



# Rapport d'étude préalable aux travaux de restauration des opalines du Cap Béar

Adeline FOURNAL & Claire IDRAC

Janvier 2020



## Table des matières

<b>CONTEXTE DE L'ETUDE ET DESCRIPTION DU PHARE.....</b>	<b>2</b>
<b>Contexte de l'étude.....</b>	<b>2</b>
Contexte administratif.....	2
Projet de valorisation du site.....	2
Objectifs de l'étude .....	2
Réalisation .....	2
<b>Description du phare du Cap Béar .....</b>	<b>2</b>
Le phare.....	2
Support des opalines .....	3
Les opalines .....	3
<b>Quatre phares présentant des similarités .....</b>	<b>4</b>
<b>CONSTAT D'ÉTAT .....</b>	<b>5</b>
<b>Les carreaux d'opaline.....</b>	<b>5</b>
<b>Les autres matériaux .....</b>	<b>6</b>
<b>Problèmes de sels .....</b>	<b>9</b>
<b>Anciennes interventions, critique d'authenticité .....</b>	<b>10</b>
<b>ANALYSES ET DIAGNOSTIC .....</b>	<b>14</b>
<b>Climat .....</b>	<b>14</b>
<b>Nature des sels et comportement .....</b>	<b>17</b>
Analyses.....	17
Origines des sels .....	19
Contraintes mécaniques des sels sur les carreaux d'opaline .....	20
<b>SOLUTIONS PROPOSÉES.....</b>	<b>22</b>
<b>Solution n°1 : Climatisation et consolidations ponctuelles des opalines in-situ .....</b>	<b>22</b>
<b>Solution n°2 : Dépose et traitement des opalines d'origine .....</b>	<b>23</b>
<b>Solution n°3 : Restitution à neuf des carreaux d'opaline.....</b>	<b>25</b>
<b>Chiffrage des solutions .....</b>	<b>25</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>1</b>

# CONTEXTE DE L'ETUDE ET DESCRIPTION DU PHARE

## Contexte de l'étude

### *Contexte administratif*

La présente étude s'inscrit en amont de toute intervention. Elle a été demandée par l'architecte des monuments historiques en charge du dossier **Monsieur Olivier Weets** et commandée par la Communauté de communes Albères – Côte Vermeille – Illibéris dont notre interlocuteur a été **Monsieur Roger Carrère**.

### *Projet de valorisation du site*

Envisagée dans un contexte de réaménagement d'une zone du littoral à des fins touristiques et dans le souhait d'ouverture du phare au public les critères de **sécurité** et d'**esthétisme** seront donc traités en priorité.

### *Objectifs de l'étude*

Elle a pour mission d'établir un **constat d'état** du revêtement mural en carreaux d'opaline, de poser un **diagnostic** afin d'appréhender les processus d'altération et leurs évolutions et d'envisager les **solutions possibles**.

### *Réalisation*

L'étude a nécessité deux jours sur place les 13 et 14 Janvier. Le prélèvement d'un fragment tombé au sol a été effectué en vue d'analyse.

## Description du phare du Cap Béar

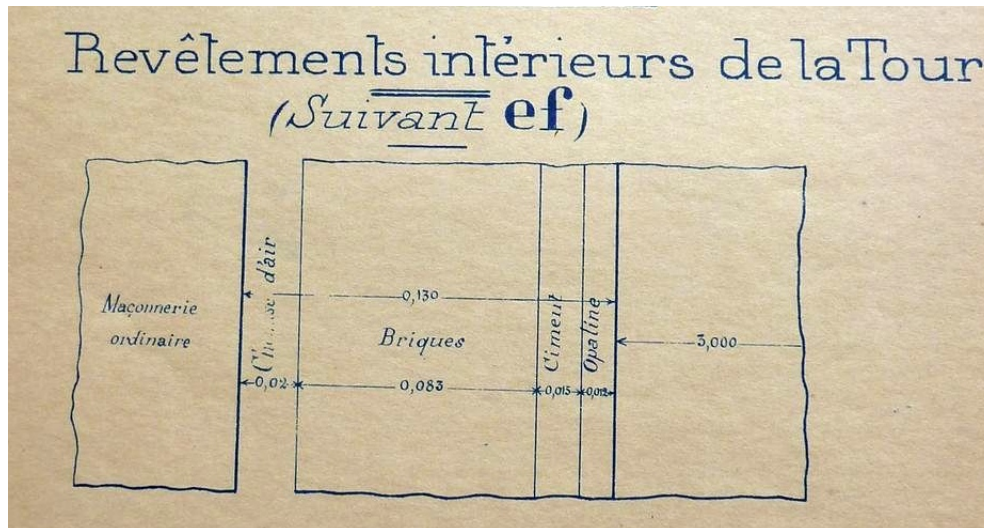
### *Le phare*

Le phare du cap Béar, construit en 1905, est une tour carrée de plus de 79m de hauteur. Propriété de l'état, il est depuis 2012 classé au titre des monuments historiques. Le phare a été transféré au Conservatoire du littoral. Il est actuellement non visitable et encore en usage.

Le phare est constitué de nombreux matériaux. Dans le bâti on retrouve entre autres du granit, de la brique, du ciment ; les escaliers sont composés de marbre rouge, d'alliage cuivreux et d'alliage ferreux, les revêtements muraux comportent des opalines, des bois.

## Support des opalines

D'après les plans fournis la stratigraphie du mur se sous-divise en 5 éléments (de l'extérieur vers l'intérieur) : La **maçonnerie**, un **vide** (chemise d'air), les **briques**, le **ciment** et les opalines. La partie extérieure (maçonnerie) est d'une épaisseur différente en fonction des angles ou des côtés. La partie intérieure (brique + ciment + opaline) mesure 11 cm d'épaisseur.



Détail d'un plan de coupe des murs du phare

## Les opalines

Le revêtement mural, fourni et posé par **Saint Gobain**, est composé de **1640 carreaux d'opaline** (verre opaque à l'aspect blanc laiteux composé d'oxyde d'étain ou d'acide phosphorique/phosphate) **maintenus par le ciment et jointés**. Cet habillage avait comme objectif le ruissellement de la condensation afin de maintenir un air plus sec à l'intérieur de la tour. Aujourd'hui on constate une dégradation généralisée.

Les opalines sont de teinte bleutée homogène elles mesurent :

- 38,5 x 18,5 cm et 1,2cm d'épaisseur.

Comme nous l'observons sur la photo ci-contre, la surface d'une majorité de carreaux est marquée de stries parallèles et orientées en diagonale, traces de fabrication.



