

# LE PONT CHARLES-MARLIN (SAINT-GEORGES-NIGREMONT, CREUSE) HISTORIQUE ET CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE DES DÉSORDRES

---

## THE "CHARLES-MARLIN" BRIDGE (SAINT-GEORGES NIGREMONT, CREUSE) HISTORY AND PRELIMINARY ASSESSMENT OF PATHOLOGIES

---

**Vincent THIERY**

IMT Lille-Douai, Département « Génie Civil et Environnemental »,  
Laboratoire de génie civil et de géo-environnement (LGCgE), 765 Boulevard Lahure,  
59500 DOUAI, France – [vincent.thiery@imt-lille-douai.fr](mailto:vincent.thiery@imt-lille-douai.fr)

---

### 1. INTRODUCTION, CONTEXTE ET DÉMARCHE

Le pont Charles-Marlin, situé sur la commune de Saint-Georges-Nigremont (Creuse, France, figure 1), également connu sous le nom de « viaduc de Lascaux », est un bel exemple de pont en béton armé des années 1930. Il est le fruit d'une volonté locale de relier un hameau excentré, Lascaux, à un axe routier principal, dont il est séparé par la vallée de la Rozeille. Une loi de 1930 sur le désenclavement des hameaux de plus de 50 habitants permettait à l'état de subventionner à taux élevé la construction de chemins accédant à ces villages. C'est dans ce cadre qu'en septembre 1933 fut mise au concours la construction d'un pont reliant la route (RD 18) Magnat-l'Étrange - Pontcharraud au hameau de Lascaux (70 habitants à l'époque). Le cahier des charges établi à cette occasion détaille tous les aspects relatifs à la construction, notamment en terme de choix

des matériaux quelle que soit l'issue retenue pour cet ouvrage (béton, maçonnerie...).

Seuls deux bureaux d'études semblent avoir répondu : la compagnie Lyonnaise d'entreprises et travaux d'art ainsi que le bureau d'études Pelnard-Considère & Caquot. C'est ce dernier qui a remporté le concours. Mentionnons que ce bureau d'étude a été fondé en 1906 par Armand Considère (1841-1914), X-ponts, inventeur de la technique du béton fretté. Un de ses gendres, Louis Pelnard (ingénieur des Mines) le rejoint en 1910, puis c'est au tour d'Albert Caquot (X-ponts) de rejoindre la société en 1912. Le bureau d'études prend alors son nom. A.Caquot s'est illustré notamment par la réalisation du second pont de la Caille (viaduc des Usses) près d'Annecy, qui détint en son temps le record mondial de portée des ponts en béton (140 m), ou encore par la conception de la grande écluse de Donzère-Montdragon (24 m de chute) ainsi que la structure interne du Christ rédempteur de Rio de Janeiro.

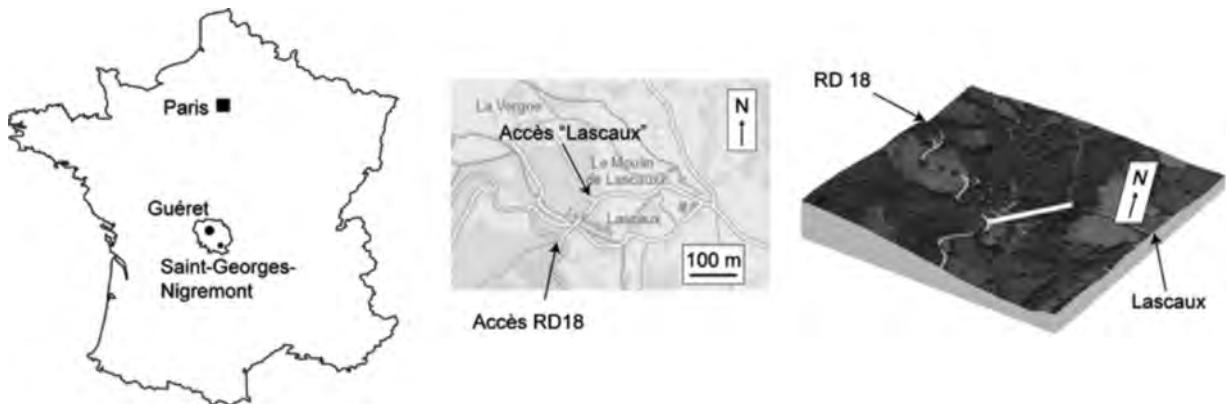


Figure 1. Localisation de la commune de Saint-Georges-Nigremont où se situe l'ouvrage et localisation de celui-ci sur carte topographique (IGN FranceRaster) et modèle numérique de terrain RGEAltı au pas de 1 m (la localisation du pont est soulignée par un trait blanc).

L'ouvrage en béton armé fut construit de juin 1934 à août 1935 par Henri Durand, entrepreneur à Ferrière-la-Petite (Nord). Le décentrement de l'arc eut lieu en juillet 1935. Les épreuves de test quant à elles eurent lieu le 10/10/1935. Elles consistent en divers chargements par poids morts et charges roulantes. Le chargement maximum de l'arc atteignit 160 t. La déformation mesurée sur l'arc nord fut nulle, sur l'arc sud elle fut de 4 mm (Isnard, 1936).

Le pont fut inauguré le dimanche 27/10/1935 en présence de divers élus et de la veuve de son bienfaiteur. La cérémonie est rapportée dans le « messager de la Creuse » du 30/10/1935 ainsi que dans « l'éveil de la Creuse » du 1/11/1935. Reproduisons ici une partie d'un discours prononcé lors de l'inauguration (on peut supposer qu'il s'agit du maire de la commune) :

« *L'ouvrage, dont le ministre approuva les dispositions techniques par décision du 6 décembre 1933, mesure près de 140 mètres de longueur ; il est constitué par une arche centrale de 70 mètres de portée, surbaissée au septième, enjambant la vallée, avec, comme raccordement, deux travées droites sur palés. Il culmine de 17 mètres sur le lit de la Rozeille. Arc-bouté aux parois rocheuses de la gorge, il présente une très grande stabilité, et les travaux de décentrement aussi bien que les épreuves diverses qu'il a subies, n'ont produit que des flèches insignifiantes,* »

*caractéristiques d'une excellente construction. Sa sveltesse, son très grand coefficient de hardiesse, permettent de dire et d'affirmer que le béton armé dont il est construit, matériau extrêmement souple, se prête actuellement à toutes les exigences du génie civil. »*

On peut noter que cet ouvrage remarquable, situé en région rurale, a fait l'objet de l'édition de cartes postales (figure 2 a), ce qui permet d'avoir une base de référence iconographique pour son étude. Un article paru dans la revue « Le constructeur de ciment armé » en 1936 (Isnard, 1936) présente quelques photos de la construction (figure 2 b et d). On sent que ce pont a marqué les curieux puisqu'on arrive encore aujourd'hui à se procurer des photographies d'époque (figure 2 c). En résumé, une comparaison entre son état initial et son état actuel est rendue possible (figure 2 d et e). Les archives nationales du monde du travail (Roubaix), qui conservent les archives du bureau d'étude Pelnard-Considère & Caquot, possèdent le dossier relatif à ce pont : plans, notes de calcul... (figure 2 f-i).

