

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023

ESPACE VINCI - 75002 PARIS



Terre et Pierre
Expertise et Innovation

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI



MERCREDI 5 JUILLET 2023

ESPACE VINCI
25 RUE DES JEÛNEURS 75002 PARIS

PARTICIPATION AUX FRAIS : 35,00 € TTC

COMPREND :
ACCÈS AUX CONFÉRENCES, REPAS, PAUSE, DOSSIER
DANS LA LIMITE DES PLACES DISPONIBLES (80 MAXI)

CONTACT

NADÈGE VERRIER
CTMNC-ROC@CTMNC.FR
TÉL : 01 44 37 50 00

INSCRIPTION AVANT LE 23 JUIN 2023

À L'AIDE DU LIEN OU DU QR CODE CI-DESSOUS

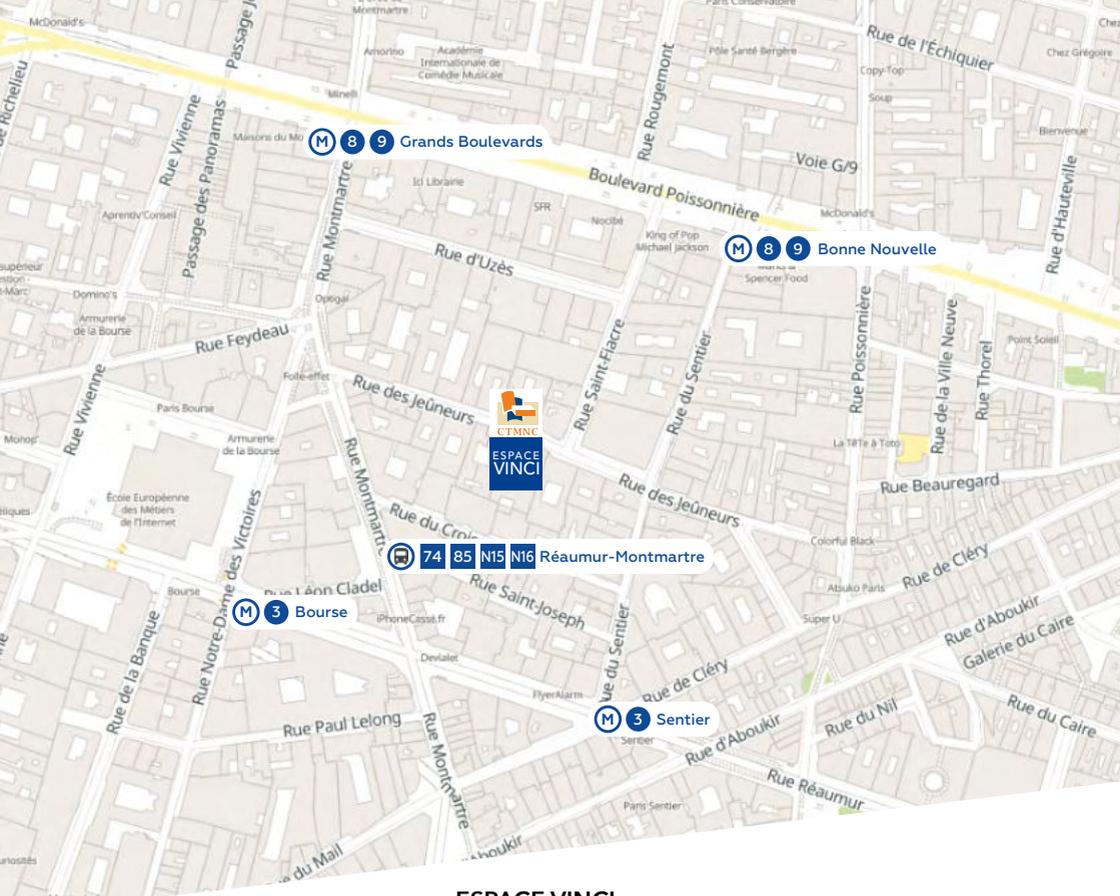
<https://forms.office.com/e/kXwZp2V5Ct>



PROGRAMME

ANIMATEUR : Gilles Martinet, secrétaire général du SNROC

- 9H00 - 9H30 **ACCUEIL**
- 9H30 - 9H45 **INTRODUCTION**
Olivier Chèze, directeur adjoint du département ROC du CTMNC
Emeric de Kervenoaël, vice-président du CTMNC
- 9H45 - 10H15 **VERS UNE ARCHITECTURE PLUS HABILE
ET PLUS RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT**
Claire Arnaud et Philomène Delrue
co-gérantes de Arnaud & Delrue architectes
- 10H15 - 11H00 **LA PIERRE AU RENDEZ-VOUS DE L'INDUSTRIE 4.0**
Christophe Margand, président de Guinet-Derriaz
- 11H00 - 11H15 **PAUSE**
- 11H15 - 12H00 **QUELQUES APPORTS DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
AU CALCUL DES STRUCTURES MAÇONNÉES**
Frédéric Dubois, directeur adjoint du LMGC, université de Montpellier
Marine Bagneris, co-fondatrice du bureau d'études Stono
- 12H00 - 12H45 **LES ENJEUX ET LES DÉFIS DE LA CONSTRUCTION BAS-CARBONE**
Tristan Pestre, chef de projets du CTMNC
- 12H45 - 14H00 **DÉJEUNER**
- 14H00 - 14H45 **DES CHANTIERS REMARQUABLES**
Olivier Chastel, gérant de l'Atelier du Grain d'Orge SAS
Carla Pani, ingénieur R&D chez Rocamat
- 14H45 - 15H30 **LE POINT DE VUE D'UN AMÉNAGEUR**
Fabien Guisseau, directeur général adjoint développement économique
et partenariats stratégiques chez Grand Paris Aménagement
- 15H30 - 16H15 **TABLE RONDE**
avec les intervenants, accompagnés de
Jean-Louis Marpillat, directeur général de Rocamat
- 16h15 - 16H30 **CONCLUSION**
Emeric de Kervenoaël, vice-président du CTMNC