Traces de fabrication en surface du carreau



Vue des différences de couleur entre les carreaux sous l'escalier en RDC

Si à première vue tous les carreaux paraissent identiques on note toutefois des **différences** :

- Absence ou présence de stries de surface
- Teinte plus ou moins foncée (voir photo ci-contre)

## Quatre phares présentant des similarités

Dans le paysage français seul quatre autres phares présentent un revêtement proche réalisé par Saint Gobain à la même époque :

- Phare d'Ailly (Seine Maritime)
- Phare d'Eckmühl (Finistère)
- Phare de l'île Vierge (Finistère)
- Phare de Coubre (Charente-Maritime)

En synthèse des échanges mail et téléphoniques que nous avons pu avoir avec ces différents interlocuteurs on retient :

- Les phares du Finistère ont une opaline plus claire que le phare de la Coubre
- Le phare de la Coubre réalisé en béton armé (sans interface avec le revêtement opaline) semble présenter des altérations très proches du phare du Cap Béar
- **Le phare de l'île Vierge est en parfait état**
- Le phare d'Eckmühl présente des pertes d'adhésion et de bris de ses carreaux sur des zones précises
- **Les archives départementales à Quimper ont un grand nombre d'archives concernant la pose des opalines du phare d'Eckmühl**

## CONSTAT D'ÉTAT

Bien que nous ayons été mandatées pour étudier le cas des opalines, il nous a paru pertinent de réaliser un constat d'état à l'échelle de la totalité du phare et non seulement à l'échelle des carreaux de revêtement. En effet, les opalines font partie d'un tout et **chaque élément est susceptible d'interagir avec un autre**, tant sur le plan de l'origine et des processus de dégradation que sur le plan des éventuelles solutions que nous pourrions proposer.

### Les carreaux d'opaline

Nous avons observé un réseau de fissures sur la presque totalité des carreaux, **seulement 17 carreaux sur 1650 sont entiers, soit moins de 1% de la totalité**. Ces fissures sont évolutives et plusieurs stades d'évolution sont présents sur les carreaux : fissures simple, fissure écartée, fragments déplacés, gondollement, feuillement (plus prononcé sur les zones en contact avec le joint blanc). En plus des fissures, une perte d'adhérence avec le mortier d'origine mène à la création de lacunes dans les carreaux. **L'état des carreaux d'opaline est alarmant.**

Nous avons remarqué des altérations plus nombreuses sur les carreaux d'opaline situées sur le mur Nord-Ouest du phare, de ce fait nous avons comparé les températures de surface des carreaux (voir détails page 13 dans le chapitre « Analyses », sous-chapitre « Climat »).

Le mur Nord-Ouest est plus froid que celui du Sud-Est avec une différence moyenne de 0,2 à 1 degrés. Le côté plus froid devant condenser plus souvent, cela peut en partie expliquer le surplus d'altération des opalines sur ce mur. Nous avons également observé de nombreuses efflorescences dans les fissures et sur les joints.



Détail d'un réseau de fissures en lumière rasante, des morceaux sont déjà saillants par rapport à la surface



Détail du feuillement sur une bordure de carreau près du joint blanc



Détail d'un carreau déformé dépassant du plan du mur



Vue du sol du RDC du phare avec les fragment d'opaline tombés



Vue d'une grande zone de lacune avec mortier sous-jacent apparent et efflorescences de sels



Vue des efflorescences salines le long d'une fissure dans l'opaline

## Les autres matériaux

L'ensemble des matériaux présents dans le phare présentent des altérations structurelles et chimiques sévères :

- **Oxydation des métaux (cuivreux et ferreux)**
- **Déstructuration du bois**
- **Fissures et cassures dans le marbre**



Une oxydation généralisée des matériaux métalliques a été observée dans le phare. Cependant cette oxydation n'est pas homogène à l'échelle du bâtiment. Nous avons observé, notamment au niveau de la rampe, que les parties basses étaient beaucoup plus altérées que les parties hautes du phare (voir photos ci-après).



Vue des parties basses de la rampe proche du RDC du phare



Vue des parties basses de la rampe proche du haut du phare

Les parties de la rampe située en bas du phare présentent une corrosion de surface généralisée avec des traces importantes de corrosion active, autant sur les alliages cuivreux que ferreux. La couche protectrice de peinture noire observée sur toute la rampe est fortement lacunaire sur la partie basse de la tige proche de la jonction avec le marbre.



Détail de la forte oxydation et de la corrosion active sur la rondelle en alliage cuivreux et de la tige en alliage ferreux de la rampe métallique (localisation RDC du phare).



Détail de la surface fortement altérée de la tige en alliage ferreux. Gouttelettes, fissurations et feuilletages caractéristiques d'une corrosion active du fer (localisation RDC du phare).

En partie haute du phare, les mêmes éléments de la rampe sont encore totalement recouverts de leur couche protectrice de peinture noire. Ils présentent ponctuellement des zones d'oxydations localisées, notamment sur les alliages ferreux avec pour ces derniers quelques gouttelettes orangées, traces de corrosion active très probablement par chlorures.

La main courante de la rampe présente une oxydation de surface généralisée mais peu épaisse.



Détail d'une zone limitée d'oxydation de la tige en alliage ferreux dans la partie haute de la rampe



Détail de l'oxydation de surface sur la main courante de la rampe (localisation entre la première et la deuxième fenêtre côté porte du phare)

Certaines altérations de matériaux entraînent d'autres dégradations sur d'autres matériaux. Cette corrélation entre les processus d'altération de certains matériaux a pu être observée au niveau des marches en marbre. Comme le montre la photo ci-dessous, le tenon en alliage ferreux permettant de fixer la rampe dans la marche en marbre s'est totalement corrodé. La corrosion du fer se caractérise par une expansion des produits de corrosion. Cette expansion est à l'origine de la fissuration du marbre puis de sa casse.



Ci-contre détail d'une marche de marbre lacunaire. La flèche orange pointe le tenon en alliage ferreux qui s'est corrodé (zone noire légèrement cernée d'orange en partie supérieure). Le cerclage en pointillés montre un éclat issu du tenon en fer corrodé (même couleur noire avec liseré orangé). Le marbre présente des fissures qui suivent le veinage naturel de la pierre ainsi que de nombreux éclats.

Certaines pièces de bois localisées dans les encadrements de porte et les regards techniques présentent une déstructuration de la fibre du bois qui devient très souple et ressemble à de la filasse. Ces pièces de bois ont perdu toute résistance mécanique.



Détail des fibres de bois n'ayant plus de tenue structurale

## Problèmes de sels

Un autre paramètre a sans doute joué un rôle d'accélérateur dans le processus de dégradation de la plupart des matériaux du phare, à savoir la **présence de sels** solubles. Ces derniers ont été observés à l'œil nu sous forme d'**efflorescences en de multiples endroits du phare et sur plusieurs matériaux** (marbre, granit, carreaux d'opaline, joints, mortier, brique).



Détails d'efflorescences salines sur une fissure d'un carreau d'opaline



Détails d'efflorescences salines sur un joint entre 2 carreaux d'opaline



Détails d'efflorescences salines sur le marbre



Détails d'efflorescences salines sur la brique

Au vu de la quantité de sels présents sur l'ensemble de la maçonnerie et de l'état de corrosion avancé des pièces métallique prises dans la maçonnerie, nous nous interrogeons sur la capacité actuelle de la maçonnerie intérieure à assurer son rôle structural. N'ayant pas de compétences dans ce domaine, nous recommandons d'avoir l'avis de Mr Montreau, architecte du projet, à ce sujet.