La présente étude s'inscrit dans une démarche de connaissance de cet ouvrage afin de comprendre les raisons qui ont amené à sa dégradation et de pouvoir fournir aux décideurs locaux des éléments en vue de l'éventuelle réhabilitation de ce pont.



Figure 2. a : carte postale ancienne (collection de l'auteur) contemporaine de l'ouverture du pont.

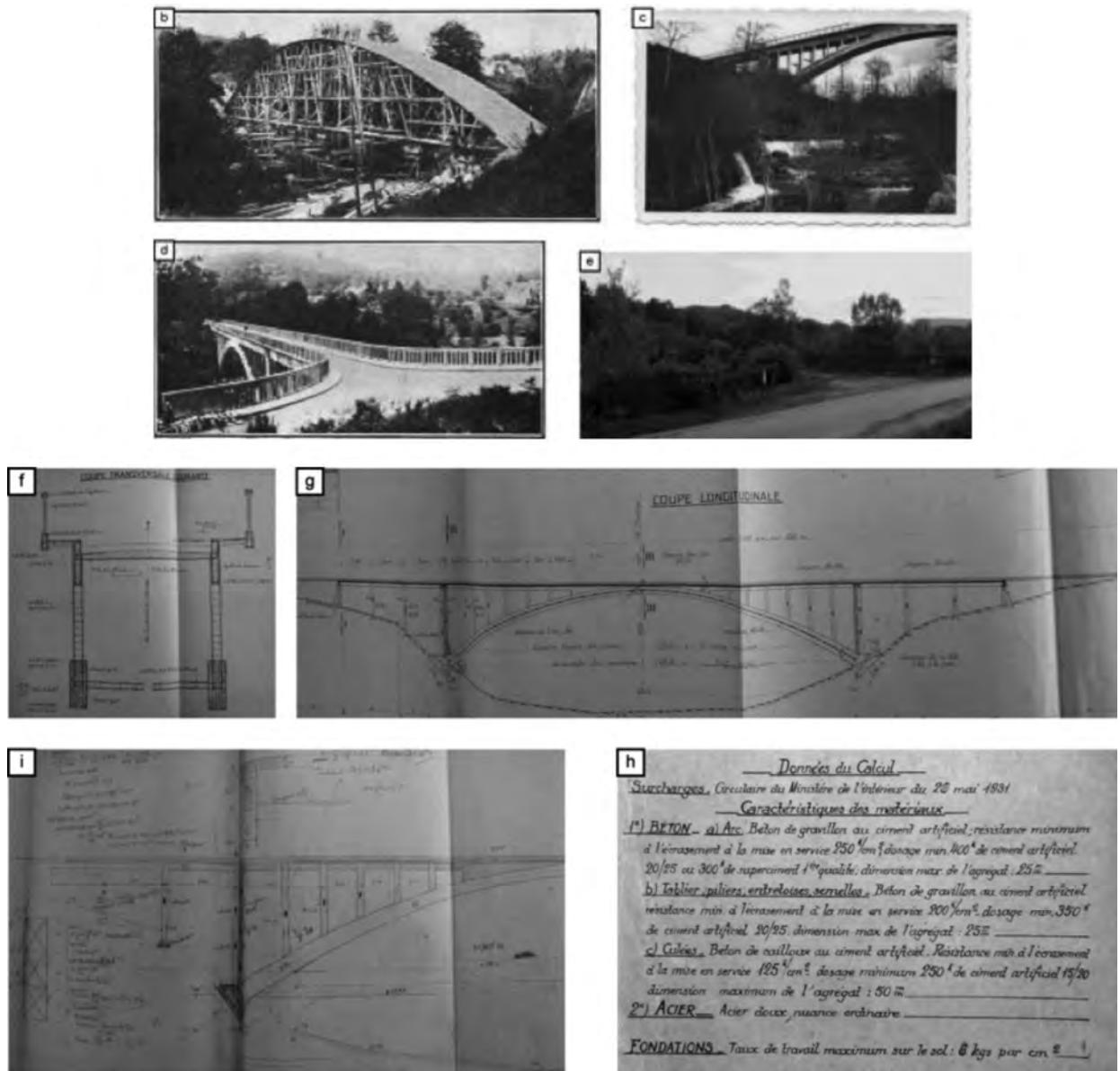


Figure 2. b : construction de l'arc (Isnard, 1936). c : photo du pont le 6/6/1937 (collection de l'auteur)

d : vue sur le pont depuis la RD 18, peu après son inauguration (Isnard, 1936).

e : même vue qu'en d, mai 2018. f à i : divers documents d'archives relatives au pont (coupes, notes manuscrites, données de calcul). Sources : archives nationales du monde du travail.

## 2. ÉTAT DES LIEUX DE L'OUVRAGE

Le pont Charles-Marlin a été fermé à la circulation définitivement en 1980, après avoir fait l'objet de restrictions de circulations (tonnage maximal) au cours des années 1960. Il a failli être démolie en 2004. Le long de la D18 reliant Magnat-l'Étrange à Pontcharraud, au détour d'un virage, on l'aperçoit furtivement, fermé par un grillage et caché par la végétation (figure 3 a) ; des panneaux de circulation rappellent que son accès est interdit. Côté Lascaux, la portion entre l'ancienne route d'accès au pont et la route de dérivation et complètement noyée dans la végétation. En prenant de l'altitude à l'aide d'un drone (figure 3 b), on réalise vraiment la portée de l'ouvrage dans son cadre. Différents chemins et routes permettent de tourner autour de

l'ouvrage et de l'observer dans de bonnes conditions (figure 3 c & d).

Outre l'aspect de délabrement lié à l'abandon, on peut observer un certain nombre de désordres sur l'ouvrage. La localisation des phénomènes illustrés dans cet article est rappelée en figure 4.

Une fissure partant du tablier (figure 5 a et b) et se prolongeant dans une des piles principales est particulièrement évidente, son ouverture varie au cours de l'année (communication personnelle des habitants de la maison située à proximité immédiate de l'ouvrage, côté route principale). Cette fissure se propage également sur la pile située en face opposée. Cette observation peut être également faite sur la pile côté Lascaux sur l'autre rive (figure 5 d).