ESPACE VINCI

25 RUE DES JEÛNEURS 75002 PARIS

METRO 8 & 9 - STATION **GRANDS BOULEVARDS**

METRO 8 & 9 - STATION **BONNE NOUVELLE**

METRO 3 - STATION **BOURSE**

METRO 3 - STATION **SENTIER**

BUS 74, 85, N15 & N16 - STATION **RÉAUMUR-MONTMARTRE**

CONTACT

NADÈGE VERRIER

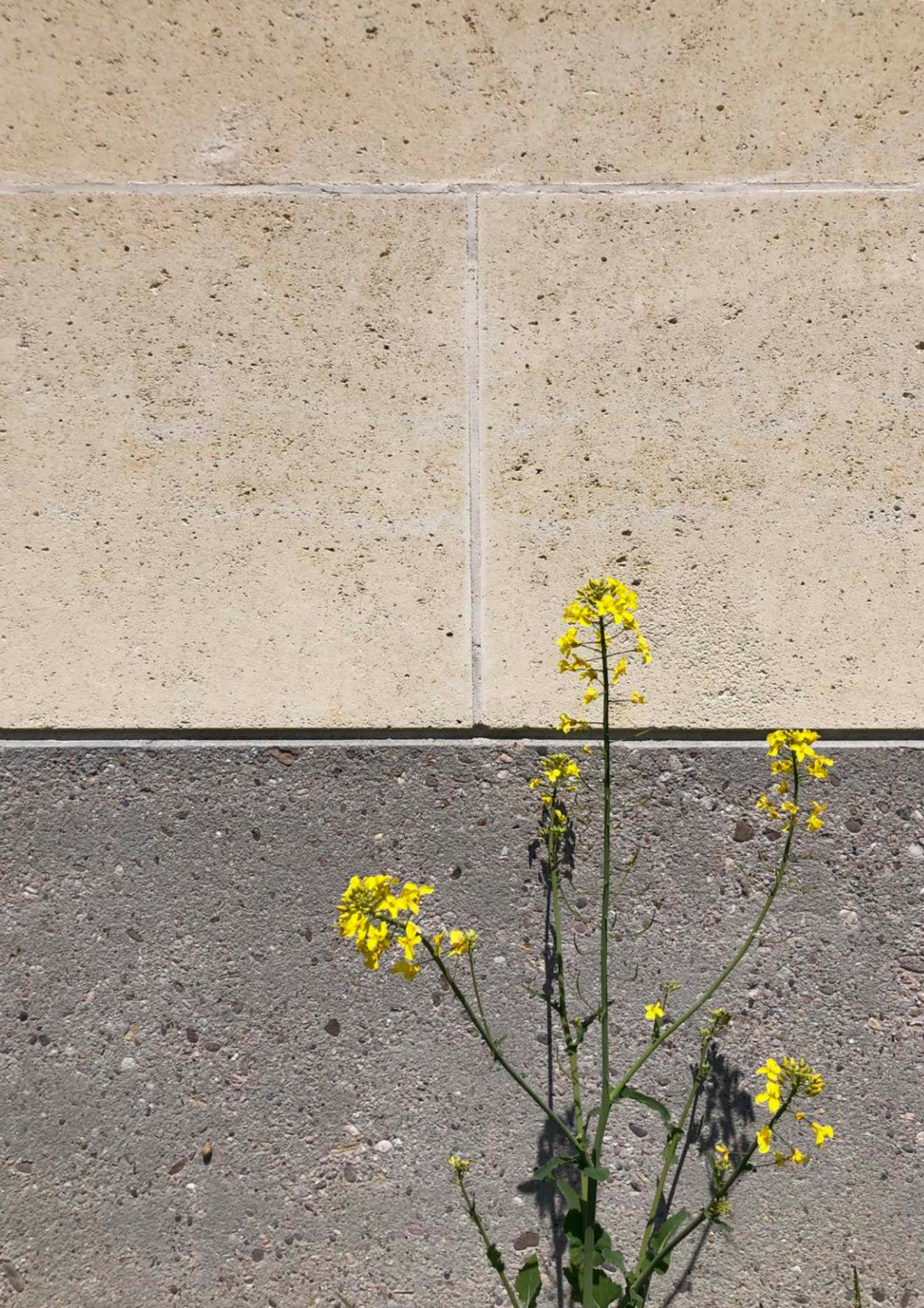
CTMNC-ROC@CTMNC.FR

TÉL : 01 44 37 50 00



Terre et Pierre
Expertise et Innovation





Vers une architecture
plus habile
et plus respectueuse
de l'environnement

arnaud & delrue
architectes



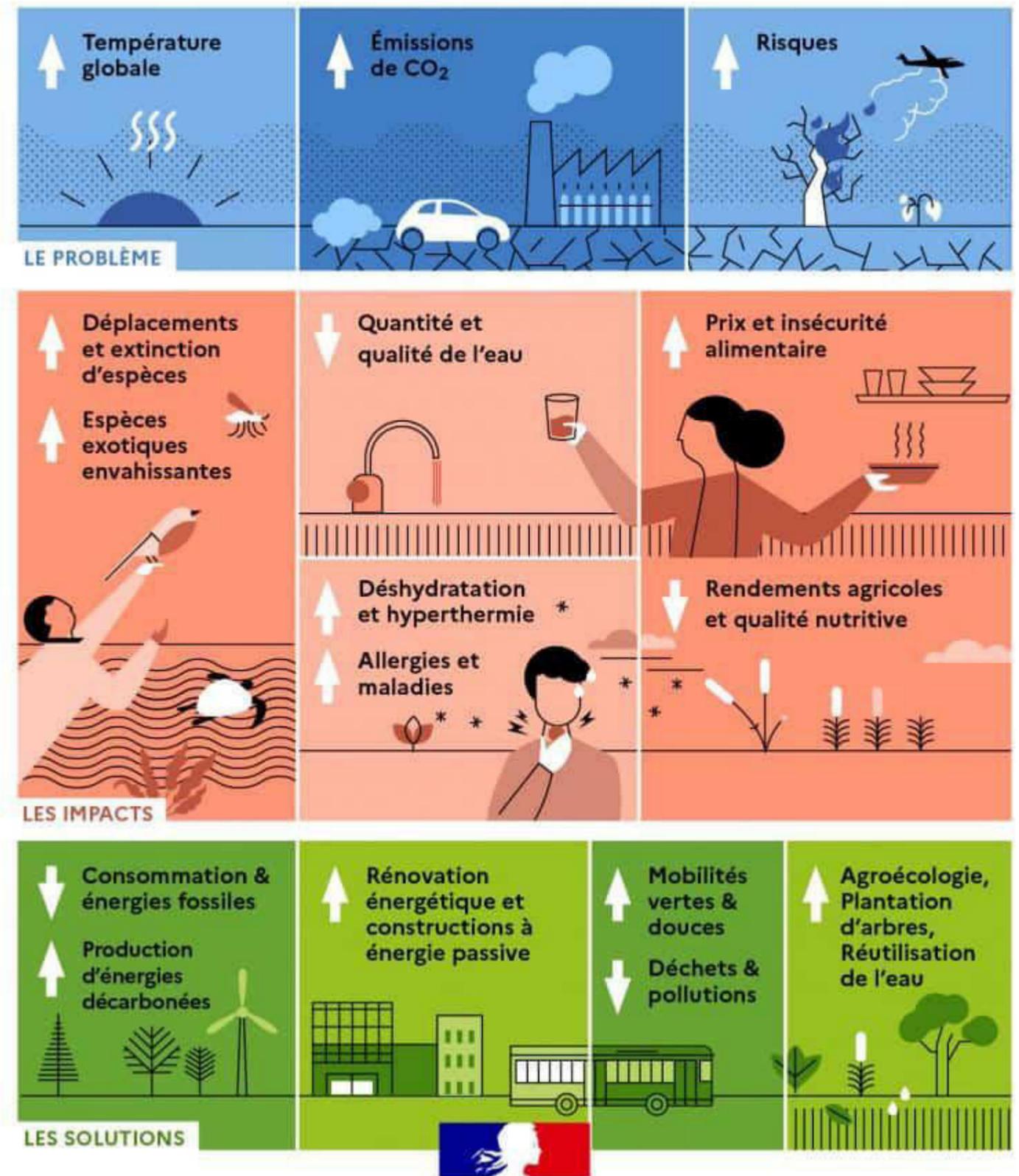
1 • Constats

Secteur du bâtiment & dérèglement climatique

- Le secteur du bâtiment représente 43% de la consommation énergétique,
- et 23% des émissions de CO₂.
- Il participe à l'appauvrissement et à la raréfaction des ressources.
- Il génère plus de 40 000 tonnes de déchets par an.
- Les prévisions les plus optimistes sur le climat annoncent une multiplication par deux des canicules d'ici 2050.
- Les naturalistes diagnostiquent un effondrement de la biodiversité, 68% des populations de vertébrés ayant déjà disparus depuis 1970.

Rapport de synthèse du GIEC

Le changement climatique **aujourd'hui**



Épuisement des ressources : le cas du sable

Le sable, composant essentiel du béton est la deuxième ressource la plus utilisée de la planète après l'eau.

La consommation mondiale de béton s'élève à deux tonnes par an et par être humain.

Dans le domaine de la construction, et de manière encore plus marquée en île-de-France au vu du niveau élevé d'infrastructures existantes, les granulats issus de l'exploitation des carrières sont la ressource la plus fortement consommée, en particulier pour la réalisation des ouvrages neufs.

À l'horizon 2030, les ressources locales en granulats alluvionnaires en Île-de-France seront insuffisante.

À l'échelle mondiale, les extractions maritimes menacent les côtes comme les écosystèmes.

La pénurie et les désordres écologiques et humains nous invitent à proposer de nouveaux modes de construction en réduisant notre recours au béton.



Devenir

Depuis 25 ans, se sont succédés la HQE,
le développement durable,
l'écoresponsabilité,
l'économie circulaire et régénérative...

De multiples démarches sont apparues pour faire
mieux avec moins.

Pour atteindre les objectifs de l'accord de paris
la filière doit donc réduire sa production de gaz
à effet de serre de 30% d'ici 2030.

Aujourd'hui, avec la RE2020, la neutralité carbone
est visée à horizon 2050.

Cette prise de conscience concerne donc l'ensemble
des professionnels du bâtiment et de l'aménagement
du territoire.

Au regard des bouleversements climatiques actuels,
il nous paraît obligatoire en tant qu'architectes,
professionnels du bâtiment et de l'aménagement
du territoire, de nous emparer de ces problématiques
et de concevoir une architecture plus habile
et respectueuse de l'environnement.





2 • Le matériau pierre
comme réponse
aux défis d'une
édification vertueuse

Une ressource disponible

La construction en pierre massive offre une alternative viable à la construction en béton.

La France possède un solide réseau de carrière en activité réparties sur l'ensemble du territoire et permettant de répondre à des projets de construction en pierre massive.

Dans le bassin parisien, l'étude réalisée en 2018 dans le cadre de l'exposition *Pierre* au Pavillon de l'Arsenal ; *Révéler la ressource, explorer le matériau* confirme une production de roche calcaire suffisante pour assurer la construction de 6 000 à 9 000 logements par an (soit 10 % de la production annuelle de logements souhaitée jusqu'en 2030 en Île-de-France).

Certains aménageurs, promoteurs, architectes, travaillent à la valorisation du matériau pierre et au développement d'une filière complète de matières bio et geo sourcées pour la construction française.



Un maillage de carrières dense et riche sur l'ensemble du territoire.

Différentes caractéristiques de roches exploitées.

Corrélation entre le type de ressource et l'architecture produite.







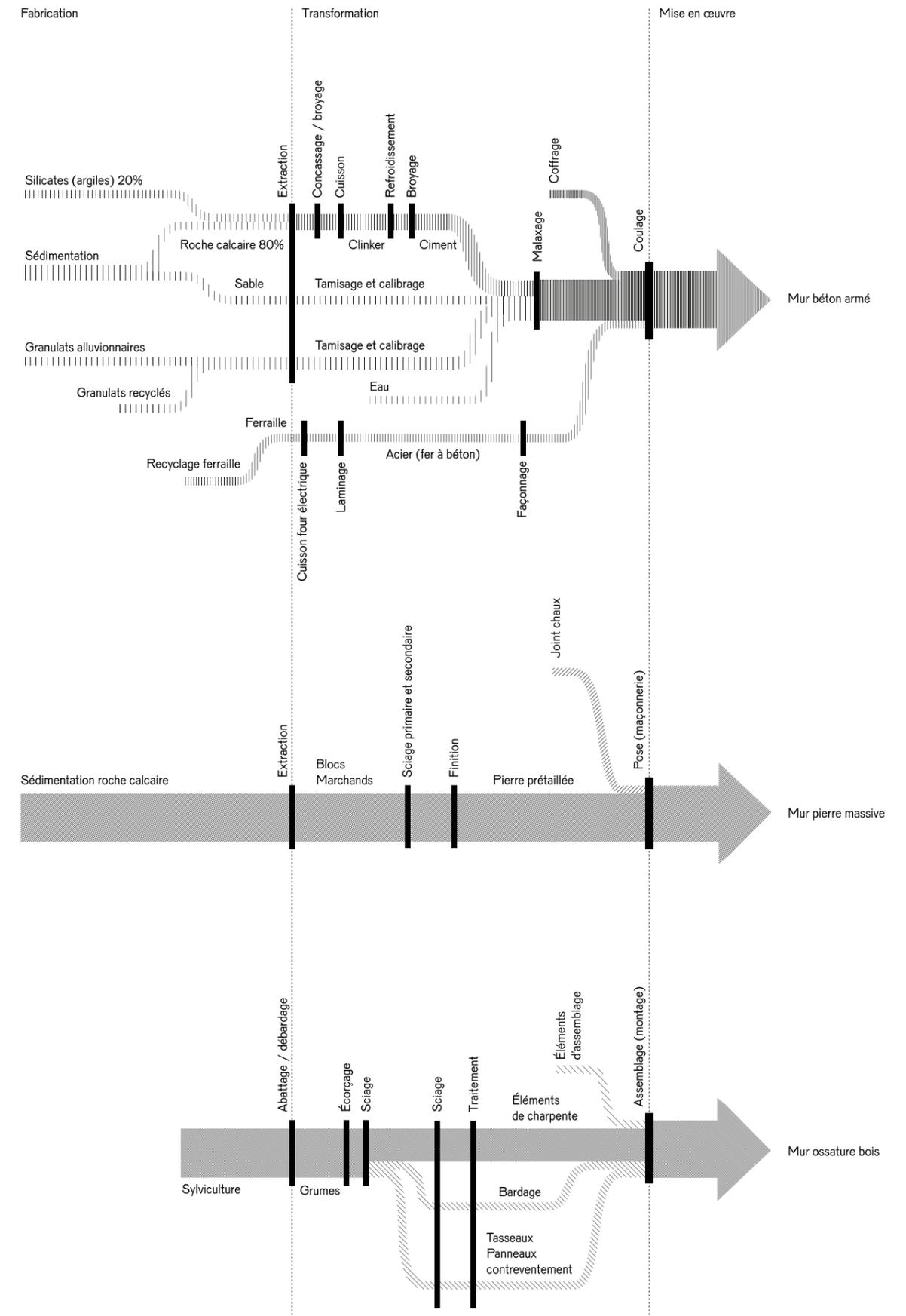
Un matériau géosourcé bas carbone

Les matériaux géosourcés sont les matériaux issus de ressources d'origine minérale, tels que la terre crue ou la pierre.

