en solution sont ionisés par l'effet de très haute température à l'aide d'une flamme ou d'une torche à plasma (Inductively Coupled Plasma, ICP), puis ils sont analysés par spectrométrie d'émission atomique (Atomic Emission Spectrometry, AES). HPLC (high pressure liquid chromatography) c'est une technique qui s'appuie sur la chromatographie en phase liquide. C'est un procédé de séparation des constituants d'un mélange qui permet de doser les éléments.

Tableau 8. Résultats des analyses chimiques

	Cœur	Extérieur	Δ	Δ absolu	
% massique	SiO₂	48,7	55,2	6,55	Oxyde de Silicium
	CaO	4,78	1,08	-3,71	Oxyde de Calcium ou Chaux vive
	Al₂O₃	14,9	15,2	0,33	Oxyde d'Aluminium
	Fe₂O₃	7,47	8,83	1,36	Oxyde de Fer
	K₂O	2,85	3,19	0,35	Oxyde de Potassium
	Na₂O	3,25	3,33	0,07	Oxyde de Sodium
	MgO	6,63	5,44	-1,19	Oxyde de Magnésium
	Mn₂O₃	0,12	0,10	-0,01	Oxyde de Manganèse
	TiO₂	1,14	1,04	-0,10	Dioxyde de Titane
	F	0,04	0,02	-0,02	Fluor
	SO₃	0,01	0,00	0,00	Trioxyde de Soufre
	P₂O₅	0,84	0,61	-0,23	Pentooxyde de Phosphore
	Cr₂O₃	0,053	0,048	0,00	Oxyde de Chrome(III)
Perte au feu (%)	7,01	4,74	-2,27	2,27	
TOTAL moyenne	97,7	98,9			

Les résultats de l'analyse chimique sont présentés dans le Tableau 8. Parmi ces résultats, on note que le composé chimique le plus présent est l'oxyde de silicium (SiO_2), il est l'élément de base de tout les silicates présents dans la roche, et a été évalué à environ 50 % de la composition totale. Le deuxième composé, c'est l'oxyde d'aluminium évalué à 15 % environ, et qui rentre dans la composition des aluminosilicates très présent dans cette roche. Ensuite, il y a de l'oxyde de fer ($\approx 8\%$) et de l'oxyde de magnésium ($\approx 6\%$), que l'on retrouve dans la biotite, la chlorite et la hornblende. Vient ensuite l'oxyde de calcium, ou Chaux, qui représente moins de 5 % et que l'on trouve dans la composition de la prehnite et la hornblende. Il y a du dioxyde de titane à 1 % environ, et les autres composants représentent moins de 1 % du total. En ce qui concerne les variations de proportion entre les deux zones, ce sont les oxydes de silicium (+6,55 %) et de calcium (-3,71 %) qui montrent le plus d'activité. L'augmentation de SiO_2 pourrait être la conséquence de la dissolution des autres composants.

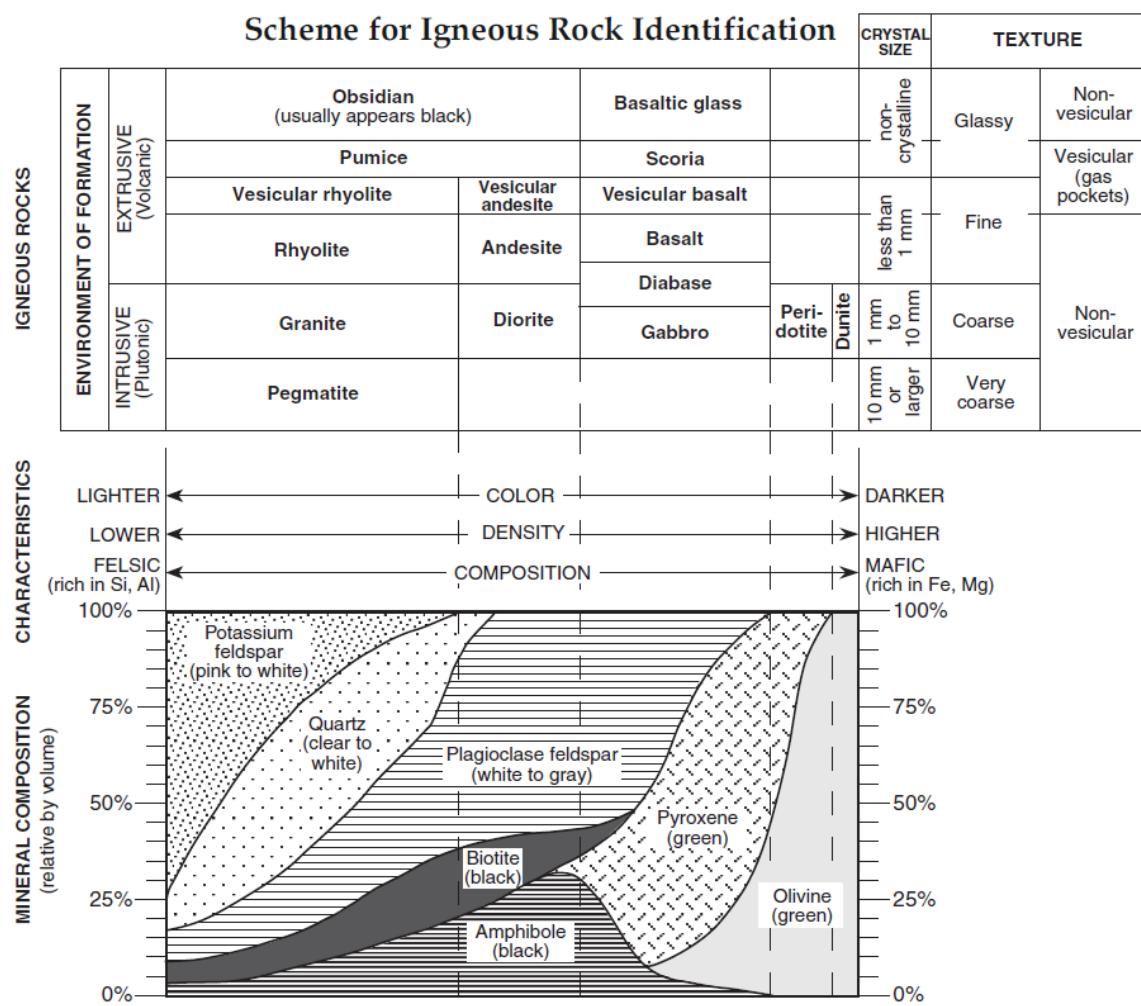


Figure 6. Schéma d'identification des roches ignées - Reference Tables for Physical Setting/EARTH SCIENCE – 2011 [44]

La Figure 6 permet de positionner la Kersantite parmi les roches plus communes en fonction de la minéralogie et de la proportion en silice. La Figure 7 qui est un diagramme similaire au précédent nous donne une indication d'échelle quant à la proportion de SiO₂, et montre la frontière Diorite/Gabbro à 52 % de SiO₂. Nous pouvons donc confirmer qu'entre 48,7 % et 55,2 % de SiO₂, nous nous trouvons bien à la frontière entre les Gabbros et les Diorites comme nous l'avions lu lors de la recherche bibliographique. Dans le premier schéma il s'agirait d'une pierre principalement constituée de feldspath plagioclase (55 %), d'amphibole (30 %), de biotite et de pyroxène, tandis que dans le deuxième schéma elle serait principalement constituée de plagioclase (55 %), de pyroxène (45 %) et d'amphibole (10 %). Dans les deux cas, elle est composée d'éléments silicatés, d'où la très forte proportion de SiO₂ obtenue après le test chimique.

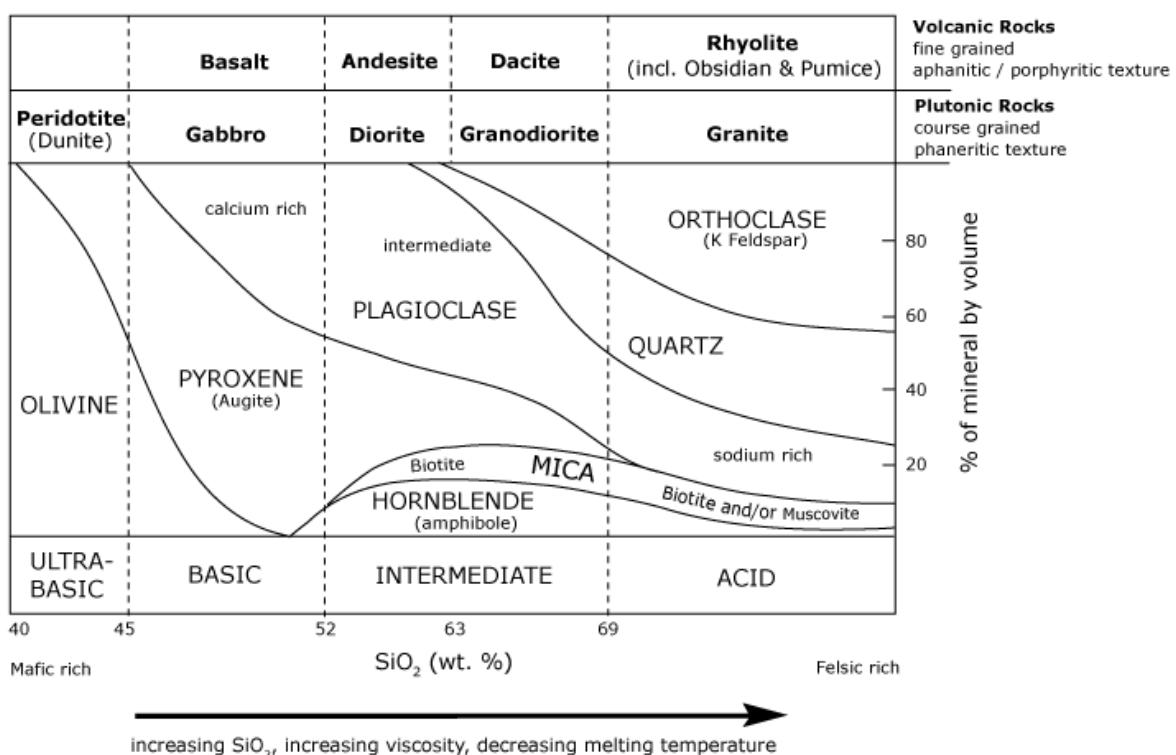


Figure 7. Schéma d'identification des roches ignées - The University of Auckland 2005 [46]

Lors d'une entrevue avec M. Fortuné, géologue retraité du LMDC, nous avons eu l'occasion de discuter des phénomènes d'altération de cette pierre. La vitesse de propagation du front de dégradation va dépendre de la porosité initiale de la roche, et de la composition de celle-ci. On peut donner l'exemple des granites : les feldspaths étant plus facilement mis en solution que les quartz, dans les granites ayant un fort taux de quartz l'altération est plus lente que dans les granites ayant un fort taux de feldspaths. Sous l'action de l'eau, les corps présents dans la roche peuvent se décomposer, et former de nouvelles molécules. C'est la réaction d'hydrolyse. Ainsi, les éléments se combinent différemment, des ions

passent en solution... Entre autres, les fers contenus dans le mica noir réagissent pour former des oxydes et hydroxydes de fer, les feldspaths vont donner des hydroxydes d'aluminium... Les quartz qui forment la plus grande partie du matériau, sont inaltérables. L'étape la plus importante dans la dégradation du granit semble être l'altération des biotites primaires en vermiculite pseudomorphe [Bartłomiej Kajdas et al 2016]. Ce type d'altération provoque l'expansion des cristaux de mica et conduit à la désintégration du granite. Il a été constaté une diminution de la quantité de biotite et de plagioclase pendant la dégradation, et simultanément, une légère augmentation de la quantité d'autres phyllosilicates. Leurs analyses sur les cristaux de biotite ont montré une diminution de K₂O généralement couplé avec l'apparition d'oxyde de fer et de titane. Les plagioclases primaires montrent moins d'altération que les biotites, mais certains feldspaths sont partiellement remplacés par des minéraux argileux. Les plagioclases produisaient des smectites en petites doses, et transformaient rarement les cristaux en entier. On sait par expérience que les granites à gros grains sont plus facilement et plus rapidement altérables que les granites à grains fins. Le Kersanton de cette étude est une pierre à grains relativement fins, on suppose donc qu'elle subit une altération lente.



Figure 8. Échantillons utilisés pour la mesure de la masse volumique apparente et la porosité

2. 2. 2. Analyse DRX

Deux analyses de DRX ont été réalisées pour deux échantillons (A pour le cœur et B pour l'extérieur). Premièrement, on remarque que les pics sont fins, le matériau est bien cristallisé. Après une analyse rapide, on constate que le pic le plus fort semble correspondre à l'albite, constituée de sodium, de calcium, d'aluminium, de silicium et d'oxygène. Il diminue fortement entre les diagrammes A et B. Un autre minéral qui semble très présent et qui diminue, c'est celui qui a été identifié comme clinochlore, du groupe des chlorites. Ce composé est constitué de fer, de magnésium, d'aluminium, de silicium, d'hydrogène et d'oxygène. On remarque aussi la présence d'un pic particulier correspondant à l'oxyde de silicium, et montrant une augmentation entre A et B. Précédemment dans l'analyse chimique, nous avons vu les SiO₂ augmenter et les CaO diminuer, cela semble compatible avec cette première analyse de DRX.

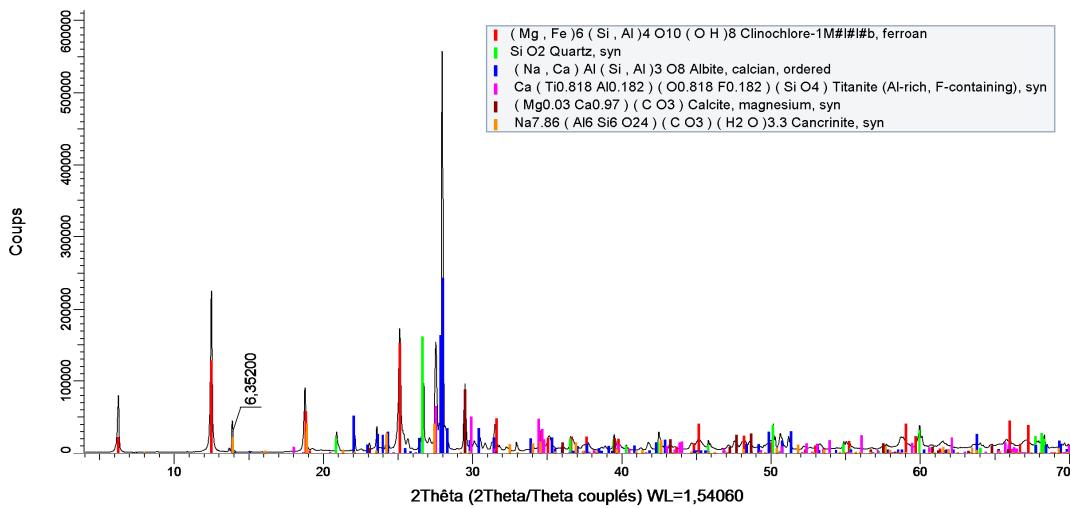


Figure 9. Résultats DRX échantillon A (Cœur)

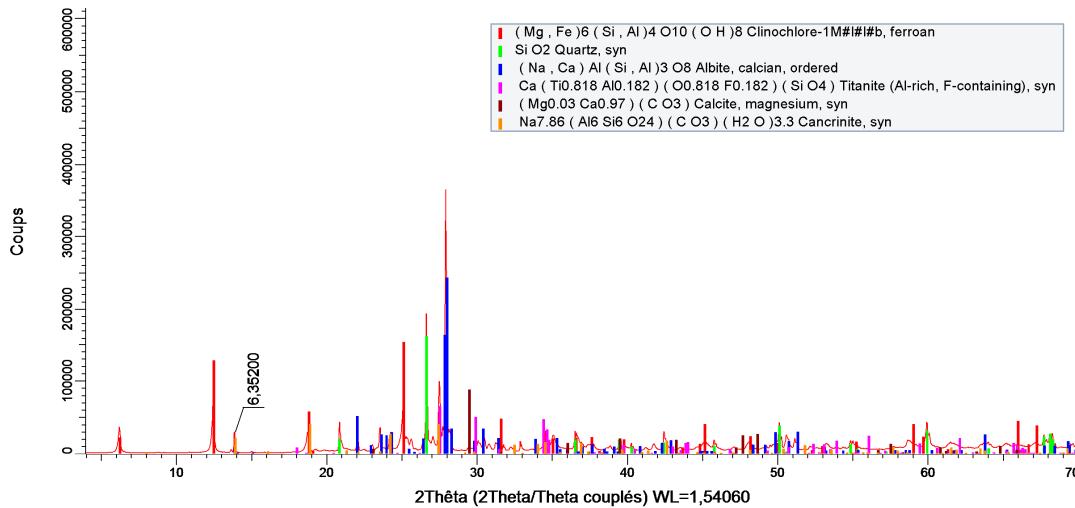


Figure 10. Résultats DRX échantillon E (Extérieur)

2. 3. Essais de compression.

Essais réalisés le 10 mars 2017, en s'appuyant sur la norme NF EN 772-1, janvier 2001. 24 éprouvettes tirées parmi les 4 blocs, ont été testées en compression. Les éprouvettes n'ont pas été conservées en étuve faute de place disponible. Parmi les 24 éprouvettes, 21 ont été conservées à l'air ambiant (7 cubes 100x100x100mm³ ; 11 cylindres Φ70mm et h70mm ; 3 cylindres Φ70mm et h140mm) et 3 conditionnées par immersion dans une eau à 20 °C pendant 10 jours (3 cylindres Φ70mm et h70mm).

Les surfaces planes en contact avec la presse ont été préparées à la rectifieuse (manuelle pour les cubes, et automatique pour les cylindres). Les éprouvettes ont été pesées à la balance à 1g près, et mesurées au pied à coulisse, pour en déduire la masse volumique. Les essais de compression ont été réalisés à la presse 4000kN. Par ailleurs, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores a été évaluée à l'aide d'un appareil Pundit Proceq qui mesure le temps de parcours des ondes acoustiques longitudinales entre un émetteur et un récepteur. Les masses volumiques et les vitesses du son ont été mesurées sur les éprouvettes 1 jour avant le passage à la presse, sauf pour les éprouvettes B35 B36 et B37 où les mesures ont été effectués avant immersion.

Le Tableau 9 recense tous les résultats des essais de compression classés par bloc, par zone et par forme, sans prendre en considération les effets de forme. À première vue, on peut dire que les cubes du bloc B1 ont montré une résistance proche des 120MPa avec 105MPa pour la plus basse valeur, atteinte par le cube C4 qui ne présentait pas de défauts visibles. Tandis que le cube C5 sur lequel a été observée une fissure naturelle, enregistre une résistance de plus de 128MPa, et représente la valeur maximale enregistrée parmi les cubes. Les cubes du bloc B2 ont été moins performants, et font descendre la moyenne des résistances sur cube à 112MPa. Le bloc B2 semble avoir été de moins bonne qualité que le bloc B1. Les essais sur le bloc B3 représentent des essais sur cylindre d'élancement 1 et 2, et leurs performances ont parfois égalé celles des cubes issus de B1 mais ne les ont pas dépassées. Le bloc B4 sur lequel a été observée la différence la plus marquante entre le cœur et l'extérieur, et qui a été utilisé pour tester la résistance de cylindres d'élancement 1, montre une nette dégradation de la résistance entre le cœur et l'extérieur (de l'ordre de 30 %).

Tableau 9. Résultats bruts des essais de compression sur la pierre de Kersanton sur cube et sur cylindre.

Zone 1=Cœur ; 2=Ext	Bloc n°	L (mm)	l ou φ (mm)	h (mm)	Éprouvette n°	Masse Volumique (kg/m³)	Contrainte de rupture (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	Forme ou élançement
B1	1	100	99,3	100	C1	2680	114,5	5556	Cube
	1	99,1	99,7	99,7	C2	2691	125,7	5328	Cube
	1	99,4	100	99,8	C3	2707	125,5	5373	Cube
	1	100,2	100	100	C4	2703	104,7	5302	Cube
	1	100	100	100	C5	2684	128,5	5405	Cube
B2	1	2	100	99,8	C6	x	101,3	5102	Cube
	1	2	99,8	100	C7	x	83,9	5118	Cube
B2	1	2	69,6	140,9	213	2679	106,2	5124	E=2
B3	1	3	69,6	141,3	38	2695	94,7	5138	E=2
	1	3	69,6	141,3	311	2699	69,8	5138	E=2
B3	1	3	69,6	70,7	31	2706	124,3	5050	E=1
	1	3	69,6	70,7	32	2703	119,6	5050	E=1
	1	3	69,6	70,6	33	2707	89,7	5043	E=1
	1	3	69,6	70,7	34	2662	119,4	5237	E=1
B3 Immergé	1	3	69,6	70	35	2688	114,7	5185	E=1
	1	3	69,6	69,1	36	2704	106,0	5119	E=1
	1	3	69,6	70	37	2696	83,3	5185	E=1
B4 Cœur	1	4	69,6	70,2	41	2636	122,9	4841	E=1
	1	4	69,6	70,2	42	2636	133,9	4841	E=1
	1	4	69,6	70,4	43	2636	127,6	4855	E=1
B4 Extérieur	2	4	69,6	70	44	2508	75,5	4242	E=1
	2	4	69,6	70,6	45	2554	96,0	4440	E=1
	2	4	69,6	70,8	46	2558	99,5	4425	E=1
	2	4	69,6	70,6	47	2550	86,8	4305	E=1

Les masses volumiques et les vitesses du son donnent des indications sur l'état de dégradation des matériaux d'une éprouvette à l'autre. Plus la vitesse du son diminue, plus il y a de vide d'air dans le matériau. De même pour la masse volumique, plus elle est importante, plus le matériau est dense. La figure suivante (Figure 11) illustre bien que les deux paramètres sont étroitement liés. Si on considère la vitesse du son dans l'air à 340 m/s (pour des conditions de pression et de température 1013,25 hPa et 20°C), et si on admet une variation exponentielle (telle qu'elle semble se dessiner sur le graphique) alors on obtient une tendance exponentielle : $v(\rho)=340 \cdot \exp(\rho \cdot 10^{-3})$ avec un coefficient de détermination R^2 très proche de 1.