### Anciennes interventions, critique d'authenticité

Le phare a fait l'objet d'anciennes interventions plus ou moins invasives. Certaines relèvent de l'entretien et ont eu un impact limité sur l'aspect initial du phare tandis que d'autres ont considérablement modifié son aspect esthétique et l'ont éloigné du projet d'origine.

Dans les interventions d'entretien nous avons relevé :

- Une peinture bleu clair à l'imitation de l'opaline, passée sur les comblements dans les opalines
- Du mastic blanc qui a servi au rejointoiement et au comblements des carreaux
- Du mortier gris qui a servi à boucher les trous de carottage des prélèvements.



Détail d'un carreau restitué à l'enduit blanc avec une retouche bleue imitant les carreaux



Détail d'un carreau cassé avec une zone de carottage bouchée au mortier gris (cerclé en pointillé jaune)

Le joint blanc a été posé entre les opalines probablement lors d'une période de réfection du phare. En effet nous avons trouvé de cet enduit dans des lacunes sur les carreaux d'opaline. **Ce joint blanc est très dur et semble relativement imperméable car les sels ne le traversent pas, ils cristallisent à l'interface entre le carreau et le joint.** De plus nous avons observé que dans plusieurs cas, le feuillement de surface de l'opaline partait de la surface sur le bord des carreaux près du joint.



Détail des cristallisations à l'interface carreau/joint

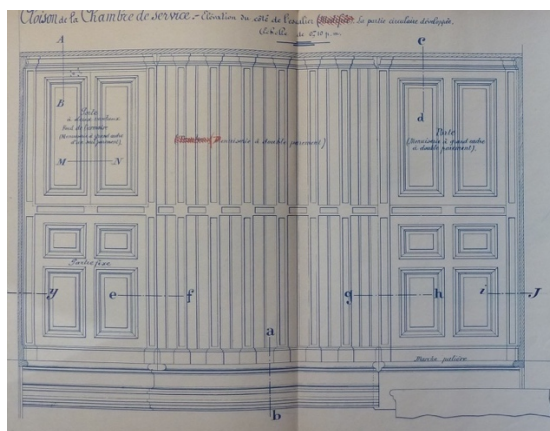


Vue du feuillement de l'opaline le long du joint blanc

Si cet enduit blanc n'a pas eu un impact esthétique important lors de sa pose, il est à l'origine de nouvelles dégradations sur les opalines.

D'autres interventions ont eu un impact plus important sur la matérialité et l'esthétique originelle du phare du Cap Béar.

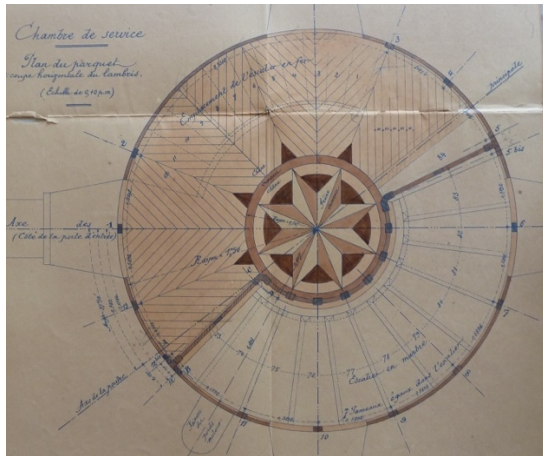
Dans le projet d'origine, le sol, les murs et le plafond de la chambre de service était recouverts de lambris et de parquet de chêne. Le parquet à point de Hongrie de la chambre présentait au centre une rose des vents en marqueterie de chêne, d'ormeau, de noyer et de frêne. Tout cet habillage de bois n'existe plus aujourd'hui et a été remplacé par un placage de contreplaqué vernis, comme nous pouvons l'observer sur la photo ci-dessous.



Vue du dessin des lambris sur les plans d'origine du phare



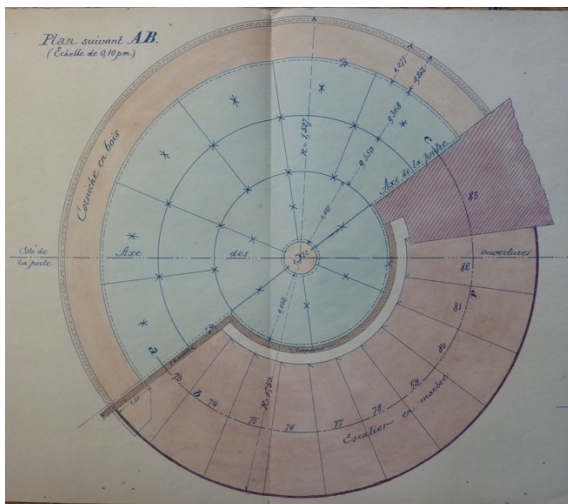
Vue du placage de contreplaqué sur les murs et le plafond de la chambre de service



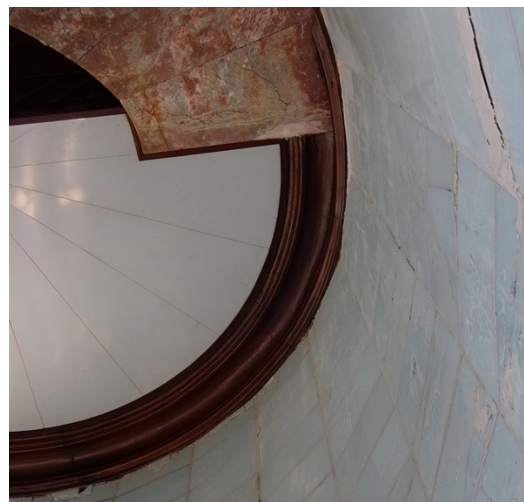
Vue du plan d'origine du parquet marquetté de la chambre de service

A noter également qu'il y avait une porte aménagée entre la chambre de service et le haut de l'escalier en marbre rose. Ce cloisonnement des espaces n'existe plus aujourd'hui.

Le plafond de la cage du grand escalier était quant à lui recouvert de grands carreaux d'opaline restituant des portions de cercle et d'une corniche en bois. Cette proposition avait été faite en prenant exemple sur le phare de l'Ailly.

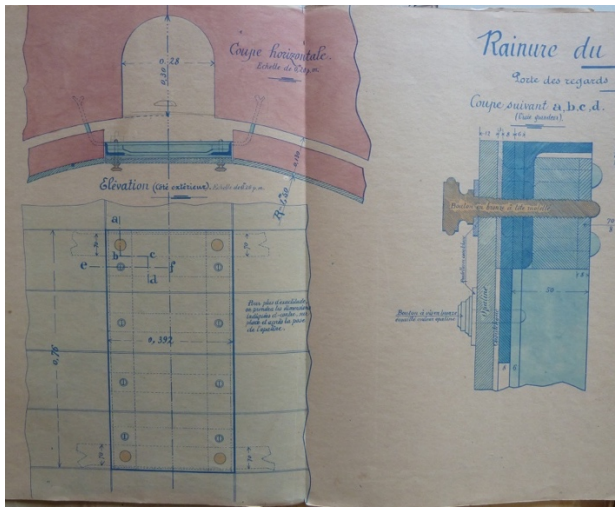


Vue du plan d'origine pour le plafond de la cage du grand escalier de marbre rose



Vue du plafond actuel de la cage du grand escalier de marbre rose. Présence de plaque de plastique blanc remplaçant les opalines.