Les arcs présentent de la corrosion des armatures en de nombreux endroits (figure 6), qu'il s'agisse des faces internes ou

externes, de l'intrados ou de l'extrados. On peut également observer des phénomènes de ségrégation du béton : les granulats sont concentrés à la base de l'arc (figure 6 c), laissant supposer de grandes irrégularités de placement. Notons également que les entretoises montrent également fréquemment une

corrosion importante à leur jonction avec l'arc (figure 6 d et e). Signalons enfin à titre de curiosité esthétique la présence fréquente de contre-empreinte des planches ayant servi à mouler le béton (figure 6 f, cette observation est de plus réalisable en différents endroits du pont, pas seulement sur les entretoises).



Figure 3. État des lieux général du pont. a : vue du pont tel qu'on le voit depuis la RD 18 au sud de l'ouvrage. Mai 2018.

b : vue en drone en direction du nord-ouest, on voit la face « Rozeille ». Avril 2017.

c : le pont en contre-plongée depuis le moulin de Lascaux (nord-ouest). Avril 2017.

d : vue le long de la Rozeille en direction du nord-ouest. Avril 2017.

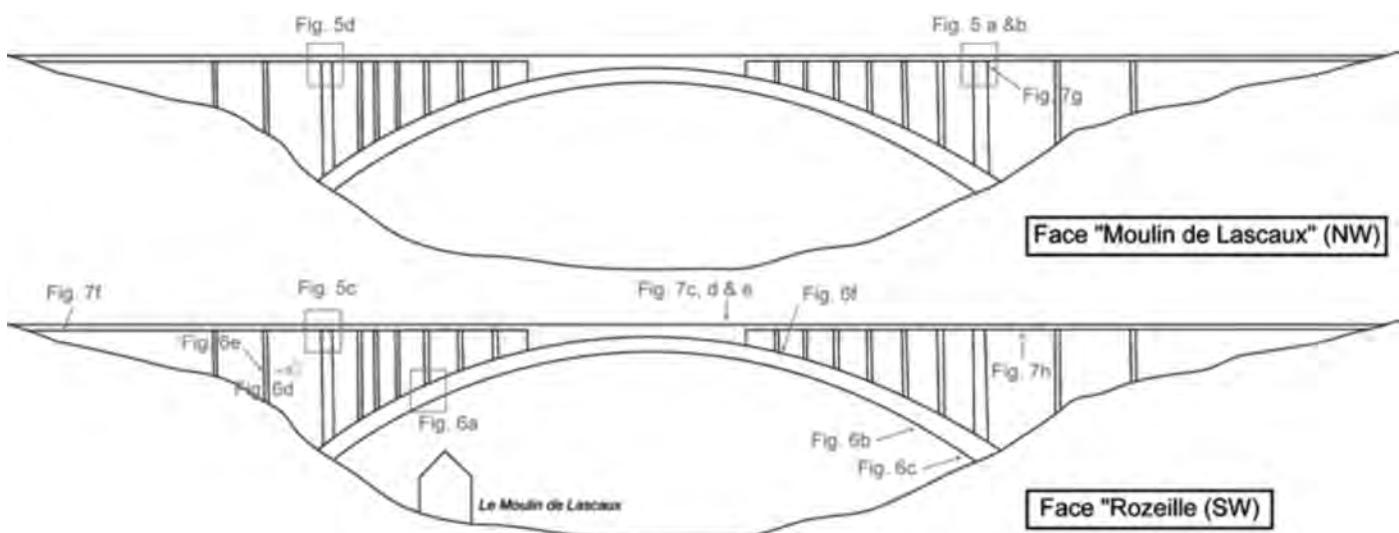


Figure 4. Élévations des deux faces du pont localisant les photos des figures suivantes.



**Figure 5. Observations sur les piles. a : pile faisant face au moulin de Lascaux (façade nord-ouest du pont) et détail en b. On note la présence d'une fissure majeure plurimétrique. Avril 2017.**

**c : cette fissure se retrouve sur la pile située à l'autre face. Mai 2018.**

**d : la pile située sur la rive Lascaux, façade nord-ouest, montre également une fissuration importante. Mai 2018.**

Le tablier a un aspect très légèrement bombé, en accord avec les plans (figure 2 f). La végétation est abondante : placages herbeux, arbustes, mousse (figure 7 a et b). Sur sa partie supérieure (voie de roulement, le béton est apparent, sans macadam), les fissures sont abondantes (figure 7 c), pouvant dépasser un mètre de longueur pour quelques millimètres de largeur, elles sont soit dans l'axe du pont soit transversales et sont emplies

de cristallisations blanches. Localement, le béton est complètement désagrégé (figure 7 d). On les observe également, longitudinales, au niveau des trottoirs du pont (figure 7 e). Au niveau des flancs du tablier, on peut observer, tout comme signalé ci-dessus pour l'arc, une ségrégation des granulats (figure 7 f), rendue bien visible là où le béton est abîmé par la corrosion des armatures.