On peut donc inverser l'équation précédente pour en déduire l'équation permettant de trouver la masse volumique (ρ) en fonction de la vitesse de propagation du son (v) mesurée :

$$\rho(v) = 10^3 \cdot \ln\left(\frac{v}{340}\right)$$

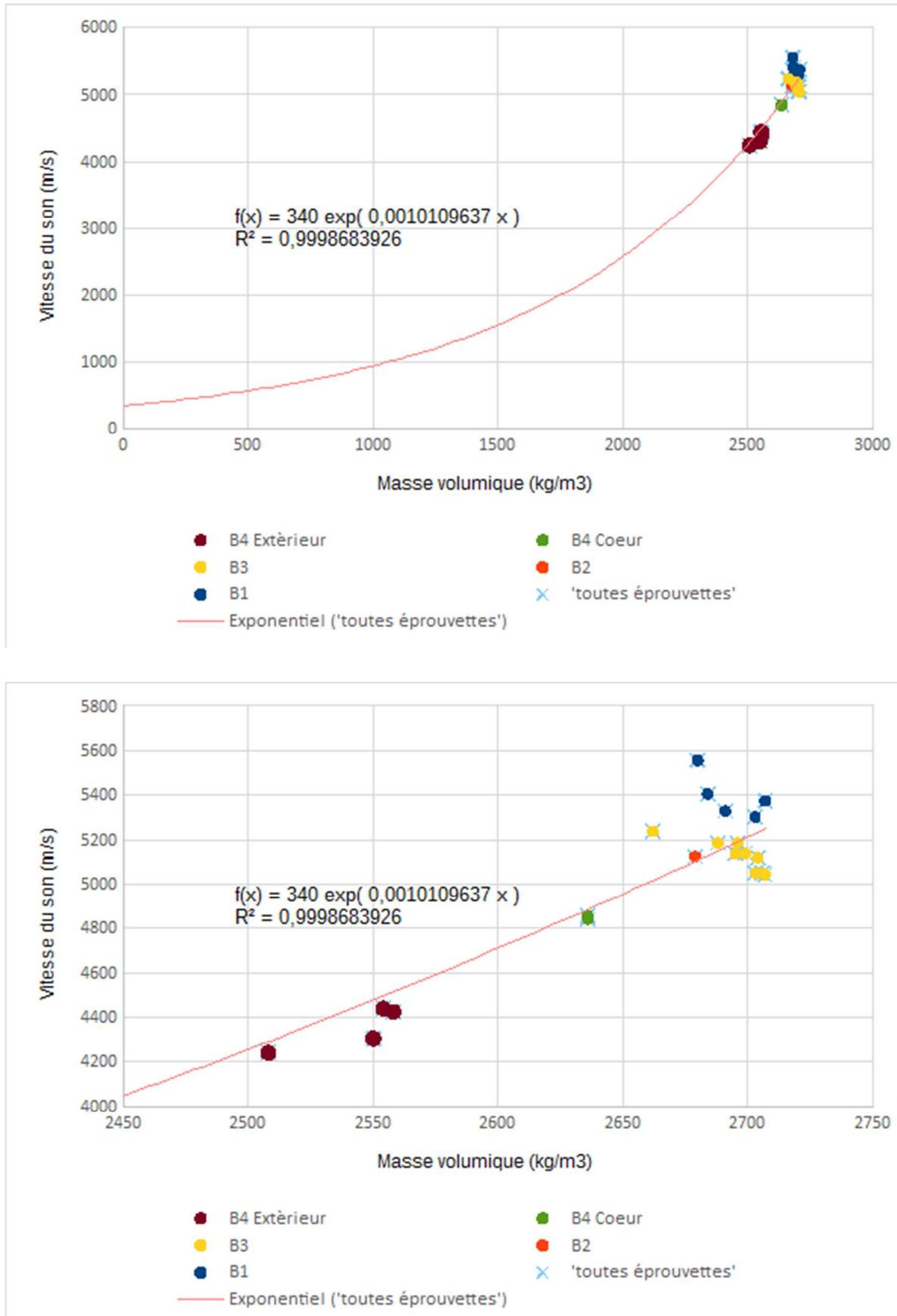


Figure 11. Diagrammes Vitesse du son (m/s) en fonction de la Masse volumique (kg/m³)

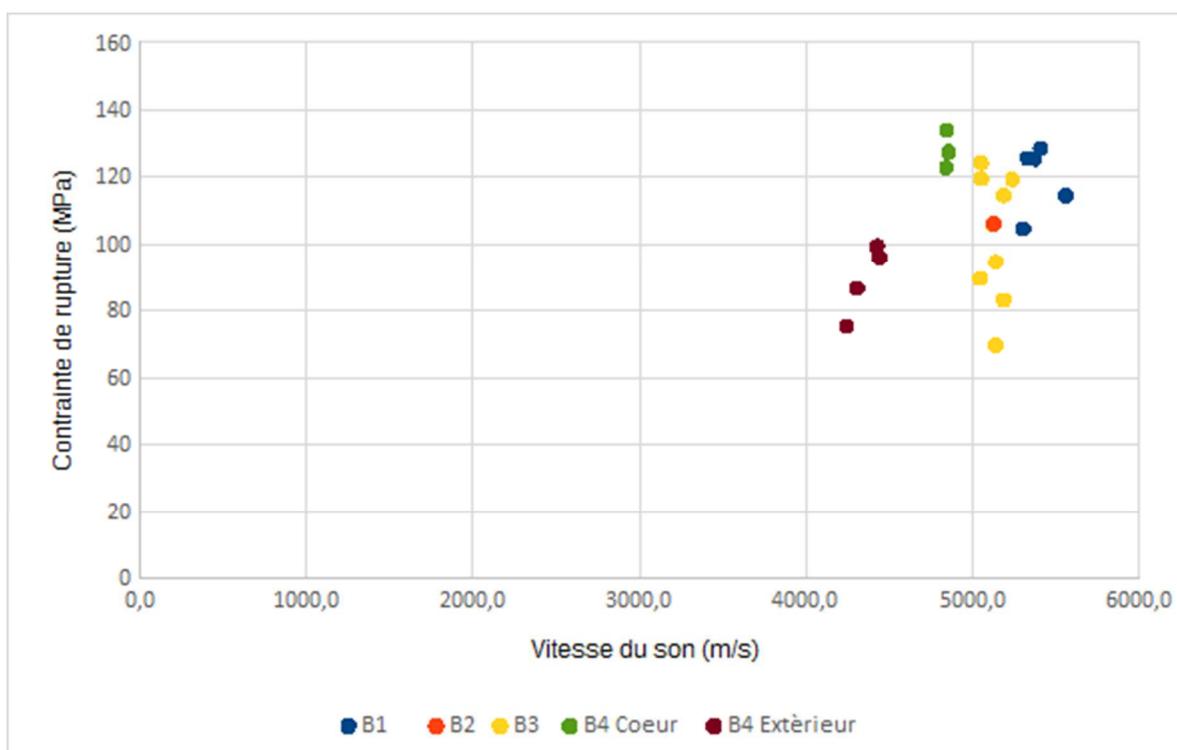


Figure 12. Diagramme des Contraintes de rupture (MPa) en fonction de la Vitesse du son (m/s)

Figure 12, on remarque un décalage évident des valeurs du bloc B4 par rapport aux autres blocs, et ce décalage est plus marqué si on se concentre sur les zones extérieures. Pour B4, la vitesse du son et la masse volumique sont plus faibles que pour les autres blocs. Entre les blocs B1, B2 et B3, l'état d'altération paraît relativement similaire au regard des valeurs de vitesse du son et de masse volumique bien groupées. Dans le tableau qui suit, les résultats des essais pour les blocs B1, B2 et B3 sont regroupés afin d'étudier l'influence de la forme sur la résistance. Pour cela, un facteur de forme δ est calculé à partir de la moyenne des résistances pour chaque cas de forme, puis comparé avec le facteur de forme donné par le Tableau A.1 de l'annexe A de la norme NF EN 772-1 janvier 2001 (et obtenu par interpolation pour les dimensions 70 mm et 140 mm). On trouve une différence de 11 % entre les facteurs de forme expérimental et théorique (Tableau 10).

Tableau 10. Résultats des essais de compression sur cube 10x10x10cm³ et cylindre d'élancement 2

Zone 1=Cœur ; 2=Ext	Bloc n°	L (mm)	l ou φ (mm)	h (mm)	Éprouvette n°	Masse Volumique (kg/m ³)	Contrainte critique (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	Forme ou élancement
B1	1	100	99,3	100	C1	2680	114,5	5556	Cube
	1	99,1	99,7	99,7	C2	2691	125,7	5328	Cube
	1	99,4	100	99,8	C3	2707	125,5	5373	Cube
	1	100,2	100	100	C4	2703	104,7	5302	Cube
	1	100	100	100	C5	2684	128,5	5405	Cube
B2	1	100	99,8	98,8	C6	x	101,3	5102	Cube
	1	99,8	100	100,2	C7	x	83,9	5118	Cube
B2	1	2		69,6	213	2679	106,2	5124	E=2
B3	1	3		69,6	38	2695	94,7	5138	E=2
	1	3		69,6	311	2699	69,8	5138	E=2

	Contrainte critique (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	δ	δ selon norme	Ecart entre δ et δ norme
Moyenne cube	112	5312			
Ecart type	13,2	118	0,89	1,00	
Coef variation	0,12	0,02			
Moyenne élancement 2	90,2	5133			
Ecart type	13,6	6,2	1,24	1,11	11%
Coef variation	0,15	0,00			

Sur le même principe, l'étude a été réalisée sur le bloc B3 entre les cylindres d'élancement différents. La différence entre l'expérience et la théorie est du même ordre de grandeur (14 %). Nous ne sommes pas très éloignés, ce qui nous permet d'être confiants quant aux résultats de ces essais mécaniques.

Tableau 11. Résultats des essais de compression sur cylindre d'élancement 1 et cylindre d'élancement 2

Zone 1=Cœur ; 2=Ext	Bloc n°	φ (mm)	h (mm)	Éprouvette n°	Masse Volumique (kg/m ³)	Contrainte critique (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	Forme ou élancement
B3	1	3	69,6	141,3	38	2695	94,7	5138
	1	3	69,6	141,3	311	2699	69,8	5138
	1	3	69,6	70,7	31	2706	124,3	5050
	1	3	69,6	70,7	32	2703	119,6	5050
	1	3	69,6	70,6	33	2707	89,7	5043
	1	3	69,6	70,7	34	2662	119,4	5237

	Masse Volumique (kg/m ³)	Contrainte critique (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	δ	δ selon norme	Ecart entre δ et δ norme
Moyenne élancement 2	2697	82,3	5138			
Ecart type				1,29	1,11	
Coef variation						
Moyenne élancement 1	2695	113,3	5095			
Ecart type	16	12	71	0,81	0,94	14%
Coef variation	0,01	0,10	0,01			

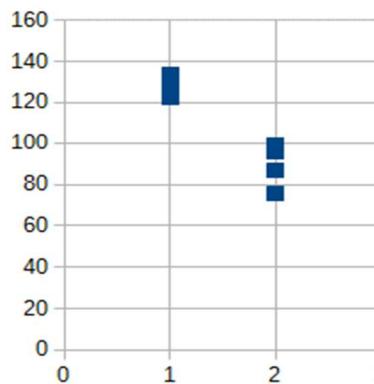
Pour la suite, on s'intéresse au bloc B4 pour étudier l'influence du degré d'altération de la pierre sur sa résistance (Tableau 12). Toutes les éprouvettes sont de même dimension. Comme il a été mentionné précédemment, on note une forte dégradation de la résistance lorsque l'on passe du cœur vers la périphérie (30 % d'écart). Tandis que la vitesse du son semble moins affectée (10 % d'écart), et la

masse volumique encore moins (4 % d'écart). Ces résultats indiquent que le phénomène d'altération en jeu a une influence non négligeable sur les caractéristiques mécaniques de la pierre. Les diagrammes de la Figure 13 permettent de constater visuellement les écarts de valeur.

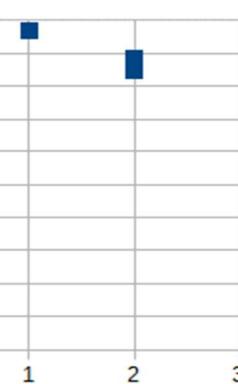
Tableau 12. Résultats des essais de compression sur le bloc B4 seul

Zone 1=Cœur ; 2=Ext	Bloc n°	φ (mm)	h (mm)	Éprouvette n°	Masse Volumique (kg/m ³)	Contrainte critique (Mpa)	Vitesse du son (m/s)	Forme ou élancement
B4 Cœur	1	4	69,6	70,2	41	2636	122,9	4841 E=1
	1	4	69,6	70,2	42	2636	133,9	4841 E=1
	1	4	69,6	70,4	43	2636	127,6	4855 E=1
B4 Extérieur	2	4	69,6	70	44	2508	75,5	4242 E=1
	2	4	69,6	70,6	45	2554	96	4440 E=1
	2	4	69,6	70,8	46	2558	99,5	4425 E=1
	2	4	69,6	70,6	47	2550	86,8	4305 E=1
Coéficient Extérieur/Cœur								
Masse Volumique	Contrainte critique	Vitesse du son						
0,96	0,70	0,90						
Moyenne coeur								
					2636	128,1	4846	
Ecart type								
						4	6	
Coefficient de variation								
						0,0%	0,1%	
Moyenne extérieur								
					2543	89,5	4353	
Ecart type								
						17	8	80
Coefficient de variation								
						0,7%	9,3%	1,8%
Moyenne total								
					2583	106	4564	
Ecart type								
						46	19	241
Coefficient de variation								
						1,8%	17,9%	5,3%

Contrainte de rupture (MPa)
en fonction de la zone
(1=Cœur ; 2=Extérieur)



Vitesse du son (m/s)
en fonction de la zone
(1=Cœur ; 2=Extérieur)



Masse volumique (kg/m³)
en fonction de la zone
(1=Cœur ; 2=Extérieur)

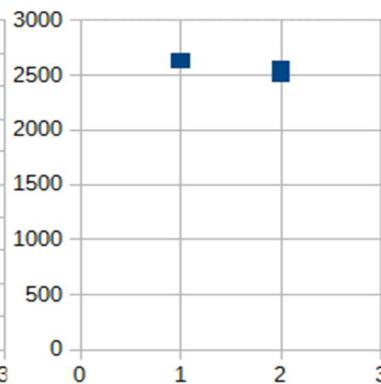


Figure 13. Contrainte de rupture, vitesse de son et masse volumique en fonction de la zone sur la pierre

Enfin, il a été montré plus tôt que la forme avait une influence sur les résultats, ce qui permet de dresser le Tableau 13, qui liste les contraintes de rupture corrigées selon les facteurs de forme Expérimentaux et Théoriques. On note une diminution de la résistance entre 24 % et 32 % entre le cœur

et l'extérieur. Outre le coefficient de variation qui augmente, il n'y a pas de différence flagrante entre les résultats globaux et ceux du bloc B4 seul.

Tableau 13. Valeurs des contraintes de rupture en compression après application du facteur de forme δ

Zone 1=Cœur ; 2=Ext	Normatif		Expérimental		Vitesse du son (m/s)	Forme ou élancement	
	δ norme	Contrainte de rupture (Mpa)	δ expérience	Contrainte de rupture (Mpa)			
B1	1	115	1	115	5556	Cube	
	1	126	1	126	5328	Cube	
	1	126	1	126	5373	Cube	
	1	105	1	105	5302	Cube	
	1	129	1	129	5405	Cube	
B2	1	101	1	101	5102	Cube	
	1	84	1	84	5118	Cube	
B2	1	111	1,24	132	5124	E=2	
B3	1	105	1,24	117	5138	E=2	
	1	77	1,24	87	5138	E=2	
B3	0,94	117	0,81	101	5050	E=1	
	0,94	112	0,81	97	5050	E=1	
	0,94	84	0,81	73	5043	E=1	
	0,94	112	0,81	97	5237	E=1	
B4 Cœur	0,94	116	0,81	100	4841	E=1	
	0,94	126	0,81	108	4841	E=1	
	0,94	120	0,81	103	4855	E=1	
B4 Extérieur	0,94	71	0,81	61	4242	E=1	
	0,94	90	0,81	78	4440	E=1	
	0,94	94	0,81	81	4425	E=1	
	0,94	82	0,81	70	4305	E=1	
		Normatif		Expérimental			
Moyennes Coeur	110	MPa	106	MPa			
Ecart type	12		13				
Coef de variation	11%		12%				
Moyennes Extérieur	84	MPa	72	MPa			
Ecart type	8		7				
Coef de variation	9%		9%				
Moyennes Globales	105	MPa	99	MPa			
Ecart type	15		16				
Coef de variation	14%		16%				

Pour conclure, il se dégage une plage de valeur pour caractériser la pierre de Kersanton saine et altérée. Il faut garder à l'esprit que les essais ont été réalisés sur la pierre sans passage à l'étuve, par conséquent, les états hydriques des éprouvettes sont incertains. Sachant que les blocs ont été exposés à l'environnement extérieur près de la carrière pendant un temps prolongé avant de les transformer en éprouvettes, il est possible que de l'humidité soit encore présente dans le réseau poreux de la pierre. Ce qui pourrait expliquer l'absence de différence entre les éprouvettes testées sans immersion et celles testées après une immersion de 10 jours. Pour cette raison, les moyennes calculées dans le dernier tableau ne prennent en compte que les valeurs des essais réalisés le même jour, donc issues d'éprouvettes ayant été conservées dans des conditions similaires. Prendre une valeur de résistance à la compression de l'ordre de 100MPa semble réaliste au regard des résultats obtenus pendant cette campagne d'essais.

2. 4. Détermination du module d'élasticité de la pierre de Kersanton

2. 4. 1. Module d'élasticité

L'essai a été réalisé le 17 mars 2017, en suivant la norme NF EN 14580, août 2005. Les 3 éprouvettes cylindriques ($\Phi 70\text{mm}$ et $h140\text{mm}$) ont été conservées à l'air ambiant du local :

- Bloc 2 ; Éprouvette B212
- Bloc 3 ; Éprouvette B39
- Bloc 3 ; Éprouvette B310

Seules les deux éprouvettes suivantes ont servi aux essais de module :

- Bloc 2 ; Éprouvette B212
- Bloc 3 ; Éprouvette B39

Ensuite, les trois éprouvettes ont servi à tracer l'évolution des déformations jusqu'à rupture.

Les éprouvettes ont été équipées chacune de 3 jauge de déformations longitudinales et de 3 jauge de déformation transversales. Les jauge de déformations longitudinales (longues de 7 cm) ont été placées au milieu de la hauteur comme le précise la norme, et espacées de 120° chacune les unes des autres par rapport à l'axe de symétrie du cylindre. Les jauge de déformation transversales ont été placées entre les jauge de déformations longitudinales, au milieu de la hauteur, comme le montre la Figure 14.



Figure 14. Photo d'une éprouvette avec ses jauge de déformation

Les éprouvettes ont été testées une première fois jusqu'à 14MPa (soit 13 % de la charge de rupture moyenne obtenue lors des essais de compression).

Les essais de module ont donc été effectués dans un second temps, sur les mêmes éprouvettes, en considérant que les caractéristiques mécaniques étaient inchangées. Les tests de compression qui ont suivi ont même révélé des résistances nettement supérieures à la moyenne obtenue précédemment, et supérieures à la valeur maximale obtenue sur les cylindres de même dimension lors de ces mêmes essais de compression. Les essais de modules ont été accompagnés d'une mesure des déformations transversales afin d'en estimer le coefficient de Poisson pour chaque éprouvette. Pour chaque éprouvette, les déformations retenues sont les moyennes des déformations pour chaque type de jauge, afin de n'avoir qu'une valeur par éprouvette pour chaque type de déformation.

L'essai se déroule de la façon suivante : On applique 3 cycles de chargement-déchargement entre une contrainte de pré-charge, et une contrainte maximale égale à 33 % de la charge de rupture théorique, le module est calculé lors du troisième cycle. Dans le classement ci-dessous, on trouve les contraintes initiales (σ_u) et maximales (σ_0) (correspondant aux contraintes initiale et maximale du troisième cycle), ainsi que les déformations longitudinales (ε_{lu} , ε_{l0}) et transversales (ε_{tu} , ε_{t0}) associées, utilisées pour déterminer le module de Young et le coefficient de Poisson pour chaque éprouvette.

	Contraintes	Déformations longitudinales	Déformations transversales
B212	$\sigma_u = 7,9 \text{ MPa}$ $\sigma_0 = 34,9 \text{ MPa}$ $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_u = 26,9 \text{ MPa}$	$\varepsilon_{lu} = 253 \mu\text{m/m}$ $\varepsilon_{l0} = 826 \mu\text{m/m}$ $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{l0} - \varepsilon_{lu} = 573 \mu\text{m/m}$	$\varepsilon_{tu} = -51 \mu\text{m/m}$ $\varepsilon_{t0} = -178 \mu\text{m/m}$ $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{t0} - \varepsilon_{tu} = -127 \mu\text{m/m}$
B39	$\sigma_u = 8,2 \text{ MPa}$ $\sigma_0 = 30,2 \text{ MPa}$ $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_u = 22,1 \text{ MPa}$	$\varepsilon_{lu} = 231 \mu\text{m/m}$ $\varepsilon_{l0} = 682 \mu\text{m/m}$ $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{l0} - \varepsilon_{lu} = 452 \mu\text{m/m}$	$\varepsilon_{tu} = -40 \mu\text{m/m}$ $\varepsilon_{t0} = -157 \mu\text{m/m}$ $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{t0} - \varepsilon_{tu} = -117 \mu\text{m/m}$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_l} \quad \vartheta = \frac{\Delta\phi}{\Delta\varepsilon_l \phi} \quad \Delta\phi = \frac{\Delta\varepsilon_t}{\pi}$$

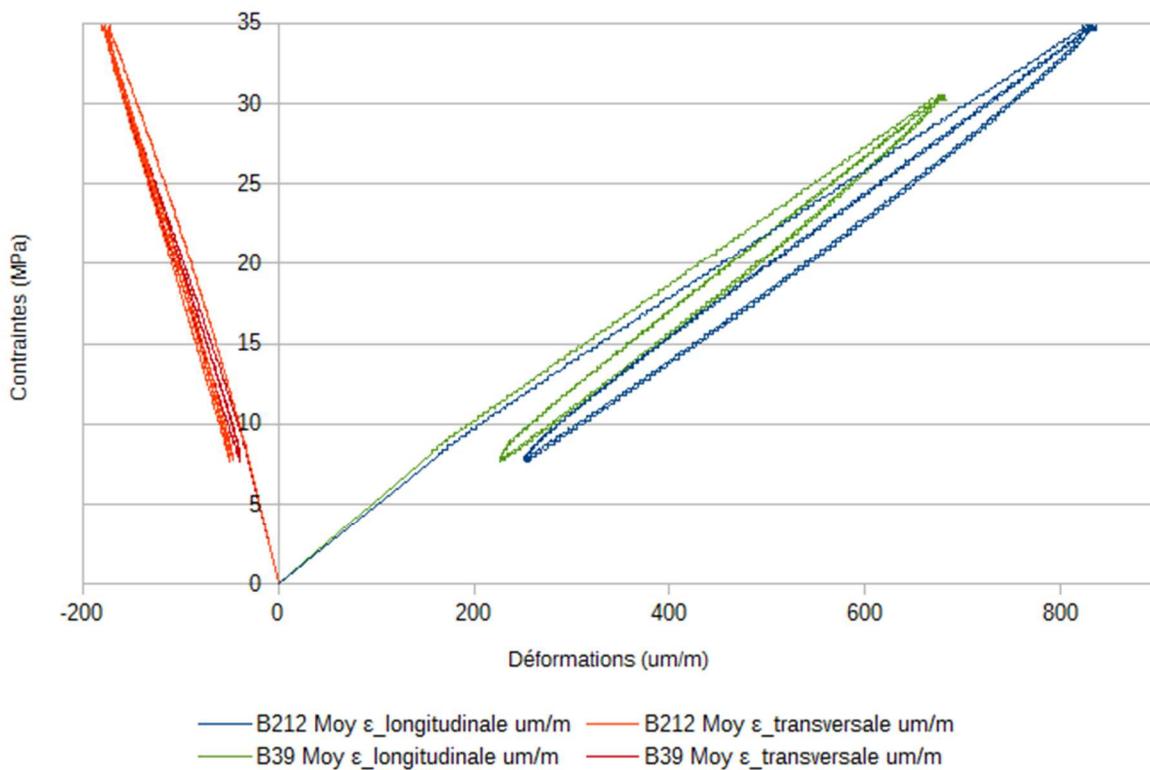


Figure 15. Diagramme des Contraintes (MPa) en fonction des Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$)

Tableau 14. Module d'élasticité selon la norme NF EN 14580

	E essai cyclique (MPa)	ν essai cyclique
B212	47015	0,14
B39	48857	0,17
Moyenne	47936	0,16

Au regard des résultats et des courbes, les pierres testées présentent des déformations très similaires. Les courbes sont superposées, et les modules calculés ont un écart de 3 %. Il est vrai qu'il est impossible de conclure sur le module d'élasticité réel de la pierre Kersanton avec seulement deux essais, mais la similarité des résultats permet d'être confiant quant à ces résultats, et donne la possibilité de poser une hypothèse sur cette caractéristique. $E \approx 48000 \text{ MPa}$.