De même les portes de 3 des 4 des regards courant sur toute la hauteur de la rainure du poids moteur étaient à l'origine des portes métalliques recouvertes d'opaline. Il ne subsiste plus une seule de ces portes aujourd'hui car elles ont été remplacées par des portes en bois peintes en rouge.



Vue du plan d'origine des regards faits de portes métalliques recouvertes d'opalines



Vue d'un regard actuel en bois peint en rouge

## ANALYSES ET DIAGNOSTIC

### Climat

Nous avons effectué des relevés climatiques avec un thermo-hygromètre (Appareil Testo 610, précision HR  $\pm 2,5\%$  HR et température  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , résolution 0,1 pour % HR et  $^\circ\text{C}$ ) ainsi que des relevés de température de surface avec un thermomètre laser (AGT NX-9344-675).

Les données recueillies sont exposées dans le tableau ci-dessous.

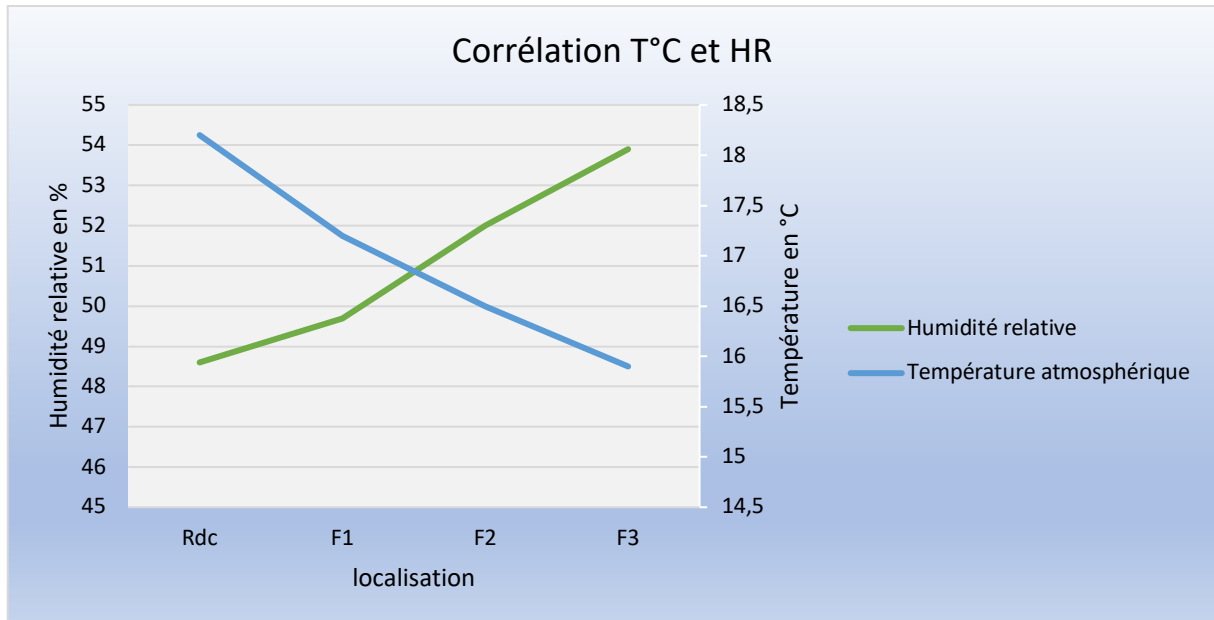
	Humidité relative (%)	Température atmosphérique ( $^\circ\text{C}$ )	Température de rosée ( $^\circ\text{C}$ )	Température de surface ( $^\circ\text{C}$ )		
Température extérieure	41,3	14,6	1,6	Nord-Ouest	Sud-Est	Différence entre les 2 murs
<b>RDC</b>	<b>48,6</b>	<b>18,2</b>	<b>7,2</b>	<b>13</b>	<b>13,3</b>	0,3
<b>F1</b>	<b>49,7</b>	<b>17,2</b>	<b>6,6</b>	<b>12,7</b>	<b>13,1</b>	0,4
<b>F2</b>	<b>52</b>	<b>16,5</b>	<b>6,6</b>	<b>12,3</b>	<b>13,1</b>	0,8
<b>F3</b>	<b>53,9</b>	<b>15,9</b>	<b>6,6</b>	<b>11,9</b>	<b>12,9</b>	1
T $^\circ\text{C}$ sous les escaliers - RDC				14,4		

On voit que le jour de la prise de mesures, le climat extérieur était sec avec 41,3% d'HR (froid et ensoleillé) tandis que l'intérieur du phare était plus humide, sans pour autant être très humide, de 48,6% à 53,9% d'HR. Cette différence d'humidité peut s'expliquer par le fait que le phare restant fermé toute l'année, il conserve en ses murs une humidité résiduelle, humidité régulièrement captée et restituée par les sels hygroscopiques dans leur environnement.

L'humidité mesurée ce jour-là était suffisamment basse pour permettre la cristallisation des sels que nous avons pu observer.



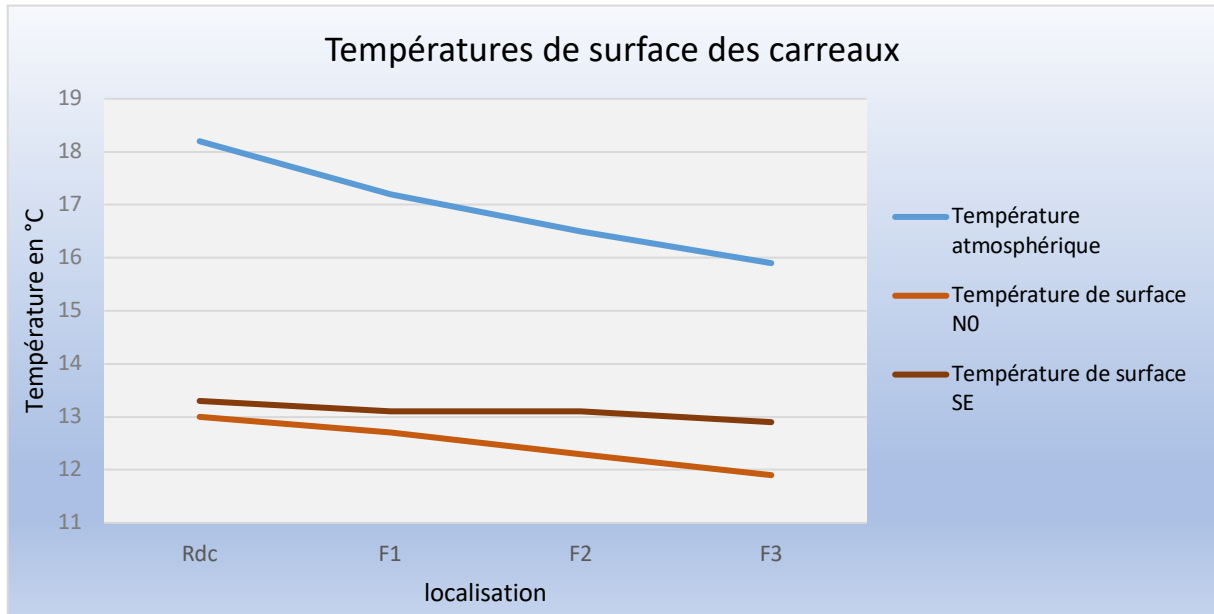
Les paramètres d'HR et de température ont été pris à différentes hauteurs à l'intérieur du phare. Ces deux paramètres évoluent lentement à mesure que l'on approche du haut du phare. Comme nous l'observons sur le graphique ci-dessous, plus on monte, plus la température descend et plus l'HR augmente. Cette corrélation entre baisse de la température et montée de l'HR est normale et est caractéristique d'un climat non régulé.