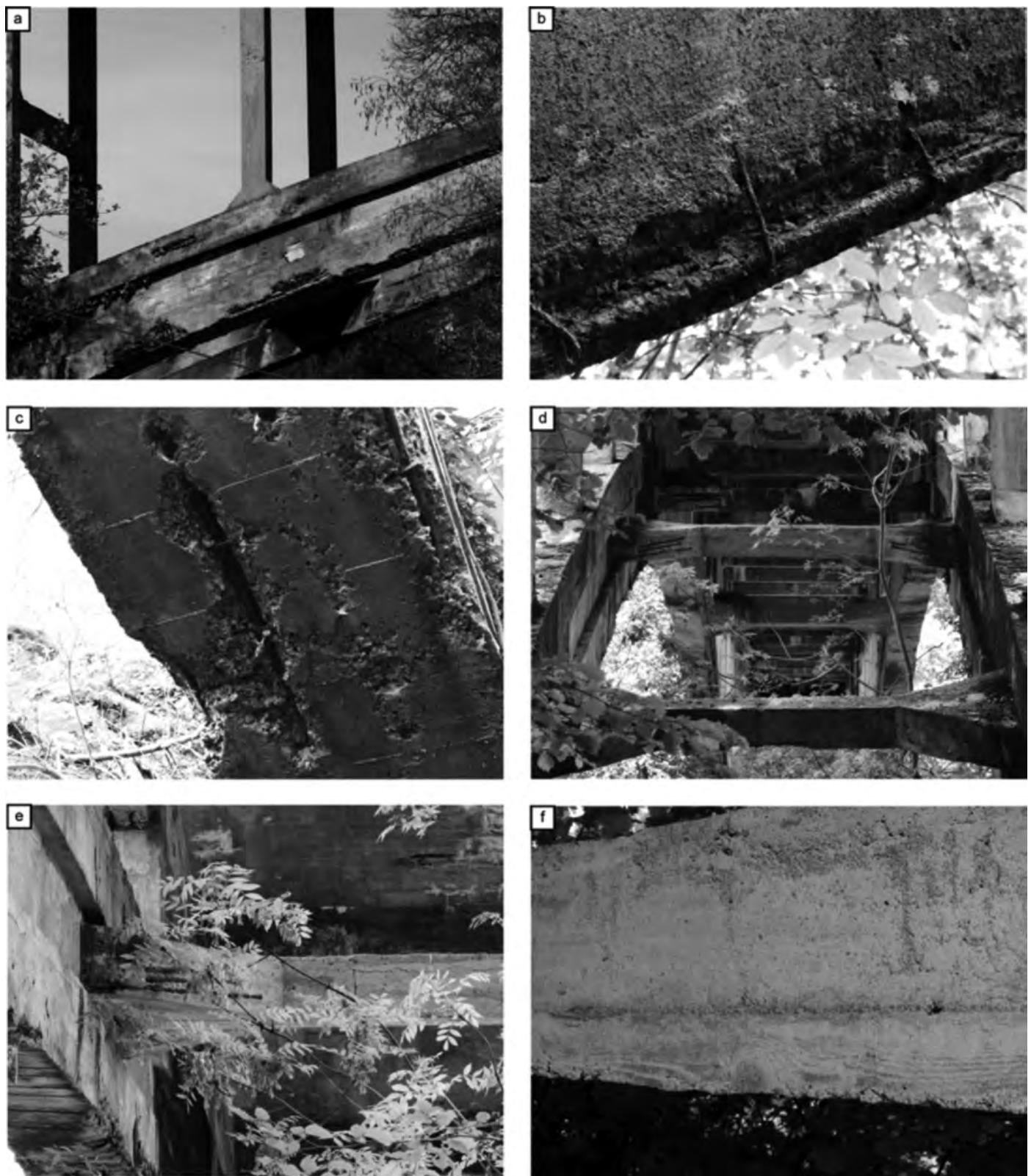


Figure 6. Observations de corrosion des armatures sur l'arc et les entretoises.

a : vue détaillée de l'arc (voir figure 4 c) sur la face sud-est. Avril 2017.  
 b : vue rapprochée de l'arc interne rive Lascaux face Rozeille. La corrosion des armatures les met à nu sur plusieurs dizaines de centimètres de longueur, tout comme sous l'arc (c) à la base de celui-ci (arc rive Lascaux côté Moulin) : de gros morceaux de béton sont tombés. On observe également une ségrégation importante des granulats, les plus grossiers se situant à la base de l'arc. Mai 2018. d et e : les entretoises montrent localement une forte corrosion des armatures, notamment au contact avec l'arc. Vue dans l'axe du pont en direction de Lascaux. Mai 2018. f : on observe fréquemment sur les entretoises ainsi que sur le tablier la contre-empreinte des planches de bois ayant servi à mouler le béton. Mai 2018.