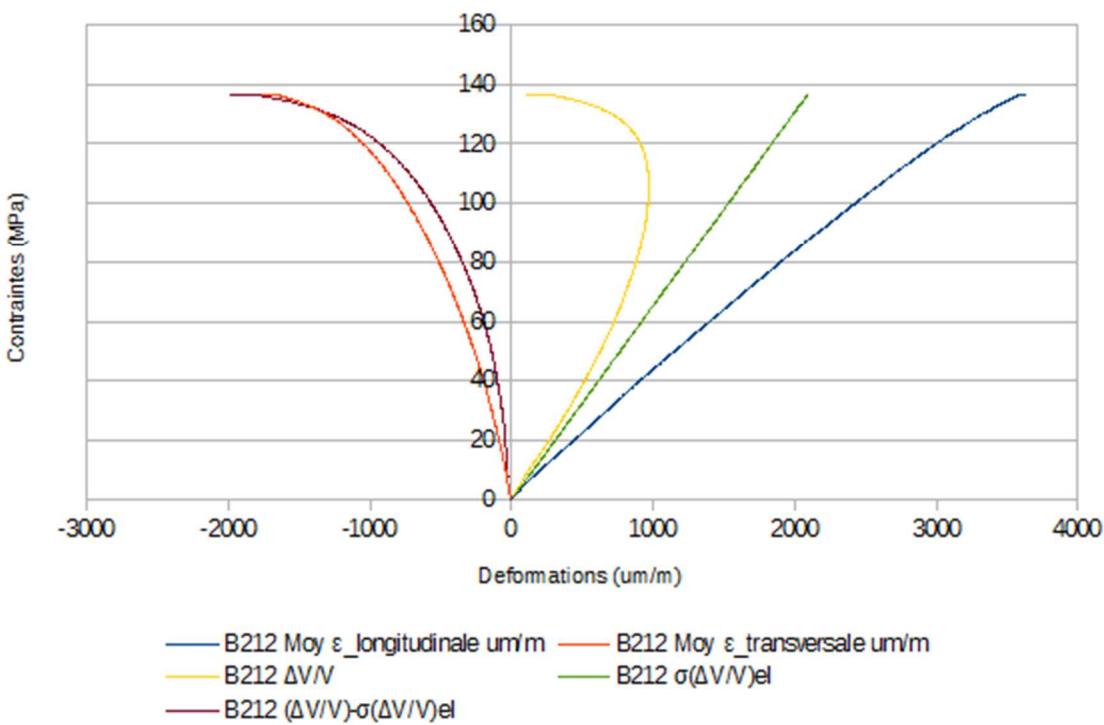
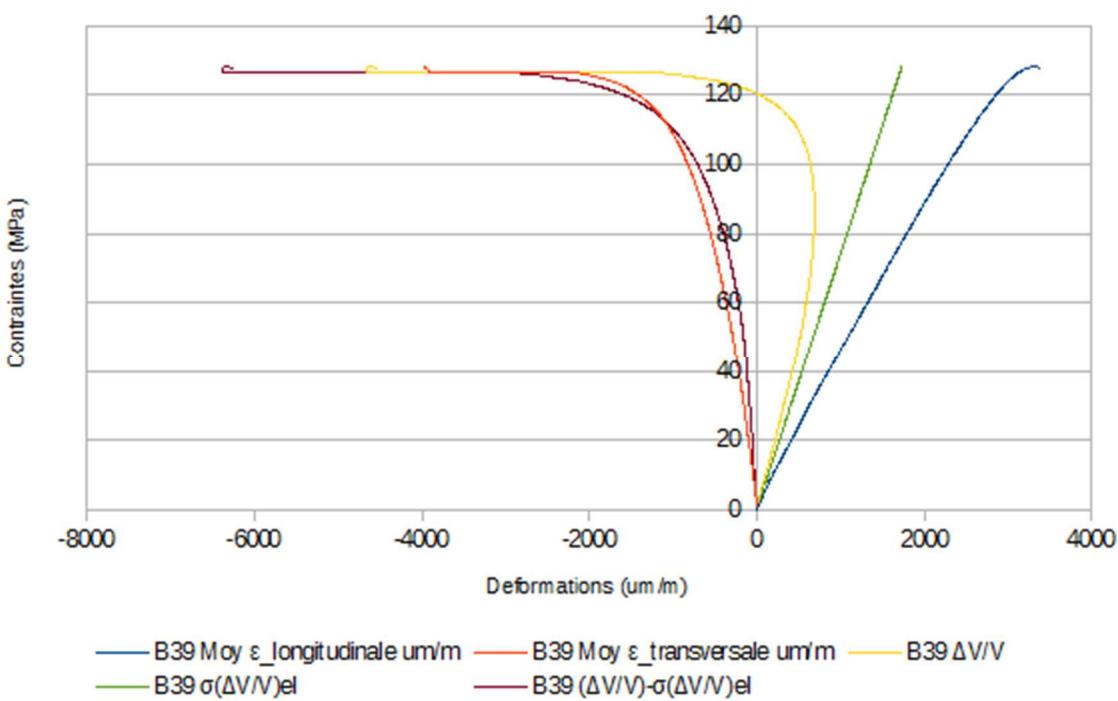
2. 4. 2. Essais de compression jusqu'à rupture avec relevé des déformations

Le montage précédent a été utilisé sur les mêmes éprouvettes, pour tracer l'évolution des déformations, lors d'un essai de compression, jusqu'à la rupture. En y intégrant pour chacun des essais, la variation de volume expérimentale ($\Delta V/V$) et la variation de volume élastique ($\Delta V/V_{el}$) (dont les équations sont données ci-dessous), il est possible d'étudier les différentes phases en jeu. Les modules et les coefficients de Poisson utilisés sont ceux déterminés lors des essais de module présentés dans la partie précédente. Les tracés des courbes sont présentés en Figure 16, Figure 17 et Figure 18.

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_l + 2\varepsilon_t \quad \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{élastique} = \frac{1-2\vartheta}{E}$$

Le tracé des courbes de variation de volume permet de constater 3 choses :

- L'absence de phase de consolidation probablement liée au fait que l'essai de module ait été fait juste avant. Les phases de consolidation sont donc en partie visibles sur les courbes résultats des essais de modules, et tracées lors du premier cycle de chargement. La pente tracée par le premier cycle est en effet plus faible que les pentes des cycles suivant.
- Une phase élastique très courte voire inexistante, repérée par l'écart qui apparaît très tôt sur le graphique entre la droite $(\Delta V/V)_{élastique}$ et la courbe $(\Delta V/V)$.
- Une phase d'ouverture de fissures stable, très longue par rapport à la phase d'ouverture instable qui suit.

Figure 16. Bloc B212, Diagrammes Contraintes (MPa) sur Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$)Figure 17. Bloc B39, Diagrammes Contraintes (MPa) sur Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$)

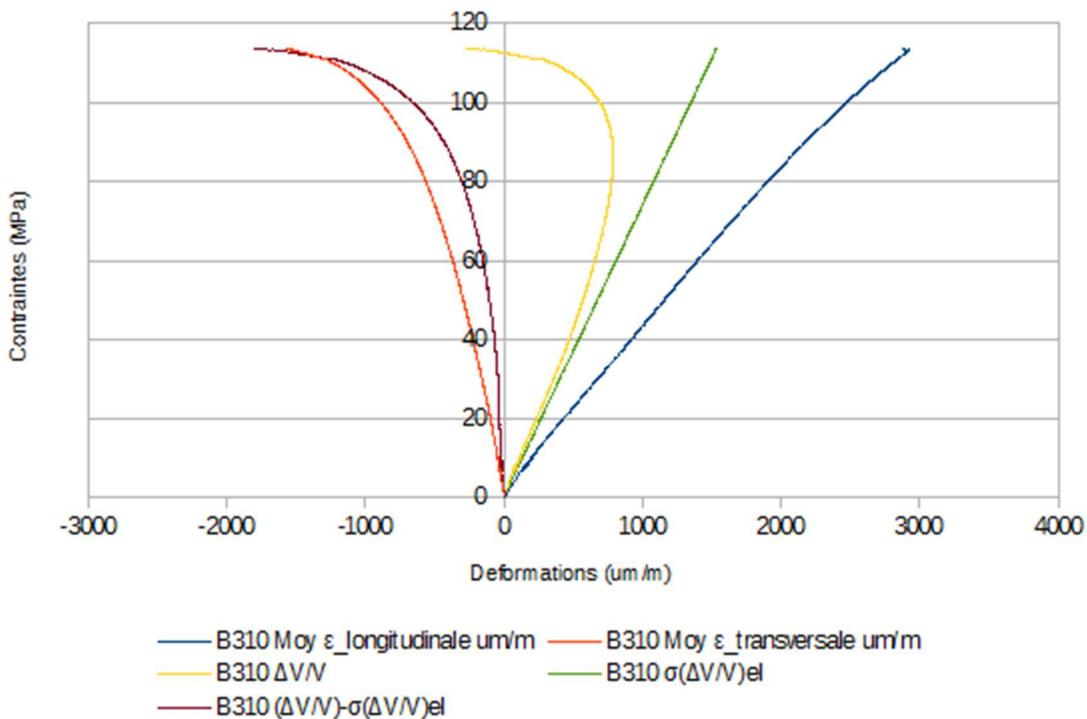


Figure 18. Bloc B310, Diagrammes Contraintes (MPa) sur Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$)

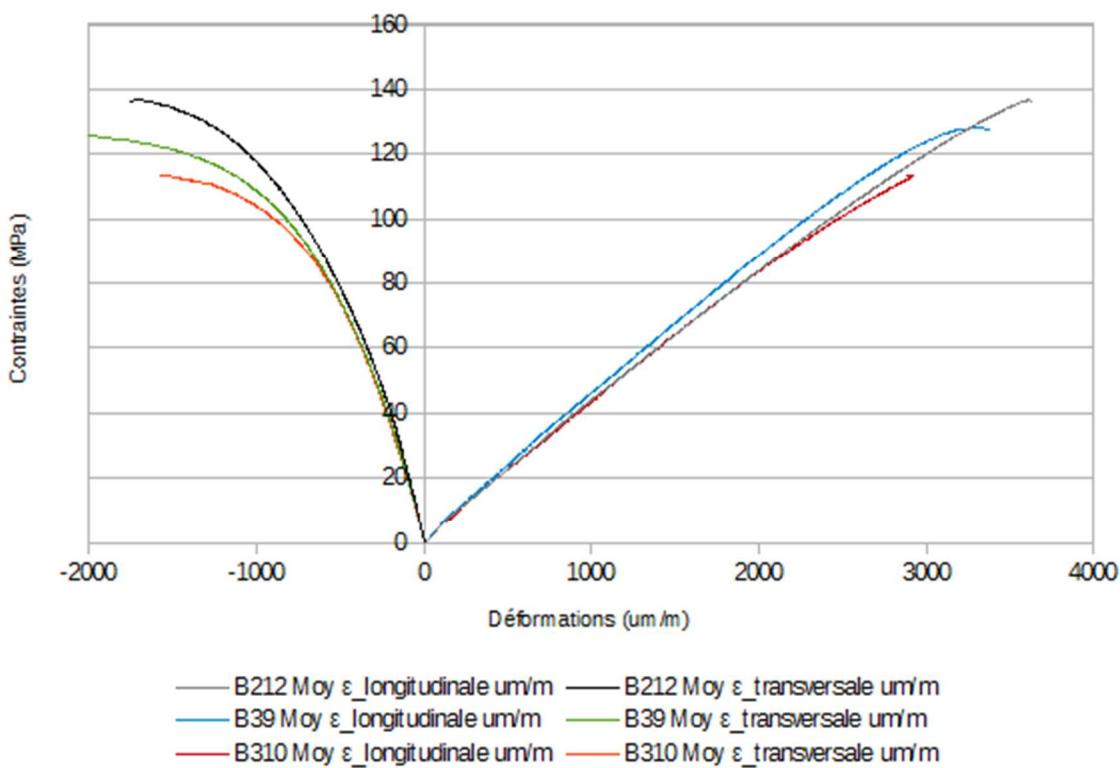


Figure 19. Synthèse des essais de compression, diagrammes Contraintes (MPa) sur Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$)

La Figure 19 est la superposition des trois courbes de déformation longitudinale et transversale pour les trois essais. On y remarque très peu de divergence de résultats, ce qui révèle un comportement homogène parmi les trois éprouvettes. Les résistances se sont avérées plus grandes que la moyenne des essais de compression de la partie précédente.

Tableau 15. Résultats de la rupture des éprouvettes B212, B39 et B310

Contraint de rupture (MPa)	
B212	136
B39	128
B310	113
Moyenne	126
Ecart type	8
Coef variation	6,7%

Des Modules ont également été calculés à partir des résultats de ces essais (entre la contrainte de pré-charge (8MPa) et 33 % de la charge de rupture). Les résultats sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16. Modules déterminés pendant les essais de ruptures

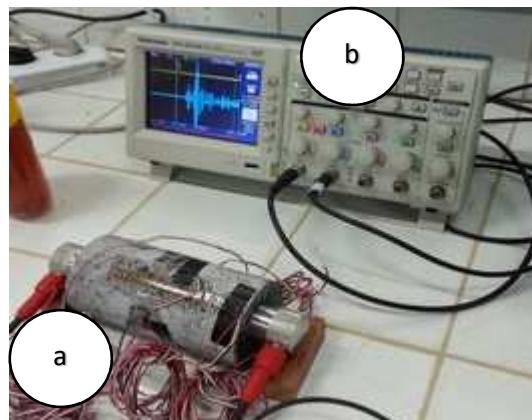
	E essai rupture (MPa)	v essai rupture
B212	42369	0,14
B39	44605	0,17
B310	42049	0,16
Moyenne	43008	0,16

2. 4. 3. Module d'élasticité dynamique

Le module dynamique et le coefficient de Poisson peuvent être estimés par le Contrôle Non Destructif, avec un essai acoustique. Une impulsion acoustique est envoyée à travers l'échantillon entre un émetteur et un récepteur. Connaissant les dimensions de l'échantillon, on détermine la vitesse de propagation après avoir relevé le temps de parcours à l'aide de l'oscilloscope numérique branché sur la sortie du récepteur.

Le module dynamique et le coefficient de Poisson ont été estimés avec les formules de CND suivantes :

- ρ = Masse volumique de l'éprouvette
- V_T = Vitesse d'une onde acoustique transversale
- V_L = Vitesse d'une onde acoustique longitudinale



$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}$$

$$\vartheta = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}$$

Figure 20. Photo du montage de l'essai acoustique :
 (a) l'éprouvette avec un transducteur à chaque extrémité,
 (b) oscilloscope numérique

Tableau 17. Module et coefficient de Poisson des essais acoustiques

	E essai acoustique (MPa)	v essai acoustique
B212	55192	0,21
B39	53305	0,23
B310	48898	0,26
Moyenne	52465	0,23

2. 4. 4. Synthèse sur le module d'élasticité

Tableau 18. Modules d'Young expérimentaux pour les différents essais

	E essai cyclique (MPa)	v essai cyclique	E essai rupture (MPa)	v essai rupture	E essai acoustique (MPa)	v essai acoustique
B212	47015	0,14	42369	0,14	55192	0,21
B39	48857	0,17	44605	0,17	53305	0,23
B310			42049	0,16	48898	0,26
Moyenne	47936	0,16	43008	0,16	52465	0,23

Enfin, l'ensemble des essais donne les résultats inscrits dans le Tableau 18. Il y a un écart de 10 %, entre les valeurs moyennes des essais normés (essai cyclique) et des essais en compression (essai rupture), qui peut-être expliqué de la façon suivante : dans le premier cas, le module résulte d'un calcul prenant en compte les 33 % de la valeur de rupture attendue, tandis que dans le deuxième cas, le calcul prend en compte les 33 % de la contrainte critique de l'éprouvette en charge qui s'est avéré nettement supérieur à la valeur attendue. Cet écart qui est illustré par la Figure 21, ne se fait pas ressentir pour les coefficients de Poisson, qui restent constants entre ces deux essais. La moyenne des modules dynamiques est 9 % supérieure à la moyenne des modules normés, ce qui est normal et habituel. Prendre une valeur de Module d'Young de 48 000 MPa semble réaliste au regard des résultats obtenus pendant cette campagne d'essais.

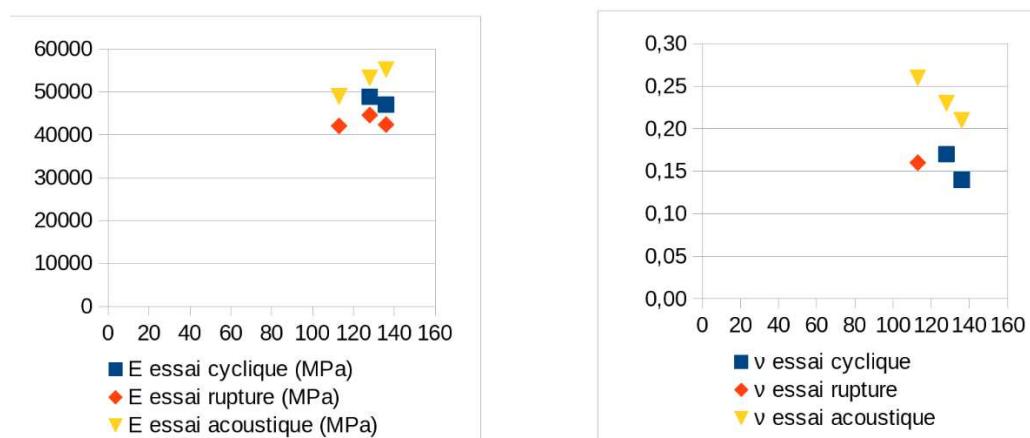


Figure 21. A gauche : Modules d'Young (MPa) en fonction des contraintes de rupture (MPa)

A droite : Coefficient de Poisson en fonction des contraintes de rupture (MPa)

2. 5. Essai de flexion 3 points

Ces essais de flexion 3 points ont été réalisés selon de la norme NF EN 12372, mai 2007, le 23 mars 2017.

2. 5. 1. Détermination de la résistance à la traction de la pierre de Kersanton

6 éprouvettes (F1, F2, F3, F4, F5, F6) ont été taillées à la scie dans le bloc 4, et étaient de dimension :

- L=240mm ; Longueur totale
- l=200mm ; Distance entre appuis
- b=50mm ; Largeur
- h=40mm ; Hauteur
- a = 0,25 MPa/s



Vitesse de chargement appliquée : 0,25 MPa/s ce qui donne 66,7 N/s dans ce cas.

$$v_{charge} = \frac{2abh^2}{3l}$$

Seules 5 éprouvettes ont donné un résultat (Tableau 19). Un accident de mise sous pré-charge s'est produit sur l'éprouvette F4. Toutes les éprouvettes ont rompu comme prévu au niveau de la section située sous le point d'application de la charge, c'est-à-dire au milieu de la portée. La résistance à la traction a été déterminée avec l'aide de la force maximale atteinte par la presse, et de la formule de RDM rappelée par la norme. On note une diminution de 23 % de la résistance entre le cœur et l'extérieur, ce qui est compatible avec les pertes constatées lors des essais de compression. Mais il faut savoir que les éprouvettes F5 et F6 n'ont pu être taillées entièrement dans une zone altérée compte tenu de leur dimension (Figure 22 et Figure 23).



Figure 23. Photo éprouvette B4 F5



Figure 22. Photo éprouvette B4 F6

Tableau 19. Résultats des essais de flexion 3 points

	Nom	L (mm)	I (mm)	b (mm)	h (mm)	F_rupture (N)	σ_{rupture} (MPa)	Vitesse du son (m/s)
Cœur	F1	241,5	200	51,7	39,4	4817,9	18,0	4820
	F2	241	200	49,9	39	3859,6	15,3	4869
	F3	241,5	200	50,5	39,5	4410,0	16,8	4859
Extérieur	F5	241	200	50,7	39,8	3463,2	12,9	4626
	F6	241,5	200	50,5	41,8	3788,9	12,9	4423
		Moyenne			4362,5	16,7		
		Ecart type			480,9	1,4		
		Coef var			11%	8%		
		Moyenne			3626,1	12,9		
		Ecart type						
		Coef var						
		Moyenne			4067,9	15,2		
		Ecart type			540,0	2,3		
		Coef var			13%	15%		

2. 5. 2. Estimation de E en traction

Lors de l'essai, il a été enregistré la flèche et la force en fonction du temps. Ce qui a permis de calculer un module d'élasticité par la RDM. En traçant la courbe de E en fonction de la contrainte appliquée lors de l'essai, on peut relever une valeur de E qui devient constante. Le module en traction moyen représente 26 % du module en compression moyen obtenu par essai cyclique. Les résultats du Tableau 20 ne permettent pas de constater de réelle évolution de l'élasticité entre le cœur et l'extérieur.

$$EIv(x)'' = M(x) = \frac{F}{2}x \quad E = \frac{-Fl^3}{4b v\left(\frac{l}{2}\right)h}$$

Tableau 20. Estimation de E en traction

	Nom	E traction (GPa)
Cœur	F1	10,0
	F2	12,0
	F3	15,6
Extérieur	F5	14,3
	F6	10,5
	Moyenne Coeur	12,5
	Ecart type	2,04
	Coef variation	16%
	Moyenne Extérieur	12,4
	Ecart type	
	Coef variation	
	Moyenne totale	12,5
	Ecart type	1,98
	Coef variation	16%

2. 6. Confrontation des résultats de la campagne d'essai

Lors des essais, nous avons relevé des évolutions dans les résultats, le but de ce paragraphe est de trouver des relations entre les différentes grandeurs. Dans la partie sur les essais de compression, nous avons déjà eu l'occasion d'identifier une relation entre la masse volumique (ρ) et la vitesse du son (v). Cette observation pourrait aider à évaluer l'état physique des pierres sur site en procédant à une auscultation acoustique de la murette.

$$\rho(v) = 10^3 \cdot \ln\left(\frac{v}{340}\right)$$

Entre les zones du cœur et les zones extérieures, nous avons pu constater une baisse de résistance couplée avec un gain de porosité. Avec deux résultats pour chaque test, et en admettant qu'avec une porosité de 100 % on obtient une résistance nulle, alors on peut tracer une courbe reliant les trois points, telle que sur le diagramme de la Figure 24. La tendance exponentielle qui s'en dégage est la suivante :

$$R_c(p) = 120e^{-5,8p}$$

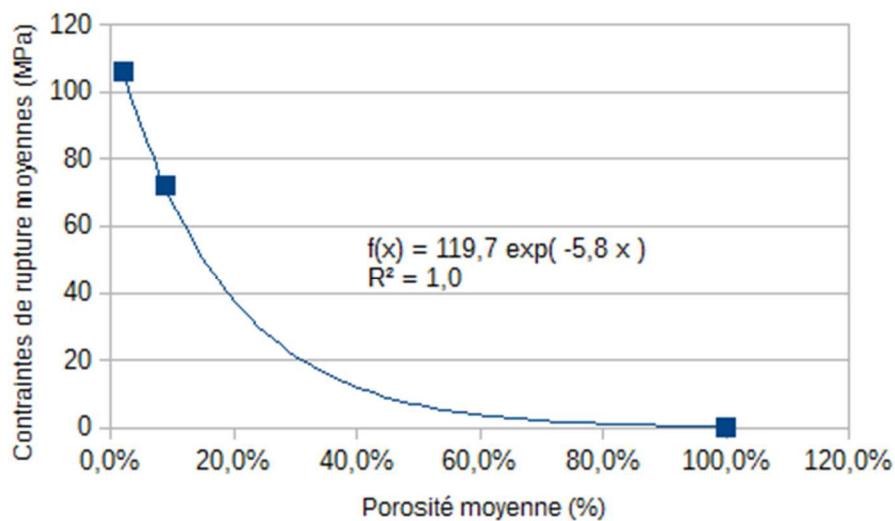


Figure 24. Contraintes de rupture moyenne (MPa) en fonction de la porosité moyenne (%)

En confrontant les résistances de compression et de traction, on trouve que le rapport Rt/Rc est du même ordre de grandeur entre les deux zones, et permet d'en déduire une relation linéaire entre la résistance en compression et en traction (Figure 25), dont le coefficient est égal à 0,17. La Figure 26 permet d'apprécier la différence de pentes entre les modules d'élasticités en compression et en traction.