La différence de température entre le haut et le bas du phare est de 2,3°C. Cette différence peut s'expliquer par la variation de l'épaisseur des murs sur la hauteur du phare. En effet, le phare est une tour carrée évasée en partie basse. Les murs plus épais en bas ont une plus grande inertie que ceux d'en haut. De ce fait la partie basse reste plus chaude en hiver et plus fraîche en été.

A noter qu'au niveau de la lanterne, la température ressentie était plus élevée grâce au soleil frappant les vitrages. De ce fait, la partie haute du phare doit certainement être plus chaude que le bas pendant les mois d'été. Seule une étude climatique sur le phare à l'échelle d'une année pourrait permettre de confirmer cette hypothèse.

Nous avons remarqué des altérations plus nombreuses sur les carreaux d'opaline situées sur le mur Nord-Ouest du phare, de ce fait nous avons comparé les températures de surface des carreaux. Le graphique ci-dessous montre les courbes des mesures de température de surface des murs comparées à la température atmosphérique.



Le mur Nord-Ouest est plus froid que le mur Sud-Est avec une différence de 0,2° à 1°C degrés (0,6°C en moyenne). Le côté plus froid devant condenser plus souvent, cela peut expliquer les altérations plus étendues des opalines sur ce mur.

La température de surface des murs est plus froide de 3° à 5°C par rapport à la température atmosphérique mais elle reste supérieure à la température de rosée de 5° à 6,5°C. L'écart entre la température de rosée et la température de surface des carreaux reste faible. Pendant la nuit lorsque la température de l'air baisse, il est fort probable qu'elle atteigne le point de rosée et qu'il y ait condensation sur les carreaux.

Lors de notre visite il n'y avait pas de condensation sur les murs. Cependant les nombreuses traces de coulures sur les carreaux attestent de la condensation répétée de l'eau à la surface des carreaux. Pour rappel, c'est d'ailleurs pour cet usage que les carreaux d'opaline ont été choisis pour le revêtement du phare : la condensation de la vapeur d'eau à la surface des carreaux permettait de faire baisser l'humidité à l'intérieur du phare.

## Nature des sels et comportement

### Analyses

#### Analyses in-situ

De premières analyses réalisées en amont de notre étude par l'entreprise GINGER CEBTP a mis en évidence dans le ciment et la brique une concentration plus élevée que la normale de chlorures et de sulfates dans le ciment.

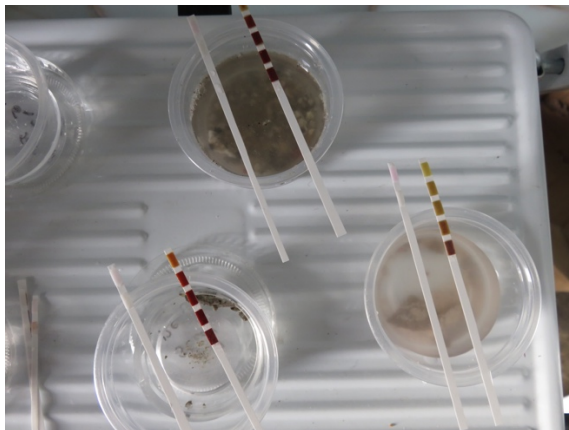
Lors de notre venue, nous avons également réalisé quelques prélèvements de sels et de matière (brique, opaline, pierre, joint, mortier).

Nous avons procédé de deux manières :

- Des échantillons ont été prélevés au bâtonnet de bois ou au scalpel puis mélangés à de l'eau déminéralisée et laissés au repos pendant 2h dans des pots de plastique avant la prise de mesure.
- Des compresses de coton imbibées d'eau déminéralisée ont été appliquées sur les joints présentant des cristallisations salines en surface.

Une fois les prélèvements effectués nous avons analysé la nature et la quantité de sels présents dans l'échantillon à l'aide de bandelettes Quantofix® pour chlorures et pour nitrates. Pour les échantillons mis à tremper dans l'eau déminéralisée, nous avons également vérifié la conductivité du mélange à l'aide d'un conductimètre (Modèle Hanna HI 98311, Précision  $\pm 2\%$ , Résolution  $1\mu S/cm$ ).

Les images ci-dessous montrent les différentes méthodes de mise en solubilisation des sels.



Vue des pots avec les échantillons de matière mis à tremper dans de l'eau déminéralisée



Vue d'une compresse d'eau déminéralisée sur un joint

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

	<b>Conductivité</b> μS/cm	<b>Chlorures</b> mg/L	<b>Nitrates</b> mg/L
EC 1 : FISSURE (rdc-col4-lig7)	2 120	0	0
EC 2 : JOINT (rdc-col1-lig6)	2 600	0	0
EC 3 : PIERRE (F4)	940	0	0
EC 4 : MORTIER (F1-col3-lig12)	3 999	0	0
EC 5 : SOUS ESCALIER	3 999	1 500	0

La plupart des échantillons prélevés et mis en solution dans l'eau déminéralisée ont montré une conductivité élevée de plus de 2 000 μS/cm, dont deux dans des valeurs supérieures à celles de la capacité d'analyse du conductimètre soit plus de 3 999 μS/cm. La conductivité nous montre la présence de nombreux ions en solutions.

Par contre les bandelettes ont montré des résultats négatifs sauf pour l'échantillon EC 5 qui a montré une concentration de 1 500 mg/L de chlorures. Au vu du contexte marin et des précédentes analyses ayant montré la présence de chlorures, il est curieux que nous n'ayons pas eu plus de réaction sur les bandelettes à chlorures. Les tests de bandelettes ne sont pas toujours fiables car ils dépendent de la quantité d'ions solubilisés dans le liquide analysé. Nos échantillons étaient peut-être trop dilués ou présentaient des types de sels pour lesquels nous n'avions pas de bandelette réactive.