Comme l'illustre le schéma ci-contre extrait de l'exposition *Pierre* au Pavillon de l'Arsenal ; *Révéler la ressource, explorer le matériau* l'utilisation de la pierre est très économe énergiquement n'impliquant quasiment aucune transformation de son extraction jusqu'à sa pose.

Sa valeur énergétique est exemplaire, proche de celui du bois et bien supérieur à celui du béton.

La pierre naturelle constitue un matériau performant pour répondre aux exigences du label E+ et C- ainsi qu'à la réglementation énergétique RE2020 notamment par la prise en compte de l'empreinte carbone tout au long du cycle de vie d'un édifice, depuis sa conception jusqu'à sa démolition.





De la durabilité à la pérennité

Matériau durable du fait de sa solidité et de sa longévité.

Matériau qui implique une construction ordonnée et relativement simple.

Une relative simplicité qui permet des bâtiments transformables, flexible et réappropriables, donc pérennes.



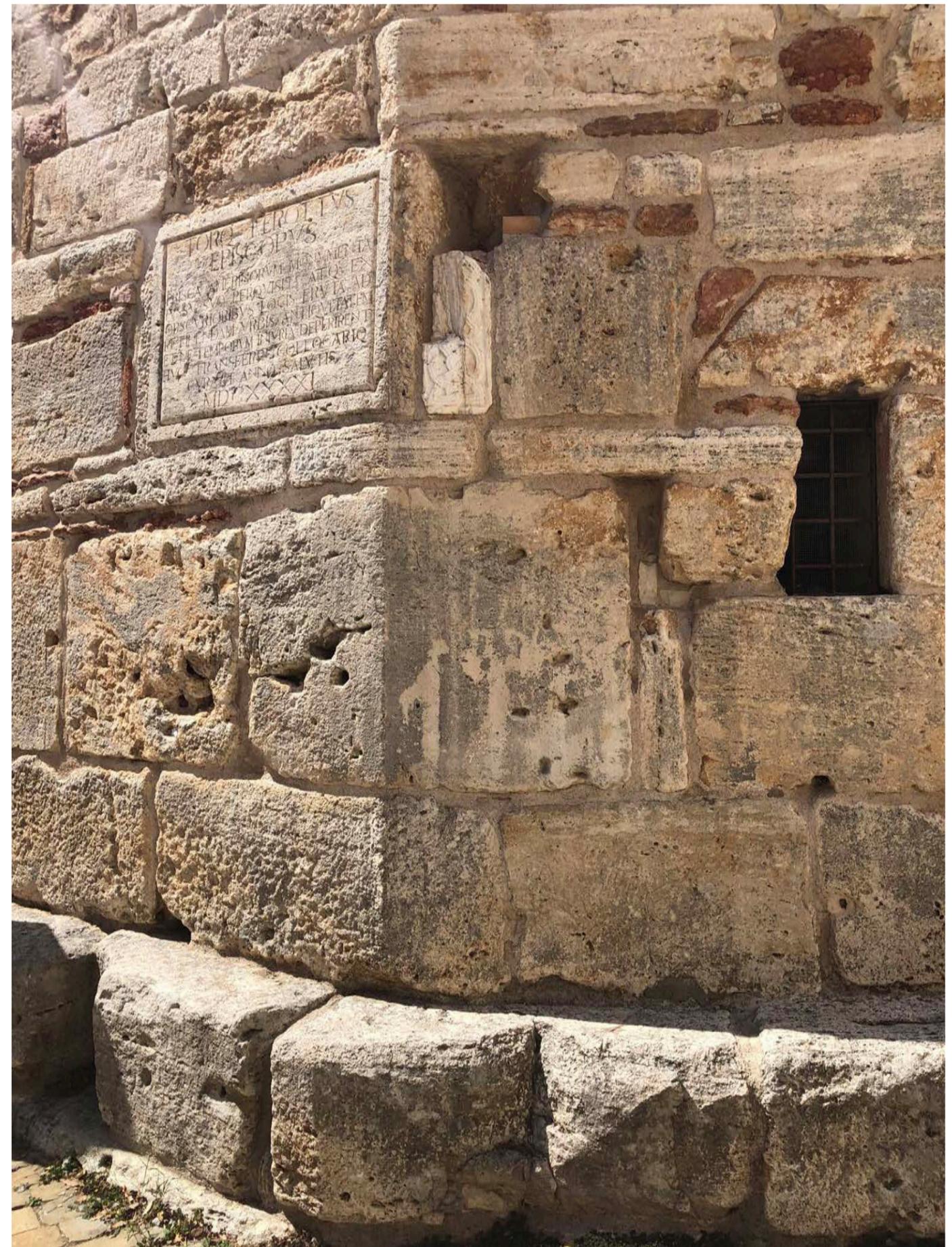
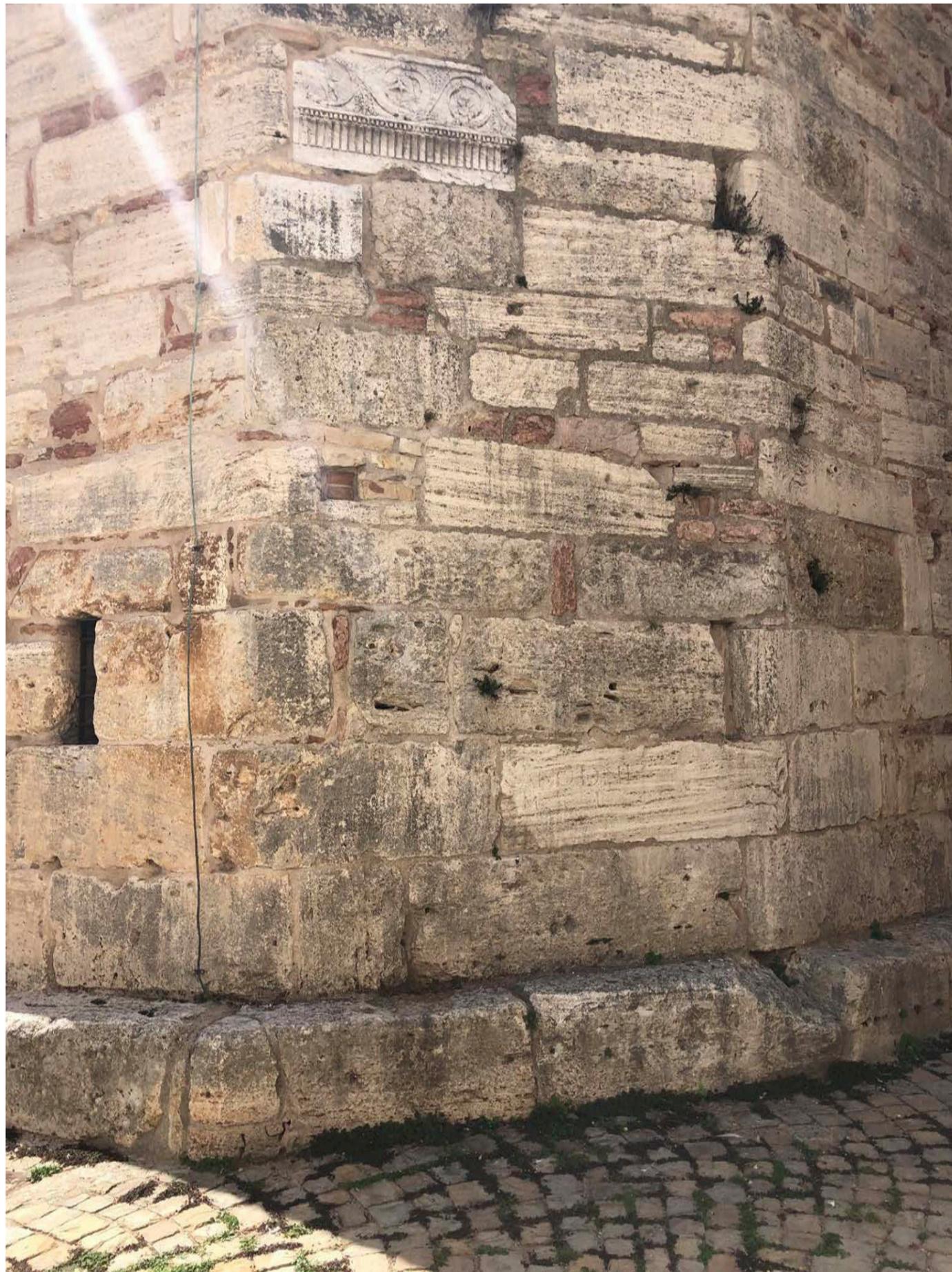


Illustration de pierre de réemplois pour l'édification d'une tourelle. Amelia, Italie.

Patrimoine & savoir-faire

Construire en pierre, c'est construire avec un matériau premier, formé sur le temps géologique.

C'est penser qu'un bâtiment va s'inscrire dans la durée, il s'agit de :

- lui donner les moyen de résister dans le temps
- l'ordonnancer avec la pesanteur et les phénomènes
- le penser autrement que comme un produit mais comme la construction d'un patrimoine, un patrimoine commun.
- envisager son démontage ou sa transformation
- lui donner sa place dans la cité
une place dans l'espace et le temps











Exemple de mise en œuvre contemporaine

Construction d'une salle multi-activés
Architecte Pascal Delrue
Entreprise SNBR

Engin de levage spécialement conçu pour l'opération par l'entreprise de pose de pierre pour édifier des blocs verticaux de 2,66m de haut.



Une cité désirable

La cité comme lieu du lien.
Lieu pour vivre ensemble.