Tableau 21. Comparaison entre résistance en compression et résistance en traction du bloc B4

	Moyenne Rc (MPa)	Ecart type	Moyenne Rt (MPa)	Ecart type	Rt/Rc
Coeur	104	3	16,7	1,4	0,16
Extérieur	72	7	12,9	0	0,18
Total	86	15	15,2	2,3	0,18

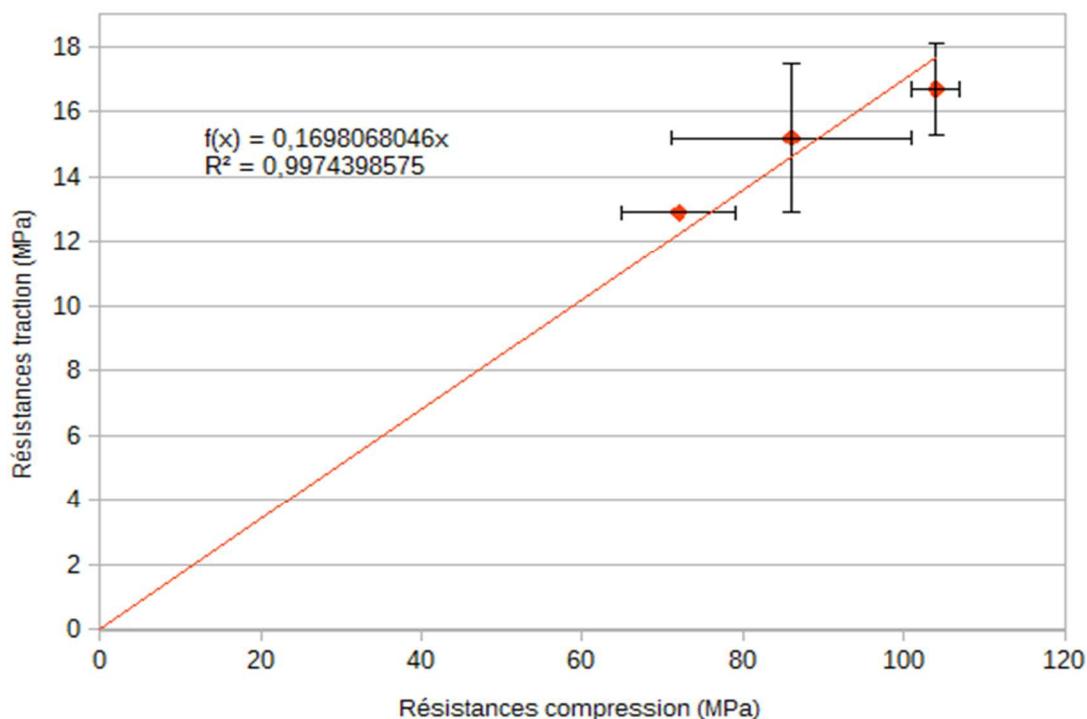


Figure 25. Résistance à la traction (MPa) en fonction de la résistance à la compression (MPa), bloc B4

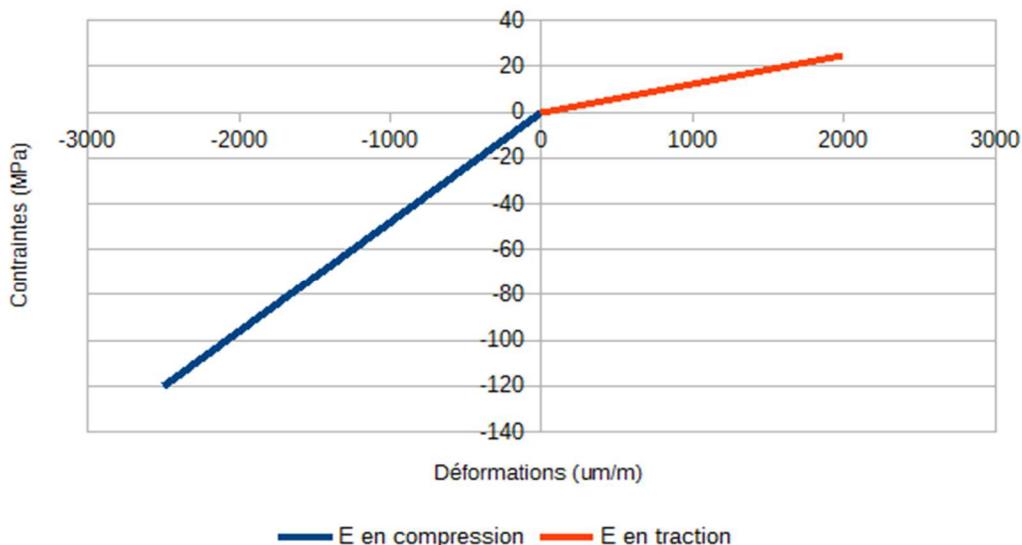


Figure 26. Diagramme Contraintes (MPa) sur Déformations ($\mu\text{m}/\text{m}$), illustration du changement de pente entre traction et compression

Nous avons constaté que la Kersantite, une fois exposée à l'environnement extérieur, subissait un phénomène d'altération progressif sous forme de front, qui cause une transformation chimique et physique au sein du matériau. Le front progresse depuis les faces exposées à l'air et à l'humidité vers le cœur de la roche. Les faces exposées à l'altération sont celles tournées vers l'extérieur du mur, mais aussi les faces latérales contre joints lorsque ceux-ci sont dégradés, et des faces internes créées par les fissures de la pierre. La vitesse de propagation du front de dégradation va dépendre de la porosité initiale de la roche, et de la composition de celle-ci. Le passage en solution de certaines espèces chimiques serait à l'origine d'une augmentation de la porosité et d'une perte significative de résistance. Cette perte de résistance est compliquée à prédire d'une part parce que le front évolue vers le cœur, et d'autre part parce que les parties déjà attaquées continuent de se dégrader. De plus, on sait par expérience que la cinétique de pénétration des agents agressifs est influencée par la porosité, or nous avons constaté une augmentation de la porosité en fonction de l'altération, alors il est possible d'imaginer que l'altération aura tendance à s'accélérer dans le temps. Dans ce cas, nous avons relevé une baisse de résistance de l'ordre de 30 %.

En comparaison avec des granites, la pierre de Kersanton n'est pas la plus résistante, en revanche, nous avons vu que grâce à sa constitution en grains fins, la Kersantite était plus protégée contre l'altération que des granites à gros grains. L'utilisation de cette pierre en parement extérieur du phare possède donc plusieurs fonctions : décorative par son esthétisme, structurelle par sa résistance, et protectrice, car elle fait office de barrière contre les attaques devant le granite de l'Île Vierge.

3. Surveillance des désordres et instrumentation du phare

3. 1. État actuel du phare (02/2017)

Du point de vue général, et suite aux travaux effectués, le phare se trouve être en bon état. Les principaux désordres sont présents au sommet du phare, et impliquent la partie structurelle entre la maçonnerie de la murette et la lanterne métallique. Sur les schémas suivants, on peut voir la répartition de ces fissures le long de la murette [11]. Les plus importantes sont visibles de l'extérieur, et se situent principalement face aux ancrages de la structure métallique. Elles semblent se former au niveau du couronnement pour se prolonger vers le bas, en suivant les joints quand il y en a et en traversant les moellons pour rejoindre les joints inférieurs. Certains moellons du muret présentent des fissures moins verticales à des positions plus aléatoires et semblent être causées par des défauts de la pierre ou par l'altération naturelle. Pour le deuxième cas de fissure, il s'agit du même type de fissure constaté sur l'un des blocs de pierre lors de la préparation des essais mécaniques. Des relevés ont été réalisés par Patrick LEROY lors de la dernière inspection détaillée le 9 février 2017, et sont présentés dans les Figures 27 et 28 ci-dessous et en Annexe B1 et B2.

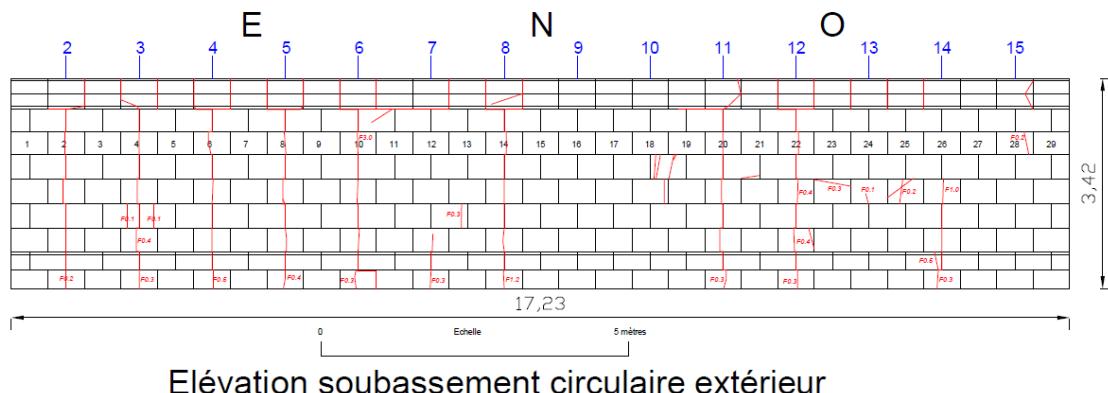


Figure 27. Élévation déroulée de la murette, avec représentation des fissures (Annexe B1)

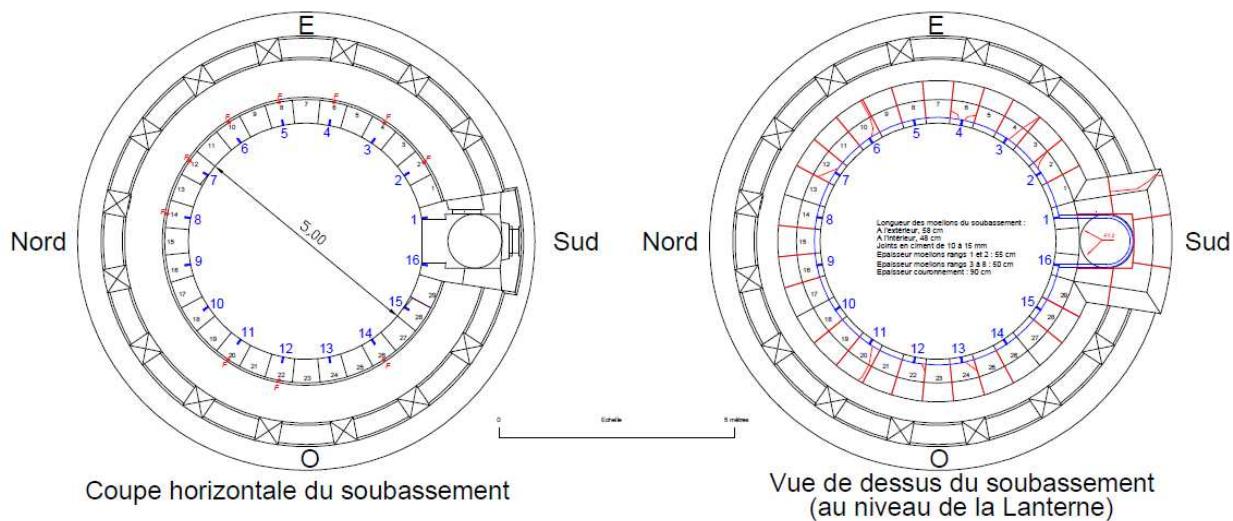


Figure 28. Coupe et vue de dessus de la murette, avec représentation des fissures (Annexe B2)

À l'intérieur de la lanterne, des fissures verticales commencent à apparaître sur le mortier de réparation (dit « sans retrait ») qui comble les espaces dédiés à l'encastrement des ancrages dans la murette. Cette observation confirme que la structure est toujours en mouvement. On y voit également des nouvelles coulures de rouille.

Certaines vitres de la lanterne sont fendues, et d'autres ont été remplacées par des panneaux de plexiglas. Le schéma qui suit (Figure 29) présente l'état des différents panneaux de vitrage.

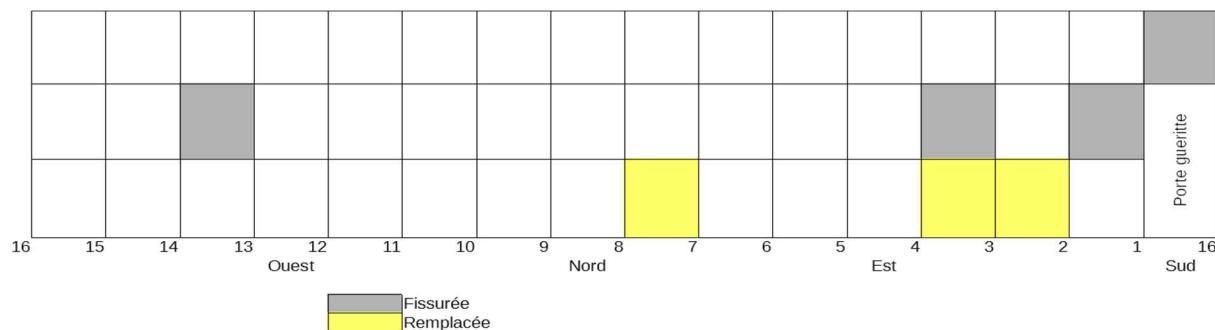


Figure 29. Relevé de l'état des vitres de la verrière

Pour résumer, sur cette murette circulaire, il y a des fissures éparses qui semblent être liées au vieillissement du matériau, et des fissures verticales qui suivent un schéma de localisation coïncidant avec des éléments de la structure (les montants). Les désordres semblent donc principalement mécaniques et toujours en évolution, ce sont les raisons pour lesquelles la pose d'instruments de mesures in-situ est intéressante.

3. 2. Analyse du comportement de la lanterne dans le temps

On garde à l'esprit que l'une des étapes de ce projet consiste à modéliser la murette. Dans cas d'un modèle, les résultats sont principalement dépendants des paramètres d'entrée. D'un point de vue géométrique, la tâche est assez simple, et nous avons fait des tests pour trouver les paramètres matériau de la maçonnerie, mais nous avons besoin de connaître les déplacements réels de la structure pour comparer et valider la modalisation.

3. 2. 1. Instrumentation de la murette de la lanterne

Pour avoir des données exploitables pour la réalisation d'une étude du comportement de la lanterne dans le temps, sont installés différents instruments [43] qui vont relever des informations sur une durée de 1 an minimum.

Six capteurs (type LVDT DG5 (course ± 5 mm) et DG 2,5 (course $\pm 2,5$ mm) Solarton) vont faire le suivi de 4 fissures, une sur chaque point cardinal. 2 des 4 fissures seront équipées de 2 capteurs pour étudier leur comportement suivant la hauteur. Sachant que les capteurs sont à l'extérieur et que le phare est ouvert pour les visites, ils doivent être protégés contre la météo et contre les chocs avec le public. Ils sont donc protégés par des capots et placé à une hauteur relativement élevée pour éviter tout accident ou vandalisme.



Figure 30. Photo d'un capteur LVDT avec son boîtier et sans couvercle

Dix sondes de température (type PT100 classe A, 4 fils) permettront de relever des valeurs dans la murette, à différentes profondeurs. 2 sondes sont placées en surface de la murette, une à l'intérieur et une à l'extérieur de la lanterne, tandis que les 8 autres sont placées (2 par 2) en 4 points de la murette comme l'indique Figure 32. Le but est de relever le gradient de température dans l'épaisseur de la murette depuis l'extérieur vers l'intérieur du phare, et permettre d'évaluer les dilatations thermiques d'un point de la murette en fonction de sa position.



Figure 31. Photo d'une sonde de température implantée dans un moellon

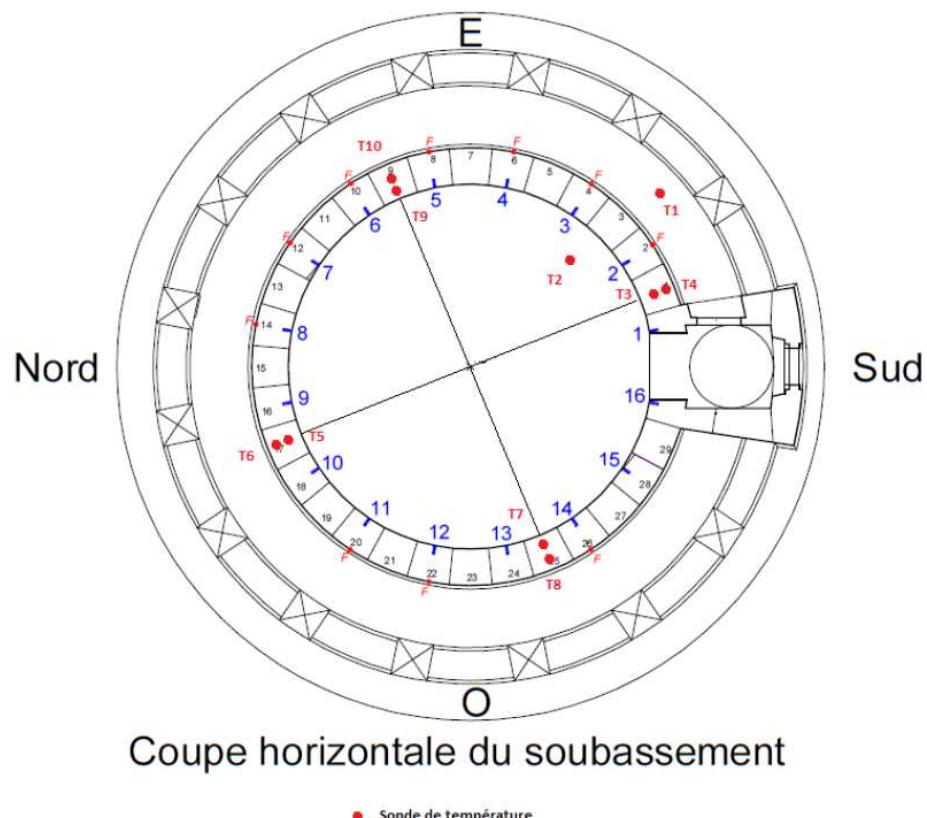


Figure 32. Plan de positionnement des sondes de température

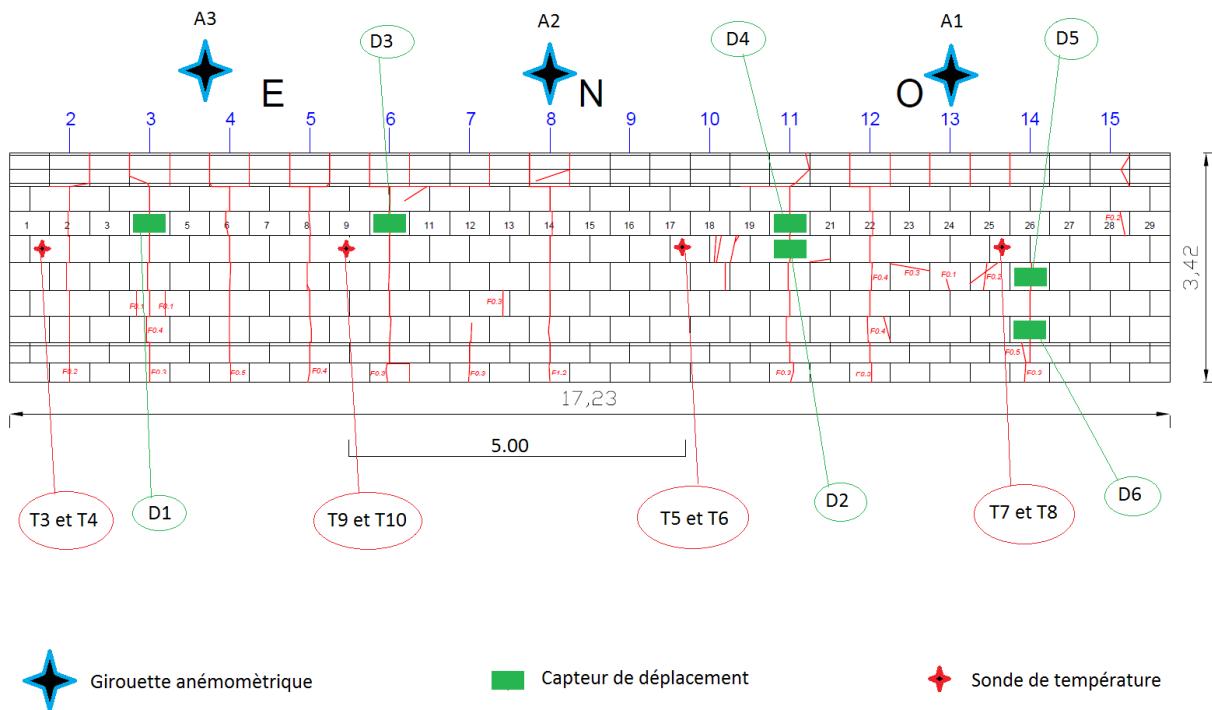


Figure 33. Plan de l'instrumentation (Annexe C)

Tableau 22. Position verticale des sondes et capteurs

Sondes	T3	T4	T9	T10	T5	T6	T7	T8
Côte verticale (m)	2,08	2,10	2,10	2,10	2,04	2,10	2,10	2,11
Capteurs	D1	D3	D4	D2	D5	D6		
Côte verticale (m)	2,40	2,40	2,43	2,03	1,59	0,86		

Trois girouettes anémomètres (type 7911 Davis instruments) sont placées autour de la lanterne à 120° chacune les unes des autres, et permettront de suivre la vitesse et la direction des vents. Elles ont été fixées sur le garde-corps métallique situé autour de la verrière. Nous avons remarqué, après leur installation que sur 3 girouettes, seules 2 donnent des indications stables (mais non parallèles) tandis que la troisième se trouve dans une zone de turbulence. En effet, la proximité avec la verrière de la lanterne fait que les girouettes sont dans la zone de perturbation, le vent qui circule autour de la lanterne est perturbé par son profil, il est dévié et accéléré lors du contournement. Avec 2 indications de direction et de vitesse, et les équations d'écoulement autour d'un cylindre (mécanique des fluides), il est possible d'estimer la vitesse et la direction du vent réel.