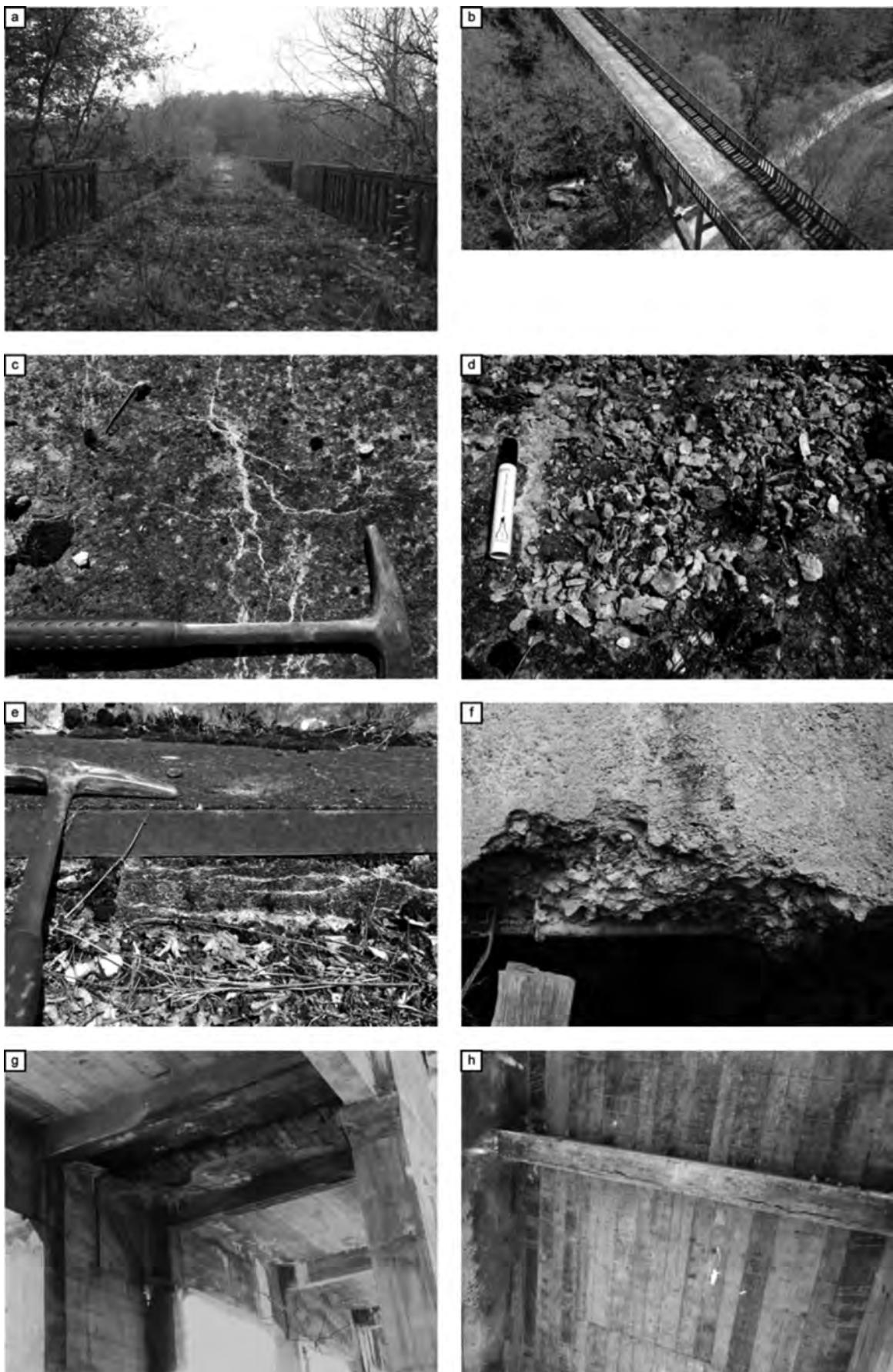


Figure 7. Observations sur le tablier. a : vue dans l'axe du pont depuis le côté Lascaux en direction de la RD 18. Novembre 2016. b : vue en drone depuis le moulin de Lascaux. Avril 2017 : la végétation printanière n'a pas encore percé. c : fissures sur le tablier, emplies de cristallisations blanchâtres. Avril 2017. d : béton désagrégeé se délitant en cailloutis sur le tablier. Avril 2017. e : fissures longitudinales dans le trottoir. Avril 2017. f : corrosion des armatures et ségrégation des granulats sur le flanc du tablier, face Rozeille. Mai 2018. g : importante corrosion des armatures et délitement du béton sous le tablier entre les 2 piles côté moulin de Lascaux. Mai 2018. h : entretoise fissurée (sans remplissage de la fissure) sous le tablier côté Lascaux. Novembre 2016.

La présence de nombreuses fissures emplies de cristallisations nécessite la réalisation d'une étude microstructurale afin de lever le doute sur la présence éventuelle de pathologies du béton, les problèmes structuraux et de carbonatation ne semblant pas être les seules responsables du mauvais état du pont. Cette étude doit permettre également de donner des indications sur le(s) type(s) de ciment(s) utilisé(s) pour la construction.

### 3. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Les photos de l'ouvrage et échantillons présentés et étudiés dans cet acte (outre les documents anciens) ont été effectuées lors de campagnes de terrain en novembre 2016, avril 2017 et mai 2018. Les lames minces et échantillons polis ont été réalisés selon des procédés classiques (Humphries, 1992), pour certaines d'entre elles, de la fluorescéine a été ajoutée à la résine afin de pouvoir travailler en microscopie en fluorescence. L'étude pétrographique du béton a été conduite selon les méthodes classiques (Jepsen & Christensen, 1989; French, 1991).

L'étude des blocs polis en lumière fluorescente a été faite sur un macroscope Zeiss AxioZoom, les lames minces ont été étudiées sur ce même microscope ainsi que sur un microscope polarisant Leica DMRXP. Les clichés MEB (BSE) et la microanalyse EDS

ont été réalisées sur un MEB Hitachi S-4300SE/N (Hitachi High-Technologies corporation, Tokyo, Japon) couplé à un détecteur EDS ThermoScientific Ultradry (Thermo Fischer Scientific Inc., Waltham, MA, USA).

Cette étude préliminaire repose sur des prélèvements réalisés manuellement sur le pont, là où la dégradation était suffisante pour prendre des fragments sans besoin de réaliser des carottages. Un échantillon d'environ 10 x 5 x 5 cm détaché de la face inférieure du tablier a ainsi pu être prélevé sans soucis. Pour l'étude de la face supérieure du tablier, des échantillons ont été prélevés facilement sur une zone où le béton est très friable, libérant des morceaux tant de taille centimétrique que légèrement plus gros (figure 4 f).

### 4. ÉTUDE MICROSTRUCTURALE DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONSTRUCTION

#### 4.1. Caractérisation des granulats

En conformité avec le cahier des charges imposé par la mairie (figure 8 a, voir § 1), le sable et les granulats utilisés pour la réalisation du béton du pont Charles-Marlin sont de source locale et presque exclusivement de nature granitoïde.

**a** QUALITÉ ET PRÉPARATION DES MATERIAUX

SABLE -

Le sable proviendra du concassage de roches amphiboliques, granitiques ou porphyriques, la grosseur des grains ne dépassera pas 5 m/m et ne sera pas inférieure à 1/2 mil. la proportion des grains de cette dernière dimension ne dépassera pas 30%.

GRAVILLON - Article 16 -

Le gravillon sera de nature amphibolique, granitique ou porphyrique et très dur, bien pur, sans matières étrangères, sa grosseur de six à vingt-sept m/m. Il sera soumis à l'agrément

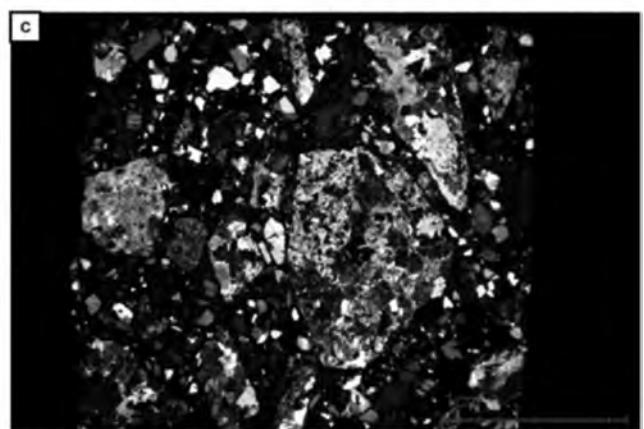
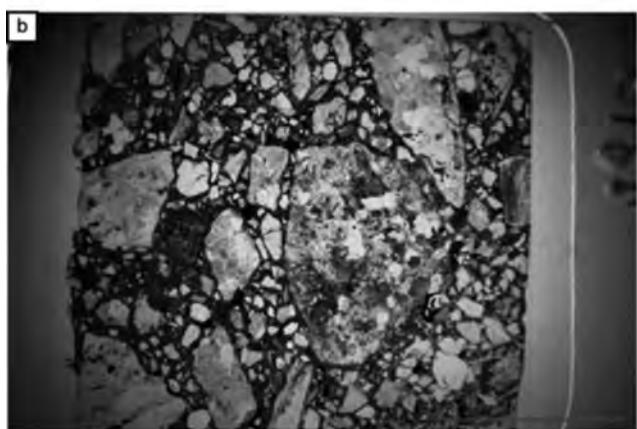


Figure 8. a : extrait du cahier des charges de la construction du pont.  
b et c : scans de lames minces du béton du pont Charles-Marlin illustrant le sable et les granulats (polariseurs parallèles et croisés, respectivement).

On observe dans le sable essentiellement des minéraux issus de la désintégration d'un granitoïde : quartz et feldspath, micas (figure 8 b et c).