Nous avons donc renouvelé des tests de bandelettes chlorures et nitrates en solubilisant les sels dans une compresse imbibée d'eau déminéralisée. Deux prélèvements ont été réalisés avec cette méthode. Cette fois les résultats se sont montrés plus concluants avec une détection de 2 000 mg/L de chlorures et une concentration très faible de 5 mg/L de nitrates dans l'un des échantillons.

La mesure de la conductivité a mis en évidence la présence de nombreux ions dans les divers prélèvements effectués et les bandelettes ont confirmé, sans grande surprise, la présence de chlorures. Cependant, la faible réactivité des bandelettes nous a aussi permis de conclure à une présence non-majoritaire des ions chlorures.

Nous avons donc cherché à pousser plus avant l'identification des sels par des analyses en laboratoire.

#### Analyses en laboratoire

Une analyse par diffraction des rayons X a été réalisée au laboratoire du CEMES à Toulouse. Les premières analyses ont montré la présence de :

- Un chlorure de sodium : Na Cl Halite, syn
- Deux carbonates de sodium : Na<sub>2</sub> H(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · (H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> Thermonatrite, syn et Na<sub>3</sub> H (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> Trona
- Un sulfate de sodium: Na<sub>4</sub> (SO<sub>4</sub>)(CO<sub>3</sub>).61 Burkeite, syn

La Halite est un chlorure de sodium caractéristique des embruns marins, sa présence est donc toute naturelle dans le contexte d'un phare. Les chlorures forment des sels solubles à très solubles qui pénètrent facilement dans les briques, les enduits et autres mortiers.

Les carbonates sont des sels peu solubles tandis que les sulfates forment des sels solubles à très solubles. Les carbonates de sodium et les sulfates de sodium sont des sels que l'on trouve généralement dans les ciments, les mortiers au ciment et les briques (certains sulfates de sodium). Ces espèces de sel peuvent aussi avoir pour origine des résidus de nettoyage chimique.

### *Origines des sels*

Les sels sont des composés ioniques regroupant des anions et des cations. Ils se forment en réaction d'un acide et d'une base. On peut distinguer deux catégories de sel : les sels primaires (ceux qui sont formés immédiatement) et les sels secondaires (qui sont le résultat d'une réaction entre les sels primaires). Plusieurs phénomènes peuvent avoir engendrés la présence de sels. Ces phénomènes peuvent coexister.

- **Réaction à l'environnement**

L'air marin par sa salinité est le premier facteur. L'humidité a permis le transfert et la pénétration des sels vers le mur.

La pollution de l'environnement (à priori peu impactant dans le cas d'un phare en bord de mer éloigné de tout contexte urbain) peut aussi favoriser l'acidité des pluies qui, en contact avec le bâtiment peuvent réagir et former des sels. Une fois ce processus enclenché, les variations d'humidité relative suffisent à l'entretenir.

**>>Les sels se formeraient donc via l'extérieur en surface et au cœur des matériaux poreux**

- **Réaction des matériaux en présence**

La réaction acide/base peut aussi être due à la mise en contact de deux matériaux différents comme par exemple la proximité du granit et du ciment qui forment des carbonates de sodium et/ou des carbonates de potassium.

**>>Les sels se formeraient au cœur des matériaux poreux**

- **Le facteur condensation**

Les carreaux d'opaline constituent un système de condensation qui permet de maintenir l'atmosphère de la tour du phare plus sèche. La condensation de la vapeur d'eau à la surface des carreaux permettait de faire baisser l'humidité de l'air à l'intérieur du phare.

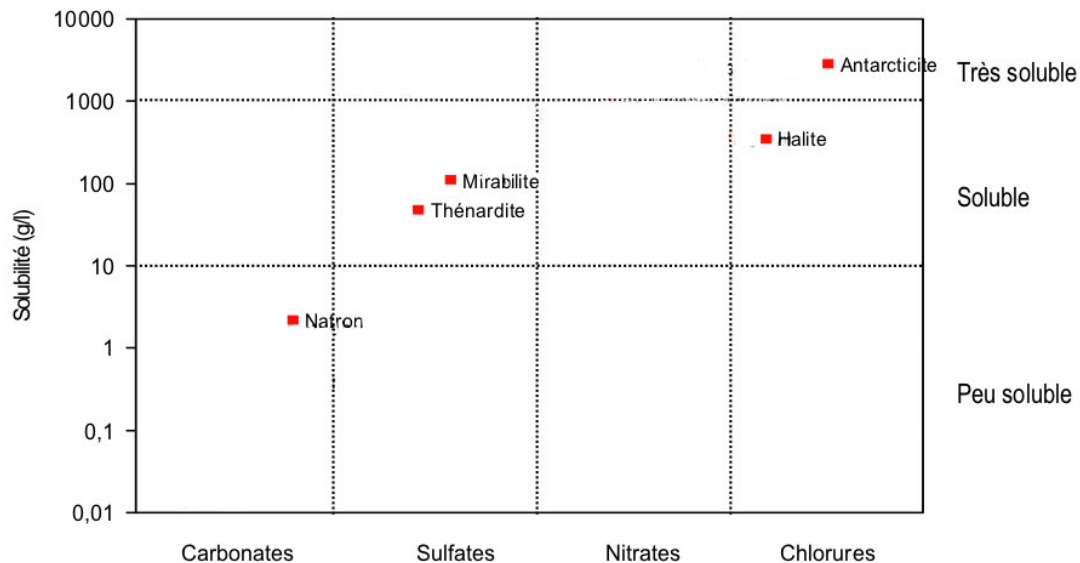
>>La condensation d'eau liquide ruisselant sur le mur favorise la création, la pénétration et la circulation de sels par la porosité des joints.

>>La condensation contribue à créer une différence de climat intérieur/extérieur en gardant un air plus sec et à orienter la circulation des sels. **Lesquels se retrouvent bloqués derrière les opalines.**

>>L'alternance des phases de condensation et de séchage en surface des carreaux fait alterner la dissolution et la cristallisation des sels ce qui engendre les dégradations observées.

Comme nous l'avons vu plusieurs sels sont en présence avec des humidités relatives d'équilibre propres. Le schéma ci-dessous permet de les situer approximativement pour mieux appréhender leur changement d'état

**Solubilité  $\Sigma$  : quantité maximale de sel qu'il est possible de dissoudre**  
 $\Sigma = f(\text{nature du sel, T, solvant})$



Les chlorures forment des sels solubles à très solubles qui pénètrent facilement dans les briques, les enduits et autres mortiers. Les carbonates sont des sels peu solubles tandis que les sulfates forment des sels solubles à très solubles.

### *Contraintes mécaniques des sels sur les carreaux d'opaline*

**Les sels sont une cause des altérations observées, liées à la pression de cristallisation.**

C'est le comportement physico-chimique des sels qui est à l'origine de certaines dégradations. Les sels alternent, en fonction de l'humidité relative ambiante, entre des phases de dissolution et de cristallisation. La dissolution permet au sel de se déplacer dans la porosité des matériaux. Sa cristallisation dans les zones libres (surface, pores, fissures, petites cavités) entraîne une contrainte mécanique qui est à l'origine de microfissurations puis de perte de matière.