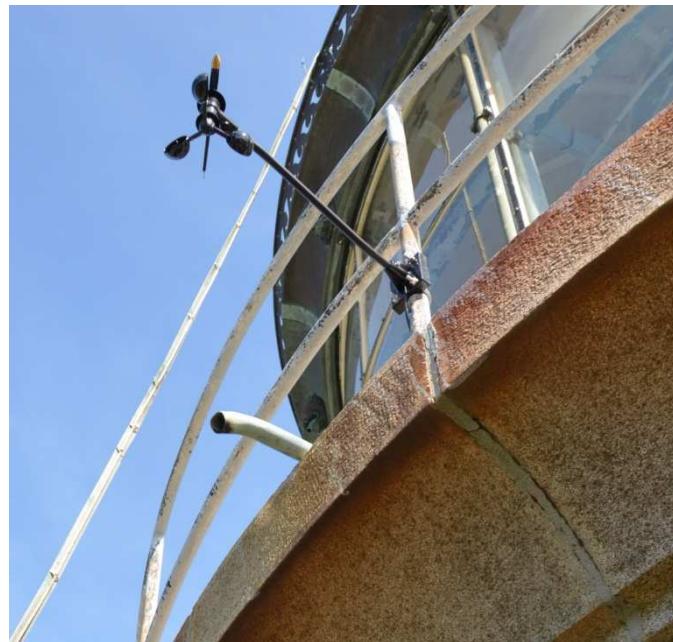


Figure 34. Photo d'une girouette anémomètre

Trois jauges d'extensiometrie (TML de type FLA-3-350-11-3LT) évalueront la déformation des entrants de la charpente métallique du phare.

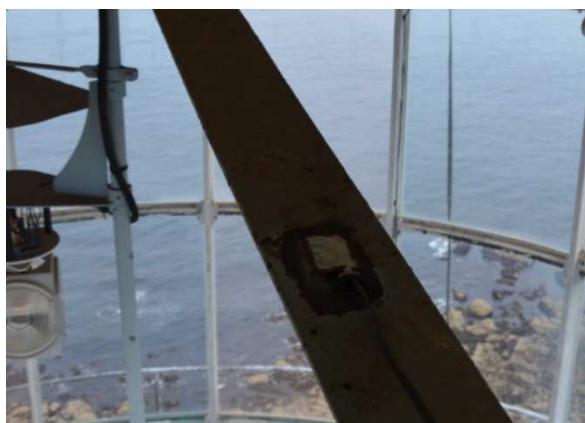


Figure 35. Photos de jauges d'extensiometrie

Les capteurs et autres instruments de mesure sont raccordés à un coffret positionné à l'extérieur du phare au pied de la verrière et comportant :

- 2 convertisseurs de tension 9-18Vcc/12Vcc pour l'alimentation des capteurs de déplacement)
- 5 modules Q blox A107 : sur lesquels sont raccordés : les sondes de température extérieures, les capteurs de déplacement, et les sorties directions des anémomètres

Le coffret extérieur est lui-même raccordé à une armoire placée à l'intérieur du phare, en faisant passer des câbles à travers une vitre de plexiglas. Cette armoire raccorde aussi les sondes de température intérieures et les jauge d'extensométrie.



Figure 36. Coffret extérieur au pied de la verrière

L'exploitation des données récoltées avec ce dispositif de mesure permettra de trouver les liens entre les ouvertures de fissures, le vent, la température et la dilatation des barres métalliques. Les données sont exploitables avec le logiciel « test.viewer ». Le but et de confronter à l'évolution de l'ouverture des fissures, tout les phénomènes physiques mesurables qui agissent sur la lanterne du phare.

3. 2. 2. Traitement des premiers résultats de l'instrumentation du phare

Un premier enregistrement s'est déroulé juste après la pose de l'équipement, le 12 avril à partir de 17:00:01 sur une période de 1 mois environ. Plusieurs dysfonctionnements ont été constatés :

Les sondes T4, T6, T8, T10 (sondes intérieures) et le capteur D5 qui ont arrêté de fonctionner après 13 jours

Les capteurs D1 et D2 ne fonctionnent plus normalement après le 13^e jour

L'enregistrement de la vitesse de l'anémomètre A1 fonctionne mal depuis son installation

Outre la vitesse de l'anémomètre A1 et les valeurs de D1 qui semblent suspectes, nous avons une plage de résultats exploitables pour une période de 13 jours. Cela permet de faire une courte analyse du comportement à court terme de la structure.

Les valeurs varient d'un jour à l'autre, mais de façon générale, les températures intérieures et extérieures fluctuent selon des périodes égales à 24 h. On remarque un déphasage d'environ 9 h ($\approx 0,03$ Ms) entre les pics des températures intérieures et ceux des températures extérieures, probablement dû à la progression par conduction de la chaleur dans l'épaisseur de la paroi. Les températures extérieures ont une amplitude bien plus importante que pour l'intérieur, les sondes sont nettement plus exposées au climat extérieur.

Côté extérieur (Annexe D1), la température de la sonde T8 est en général plus élevée (avec T4 sur la 2^{ème} moitié des 13 premiers jours). En T1 la température est souvent plus faible, elle égale ou dépasse parfois les autres au moment des pics de chaleur. Côté intérieur (Annexe D2), la température de la sonde T7 est en général plus élevée que celle des autres. En T2, la température est toujours la plus faible (voir égale à T3, T5 et T9 sur une très courte durée lors du 14^{ème} jour de mesure). Pendant ce temps, les valeurs de T9 et T5 sont en dessous des autres sondes murales. Parfois, les sondes T5, T7, T6 et T8 sont en retard par rapport à T3, T9, T4 et T10, un retard dû à leur orientation par rapport au soleil. Pour résumer, durant cette période, le mur a été plus chaud que l'air ambiant, les points exposés plus au sud sont plus chauffés de manière générale, la température des parois est plus influencée par les conditions extérieures que par les conditions intérieures.

Pour ce qui est des ouvertures de fissure, on note de la même façon, une évolution par période égale à 24 h, avec des pics qui correspondent à ceux des températures extérieures. À partir des données recueillies, il est possible de noter les évolutions de température et d'ouverture de fissure entre chaque minimum et maximum consécutif. On peut ainsi représenter l'ouverture de fissure en fonction des élévations de des diminutions de température extérieure, prise au niveau des sondes de températures les plus proches. Les résultats les plus représentatifs sont ceux de D3, D5 et D6 (Figure 37 et 39) (Annexe D3 et D4), car les capteurs sont à proximité immédiate des sondes. Les tendances semblent être linéaires, l'hypothèse qui supposait une relation entre les variations thermiques et l'évolution des fissures se confirme. Il nous est également permis d'étudier les ouvertures de fissures en fonction de la hauteur pour les fissures des montants 11 et 14 (Figure 37 et 38). Les différences sont très infimes, mais nous remarquons que l'amplitude des déformations est plus forte en D4 qu'en D2. Inversement, l'amplitude des déformations est plus forte en D6 et D5. Donc ces résultats sur les différences d'ouvertures de fissures ne permettent pas de conclure sur les zones qui se déforment le plus.

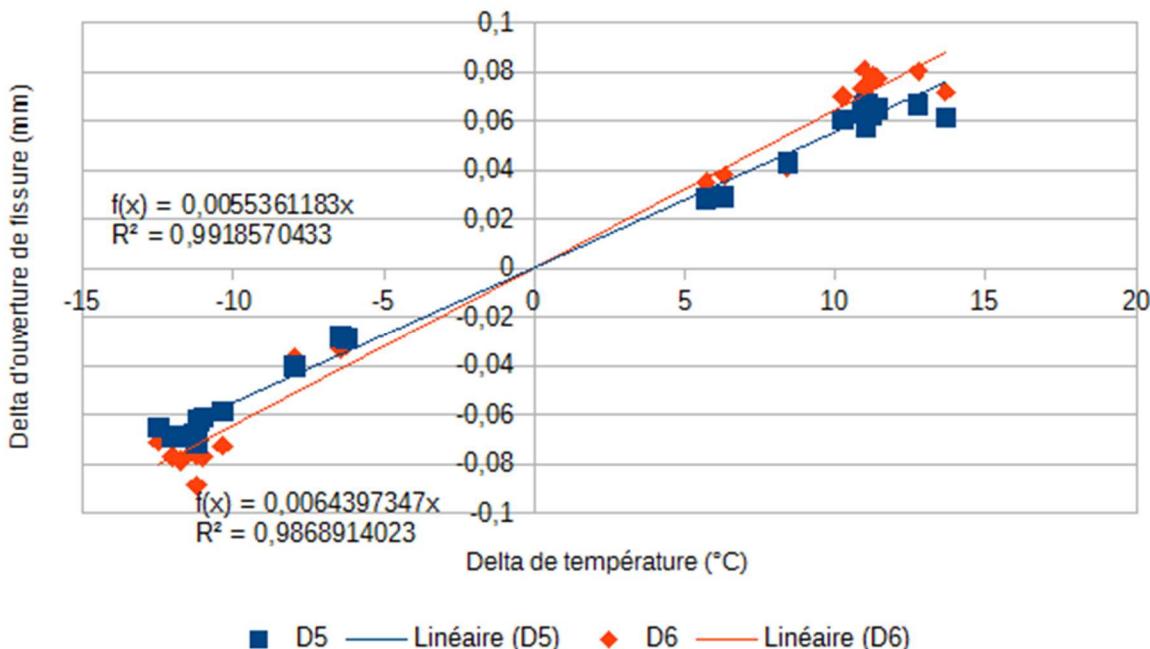


Figure 37. Différence d'ouverture de fissures (ΔD_5 et ΔD_6 en mm) en fonction des différences de température (ΔT_8 en °C)

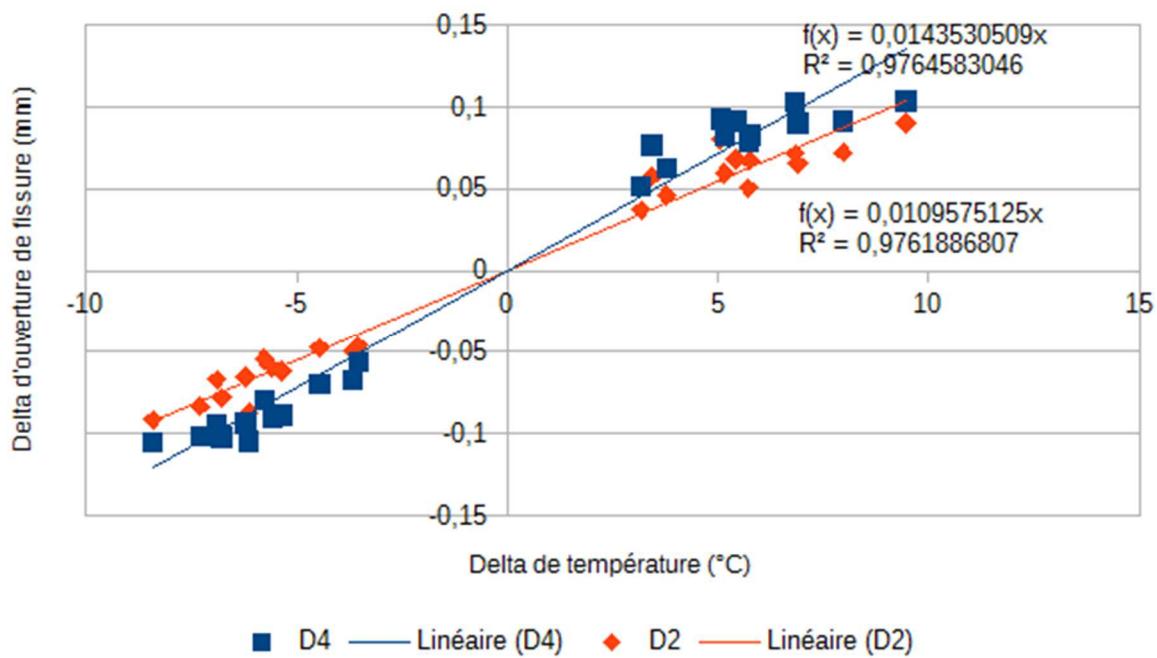


Figure 38. Différence d'ouverture de fissures (ΔD_4 et ΔD_2 en mm) en fonction des différences de température (ΔT_6 en °C)

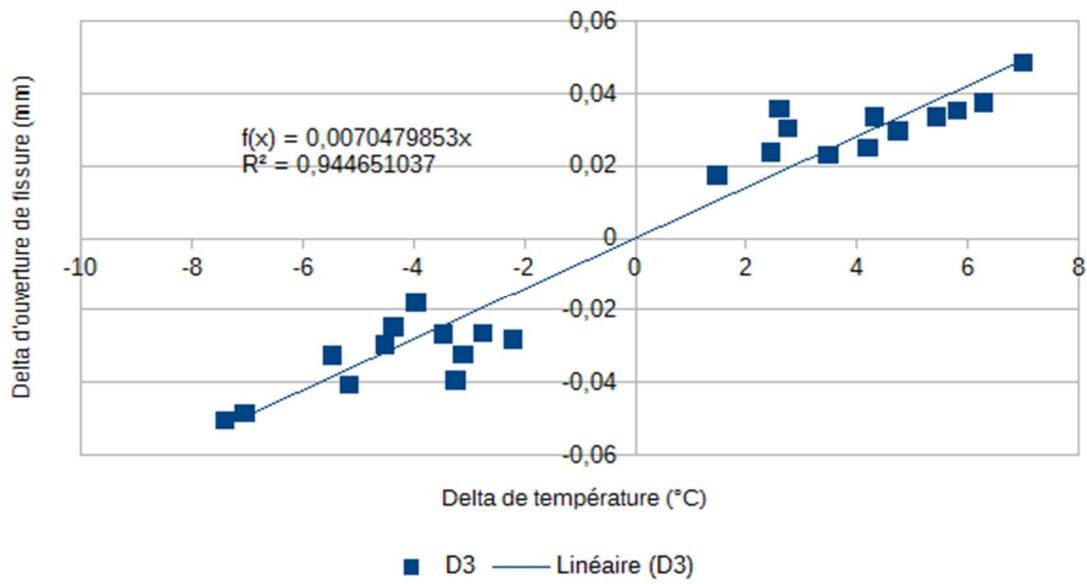


Figure 39. Différence d'ouverture de fissures (ΔD_3 en mm) en fonction des différences de température (ΔT_{10} en °C)

Si on fait une comparaison entre D3 et D4, qui se trouvent à la même hauteur sur les fissures des montants 6 et 11 respectivement, on remarque une dispersion des résultats et des deltas qui ne semblent pas être égaux pour des échéances identiques. On a vu que les différentes parties du mur n'évoluaient pas dans les mêmes conditions de température, et les dégradations peuvent être de degrés différents. La courbe de tendance indique que $\Delta D4 \approx 2,5 \cdot \Delta D3$.

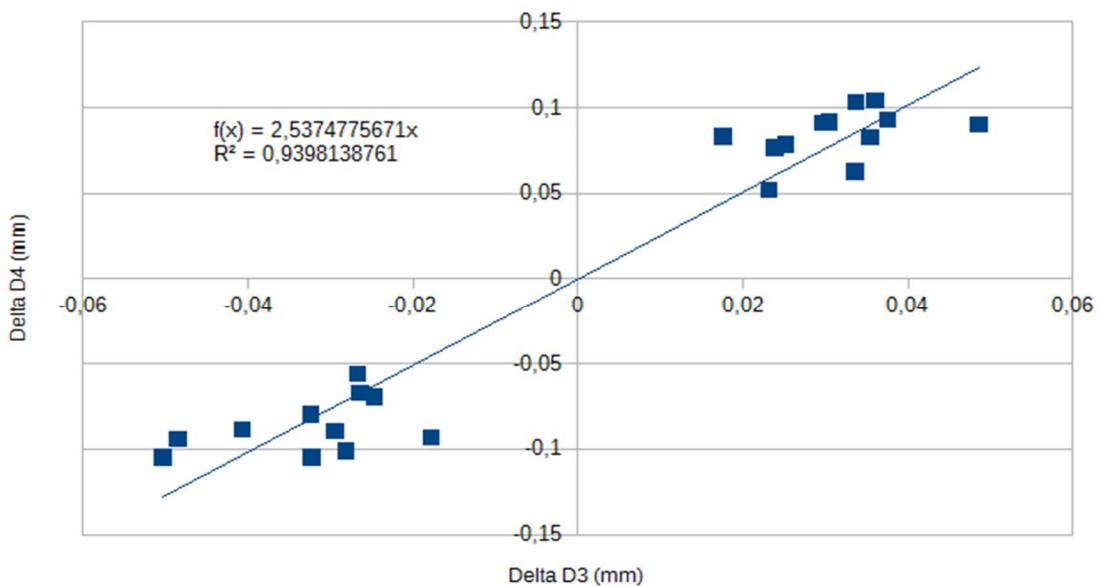


Figure 40. Comparaison à même hauteur des fissures des montants 6 et 11, $\Delta D4$ (mm) en fonction de $\Delta D3$ (mm)

Le constat qui a été fait sur les girouettes perturbées par la lanterne est également fait sur les premiers relevés. Cela est dû à l'interaction qu'a la lanterne sur l'écoulement de l'air, le vent est dévié et accéléré lors du contournement de la lanterne. Le vent est loin d'être un phénomène stable, c'est la raison pour laquelle l'installation telle qu'elle se trouve actuellement est suffisante pour donner la direction moyenne du vent. En appliquant une formule de mécanique des fluides, on constate que à 1,20 de la verrière, les vents sont accélérés à une vitesse allant jusqu'à 3 fois celle de l'écoulement. Connaissant exactement les distances entre les girouettes et les parois de la verrière, et en relevant les angles exacts que font les girouettes les unes par rapport aux autres et par rapport au nord, il est possible de voir le problème comme un problème de mécanique des fluides. Avec des équations de la mécanique des fluides, on peut approcher l'angle et la vitesse du vent réel, si on a un minimum de 2 girouettes en fonctionnement. Avec la direction, il reste à en déduire la vitesse réelle.

Pour une analyse plus globale de la structure, et évaluer les effets du vent et des températures sur le long terme, il est préférable d'étudier sur des cycles de 12 mois minimum pour retourner aux conditions initiales et constater les changements. Une étude sur plusieurs cycles permettra de les comparer.

Sachant que le coefficient de dilatation thermique se calcule de la façon suivant :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$$

Et qu'avec les résultats, nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta L = \beta \Delta T$$

Alors si on relève la dimension exacte des fissures pour un minimum ou un maximum, on peut estimer un coefficient de dilatation thermique. On retient cependant qu'il prend en compte la pierre, les joints et la structure métallique :

$$\alpha = \frac{\beta}{L}$$

4. Modalisation de la murette du phare

L'objectif de cette partie est de proposer une première modélisation très simplifiée de la murette de soubassement de la lanterne du phare de l'Île Vierge. Ce travail est réalisé sur le logiciel de modélisation de structure à barre ST1 utilisé par le CEREMA. Ce modèle peut être utilisé en complément d'une modélisation précédente faite sur la structure métallique de la lanterne, par le CEREMA, et sur le même logiciel.

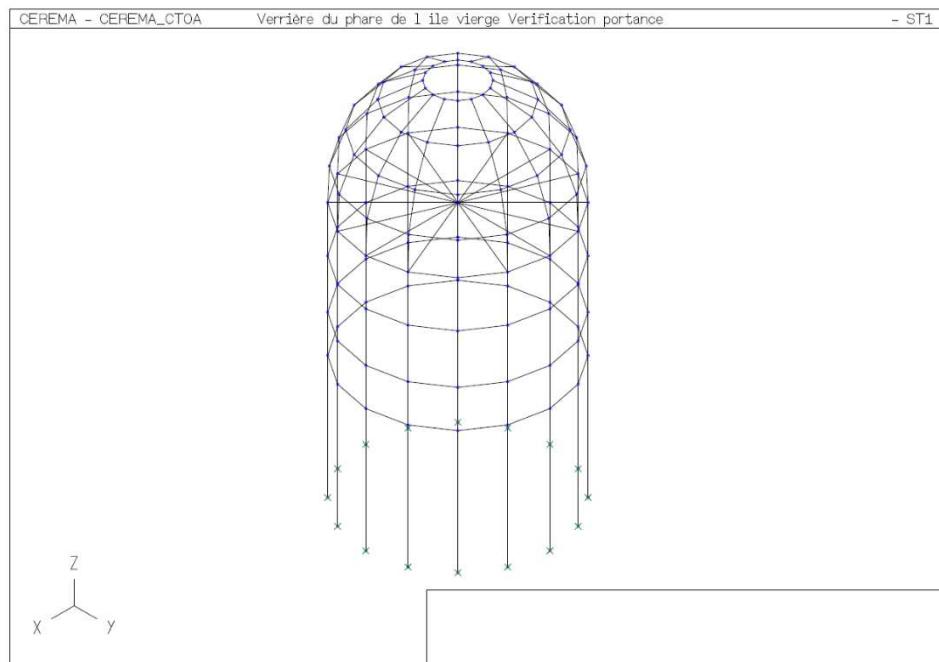


Figure 41. Modélisation de la structure métallique sur ST1 par le CEREMA

4. 1. Choix de la géométrie

La définition de la géométrie est basée sur les dimensions inscrites sur les plans et coupes d'origine.