Les granulats quant à eux montrent une minéralogie typique de granitoïde (figure 8 b et c) ; on observe fréquemment de la cordiérite plus ou moins altérée comme dans la majorité des granitoïdes du massif de Guéret (Rolin *et al.*, 2008; Cartannaz, 2006). Le quartz présente très fréquemment une extinction ondulante et des phénomènes de recristallisation en sous-grains. Des sulfures (pyrite et/ou pyrrhotite) ont été observés, notamment en

pourtour de certains granulats, ainsi que sous forme de veines dans ceux-ci. De l'amphibolite a été observée, en accord avec les contraintes du cahier des charges.

## 4.2. Caractérisation du liant

Au microscope optique, les nombreuses reliques de clinker Portland anhydres présentes dans la pâte indiquent l'utilisation d'un ciment Portland (figure 9 a et b).

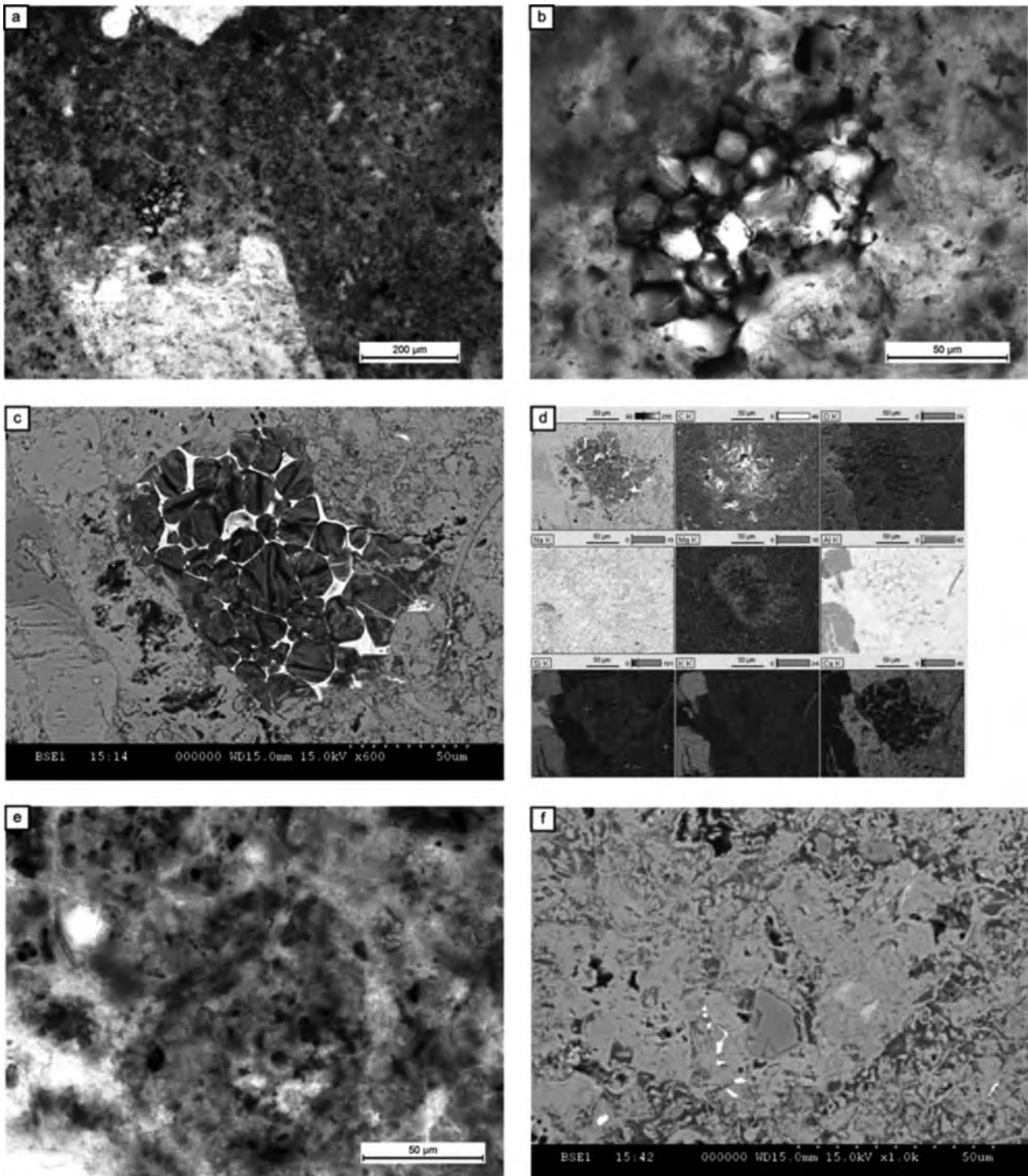


Figure 9. a : vue générale (microscopie optique, lumière transmise) de la pâte de ciment d'un échantillon prélevé sous le tablier. On note l'abondance de particules orangées, qui dominent en quantité celles du clinker anhydre. b : détail (microscopie optique, lumière transmise) d'une particule de clinker Portland non hydratée. c et d : vue au MEB-BSE et cartographie élémentaire de la même particule qu'en b. e : particule orangée, dont le type est observé en abondance dans la pâte de ciment. f : vue au MEB-BSE de la même particule.

Dans les échantillons provenant de la **partie supérieure du tablier** on observe uniquement des reliques de clinker Portland anhydre, aucun ajout (laitier, cendre volante...) n'a été observé. Dans les échantillons provenant de la **partie inférieure du tablier**, on retrouve aisément de nombreuses particules de clinker Portland anhydre. Elles ont une morphologie typique (figure 9 c), les phases cimentaires sont bien individualisées. Le diamètre de ces particules est au maximum de l'ordre de 100 micromètres. Une cartographie EDS (figure 9 d) révèle que ces phases sont très riches en Mg ; on n'observe plus de Ca en lieu et place des silicates calciques ( $C_2S$ ,  $C_3S$ ).

Sur l'échantillon étudié, la pâte de ciment n'est pas grise mais rose-orangée (figure 10 b). Ceci se traduit, en lame mince, par l'abondance de particules de même taille que les anhydres de Portland (50 – 100 micromètres de diamètre), caractérisée par cette teinte orangée (figure 9 a). Elles sont polyphasées mais l'agencement entre les phases n'est pratiquement pas résolu en microscopie optique (figure 9 e) ; au MEB-BSE (figure 9 f) le contraste chimique avec la pâte de ciment environnante est pratiquement inexistant. Des analyses EDS (non illustrées ici) mettent en avant leur chimisme essentiellement calcique.

## 5. ÉTUDE MICROSTRUCTURALE DES DÉSORDRES OBSERVÉS

A l'issue de la première campagne de prélèvements et d'observations (novembre 2016), il apparut que les principaux désordres (fissures, délitement du béton) se situaient sur la partie supérieure du tablier, une attention particulière leur a été portée. Toutefois, un certain nombre d'observations macroscopiques sur les autres parties du pont ont été depuis réalisées, il convient donc de rester prudent quant à la généralisation des travaux présentés ici.