Une cité pensée pour durer et de permettre à des générations de femmes et d'hommes de construire ensemble une culture, pour échanger dans l'espace et dans le temps, donner un cadre de vie sain à tous. Dès lors, comment penser à édifier en ville autrement que dans le temps ?



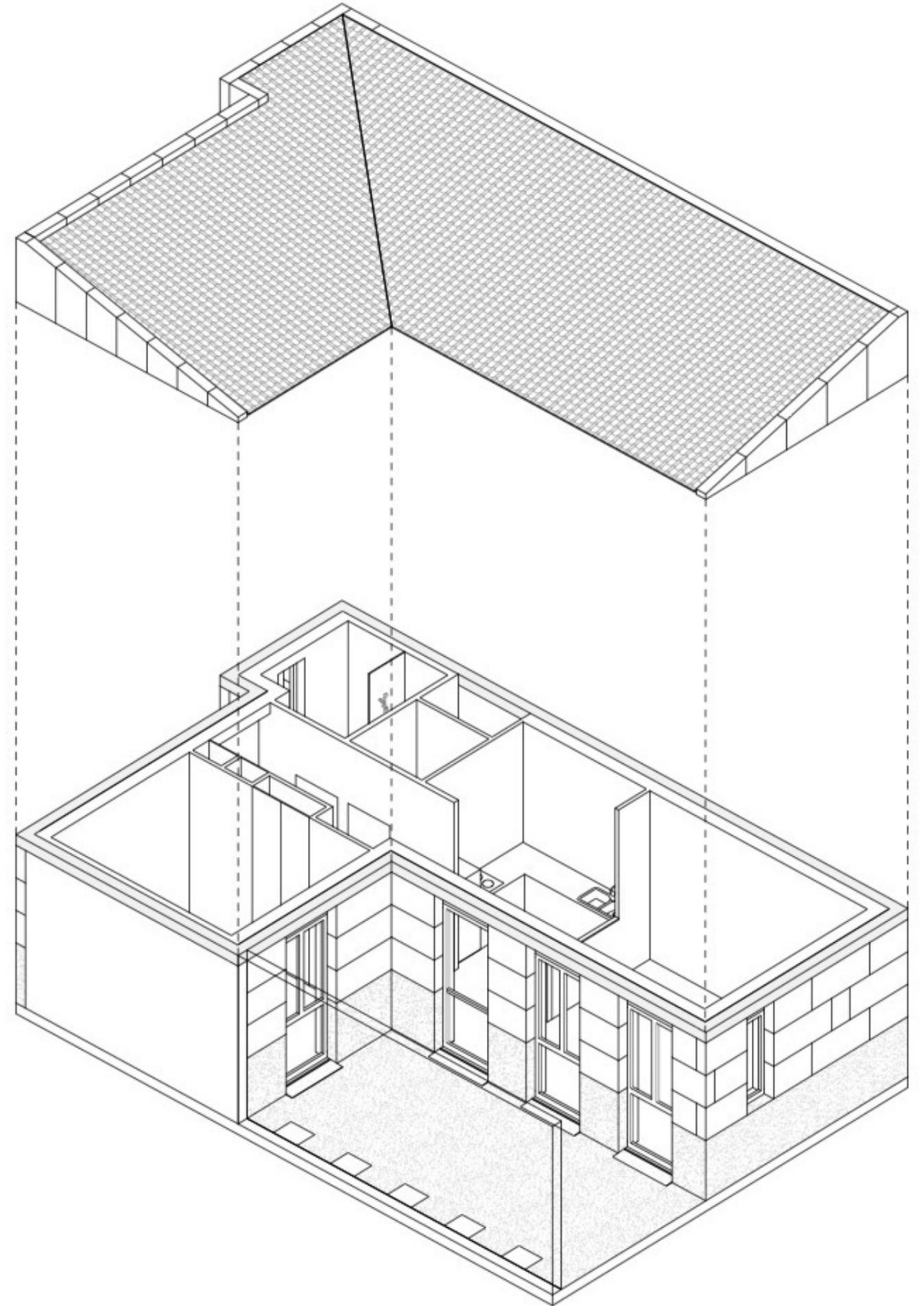


3 • Exemple d'une opération de construction de 16 logements seniors en pierre massive à Mont-Bonvillers

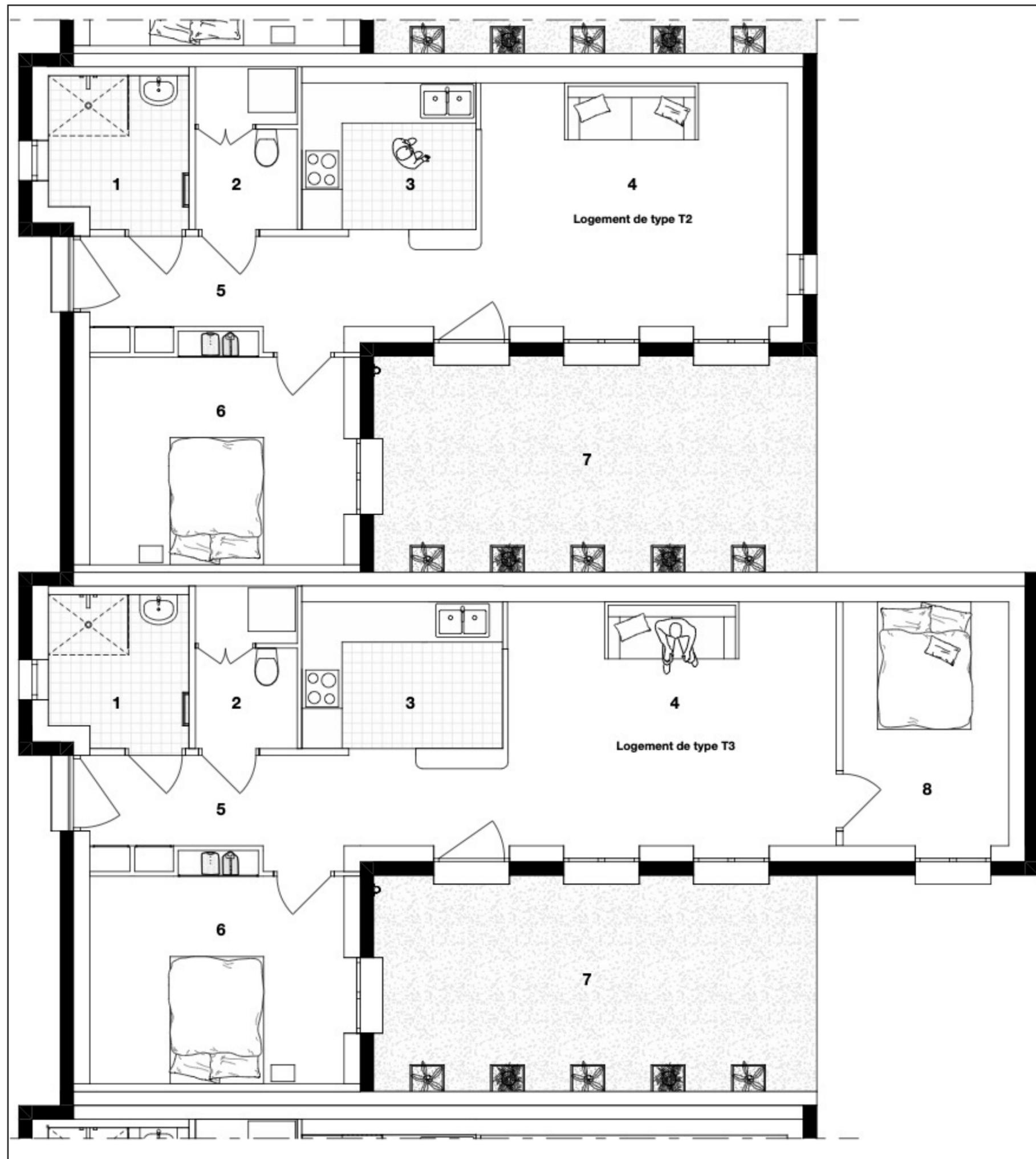
16 logements T2 et T3 individuels groupés sur une parcelle contraintes