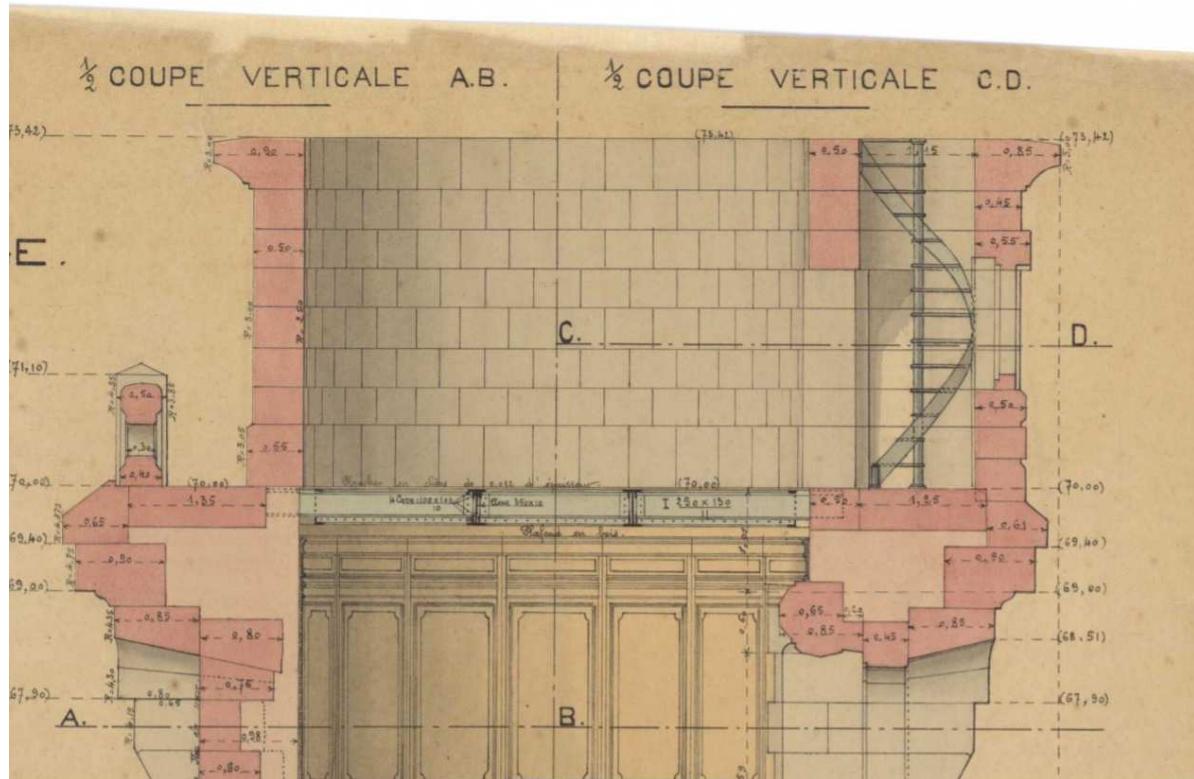


Figure 42. Extrait de la coupe verticale du sommet de la tour (1897)

La décision est donc prise de modéliser un cylindre ouvert pour prendre en compte la porte de la guérite.

• Rayon intérieur :	Rint	=	2,50 m
• Rayon extérieur :	Rext	=	3,00 m
• Rayon moyen :	Rmoy	=	2,75 m
• Épaisseur :	e	=	0,50 m
• Hauteur :	h	=	3,42 m
• Largeur de la porte :	lporte	=	0,90 m (Équivalent à 2 moellons)
• Longueur de la porte :	hporte	=	2,10 m
• Nombre de lit :	n	=	9
• Nombre de moellons par lit :	m	=	32 (Tour complet)

4. 2. Choix des paramètres des matériaux

Dans cette partie, l'enjeu est d'estimer au mieux les paramètres de la maçonnerie pour permettre sa modélisation. Nous avons vu qu'il s'agissait d'un matériau composite, qui fait donc intervenir les caractéristiques de plusieurs matériaux, deux dans ce cas : la pierre de Kersanton et le mortier de ciment portland.

Pour la pierre de Kersanton, les tests permettent de poser les caractéristiques suivantes comme hypothèse :

- Résistance en compression : $R_c = 106 \text{ MPa}$
- Résistance en traction : $R_t = 16,7 \text{ MPa}$
- Module d'élasticité statique : $E = 48\,000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,16$
- Perte de résistance en zone altérée (compression et traction) : $\gamma = 30 \%$

Pour le mortier, nous ne possédons que les informations lues dans le dossier de projet, ainsi que les connaissances générales sur les mortiers au ciment Portland de l'époque. Sont reporté ci-après les valeurs déterminées à la section 1 :

- Résistance en compression : $R_c = 7,5 \text{ MPa}$
- Résistance en traction : $R_t = 1,5 \text{ MPa}$
- Module d'élasticité statique : $E = 6\,000 \text{ MPa}$

Nous avons deux matériaux aux caractéristiques différentes, il faut procéder à une homogénéisation afin de considérer la murette comme un élément composé d'un seul matériau isotrope, et rendre les calculs plus simples. Pour cela, il est permis d'utiliser un document réalisé par le Département des Ouvrages d'Art du SETRA [00] en 1982, couramment utilisée pour le calcul des ponts en maçonnerie. Ainsi, avec l'aide des tableaux (Figure 43), nous obtenons une valeur de résistance en compression de 18,8 MPa. Au passage, on remarque que la composition du mortier du phare de l'Île Vierge se trouve dans la fourchette des mortiers dits « normal » et destinés aux parements, voûtes et enduits aériens.

Résistance caractéristique à la compression simple des pierres f_{pk}	Résistance caractéristique à la compression simple de la maçonnerie suivant les mortiers (Tableau n° 5)				Résistance moyenne à la compression simple des pierres f_{pm} (MPa)
	M ₄	M ₃	M ₂	M ₁	
2,0	1,3	1,4	1,4	1,4	2,5
5,0	2,9	3,3	3,4	3,5	6,5
7,5	3,5	4,1	4,5	4,9	10,0
10,0	4,1	4,7	5,3	6,2	13,0
15,0	5,1	5,9	6,7	8,2	20,0
20,0	6,1	6,9	8,0	9,7	26,5
30,0	7,2	8,6	10,2	12,0	40,0
40,0	8,1	10,4	12,0	14,3	53,0
60,0	-	-	16,0	18,8	80,0

TABLEAU n° 4

NOTA : Les valeurs caractéristiques sont établies pour un coefficient de variation de 15 % et une probabilité égale à 5 % d'obtenir une valeur inférieure à la valeur caractéristique (loi normale). Les valeurs relatives aux pierres figurant dans ce tableau correspondent à des essais sur cubes (rapport hauteur/largeur = 1).

Type de mortier	Résistance moyenne à 28 jours (MPa)	Composition approximative en volume		
		Ciment	Chaux	Sable
M ₁	20	1	0-1/4	2 1/4-3x
M ₂	10	1	1/4-1/2	(ciment + chaux)
M ₃	5	1	1/2-1 1/4	
M ₄	2,5	1	1 1/4-2 1/2	

Figure 43. Table d'homogénéisation des résistances en compression pour les voûtes des ponts en maçonnerie

Finalement, les hypothèses suivantes sont posées pour caractériser la maçonnerie :

- Résistance en compression : $R_c = 18.8 \text{ MPa}$
- Résistance en traction : $R_t = 1,5 \text{ MPa}$
- Module d'élasticité statique : $E = 6\,000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,16$

4. 3. Modélisation sur ST1

Après avoir choisi cette géométrie simple de la murette de la lanterne, on s'intéresse à la modélisation géométrique de la maçonnerie (Figure 44) :

Le modèle est construit dans un repère spécial à trois axes (x, y, z). Compte tenu de la courbure large du mur par rapport à la longueur de chaque moellon, chacun d'eux est représenté par deux barres rectilignes sur le plan xy . Les barres suivent la ligne moyenne des moellons, elles sont donc placées à mi-hauteur de chaque lit. La hauteur de chaque lit a été considérée comme la hauteur totale de l'ouvrage divisée par le nombre de lits. Il y a 9 lits de pierre sur la murette, donc il y a 9 niveaux de barre sur le modèle. Chaque niveau est relié au niveau supérieur avec des barres qui relient les nœuds directement supérieurs.

Nous connaissons les caractéristiques de la maçonnerie grâce à la partie précédente. Le paramétrage des caractéristiques des barres et des liaisons entre barres est fait en fonction des résultats des essais en laboratoire pour les moellons, et des hypothèses posées pour les liaisons entre moellons et les barres entre lits. Toutes les liaisons avec le sol sont bloquées dans toutes les directions. Les contours latéraux de la porte en liaison avec les murs de la guérite (considérés rigides) sont bloqués selon x . On s'attend à ce que cette ouverture provoque une concentration de contrainte, il faut donc être vigilant quant à l'analyse des résultats.

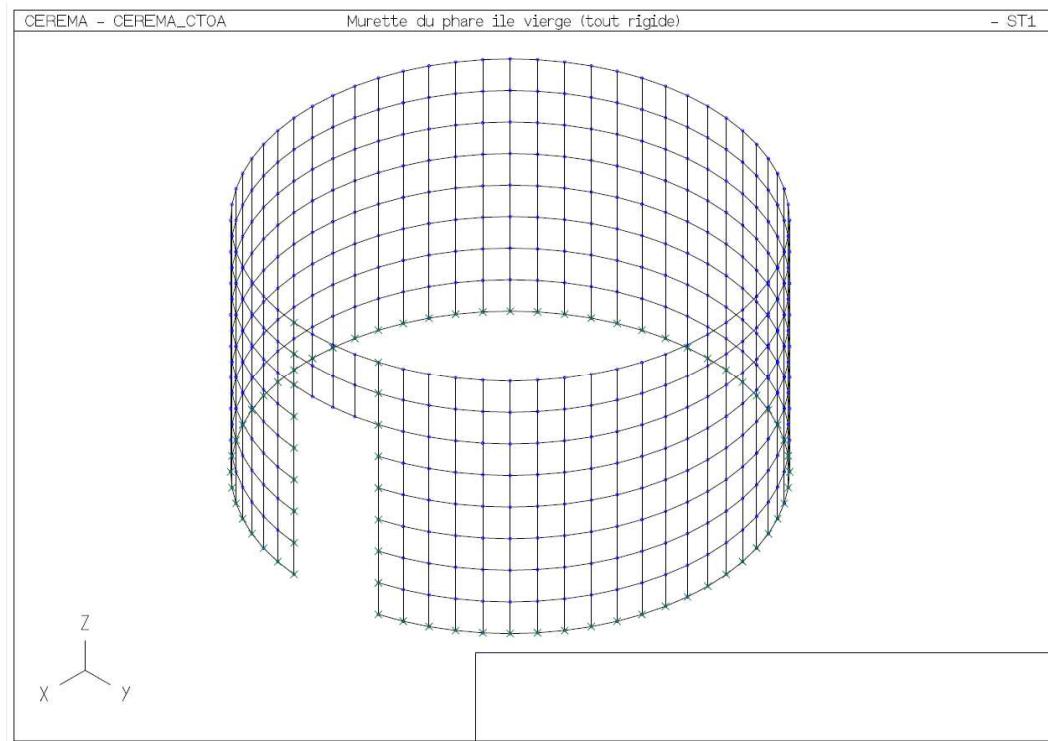


Figure 44. Rendu de la modélisation géométrique de la murette par ST1

Les charges appliquées sur les nœuds coïncidant avec les montants sont déterminées à partir du modèle de la verrière fourni par le CEREMA, et qui donne les effets du vent (calculés selon l'Eurocode 1) et de la dilatation de fers sur les montants. Les efforts récupérés par les montants sont ceux qui sont transmis à la maçonnerie.

Dans la suite de ce travail, on donne au logiciel les instructions permettant de récupérer et de tester les valeurs des efforts et contraintes interne afin de vérifier lesquels dépassent les valeurs limites et de les lister dans un fichier de sortie. La localisation des valeurs les plus fortes pourront par la suite être comparé avec la localisation des fissures sur le phare réel et permettra de faire des hypothèses sur les scénarios de chargement les plus probables qui auront conduit à la fissuration

Très rapidement, en consultant les résultats des efforts des têtes d'ancrage sur la simulation de la verrière, on relève des valeurs de l'ordre de 0,01 dans les direction x et y. Pour la réalisation du modèle, seront utilisé des valeurs arbitraires. Dans un premier temps, le modèle est simplement chargé en tête d'ancrage avec des forces de puissance et d'intensité identiques pour vérifier son comportement. Il est appliqué sur chaque tête d'ancrage, une force $F(-0,01 ; 0,01)$ pouvant correspondre à un vent sud-

est, ou bien un chargement vers l'extérieur du cylindre pouvant correspondre à l'effet de la dilatation de la structure métallique.

Comme l'illustre la figure suivante, il est possible d'afficher les efforts dans chaque barre en isolant les lits. Ici, nous voyons le lit numéro 9 (noir) avec les forces appliquées aux nœuds (rouge), et une représentation des efforts normaux (vert).

Selon les résultats que l'on souhaite étudier, et les paramètres d'appuis et de chargement entrées, le logiciel ST1 va permettre :

- De visualiser les déformées comme dans les figures 45 et 46.

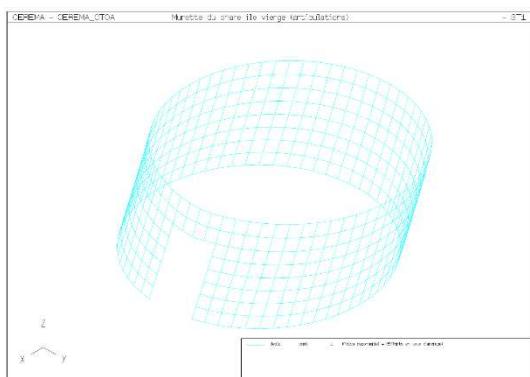


Figure 45. Exemple de déformée avec vent

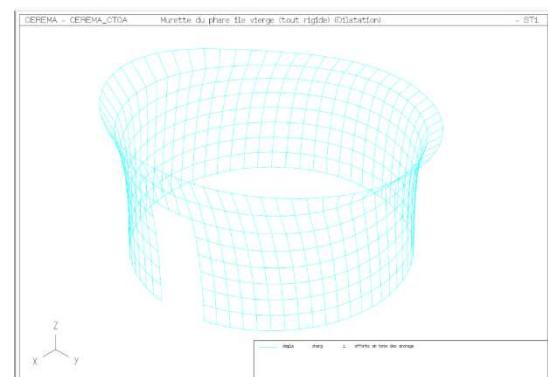


Figure 46. Exemple de déformée avec dilatation

- D'isoler des parties de structures
- De visualiser les distributions des efforts dans la structure comme sur la Figure 47.

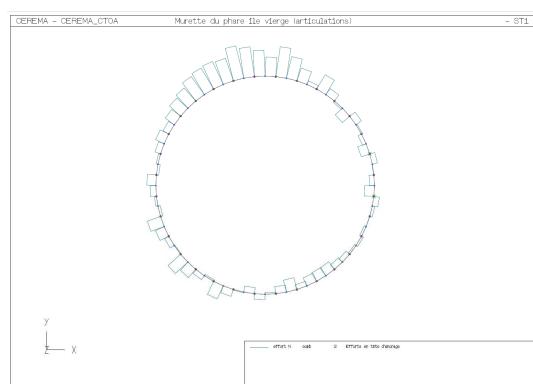


Figure 47. Exemple de distribution d'effort normal dans le cas du vent

- D'extraire des valeurs de réaction d'appuis, d'efforts et de contraintes interne.
- De réaliser des tests permettant de dire, pour chaque barre, si une valeur de constraint est dépassée ou non, et donc de localiser des zones possiblement fissurées.
- De réaliser des études sur plusieurs cas de modèle, encastrée ou articulé entre les moellons (par exemple, pour prendre en compte le mouvement possible entre les moellons).
- D'étudier des cas de chargement divers, simultanément ou séparément.

Le travail de modélisation n'est pas terminé pour ce stage. Dans le mois qui reste, l'enjeu est :

- De permettre le repérage simple des zones fortement tendues (possiblement fissurées), afin de réaliser des comparaisons rapides avec les désordres réels.
- D'analyser les différents cas de vents proposés par le modèle de la verrière, et les réactions que l'on en déduit.
- D'analyser les effets de la dilatation de la pierre sur la structure.
- De programmer l'analyse des effets d'un gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur du cylindre, et permettre de comparer avec les résultats de l'instrumentation.

Conclusion générale

Comme beaucoup de phares de la fin du XIX^{ème} siècle, il est construit en maçonnerie de pierre de taille, de moellons piqués et de moellons ordinaires. La peau de l'édifice ainsi que le soubassement de la lanterne ont été réalisés avec la renommée pierre de Kersanton, tandis que l'intérieur des parois est en granit de l'Île Vierge. L'objectif de ce stage a été d'étudier la composition de la murette de soubassement qui ancre la structure métallique et la lanterne. Il s'agit d'une introduction à un travail de diagnostic complet, qui consistera à démontrer les causes de l'apparition de fissures verticales dans la murette de la lanterne, au droit des montants. Ce stage s'est déroulé en quatre parties :

- Les archives originales de la construction ont été étudiées pour avoir des indices précis sur les matériaux utilisés, les techniques et la qualité de mise en œuvre des maçonneries.
- De la pierre de Kersanton a été prélevée à la carrière d'où proviennent les pierres du Phare en place, pour être étudiée en laboratoire, et en déduire ses caractéristiques intrinsèques moyennes.
- Des instruments de mesure de fissures, de températures, de déformations, de vitesses et direction des vents ont été installés sur la murette et dans la lanterne pour prévoir une étude traitant des conséquences des phénomènes climatiques sur le comportement de la lanterne et des désordres.
- Une proposition de modèle informatique simplifié de la murette a été réalisé avec le logiciel ST1 du CEREMA.

Nous avons su dire que ce phare était composé de 67 % de granit de l'Île Vierge pour le parement intérieur et l'intérieur des parois, et 33 % de pierre de Kersanton pour le parement extérieur, les ouvertures, le couronnement et la murette de la lanterne. Que le mortier de ciment utilisé était composé de ciment Portland, d'eau douce, et de sable prélevé non loin de l'Île Wrach et dé-salé naturellement sur l'Île Vierge pendant 4 mois minimum. Que la verrière métallique était probablement constituée de montants en acier, d'entretoises en bronze et d'une coupole en cuivre.

La campagne d'essais a permis d'évaluer en partie les caractéristiques mécanique et chimique de la pierre de Kersanton. Des blocs de pierre ont dû être transportés depuis leur carrière de l'Hopital Camfrout en Bretagne jusqu'au LMDC, ce qui a limité le nombre d'éprouvettes réalisable. Le nombre de tests finalement réalisés suffit à se faire une idée de son comportement. Le Tableau 23 qui suit fait la synthèse des résultats.

On peut retenir notamment ces quelques caractéristiques pour la pierre de Kersanton :

- Résistance en compression : $R_c = 106 \text{ MPa}$
- Résistance en traction : $R_t = 16,7 \text{ MPa}$
- Module d'élasticité statique : $E = 48\,000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,16$
- Porosité pierre saine : $p = 2,1 \%$
- Perte de résistance en zone altérée (compression et traction) : $\gamma = 30 \%$
- Augmentation de la porosité en zone altérée : $p = 76 \%$

Sachant que la finalité de ce stage est de modéliser le comportement mécanique de la murette en maçonnerie soumise aux actions de la lanterne métallique qu'elle soutient, ces paramètres expérimentaux sont utilisés pour paramétrier le modèle numérique.

Nous avons constaté la progression d'un front d'altération chimique et physique qui se répercute sur les propriétés mécaniques de la roche. Mais ce phénomène d'altération est lent par rapport à d'autres granites. L'utilisation de cette pierre en parement extérieur du phare s'avère utile pour trois raisons ; elle est décorative, structurelle, et elle protège les pierres intérieures en granite de l'Île Vierge.

L'instrumentation a été fraîchement installée le 12 avril 2017, et hormis quelques dysfonctionnements, il a été possible de faire certaines observations. Nous pensons qu'il y a un lien entre les conditions météorologiques, les conséquences sur la structure et l'ouverture des fissures (voire leur apparition). Mais dans ce type d'investigation, il est important de procéder à des relevés plus élargis avant de vraiment conclure.

Au sujet de la modélisation, il faut se montrer humble dans la mesure où la maçonnerie a été modélisée avec un logiciel de calcul de structure à barres. Les phénomènes physiques qui se produisent dans la maçonnerie ne sont donc pas modélisés correctement, et le résultat final ne peut se rapprocher de la réalité que dans une certaine mesure. En revanche, on peut s'intéresser à la déformation générale de la structure, et comparer avec des relevés réels.

Afin de compléter cette étude, et de bien comprendre le comportement la pierre de Kersanton et du phare de l'Île Vierge, il sera nécessaire de conduire des tests supplémentaires. Les futurs tests pourront être plus ciblés, maintenant que nous en savons un peu plus sur le matériau, et procéder par exemple :

- À une investigation sur la vitesse de propagation de l'altération
- Au tracé d'un profil de résistance mécanique en fonction de la profondeur dans un bloc de pierre
- À la détermination d'un coefficient de dilatation de la pierre de Kersanton
- À une meilleure évaluation de la différence de résistance entre une pierre sèche et saturée
- À la détermination de coefficients de dilatation réels des métaux constituant la lanterne
- A une analyse de la propagation des fissures afin d'en déterminer l'énergie de fissuration. Je pense également qu'avec son aspect moucheté, la pierre à la possibilité d'être étudié par vidéo-corrélation.