Des observations en comparant des blocs polis en lumière naturelle/lumière UV (figure 10) mettent aisément en évidence une fracturation intense du béton, qu'il s'agisse d'un échantillon provenant du dessus du tablier (figure 10 a) ou du dessous (figure 10 b). Les contrastes de luminescence en lumière UV mettent également en évidence des différences de ratio E/C et donc un mélange inégal.

Les évidences microstructurales de désordres sont nombreuses dans les échantillons prélevés sur le tablier là où on observe du béton désagrégé (figure 7 f). La plus évidente est la présence d'un déchaussement des granulats de la pâte de béton (figure 11 a) ; ceux-ci sont localement ceinturés d'ettringite (figure 11 b). Toutefois, une microanalyse EDS (figure 11 c) révèle que l'on est probablement en présence d'un intermédiaire au sein de la solution solide ettringite-thaumasite (Macphee & Barnett, 2004; Torres *et al.*, 2004). Au-delà de cette morphologie typique, on observe localement en abondance de l'ettringite fibreuse en remplissage de veines qui coupent la pâte de ciment, qui traversent les granulats et qui peuvent même localement les pénétrer (figure 8 d).

Les porosités sont toutes remplies (figure 10 a : on devine le remplissage par des produits blanchâtres) par des minéraux en fibres très fines. Là encore, la microanalyse EDS (figure 11 e) révèle un intermédiaire ettringite-thaumasite.

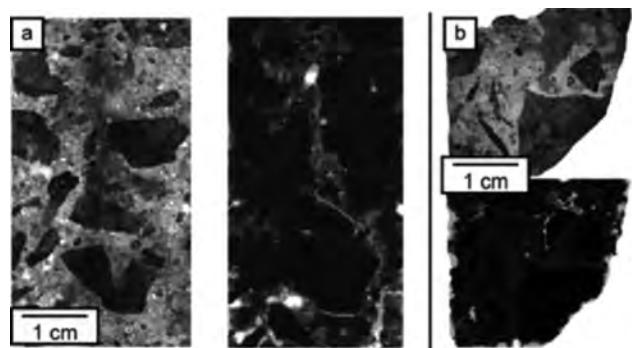


Figure 10. Comparaison entre lumière naturelle et lumière UV d'échantillons polis du pont Charles-Marlin. a : échantillon prélevé sur le tablier. b : échantillon prélevé sous le tablier.

Associées à ces veines on peut observer localement des cristaux de calcite dits « en popcorn », c'est-à-dire qu'ils surgissent au sein de la matrice de pâte de ciment (figure 8 g).

Enfin, des veines recoupent localement la pâte de ciment (figure 8 h et i). Elles peuvent avoir des compositions originales, vraisemblablement des hydrates de calcium et d'aluminium.

## 6. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Même si l'on ne peut exclure des désordres structuraux au niveau de l'ouvrage compte tenu des fissures observées sur certaines piles, l'étude microscopique révèle plusieurs pathologies liées à la nature du béton et à son évolution, ainsi que probablement à la nature du ciment utilisé.

Le ciment Portland utilisé dans la partie inférieure du tablier (figure 6 a, e, f & g) est soit un ciment composé à l'aide d'une pouzzolane qui reste à identifier, soit il s'agit d'un problème de ciment mal cuit, vraisemblablement trop peu cuit car les phases ne sont pas différenciées (Hofmänner, 1973).

À l'échelle macroscopique, la présence sur l'ouvrage de fractures longitudinales et d'une fissuration anarchique laissent présager (Godart, 2017) une pathologie de type formation d'ettringite différée (DEF). Celle-ci se confirme à l'échelle microscopique avec la présence d'ettringite ceinturant les granulats (Taylor *et al.*, 2001; St John *et al.*, 2016). La présence de calcite en popcorn (PCD) est quant à elle plus problématique car elle est associée à la forme thaumasitique de l'attaque sulfatique (Hagelia & Sibbick, 2009). Dans le cas présent, il est difficile de concevoir une attaque sulfatique externe (pas d'eaux séléniteuses), mais la richesse locale en pyrite/pyrrhotite des granulats induit une source conséquente de soufre. Notons toutefois que l'ettringite analysée ici ne correspond absolument pas à de l'ettringite pure, on se situe au sein de la solution solide ettringite-thaumasite (Macphee & Barnett, 2004; Barnett *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2004).

Même si des évidences microstructurales de réaction alcali-granulat ont été observées sous la forme de fissures dont la morphologie rappelle la RAG, aucun produit typique n'a été analysé jusqu'à présent.

De nouveaux échantillons prélevés en mai 2018 sur l'autre côté du tablier (accès route principale), sur une pilette fissurée, sous le tablier, permettront de compléter les observations sur le ciment et les pathologies.