Confort d'habiter & organisation spatiale des logements

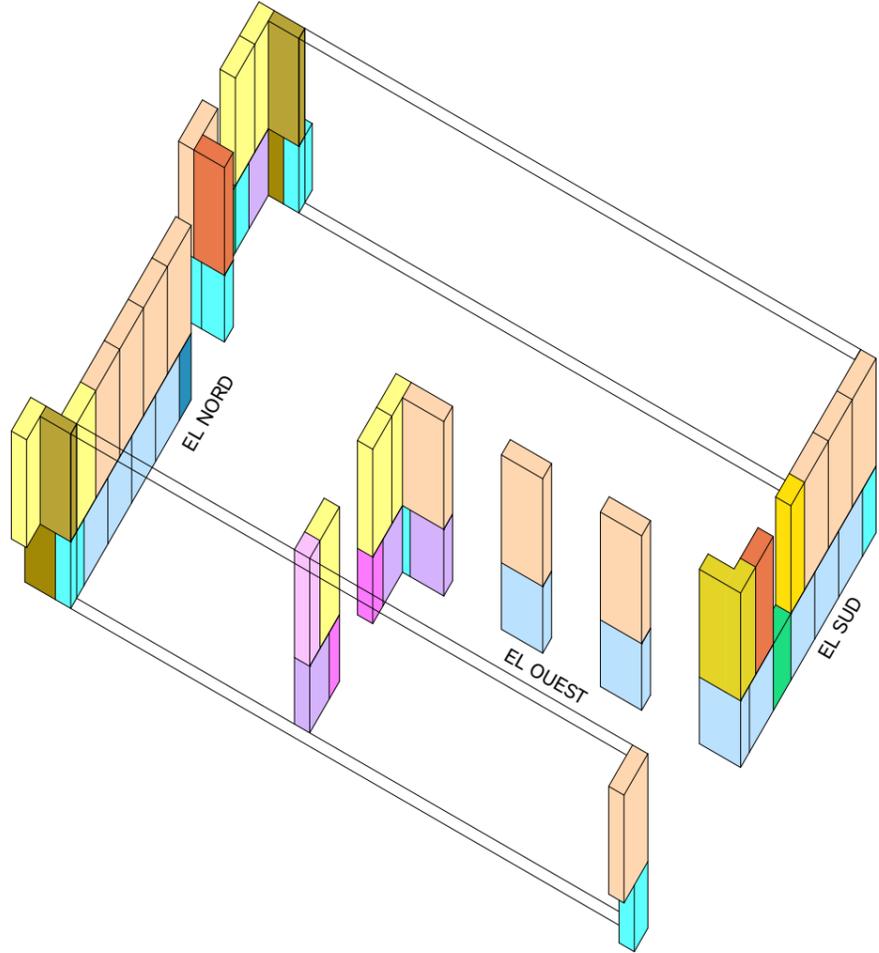
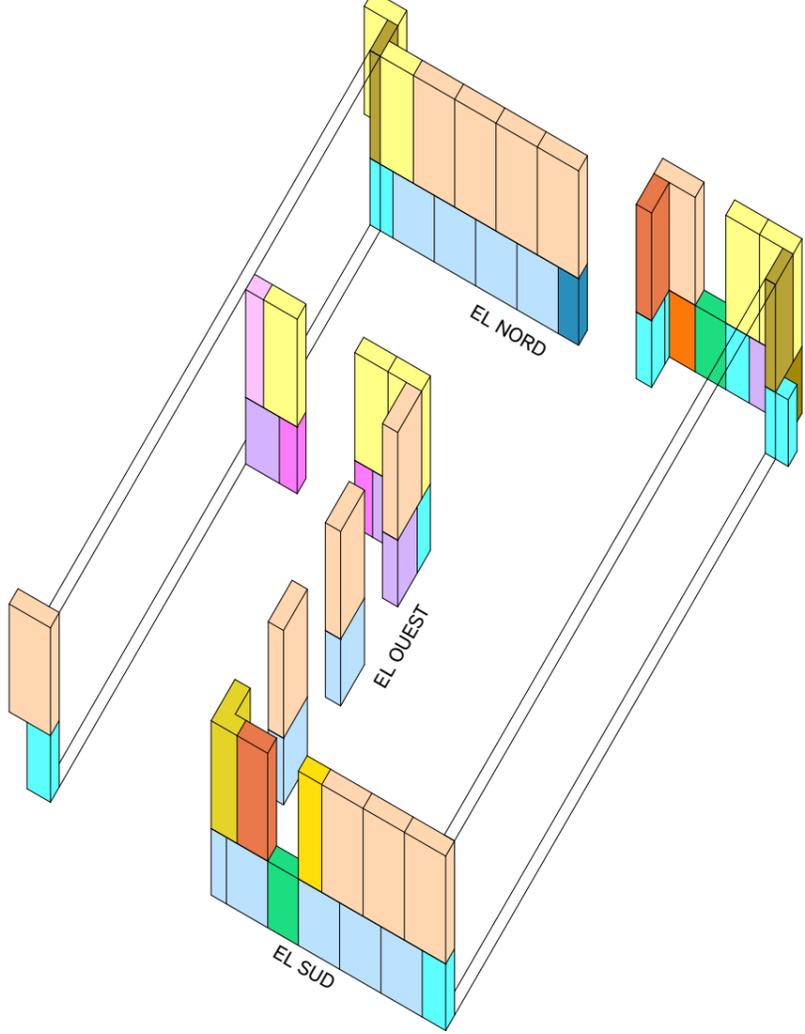
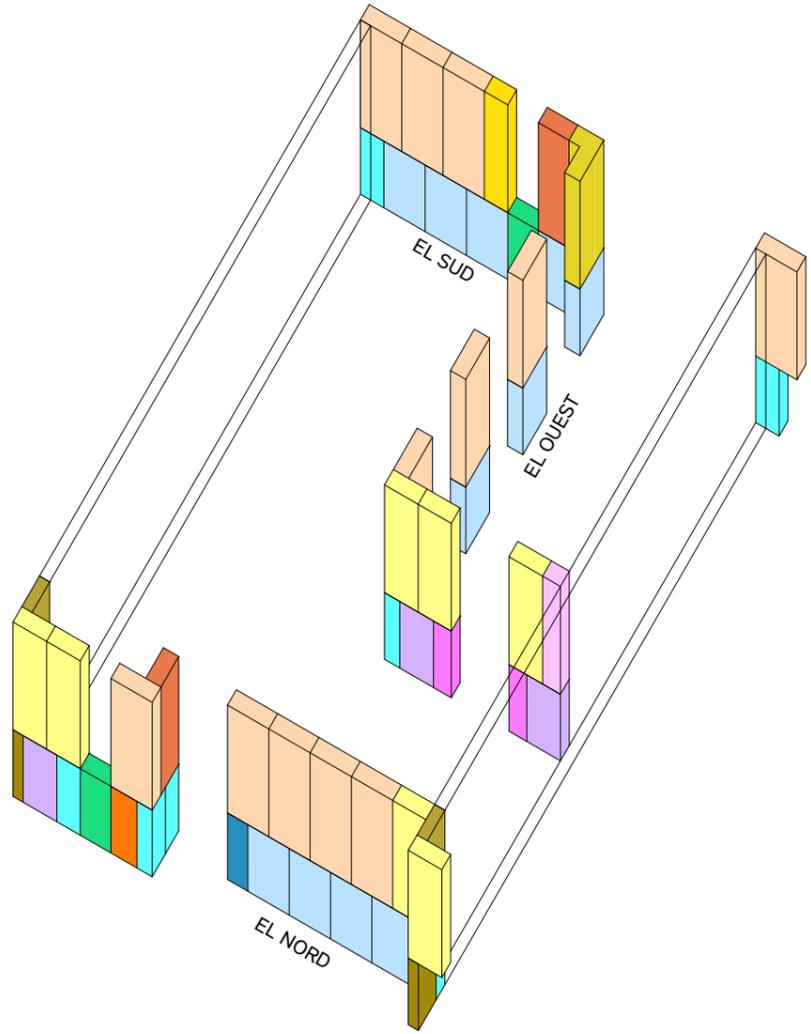




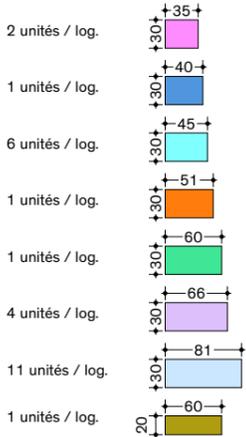


- 1 Salle d'eau
- 2 Sanitaire et Local tech.
- 3 Cuisine
- 4 Séjour
- 5 Entrée et distribution
- 6 Chambre
- 7 Patio
- 8 Chambre/bureau

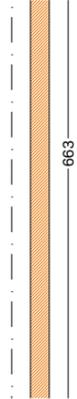
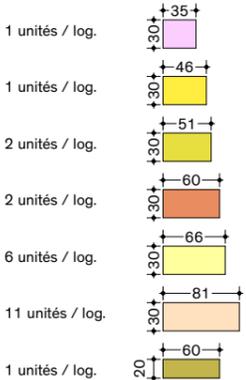
Construction pierre • Recherche de calepinage