Sur les matériaux minéraux tels que la pierre ou la céramique, la présence de sels peut se traduire par une surface pulvérulente ou une altération dite « en feuillets ». Sur les matériaux métalliques, les ions chlorures vont se combiner avec le métal pour former des oxydes peu stables qui vont « consommer » le métal sain, on parle alors de corrosion active.

La solubilité des sels est propre à chacun et est défini par l'humidité relative d'équilibre (HRE). **La dégradation dépend des caractéristiques du matériau (la nature de sa porosité en particulier) et de la fluidité des sels en présence.**

Les différents matériaux en présence brique, mortier, joints sont tous contaminés par les sels et réagissent différemment à la leur cristallisation.

**L'opaline étant en apparence en bon état physico-chimique et n'étant pas poreuse n'a pas d'altération liée directement à l'action chimique des sels. Ses altérations sont liées à l'action mécanique des sels qui entraînent des mouvements dans le mortier sur lequel elles sont fixées.**

**Le bris des opalines est favorisé par la dureté du joint qui bloque tout mouvement.** C'est pour cela que de nombreux feuilletages sont en périphérie du carreau.

Encore esthétique, l'état du revêtement en opaline n'en est pas moins dangereux. Effectivement les bris et chutes de fragments sont évolutifs à chaque variation climatique. En l'état le phare ne peut être ouvert au public sans risque.

## SOLUTIONS PROPOSÉES

3 solutions ont été envisagées :

- **Climatisation et consolidations ponctuelles des opalines in-situ** : pour un ralentissement des processus d'altération
- **Dépose et traitement des opalines d'origine, restauration fondamentale** : pour un assainissement du support et la conservation des opalines
- **Assainissement du support, restitution à neuf des carreaux d'opaline** : pour une remise en état du phare.

### Solution n°1 : Climatisation et consolidations ponctuelles des opalines in-situ

**Objectifs** : Ralentir le processus d'altération dans le plus grand respect des matériaux d'origine

**Description** :

La climatisation est une solution qui permettrait, en théorie, de ralentir et limiter les processus de dégradation en cours qui sont dus aux sels.

En stoppant la fluctuation du paramètre d'humidité relative, on arrête de fait les processus d'altérations dus aux sels sur la terre-cuite, le mortier et les opalines.

L'installation de la climatisation devra se faire dans le respect des travaux réalisés sur les bâtiments classés Monument Historique. Avant toute installation, il faudrait dans l'idéal pouvoir mener une étude climatique dans le phare pour bien calibrer la climatisation.

Il faudra voir avec un climaticien spécialisé comment l'air peut être brassé dans une structure tout en hauteur et ne pas oublier d'intégrer à la réflexion le paramètre de la chemise d'air entre les pierres extérieures et la maçonnerie intérieure du phare.

La climatisation devra maintenir le phare dans une humidité à 50% (+/-5%). La température devra être ajustée en fonction de l'humidité ambiante et de la température de surface des carreaux, afin d'éviter tout risque de condensation à la surface des carreaux. Un suivi climatique étroit et régulier devra être mis en place afin de suivre l'évolution des altérations des carreaux.

Afin de limiter le coût humain de cette veille climatique, nous recommandons qu'un système d'alertes automatiques soit mis en place afin de limiter les besoins de déplacement sur site. Néanmoins il sera nécessaire de se rendre sur place régulièrement lors de la mise en route de la climatisation puis d'affiner le programme de visites sur site en fonction de l'évolution des altérations.

Des consolidations d'urgence pour les fragments d'opaline en cours de désolidarisation pourront être réalisées in-situ. L'objectif étant de limiter les chutes et les pertes de fragments mobiles. Des tests de collage avec plusieurs résines devront



être envisagés afin de trouver la solution la plus adaptée à ces consolidations en milieu salin.

La présence de plusieurs espèces salines ayant des humidités relatives d'équilibre différentes rend difficile le contrôle total des sels. Aussi il est à craindre que la climatisation limite le processus d'altération sans le stopper. Les consolidations soumises aux mêmes contraintes mécaniques auraient aussi une durée de vie très limitée. Des interventions régulières seraient à prévoir.

Ces consolidations devront être limitées aux urgences seulement car sans possibilité de nettoyage des tranches et avec la présence de sels dans les joints de collage, la durabilité des résines de consolidation se trouvera réduite. Par exemple, si ces consolidations étaient réalisées à la résine époxyde optique le temps estimé avant son jaunissement se trouvera écourté à 5 ans au lieu de 10 à 15 ans dans des conditions optimales de conservation.

#### Intérêts :

- Intervention minimaliste conservant tous les matériaux d'origine.
- Ralentissement des processus d'altération

#### Limites :

- Le processus d'altération est ralenti mais non stoppé
- Demande un suivi constant et régulier.
- Impossibilité d'une consolidation globale due à la présence de sels et de salissures dans les joints et les fissures.
- Esthétiquement les altérations seront visibles.
- Jaunissement et affaiblissement de la résine dans un laps de temps court.

## Solution n°2 : Dépose et traitement des opalines d'origine

**Objectifs :** Une fois les carreaux déposés, assainir la maçonnerie tout en permettant un traitement optimal des carreaux en atelier.

#### **Description :**

Cette proposition comprend une étape de dépose des carreaux. Au vu des nombreuses fissurations déjà présentes sur les carreaux et des risques de casse inhérents à la dépose, **nous ne recommandons pas cette solution**. Elle nécessiterait des interventions de restauration très lourdes en atelier, sans compter une étape de dépose des carreaux très délicate, avec de nombreux risques de casse malgré la pose de facing (doublage par la face du carreaux) pour maintenir les fragments en place lors de la dépose.

De plus une fois déposé, se pose la question du stockage des carreaux pendant leur restauration. La plupart des restaurateurs spécialisés en verre ont de petits ateliers, le stockage des carreaux pendant leur restauration fera donc certainement l'objet d'une prestation complémentaire qui n'a pas été chiffrée ici.

L'assainissement du mur pourra se faire soit par un remplacement total de la maçonnerie interne (brique et mortier), soit par dessalement. Le remplacement de la maçonnerie permettrait d'opter pour un support plus approprié au contexte. Certaines pierres et/ou mortier ont une porosité davantage compatible avec la circulation des espèces salines. Il serait intéressant dans ce cas de se rapprocher du phare de l'île Vierge qui est encore en parfait état et qui a de nombreuses archives concernant sa construction.

Dans le cadre d'un assainissement par dessalement, la littérature scientifique sur ce sujet tend à montrer les résultats très mitigés de ces interventions quand elles sont faites sur des œuvres monumentales. De plus on peut s'interroger sur la pertinence d'un dessalement qui ne pourrait être que provisoire en milieu marin.

Les solutions hydrofuge sont à proscrire car elles créent des micro-climat et zones à dureté différentielle et participent à la création de nouvelles contraintes.