Références

- [1] Archives départementales du Finistère, Fonds 25S, Fonds de service des Phares et Balises du Finistère, Île Vierge, Entretien, équipements, fonds 25-S-231 à 25-S-239
- [2] archives-finistere.fr, Phares et balises, Phare de l'Île Vierge, 1902
- [3] Armée et marine : revue hebdomadaire illustrée des armées de terre et de mer, Le phare de l'île Vierge, 27/04/1902
- [4] Auscultation. Surveillance et entretien des ouvrages maritimes, Fascicule 1 : Les ouvrages en maçonnerie, Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, février 2012
- [5] Brest-touriste, volume-guide illustré indispensable aux visiteurs de la ville de Brest : renseignements commerciaux et pratiques pour le séjour et l'excursion, Louis Coudurier, 1906
- [6] Charles Le Goffic, Les métiers pittoresques (2e édition)
- [7] Cimenterie Lavocat et Cie, Mortagne-sur-Gironde (Charente-Maritime), la Gravelle ; Inventaire général du patrimoine culturel de la Région Poitou-Charentes ; <http://dossiers.inventaire.poitou-charentes.fr/le-patrimoine-industriel/notice.php?id=IA17000378>
- [8] Combien trouve-t-on de phares en France ? Bateaux.com, Magazine du voyage, des escales et des salons nautiques, Chloé Lottret, 14/03/2017
- [9] Comportement structural des phares en mer, Étude historique et analyse du comportement dynamique du phare de l'Île Vierge, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Gianluca Mari, 5 juin 2014
- [10] Comportement structural des phares en mer, Étude historique sur le phare de la Jument et proposition d'interventions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Christophe Loraux, 2013
- [11] Compte-rendu de la visite de la lanterne de l'Île Vierge du 05/08/14, Direction technique Eau, mer et fleuves, 2014
- [12] Cours pratique de construction, rédigé conformément au paragraphe 5 du programme officiel des connaissances pratiques exigées pour devenir ingénieur, Louis Prud'homme, 1870.
- [13] Diagnostic de la coupole, Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest, 2013
- [14] Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, LMDC
- [15] Etude de faisabilité pour le changement de montants dans la salle des lanternes Note de calcul, Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest, 2012

[16] FINISTERE PHARE DE L'ILE VIERGE, Réparation des structures métalliques, en béton et de la maçonnerie en partie haute du phare, Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest, 2011

[17] <http://infoterre.brgm.fr/>

[18] http://www.culture.gouv.fr/public/mistral/merimee_fr

[19] Le Kersanton, une pierre bretonne, Presses Universitaires de Rennes, Louis Chauris, 2010

[20] Le Petit Journal, 3 juin 1898

[21] Le plus haut phare de France, Le Monde Illustré, Charles Le Goffic, 31/12/1899

[22] Les différents moyens de suivi de fissures et de mesure d'ouverture de fissure, Ginger CEBTP

[23] Les grands phares du littoral de France :

<http://www.culture.gouv.fr/documentation/memoire/VISITES/phares/phares-frame.htm>

[24] Les phares – patrimoine des côtes de France, Ministère de l'Énergie, du Développement durable et de l'Énergie, juillet 2014

[25] Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation, Fonctionnement des ouvrages en maçonnerie, CEREMA Direction Territoriale Est/DOA, Sébastien Neiers, 2015

[26] Mechanical behaviour of granite: a compilation analysis and correlation of data around the world, N. Domede, T. Parent & A. Sellier, 2017

[27] Méthode de détermination de la masse volumique réel LMDC

[28] Méthode de requalification des ponts en maçonnerie, Nathalie Domède, 2006

[29] Méthodologie de Diagnostic de Structures Maçonnées Anciennes, Thomas Parent, 2015

[30] Méthodologie pour la requalification des ponts en maçonnerie, Thomas Stablon, 2011

[31] Minéraux de Bretagne Relié, Louis Chauris, 2014

[32] Ministère des transports, Direction des routes, Les ponts en maçonnerie, construction et stabilité, SETRA, 1982

[33] Norme NF EN 12372, mai 2007

[34] Norme NF EN 14580, août 2005

[35] Norme NF EN 772-1, janvier 2001

[36] Phare de l'île Vierge – Etude de faisabilité du changement des montants de la salle des lanternes – Note de calcul – novembre-2012

[37] Phare de l'Île Vierge, Dossier sommaire d'ouvrage, décembre 2010

[38] Phares et balises Nord Atlantique – Manche Ouest, Phare de l'Île Vierge plans + coupe, 2010

[39] PLOUGUERNEAU, Phare de l'île vierge, Diagnostic des structures métalliques et de la maçonnerie en partie haute du phare, Ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat, 2011

[40] Ponts et chaussées, Phares et Balises, Service maritime, Travaux neufs, Phare de l'Île Vierge, Modification de l'éclairage, Fourniture de 350 tonnes de ciment Portland, Soumission, 26 novembre 1898

[41] Projet, Ponts et chaussées, Phares et Balises, Service maritime, Travaux neufs, Phare de l'Île Vierge, Modification de l'éclairage, Reconstruction de la tour, Avant-métré des travaux, 8 janvier 1897

[42] Projet, Ponts et chaussées, Phares et Balises, Service maritime, Travaux neufs, Phare de l'Île Vierge, Modification de l'éclairage, Reconstruction de la tour, Devis et cahier des charges, 8 janvier 1897

[43] Rapport provisoir instrumentation

[44] Reference Tables for Physical Setting/EARTH SCIENCE, 2011

[45] Revue universelle : recueil documentaire universel et illustré / publié sous la direction de M. Georges Moreau, 1902

[46] Schéma d'identification des roches ignées, University of Auckland, 2005

[47] Service culturel Paris, Musée national de la marine, Les phares des côtes de France du XVIe au XXe siècle, 2012

[48] Soumission pour la fourniture de seize cents mètres cube de sable de construction à l'île Vierge, 9 novembre 1896

[49] Thalassa, Phares de France, les gardiens de la côte, France 3, 08/01/2016

[50] Travaux maritimes. La mer et les côtes. Cours professé à l'École nationale des Ponts et Chaussées, Bibliothèque numérique patrimoniale des ponts et chaussées, Georges de Joly (1864-1919)

[51] www.geoportail.gouv.fr/donnees/cartes-geologiques

Annexes

Annexe A : Extraits du cahier des charges, le 8 janvier 1897

« Article 3.

Nature des ouvrages à exécuter.

Sera exécutée en maçonnerie de moellons ordinaires avec mortier de ciment, toute la tour (y compris les fondations) sauf les exceptions ci-après :

Seront en maçonnerie de moellons piqués par assises réglées, avec mortier de ciment, les parements du fût, la voûte en arrière de la porte principale ainsi que les arceaux formant palâtres ou plafonds intérieurs de toutes les ouvertures.

Seront exécutés en maçonnerie de pierre de taille, avec mortier de ciment les marches de l'escalier de l'entrée principale, les marches de l'escalier tournant, le socle du soubassement, le soubassement, le cordon du fût, la corniche, le parapet, la murette la guérite, ainsi que les appuis et linteaux des fenêtres du fût.

Seront taillées à la boucharde à pointe fines :

Toutes les surfaces vues des maçonneries de pierres de taille et de moellons piqués, à l'exception du parement vu du fût du soubassement, lequel sera exécuté en bossages.

Seront taillés au têtu :

Les parements intérieurs des maçonneries de moellons ordinaires.

Seront rejointoyés au mortier de ciment :

Tous les lits et joints des parements vus de pierre de taille, de moellons piqués et de bossage. »

« Chapitre II

Provenance, qualités et préparation des matériaux. »

« Article 4.

Les moellons ordinaires proviendront des carrières de l'Île Vierge (appartenant à l'Administration).

Les pierres de taille et les moellons piqués seront en granit dit : de Kersanton et proviendront des carrières de Logonna à l'entrée de la rivière de l'Hopital. »

« Article 5.

les pierre et moellons de toute espèce proviendront des meilleurs bancs des carrières de granite indiqués. Ces pierres et moellons seront durs, bien gisants, sans fils, non gélifs et dégagés de toute gangue. »

« Article 6.

Les moellons ordinaires auront au moins 0,15 d'épaisseur, 0,25 de queue moyenne pour l'intérieur des murs et de 0,30 à 0,45 de queue pour le parement intérieur de la tour. »

« Article 7.

Les moellons piqués et pierres de taille seront parfaitement homogènes, pleins, d'un grain égal, ayant toutes les qualités requises pour offrir après la taille, un parement très régulier. Ils devront rendre un son clair sous le choc du marteau ; ceux qui rendraient un son sourd, qui contiendraient des parties tendres, ou s'écraseraient en grains sablonneux, au lieu de se briser en éclats à arêtes vives, seront rejetés.

Les moellons piqués pour le parement du fût auront 0,25 de hauteur d'assise et une queue moyenne de 0,50. Les autres moellons piqués et les pierres de taille auront les dimensions indiquées sur les dessins qui seront remis à l'Entrepreneur. Les pierres de taille de bossages auront uniformément 0,50 de hauteur d'assise et 0,70 de queue moyenne.

Les lits seront dressés sans démaigrissement sensible sur toute leur étendue. »

« Article 9.

La tour sera fondée sur le rocher préalablement mis à nu et dérasé horizontalement :

Les déblais de toute nature nécessaire pour dresser convenablement le terrain, dans l'emplacement des fondations et asseoir les maçonneries sur le rocher, seront exécutés suivant les formes et les profondeurs prescrites par l'Ingénieur ou par les Agents de l'Administration.

L'Entrepreneur devra se conformer rigoureusement aux dimensions qui lui auront été indiquées ; faute par lui de s'y conformer, il ne lui serait rien compté pour les cubes extraits hors de ces dimensions et il resterait chargé de remplir à ses frais, avec de la maçonnerie, les vides excédants, avec toutes les précautions qui seraient jugées nécessaires par l'Ingénieur.

Les produits du déblai de toute nature seront transportés en remblai, soit en un lieu de dépôt, soit autour de l'édifice et dans ce cas, ils seront pilonnés avec le plus grand soin. »

« Article 10.

Le mortier de ciment à employer pour les maçonneries se composera de 400Kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable. Le ciment et le sable (fournis par l'Administration) seront mesurés dans des caisses fournies par l'Entrepreneur et dont le volume sera taré de manière à présenter exactement le rapport ci-dessus. »

« Article 11.

Le mortier de ciment à employer pour les rejoindoiements se composera de 800Kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable ; le ciment et le sable (fournis par l'Administration) seront mesurés comme il a été dit à l'article précédent. »

« Article 12.

Les sables et le ciment entrant dans la composition des mortiers seront fournis par l'Administration. L'Entrepreneur devra les prendre sur les points de l'Île où auront été faits les approvisionnements.

Pour le ciment, l'Entrepreneur devra le peser et l'emmagasiner à sec de manière à avoir sur place, à côté de l'atelier de fabrication de mortier un approvisionnement suffisant pour deux jours de

travail au moins. Le ciment sera transporté sur le chantier dans des barils ou sacs fournis par le fabricant, mais l'Entrepreneur deviendra entièrement responsable de ces barils ou sacs à partir du moment où la remise lui en aura été faite par l'Agent de l'Administration.

Tous les frais de transport, pesage, mesurage, emmagasinage... seront compris dans le prix du mètre cube des diverses espèces de mortiers et de maçonneries prévues au bordereau.

La valeur de toutes les parties mouillées ou détériorées par la faute de l'Entrepreneur et de celle dont il aura fait mauvais emploi lui sera retenue. Cette valeur sera comptée à raison de 60F la tonne.

Afin d'établir un contrôle rigoureux sur les quantités de ciment remis à l'Entrepreneur, les barils et les sacs ne lui seront délivrés que sur des bons signés de lui et visés par le surveillant des travaux.

En outre, l'Entrepreneur sera tenu de se soumettre à toutes les mesures de contrôle que l'Administration jugera utile d'appliquer pour vérifier que le ciment qu'elle aura fourni a réellement été employé.

Il sera interdit à l'Entrepreneur de recevoir d'autres ciments sur le chantier.

Tous les barils ou sacs vides seront soigneusement rassemblés par l'Entrepreneur et réintégrés à ses frais dans les magasins de l'Administration après l'achèvement des travaux.

Il sera opéré, au décompte, une réduction de un franc par baril ou sacs vide non présenté.

L'eau entrant dans la composition des mortiers sera de l'eau douce et propre que l'Entrepreneur devra approvisionner à ses frais lorsque la citerne de l'île sera à sec. Tout mortier où entrerait de l'eau de mer sera rigoureusement rebuté et jeté immédiatement à la mer.

Les mortiers seront toujours fabriqués à couvert, à l'aide d'un manège à roue du modèle accepté par l'administration et en cas d'autorisation spéciale, ils pourront être exécutés au rabot, sur aire en planches jointives.

Le ciment sera d'abord mélangé à sec avec le sable, de la façon la plus complète, puis on ajoutera à l'aide d'un arrosoir à pomme, la quantité d'eau strictement nécessaire pour humecter la masse et obtenir une pâte ferme. Le mélange sera ensuite corroyé et trituré, jusqu'à ce que le mortier soit bien lié et bien homogène.

Le mortier devra être fabriqué au fur et à mesure des besoins. On n'en fera jamais plus qu'on n'en pourra employer pendant chaque période de travail. Tout ramollissement du mortier par addition d'eau, est sévèrement interdit et le mortier qui n'aura pas été employé à la fin de la journée sera jeté au rebut.

Tout mortier dont le dosage n'aurait pas été fait ou qui n'aurait pas été fabriqué conformément aux règles ci-dessus, ou qui aurait commencé à faire prise avant l'emploi sera rebuté. »

« Article 13.

Pour toutes les maçonneries, les moellons, après avoir été lavés, seront posés à bain de mortier et en bonne liaison. Ils seront placés à la main et serrés par glissement les uns contre les autres, de manière que le mortier fortement comprimé reflué à la surface par tous les joints.

Il ne devra pas y avoir de contact entre les moellons, sans interposition de mortier, et inversement, il ne devra pas exister, entre les moellons, de vide considérable remplis uniquement de mortier. Les moellons seront frappés et tassés au marteau de maçon, ceux qui casseraient seraient repris, nettoyés et employés avec de nouveau mortier. Les joints et intervalles, bien garnis de mortier seront remplis d'éclats de pierre enfoncés et serrés de façon que chaque moellon ou éclat soit toujours enveloppé de mortier et que néanmoins le volume de mortier employé soit réduit au minimum.

Les moellons formant parement se croiseront à queue avec les moellons situés en arrière ; on placera toujours par mètre carré de parement une boutisse de 0,70 de queue. »

« Article 14.

Les moellons piqués seront posés à bain de mortier sur leur lit de carrière et par assise bien réglées de niveau suivant les dispositions de l'appareil. On devra commencer, avant la pose de chaque assise par déraser bien de niveau le lit ou la surface sur laquelle les pierres devront être posées ; puis on nettoiera et on arrosera le lit ainsi que le dessous de la pierre à poser et les surfaces des joints montant contre lesquels elle devra s'appliquer. On étendra ensuite sur le lit inférieur une couche de mortier de 0,020 d'épaisseur au moins, sur laquelle la pierre à poser sera amenée et soigneusement placée.

Cette pierre sera ensuite pressée en tous sens et frappée à coups de masse en bois, jusqu'à ce qu'elle soit solidement assise, et de manière que le mortier reflué garnisse exactement les lits et joints et que l'épaisseur des joints soit réduite aux dimensions prescrites.

Les moellons piqués devront toujours être posés sans le secours de cales d'aucune sorte.

On aura soin d'enraciner le parement dans les maçonneries de moellons ordinaires, pour cela, les moellons piqués seront posés par panneresse et boutisses alternés en nombre égal, dont la queue aura généralement et sauf indications spéciales 0,50 de longueur moyenne, sans que cette longueur descende au-dessous de 0,40.

Les assises du fût de la tour auront 0,25 de hauteur et une longueur en parement d'au moins deux fois cette hauteur.

Les moellons piqués d'une assise seront toujours posés à recouvrement sur le lit de l'assise inférieur, ces recouvrements seront toujours de 0,20 au moins.

En l'absence d'indications spéciales les lits de mortier auront 0,010 d'épaisseur et les joints verticaux auront 0,008. L'Entrepreneur se conformera pour leur exécution à un modèle construit sur l'Île. »

« Article 15.

Les pierres de taille seront exactement appareillées suivant les formes et dimensions indiquées par les dessins qui seront remis à l'Entrepreneur en cours d'exécution.

Les joints verticaux des assises superposées se découperont de 0,25 au moins.

Les appareils seront d'ailleurs disposés de telle sorte que chaque pierre ait une longueur de parement égale à une fois et demie au moins sa hauteur pour les pierres de taille du socle et du couronnement du soubassement, et à deux fois au moins sa hauteur pour les pierres de la corniche et de la galerie.

Les appareillages projetés devront être soumis préalablement à l'approbation de l'Ingénieur.

Les marches de l'escalier de la tour seront formées chacune d'une pierre de taille unique, exactement taillée suivant le dessin qui sera remis à l'Entrepreneur. Chaque marche portera du côté de l'intérieur un trou de scellement pour les montants du garde-corps ; ce trou aura les dimensions qui seront indiquées en cours d'exécution. L'encastrement de chaque marche dans le parement intérieur de la tour sera d'au moins 0,25.

Pendant les travaux et jusqu'à la réception définitive toute pierre qui sera avariée ou écornée sera remplacée.

La pose de la taille sera faite à bain de mortier de ciment. On commencera par présenter la pierre, on la retirera pour la piquer au besoin, on nettoiera et on humectera les surfaces de pose qui doivent être en contact avec le mortier ; on étendra sur le lit inférieur et sur les joints des pierres voisines, une couche de mortier de 0,025 d'épaisseur. La pierre sera ensuite amenée, placée assujettie et tassée en tous sens, à coups de masse en bois, de manière que le mortier reflué garnisse exactement les lits et joints et que l'épaisseur des joints et lits soit réduite à 0,01.

Les inégalités qui pourraient se trouver vers la queue de pierre, seront soigneusement garnies avec des éclats de pierre dure enfoncées au marteau dans le mortier.

Sauf indication contraire les seuils des portes et les appuis ne seront posés qu'après le complet achèvement des maçonneries de la tour. »

« Article 16.

Une demi-heure au moins avant l'emploi, les pierres et les moellons seront arrosées avec de l'eau douce de manière à ce qu'ils soient humides au moment de leur emploi.

Dans les temps secs, les maçonneries seront arrosées légèrement, mais fréquemment, afin de prévenir une dessication trop prompte.

Dans les temps secs ou dans les temps de pluie, il conviendra aussi de préserver les surfaces des nouvelles maçonneries au moyen de nattes ou de paillassons qui seront fournis par l'Entrepreneur.

Quand on appliquera une maçonnerie nouvelle sur une déjà ancienne, les surfaces de jonction de cette dernière seront soigneusement nettoyées, arrosées, lavées à l'eau douce et grattées.

Le mortier devra toujours être déposé dans des auges en bois sur les chantiers ou échafaudages et non à même sur les maçonneries, et ces auges seront d'ailleurs soigneusement abritées, au moyen de nattes dans les temps pluvieux ou dans les temps très chauds.

Enfin, l'exécution des maçonneries de toute nature est expressément défendue pendant la gelée.

L'Entrepreneur sera tenu de prendre les mesures nécessaires pour que la circulation ou le stationnement des ouvriers ne dégrade pas les maçonneries déjà faites.

Il sera interdit à l'Entrepreneur d'engager dans les maçonneries des murs, pendant la construction, des pièces de bois ou de fer dites passants, pour le dressement des échafaudages. »

« Article 17.

Pour les parements vus, l'Entrepreneur se conformera aux modèles qui seront construits par l'Administration sur l'Île Vierge.

Les moellons ordinaires seront simplement équarris et débrutis au marteau. Toutefois la surface vue ne devra pas présenter sous la règle de vide de plus de 0,01.

Les pierres de taille, taille lisse, seront taillées à la boucharde avec ou sans ciselures suivant les prescriptions de l'Ingénieur, de telle sorte que les faces ne présentent pas sous la règle de vides de plus de deux millimètres.

La taille sera plane ou courbe, les arêtes vives ou arrondies suivant les indications des appareils ou les prescriptions de l'Ingénieur.

Les lits et joints des pierres de taille seront taillés jusqu'à une distance de dix centimètre (0,10) au moins de toutes les faces de parement de manière à ne pas présenter sous la règle de flâches de plus de 0,008 millimètres.

Toute pierre épauprée pendant la pose sera relevée et remplacée.

Les pierres de taille formant bossages seront parfaitement équarries, les arêtes devront être vives et les lits et joints seront retournés d'équerre, parfaitement dressés sur une longueur de 0,10 au moins.

La surface en parement présentera en son pourtour une ciselure de 0,05 de largeur bien arrêtée sur ses deux bords.

Entre ciselures la pierre sera enlevée en grand au marteau sans retouche à la pointe et de manière à présenter un bombement de 7 à 9 centimètre sur le plan défini par les ciselures.

Les moellons piqués, seront traités comme les pierres de taille, taille lisse, sauf que les vides sous la règle pourront atteindre 0,003 millimètres pour le parement vu. »

« Article 18.

Après achèvement des maçonneries, les parements vus seront râgrés, nettoyés et rejoignoyés avec soin.

Le râgrément consistera à tailler sur place les saillies, les irrégularités résultant de l'imperfection de la préparation ou de la pose.

Le nettoyage consistera à enlever les bavures, en grattant ou lavant à l'eau ou à l'acide. Pour opérer le rejoignolement, on commencera par dégrader ou refouiller au poinçon les joints horizontaux et verticaux sur 0,03 centimètres de profondeur, et on mouillera les surfaces avec une brosse trempée d'eau.

On appliquera ensuite, dans les joints, du mortier fin un peu ferme, qu'on serrera fortement contre la pierre et on enlèvera avec soin toutes les bavures.

On laissera le mortier rejeter son eau et prendre une certaine consistance, puis on le refoulera et on le lissera à plusieurs reprises différentes, avec une spatule en fer jusqu'à ce que le retrait occasionné par la dessication ne donne plus lieu à aucune gerçure.

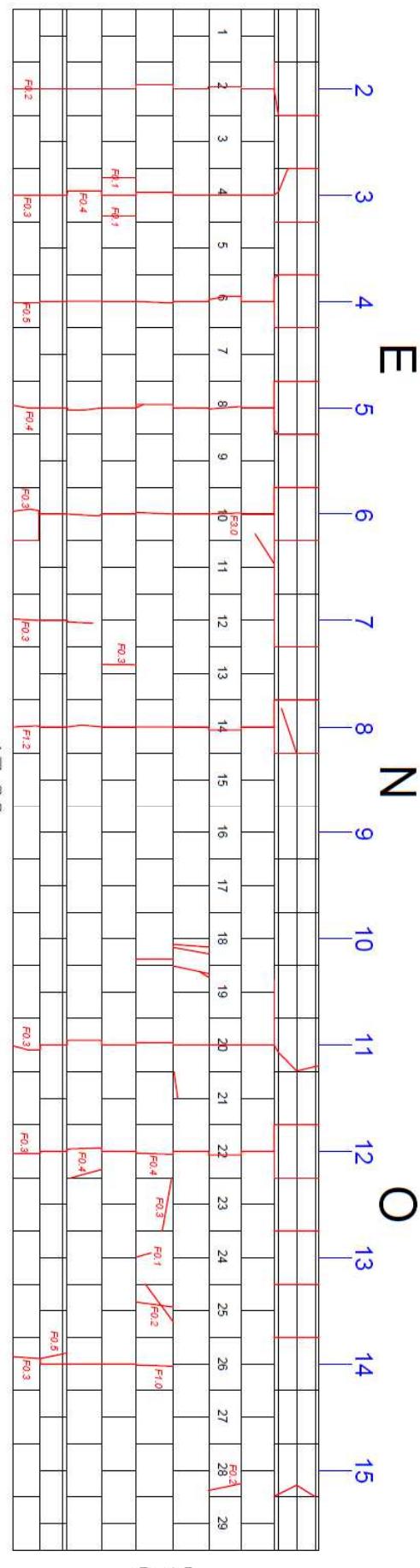
Le rejoignement sera d'une manière générale exécuté en retrait de 0,005 millimètres sur le parement théorique. »

Annexe B1 : Relevé des fissures
sur la murette ; déroulé

Elévation soubassement circulaire extérieur

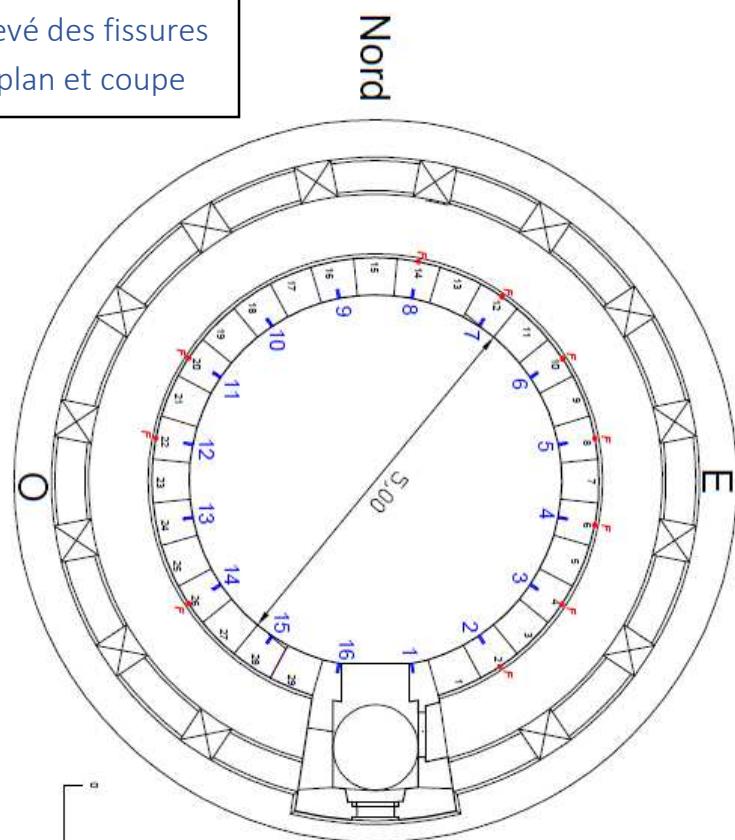
Remarques concernant les désordres constatés :

- A l'extérieur du soubassement :
Plusieurs fissures verticales paraissent avoir été élargies dans le cadre d'une réparation. La plupart des joints et toutes les fissures ont ensuite été comblées de mastic détaché et qui masque les fissures et ne permet plus de mesurer leur ouverture.
Les fissures verticales paraissent moins ouvertes à la base du soubassement qu'en partie haute.
- Le joint entre les pierres du couronnement est partout fissuré y compris à l'intérieur de l'échauguette. De plus, plusieurs pierres du couronnement sont fissurées.
- A l'intérieur du soubassement :
Les montants de la lanterne ont été rescellés. Aucune fissure n'a été constatée sur le parement intérieur de la lanterne.