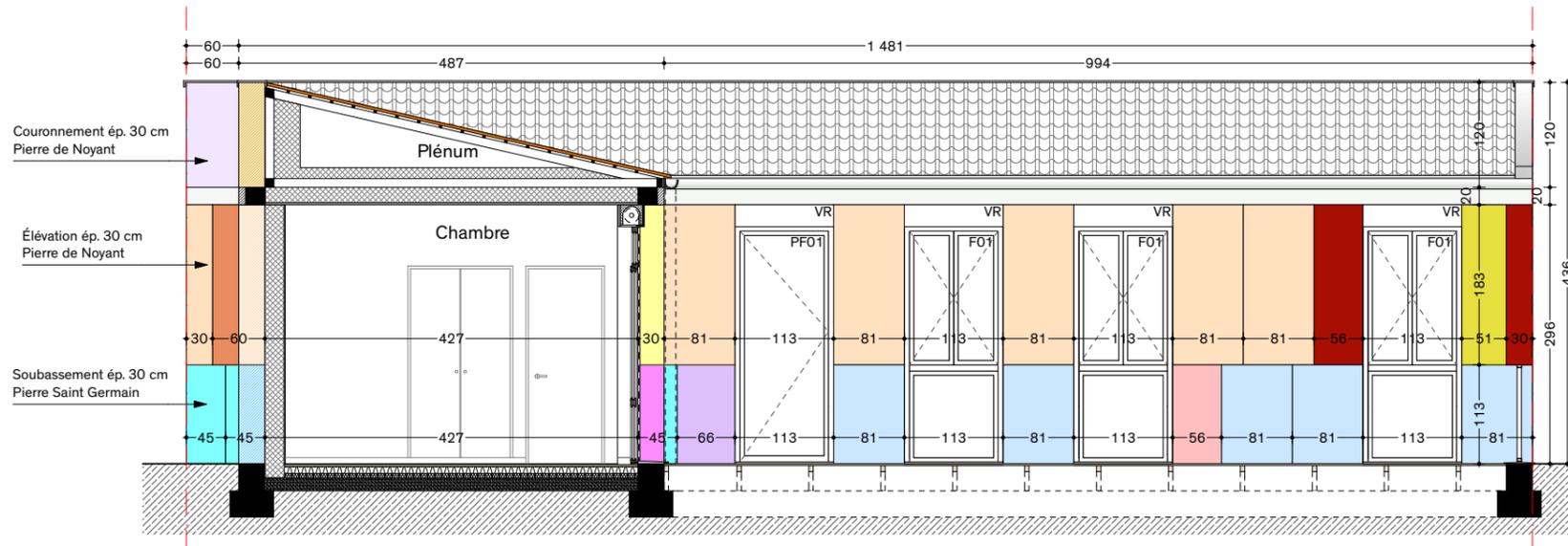


Pierres de soubassement
Saint-Germain H 113

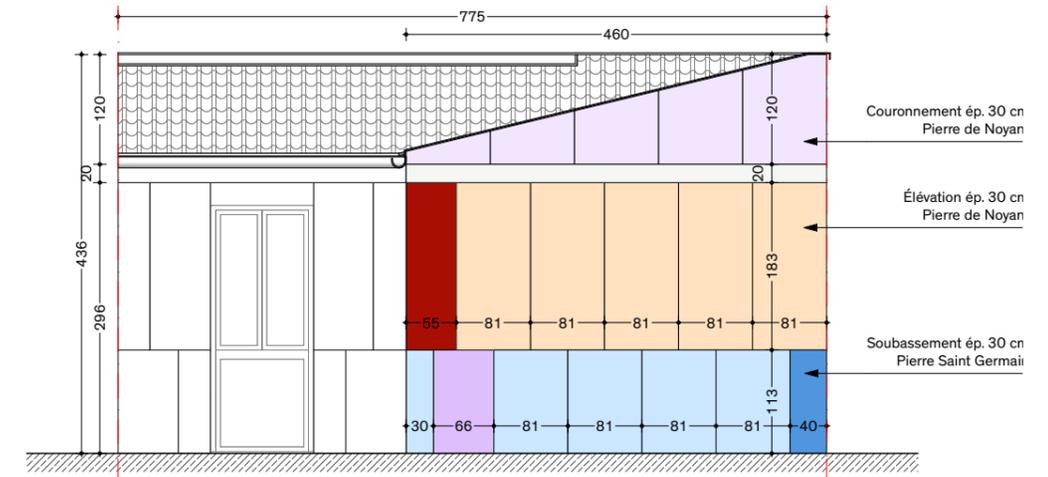
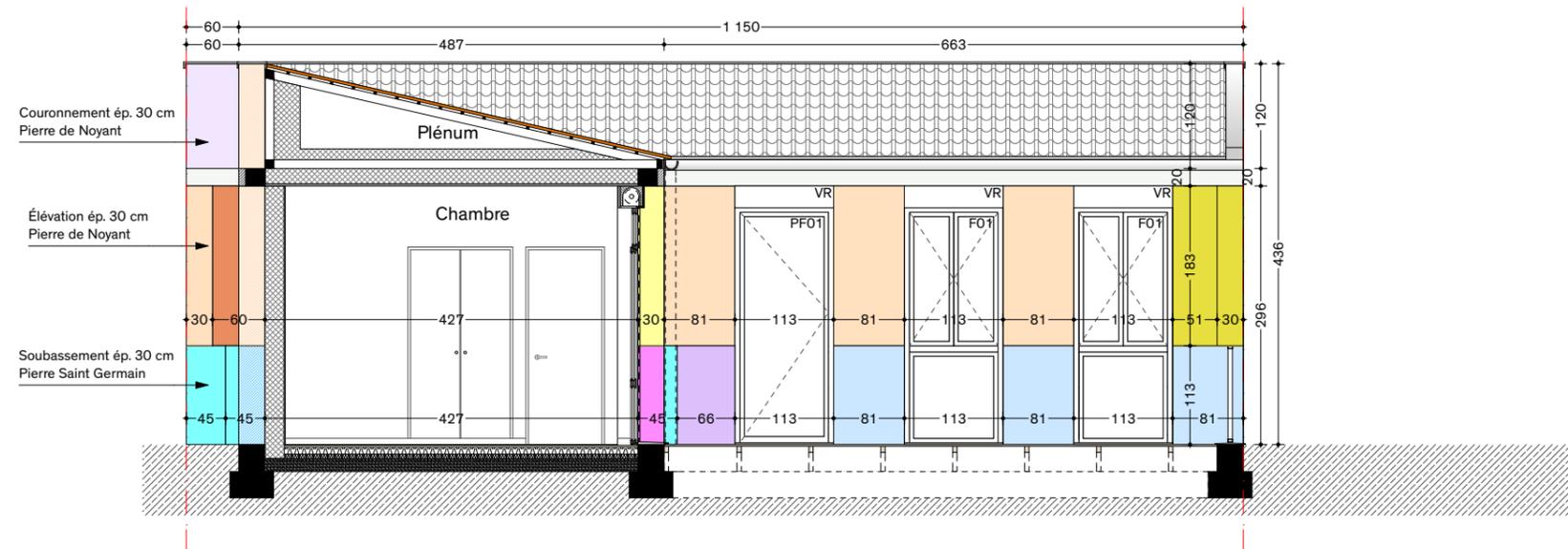


Pierres de soubassement
Saint-Germain H 113

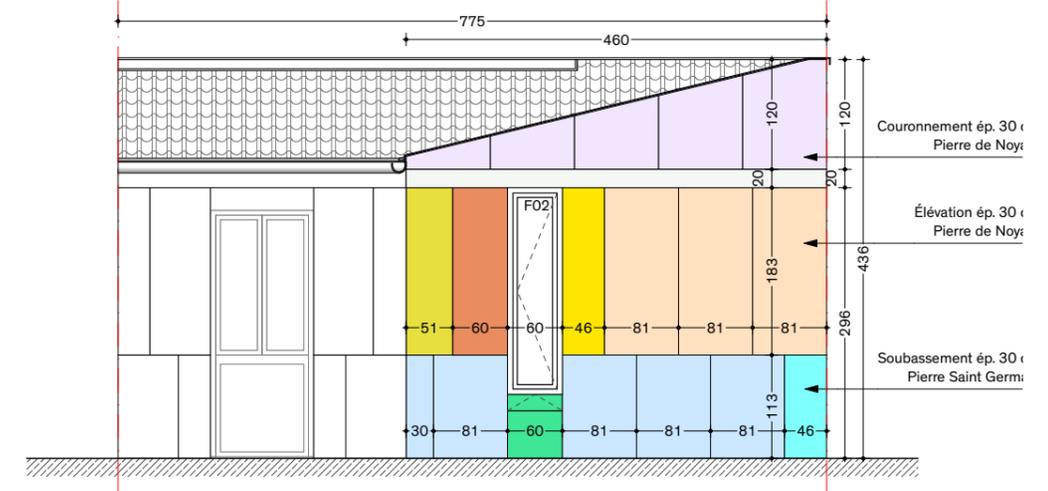




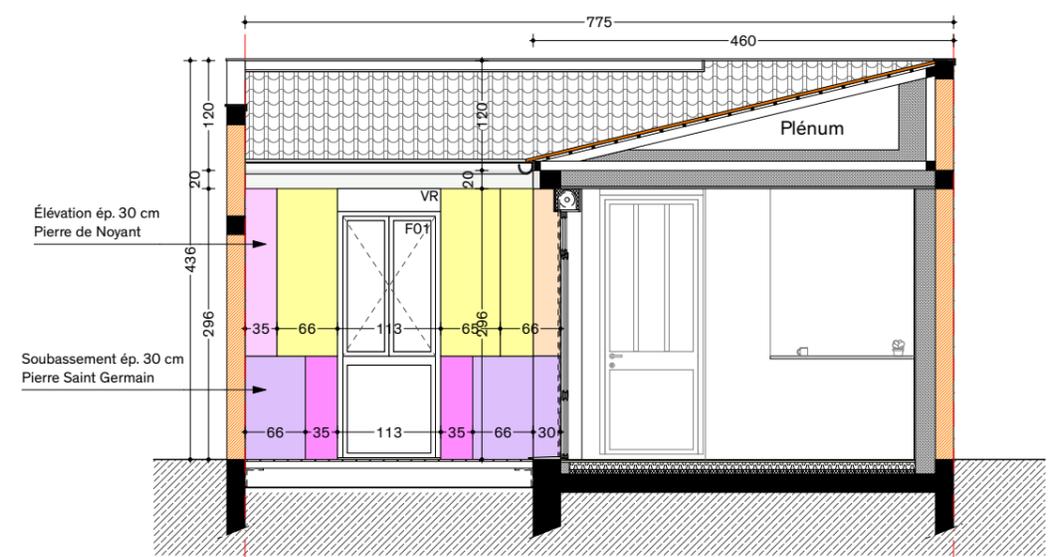
Élévation Ouest T2
Log. n° 02/04/09/10/12



Élévation Sud type T2
n° 02/04/09/10/12

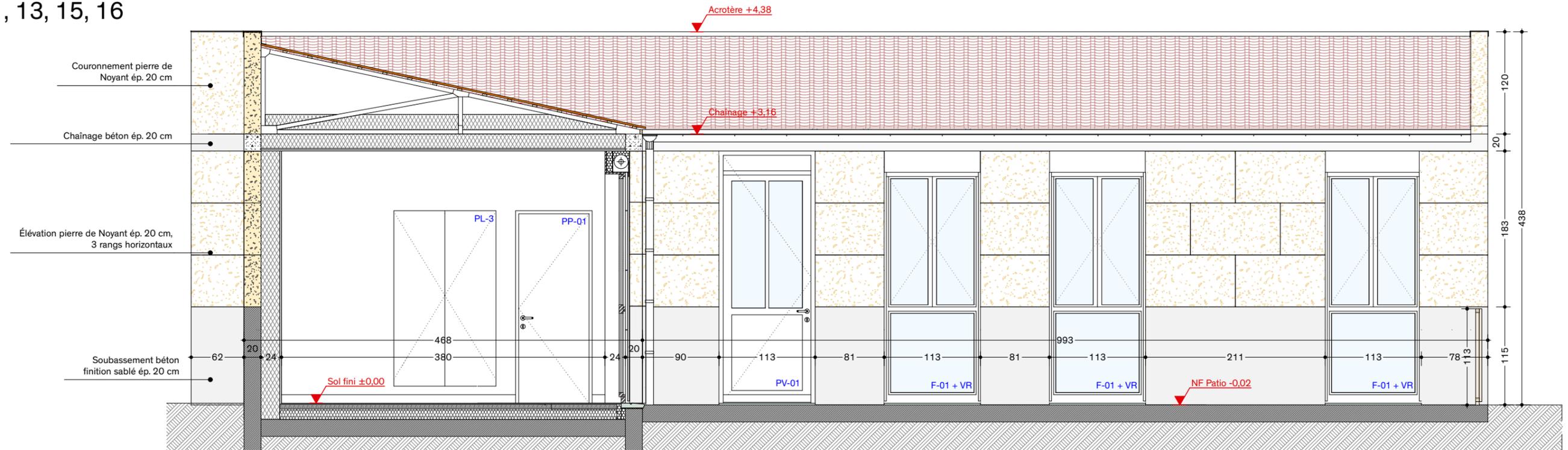
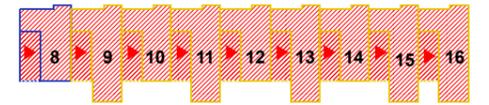