La restauration des opalines en atelier (transport, stockage, nettoyage, collage) entraînerait un coût très élevé (voir chiffrage). Les opalines devront être recollées. La colle époxy optique est difficilement réversible mais ses qualités d'adhésion, et sa grande résistance chimique et physique en font la résine la plus appropriée au collage de l'opaline conservée dans un milieu extrême. Néanmoins, son principal défaut est qu'elle finit par jaunir au bout d'une dizaine d'années.

L'installation d'une climatisation optionnelle en cas de remplacement de la maçonnerie interne permettrait de limiter les risques de condensation sur les carreaux et donc de prolonger la durée de vie de la restauration. La climatisation serait nécessaire en cas de simple dessalement de la maçonnerie.

Si cette solution était envisagée, la dépose devrait être réalisée par des restaurateurs ou par du personnel qualifié sous le contrôle d'un restaurateur.

#### Intérêts :

- Conservation des opalines.
- *Si remplacement de la maçonnerie interne* : élimination du problème salin.

#### Limites :

- Coût de l'intervention.
- Perte de matière importante au moment de la dépose.
- Jaunissement de la résine dans un laps de temps court et sur une surface importante.
- Lourdeur de l'intervention.
- *Si tentative de dessalement* : Risque élevé d'évolution des altérations mécaniques entraînant de nouvelles casses sur les opalines restaurées.

## Solution n°3 : Restitution à neuf des carreaux d'opaline

**Objectifs :** assainissement de la maçonnerie interne et remplacement des carreaux d'opaline.

### **Description :**

Cette solution consisterait à enlever les opalines actuelles pour les remplacer par des carreaux neufs. Les carreaux originaux ont été produits par Saint Gobain qui a conservé la formule d'origine et pourrait refaire ces carreaux à l'identique (coût unitaire du carreau de 135 € HT).

L'enlèvement des carreaux permettrait d'accéder au support (brique et mortier) et d'assainir par remplacement ou par dessalement (comme vu dans le chapitre précédent). Les nouveaux carreaux seraient mis en place en respectant l'agencement d'origine.

Les opalines d'origine ont eu une durabilité d'une centaine d'années. Cette durée de vie a été écourtée du fait de la présence de sels dans le mortier. On peut donc facilement estimer que de nouvelles opalines sur un support sain devraient avoir une durée de vie égale ou supérieure. Cette durée de vie pourra être encore rallongée si la climatisation est installée dans le phare, permettant de limiter le ruissellement des eaux de condensation.

#### Intérêts :

- Lisibilité de l'esthétisme d'origine.
- *Si remplacement de la maçonnerie interne :* Stabilisation à long terme du revêtement mural en opaline.

#### Limites :

- Perte des matériaux d'origine.
- *Si tentative de dessalement :* Risque d'évolution des altérations mécaniques entraînant de nouvelles casses sur les opalines neuves à long terme.

## Chiffrage des solutions

Le tableau ci-après présente les différentes solutions envisagées, leur coût et leur durabilité estimée.

SCENARI	TRAITEMENT DES OPALINES	COÛT ESTIMÉ TRAITEMENT OPALINES		AUTRES COÛTS À ESTIMER	DURABILITÉ
<b>N°1 : Climatisation et consolidations ponctuelles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidations ponctuelles (restaurateur)</li> </ul>	<b>20 000 € HT</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Climatisation</li> </ul>	<b>5 à 10 ans pour les consolidations</b>
<b>N°2 : Restauration fondamentale et climatisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dépose/ Repose des opalines (restaurateur)</li> <li>• Restauration des opalines</li> </ul>	150 000 € HT	<b>= 500 000 € HT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pose échafaudages (dépose/repose)</li> <li>• Assainissement/reprise maçonnerie</li> <li>• Climatisation</li> </ul>	<b>10 à 15 ans</b>
<b>N°3 : Restitution à neuf et climatisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achat opalines</li> </ul>	<b>230 000 € HT</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlèvement des opalines (professionnel du bâtiment)</li> <li>• Assainissement/reprise maçonnerie</li> <li>• Pose des opalines (professionnel du bâtiment)</li> <li>• Climatisation</li> </ul>	<b>100 ans minimum</b>

Le remplacement des opalines est l'option la plus intéressante en termes d'investissement/durabilité. La restauration fondamentale est l'option qui représente le budget le plus important pour une durabilité courte. Enfin la solution de climatisation et de consolidations ponctuelles présente une durabilité moindre mais sur un nombre limité de carreaux, le reste étant sauvegardé grâce à la régulation du climat. Cette dernière option nécessite la mise en place d'un suivi climatique étroit afin de suivre l'évolution des altérations des carreaux.

## CONCLUSION

Le phare du Cap Béar présente de nombreuses dégradations évolutives. Les traces d'intervention anciennes attestent de l'ancienneté des problèmes et de nombreux éléments d'origine sont aujourd'hui disparus. Actuellement, le revêtement mural en opaline est en péril rendant l'accès au phare impossible au visiteur.

Le milieu marin, les matériaux de fabrication rendent la stabilisation du revêtement mural complexe. Effectivement ravagée par les sels la maçonnerie interne bouge entraînant des contraintes mécaniques sur les carreaux d'opaline finissant par les briser.

Dans l'optique d'une ouverture au public, impliquant une nécessité esthétique et sécuritaire (absence de chute de fragments de verre) et du rapport investissement / durabilité de l'intervention nous recommandons un assainissement du support par remplacement du mortier et par pose d'opalines neuves (solution n°3).

La perte des matériaux d'origine, qui est la principale limite de cette intervention est à relativiser dans le contexte du phare du Cap Béar. Effectivement le remplacement pourrait s'inscrire dans la même optique que la restitution du décor de marqueterie aujourd'hui totalement disparu. De même ce serait l'occasion de réfléchir à la volonté ou non de rendre au phare son aspect d'origine en revêtant les regards (aujourd'hui en bois) d'opaline comme lors de sa construction. Il serait toutefois intéressant de conserver quelques carreaux d'origine en bon état pour une présentation au public et pour les archives.

Un échantillon d'opaline est en cours d'analyse à la SARL ETUDES-RECHERCHES-MATERIAUX à Poitiers pour appréhender le degré de contamination saline du verre. À l'heure du rendu de cette étude, les résultats ne nous sont pas encore parvenus. Si cette analyse est nécessaire à la compréhension des processus de dégradation à l'œuvre sur les opalines, les résultats ne viendront pas pour autant modifier les solutions proposées dans cette étude. Cependant nous ne manquerons pas de communiquer les résultats d'analyse au donneur d'ordre dès leur réception.

D'autre part, il serait pertinent de mener une réflexion d'ensemble sur la conservation des phares à revêtement d'opalines. Cette réflexion permettrait d'analyser, de comprendre et de comparer les processus d'altération pour développer des solutions les plus adaptées à chaque cas. L'exemple du phare du Cap Béar pourrait servir de cas d'étude et de projet pilote pour le développement de solutions pérennes pour les autres phares.