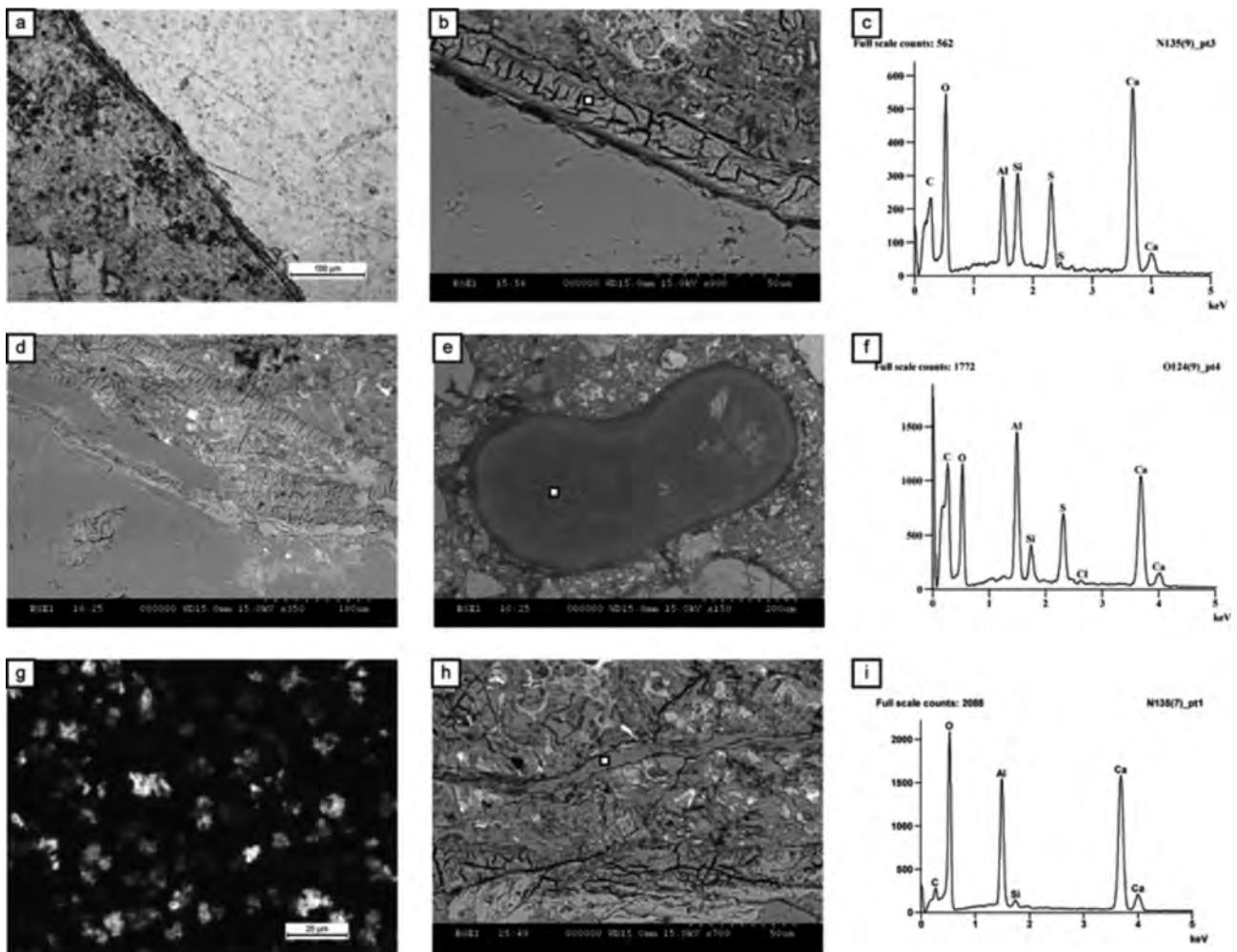


Figure 11. a : morphologie typique d'ettringite correspondant à de la formation d'ettringite différée (DEF), microscopie optique, lumière transmise. b : cliché MEB-BSE de l'interface entre un granulat granitique (plage de quartz) et la pâte de ciment, emploie d'un intermédiaire ettringite-thaumasite (analyse EDS en c). d : veines d'intermédiaires ettringite-thaumasite qui traversent tant la pâte que les granulats. e : porosité emploie d'un minéral fibreux, analyse EDS en f (intermédiaire ettringite-thaumasite). g : Cristallisation de calcite en popcorn (PCD), microscopie optique, polariseurs croisés. h : veine traversant la pâte de ciment, microanalyse EDS en i. Les localisations des analyses EDS sur les clichés b, e et H sont indiquées par un carré noir à fond blanc.

Rappelons enfin, à titre historique, que ce pont a été construit avant la description de la réaction alcali-granulats (Stanton, 1940) et bien avant celle de la formation d'ettringite différée, connue depuis les années 1980, ou encore de la formation de thaumasite, de description encore plus récente. Nous ne pouvons pas non plus passer sous silence la rumeur, encore tenace de nos jours, de vols réguliers de ciment sur le chantier.

## REMERCIEMENTS

La mairie et le maire de Saint-Georges Nigremont, M. Roulland, pour les échanges au sujet du pont et l'autorisation d'accès et de filmer ; les archives départementales du département de la Creuse pour la reproduction de coupures de presse et de divers documents relatifs à l'inauguration du pont ; les archives nationales du monde du travail pour la consultation du dossier complet du pont dans le fond d'archives du bureau d'études Pelnard-Considère et Caquot, n°1994 035 1316 n°13484 ; M. Semonsut pour le désembourrage sous le pont et les informations sur l'historique, Frédéric Sion pour le tournage en drone. Les campagnes d'observation et d'échantillonnage ont pu se réaliser grâce à un

financement d'Unisciel dans le cadre de la réalisation de ressources pédagogiques audiovisuelles.

## RÉFÉRENCES

- BARNETT, S. J., ADAM, C. D. & JACKSON, A. R. W. (2000). Solid solutions between ettringite,  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , and thaumasite,  $\text{Ca}_3\text{SiSO}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . *Journal of Materials Science* 35, 4109–4114.
- CARTANNAZ, C. (2006). 'Magmatismes et déformations polyphasés : exemples des massifs de Guéret et de Millevaches (Massif Central Français). Origine des magmas et contexte de mise en place. Thèse, Université de Franche-Comté, Besançon'.
- FRENCH, W. J. (1991). Concrete petrography : a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 24, 17–48.
- GODART, B. (2017). Pathology, assessment and treatment of structures affected by delayed ettringite formation. *Structural Engineering International* 27, 362–369.

- HAGELIA, P. & SIBBICK, R. G. (2009). Thaumasite Sulfate Attack, Popcorn Calcite Deposition and acid attack in concrete stored at the «Blindtarmen» test site Oslo, from 1952 to 1982. *Materials Characterization* 60, 686–699.
- HOFMÄNNER, F. (1973). *Microstructure of Portland Cement Clinker*. Holderbank Management and Consulting.
- HUMPHRIES, D. W. (1992). *The preparation of thin sections of rocks, minerals, and ceramics*. Oxford University Press.
- JEPSEN, B. B. & CHRISTENSEN, P. (1989). Petrographic examination of hardened concrete. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 39, 99–103.
- MACPHEE, D. E. & BARNETT, S. J. (2004). Solution properties of solids in the ettringite–thaumasite solid solution series. *Cement and Concrete Research* 34, 1591–1598.
- ROLIN, P., THIÉRY, V., DUMONT, N., CHOULET, F. & MAVEL, J. (2008). *Carte géol. France (1/50.000), feuille de FELLETIN* (n°691). Orléans : BRGM. 157 p. Notice explicative par Rolin, P., Thiéry V., Cartannaz C., Cocherie, A., Rossy, M., Henry, P., Constant, J (2008).
- ST JOHN, D. A., POOLE, A. W. & SIMS, I. (2016). *Concrete petrography - a handbook of investigative techniques (second edition)*. Arnold.
- STANTON, T. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. In *Proceedings of American Society of Civil Engineers* 66, pp. 1781–1811.
- TAYLOR, H. F., FAMY, C. & SCRIVENER, K. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 31, 683–693.
- TORRES, S. M., KIRK, C. A., LYNSDALE, C. J., SWAMY, R. N. & SHARP, J. H. (2004). Thaumasite–ettringite solid solutions in degraded mortars. *Cement and Concrete Research* 34, 1297–1305.