Élévation Sud de type T2 et T3
Log n° 02/03/04/05/06/09/10/11/12/13/14/15



Façade Ouest

Logement n°1, 3, 5, 6,
7, 9, 11, 13, 15, 16

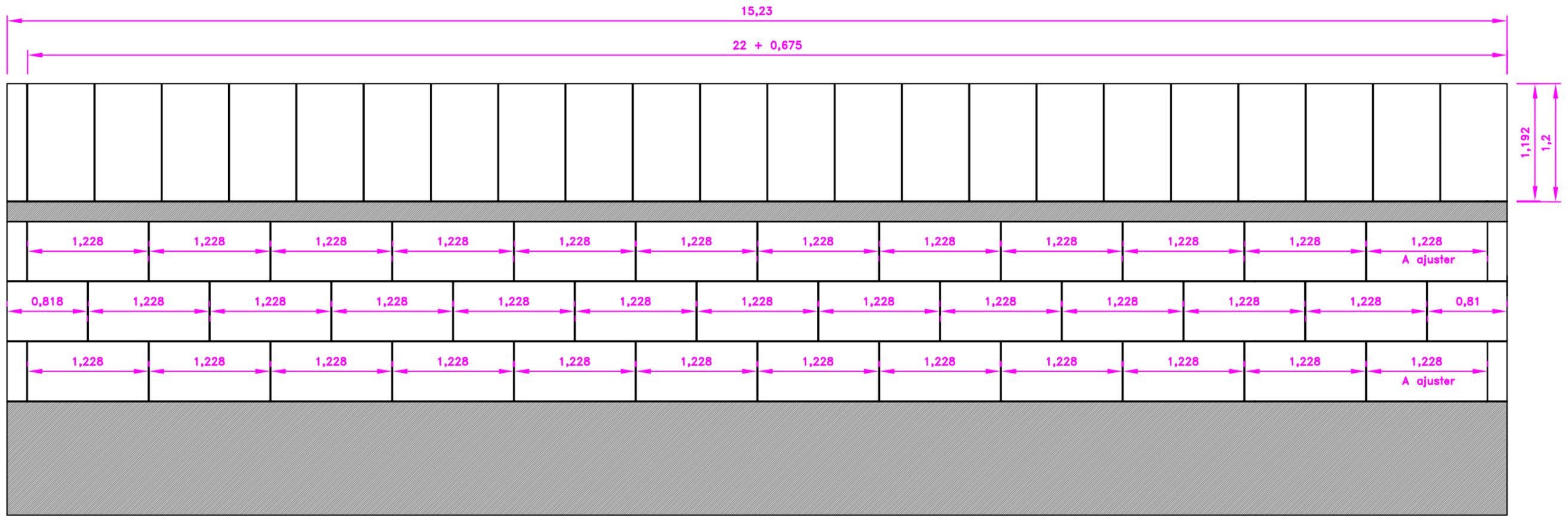


Façade Ouest

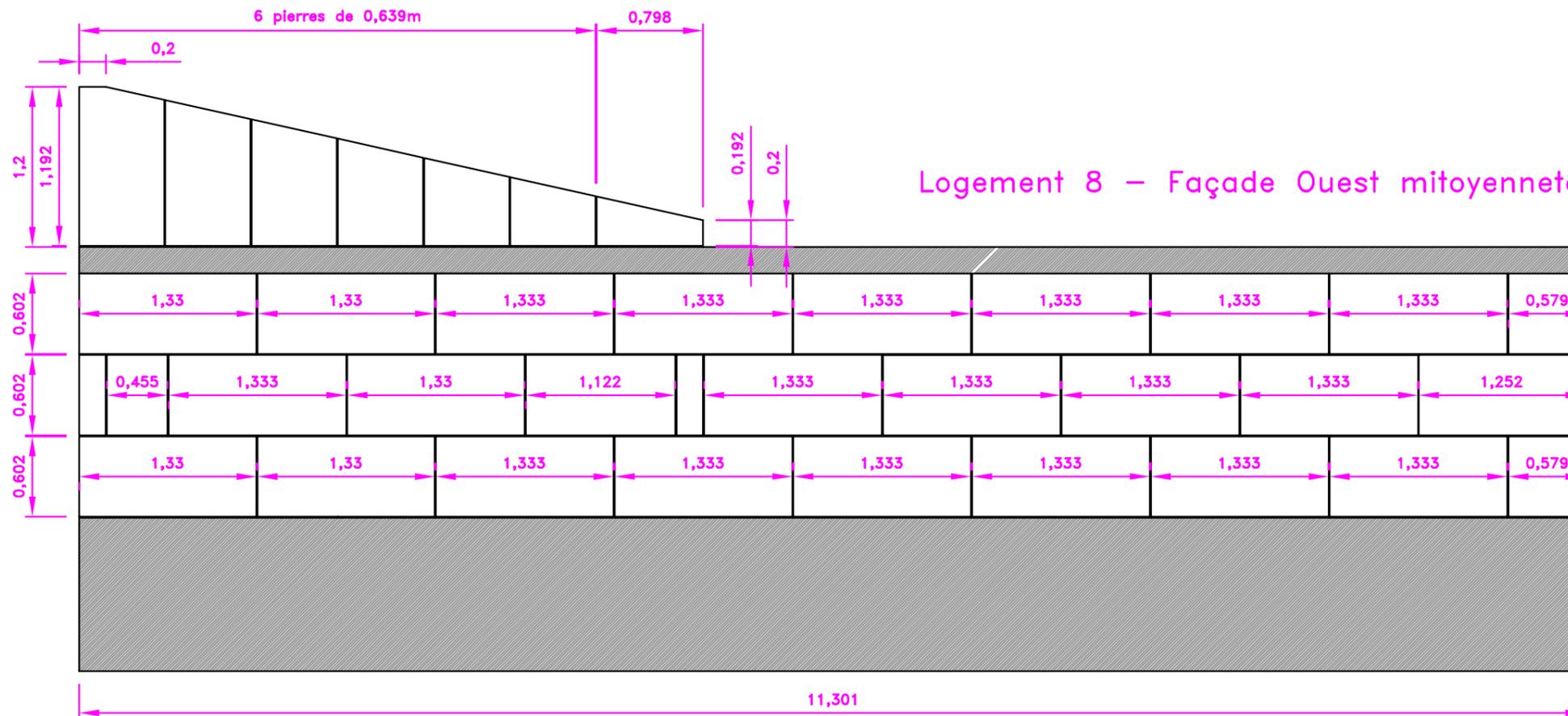
Logement n°2, 4, 8,
10, 12, 14



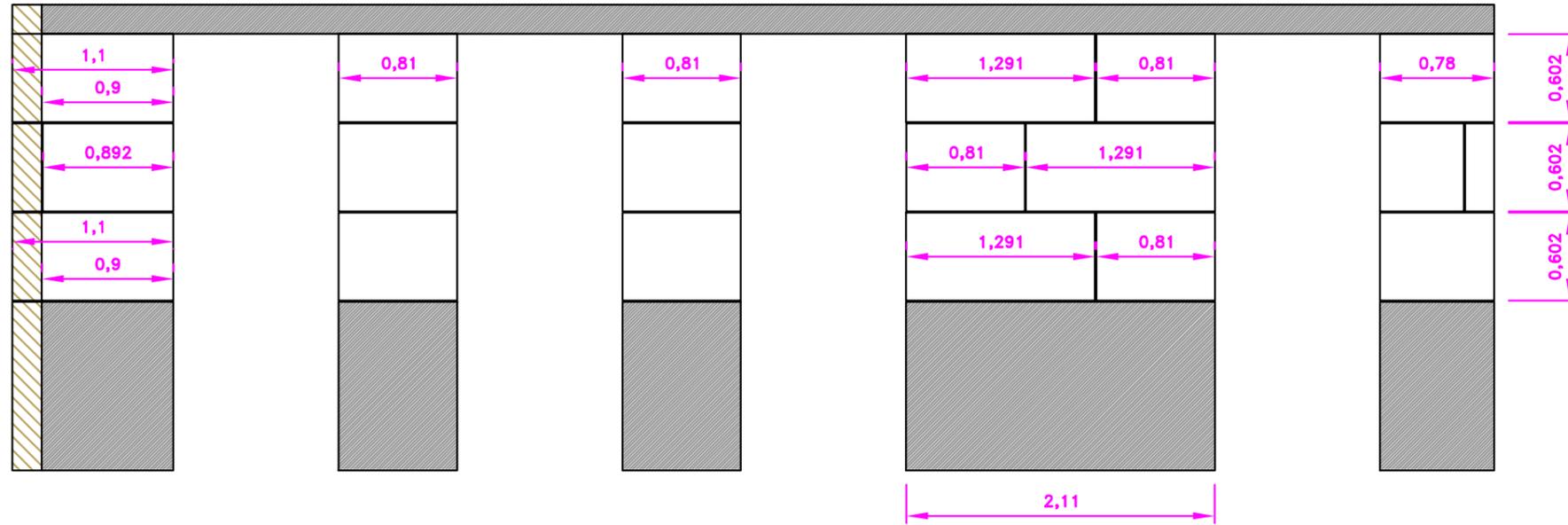
Logement 16 – Façade Est