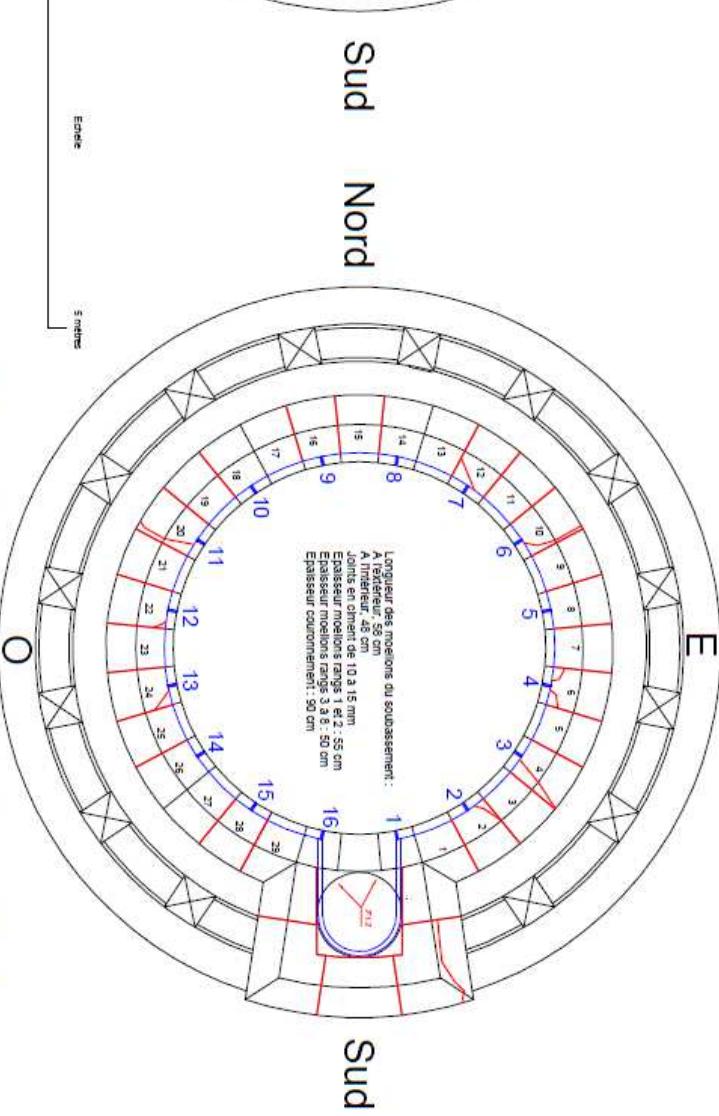


Annexe B2 : Relevé des fissures
sur la murette ; plan et coupe

Coupe horizontale du soubassement



Vue de dessus du soubassement
(au niveau de la Lanterne)



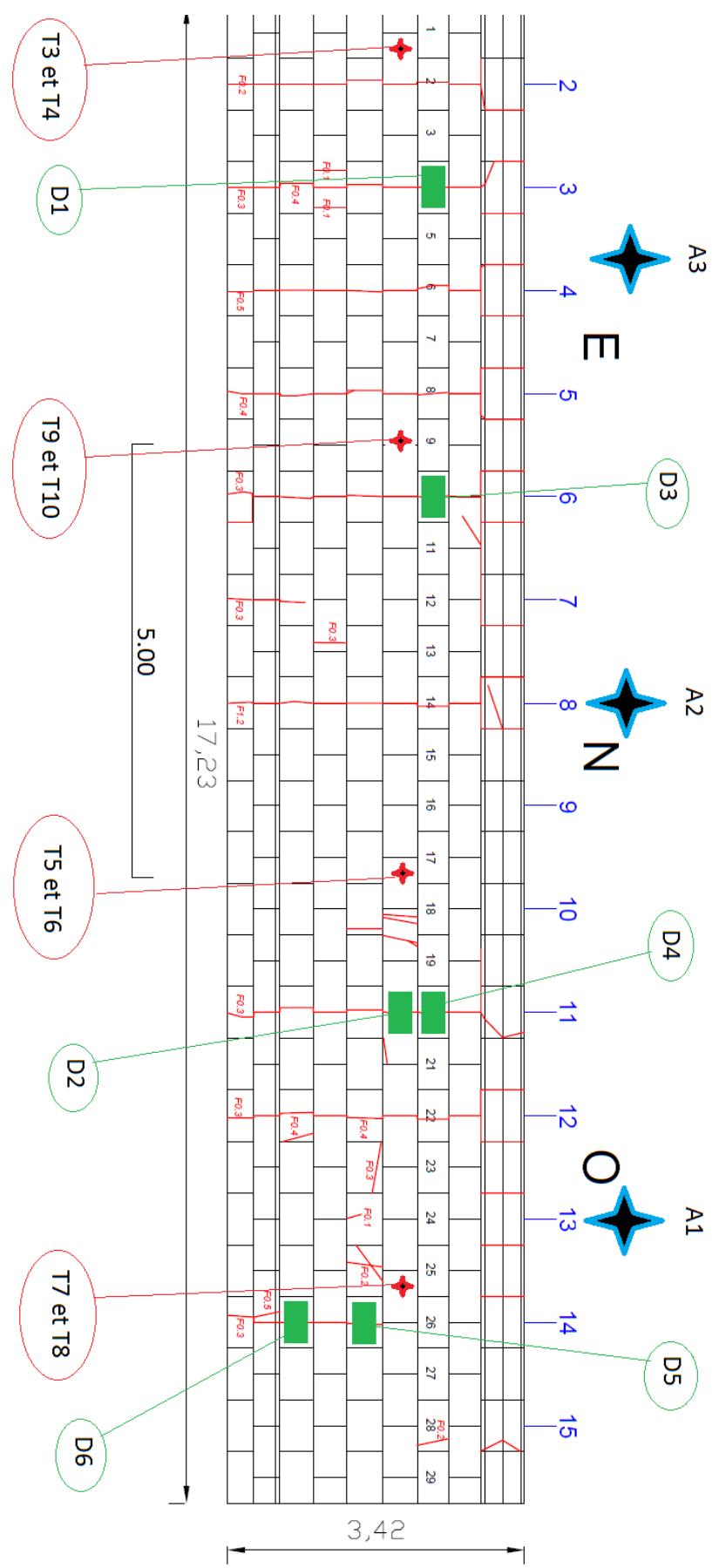
Annexe C : Relevé des fissures sur la murette ; plan et coupe



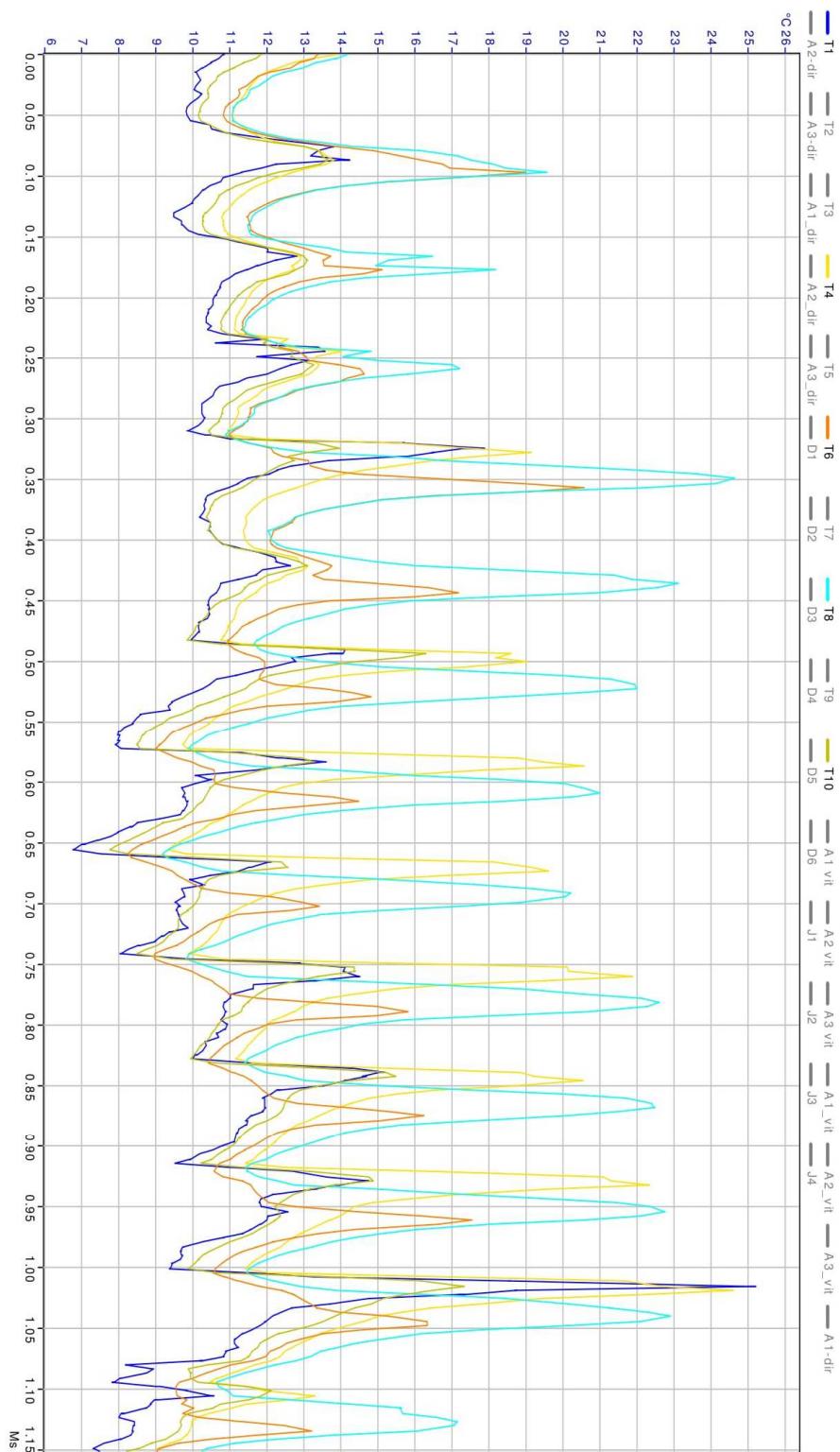
Girouette anémométrique

Capteur de déplacement

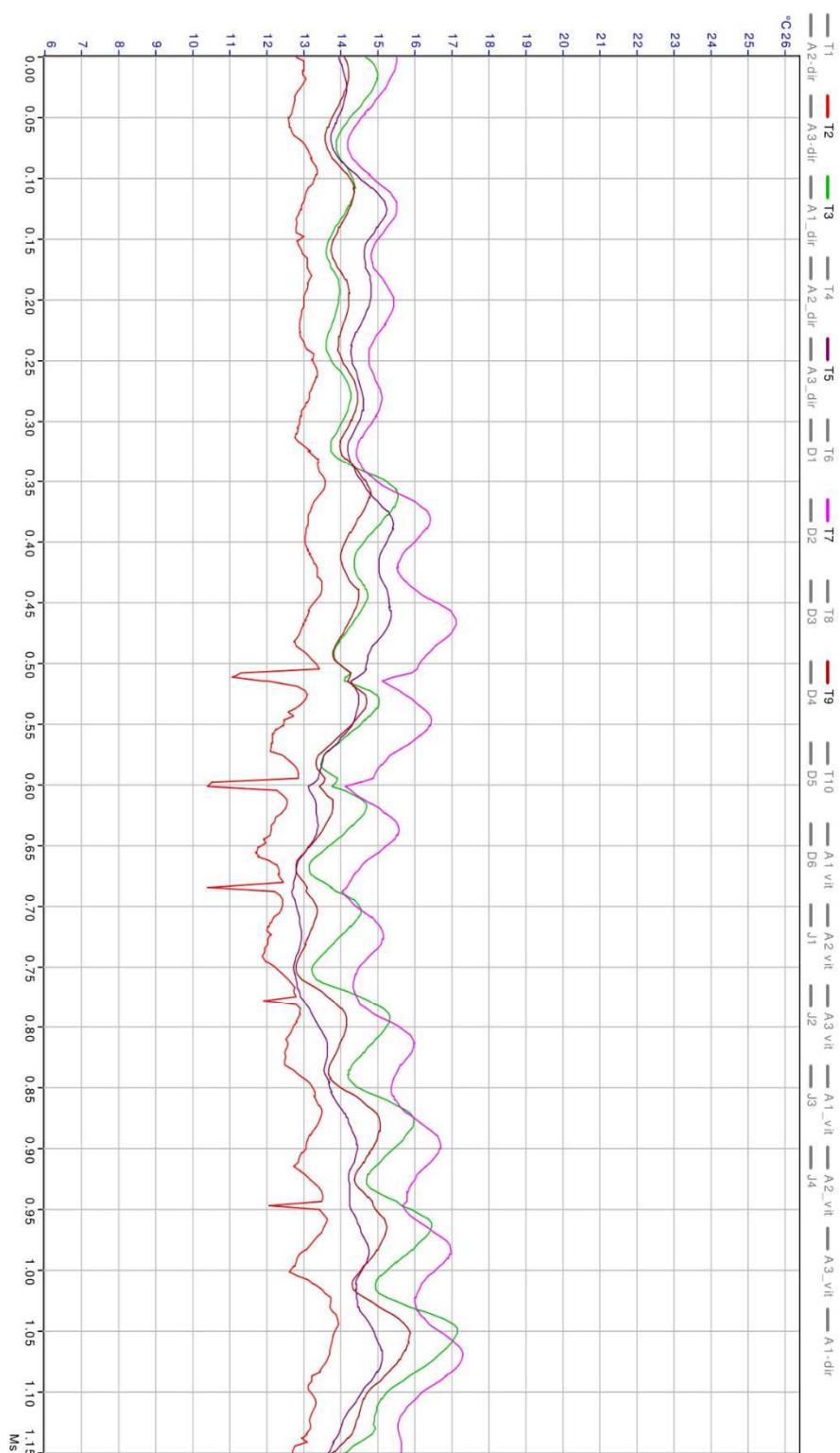
Sonde de température



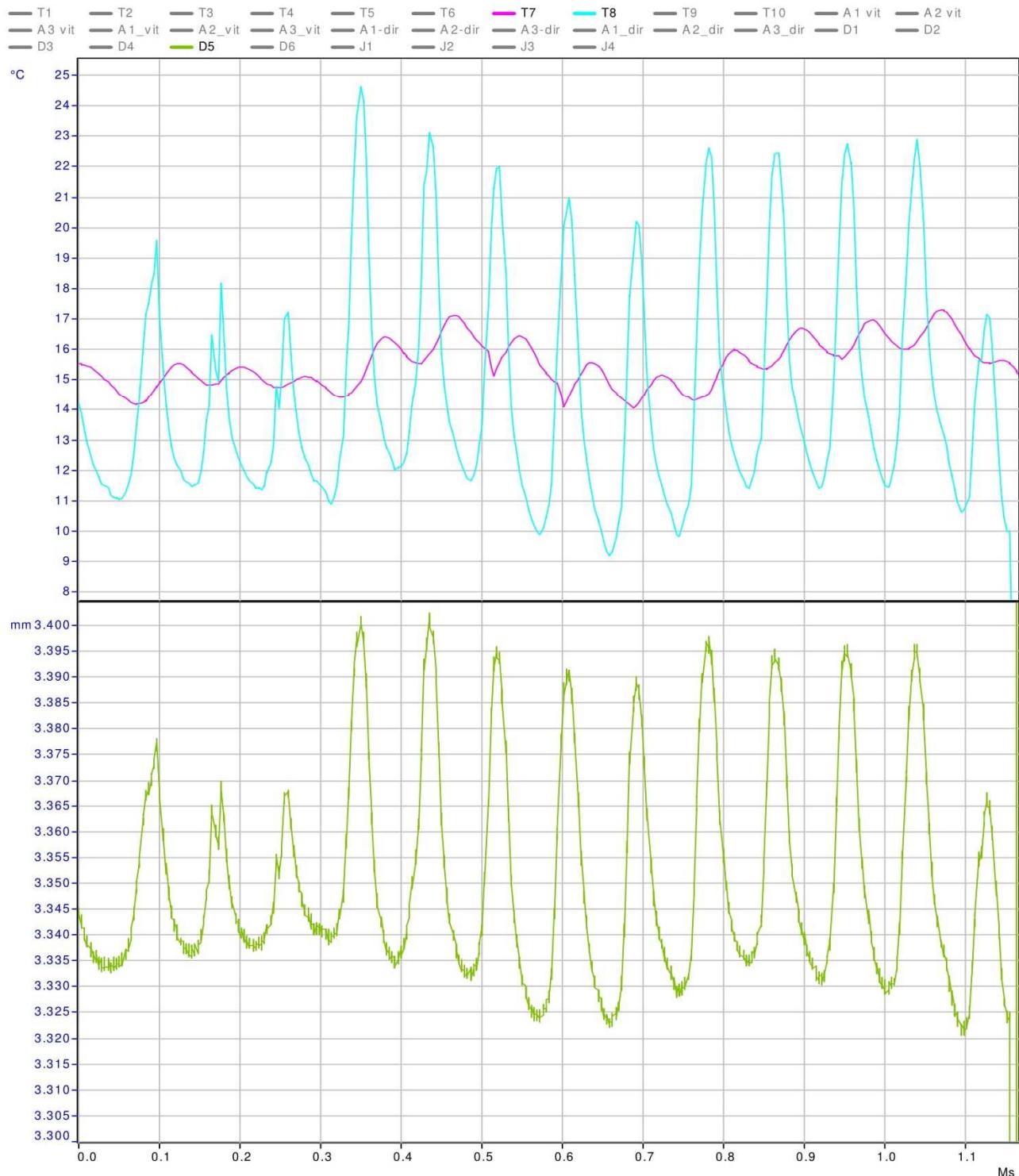
Annexe D1 : Relevé des températures extérieures



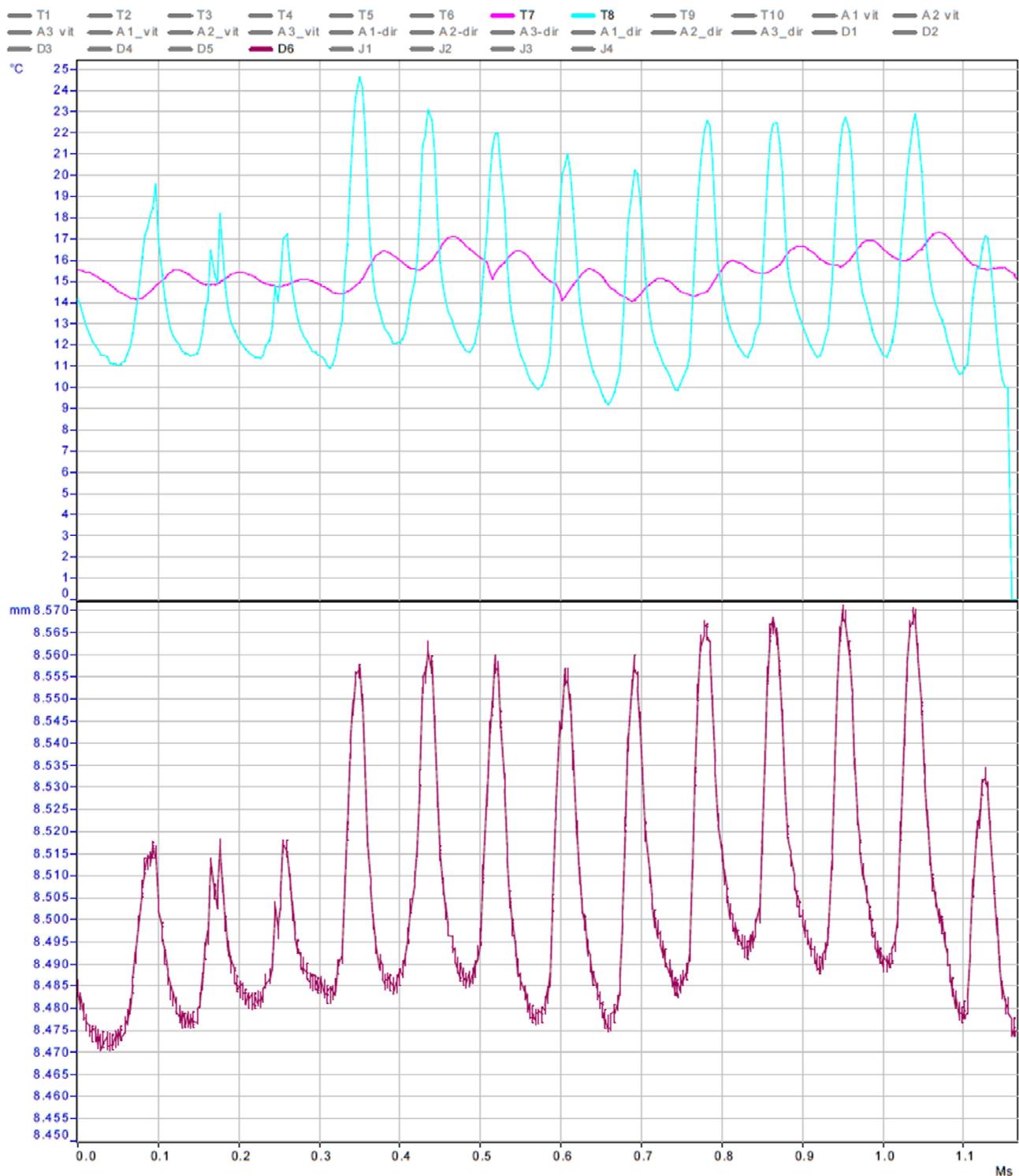
Annexe D2 : Relevé des températures intérieures



Annexe D3 : Relevé des températures T7 et 78, et des déplacement D5



Annexe D4 : Relevé des températures T7 et 78, et des déplacement D6



Annexe D5 : Relevé des températures T9 et 710, et des déplacement D3