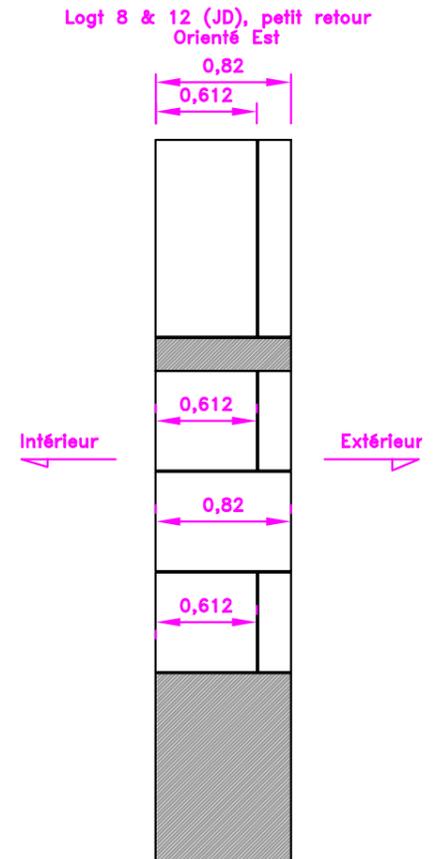
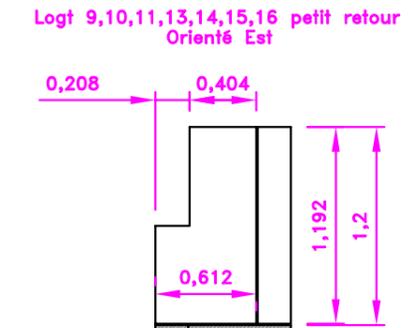
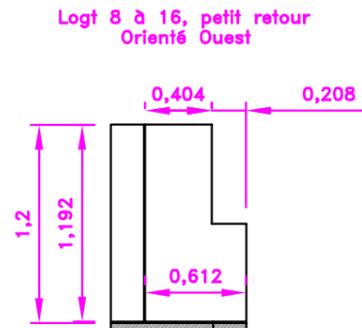
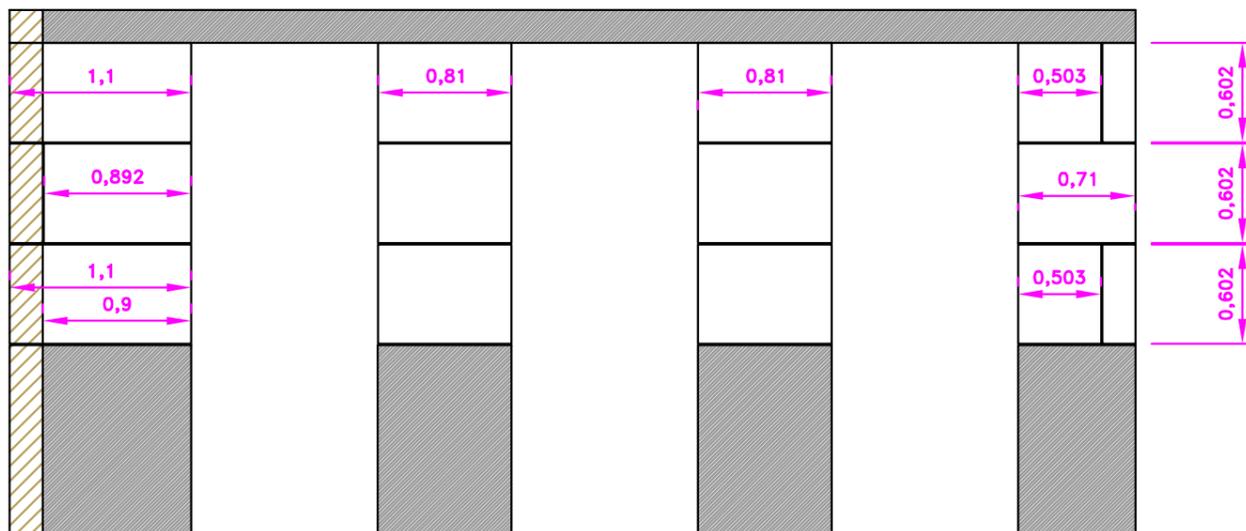
Logement 8 – Façade Ouest mitoyenneté



Logement 9; 11; 13; 15; 16 – Façade Ouest



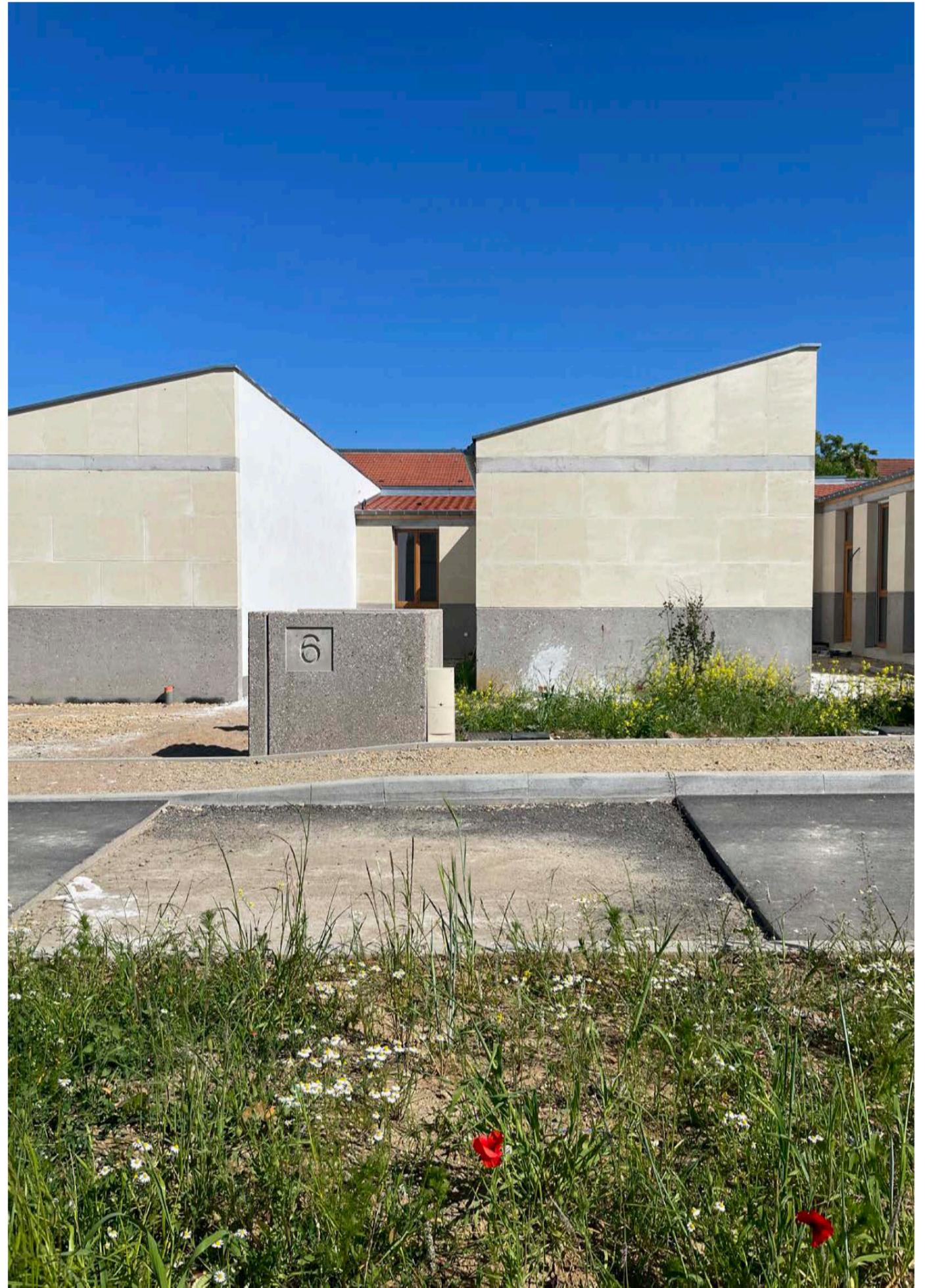
Logement 8; 10; 12; 14 – Façade Ouest

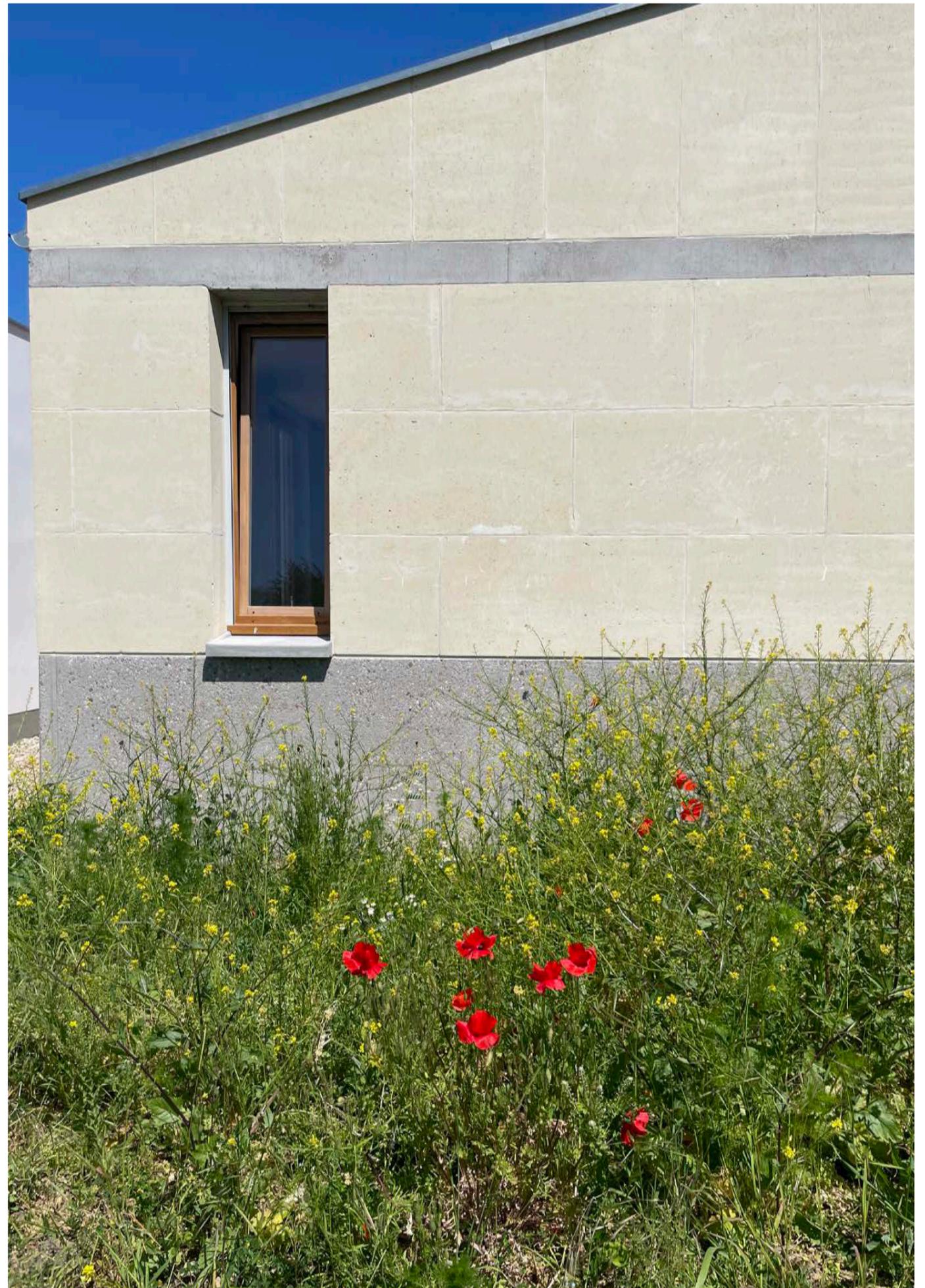






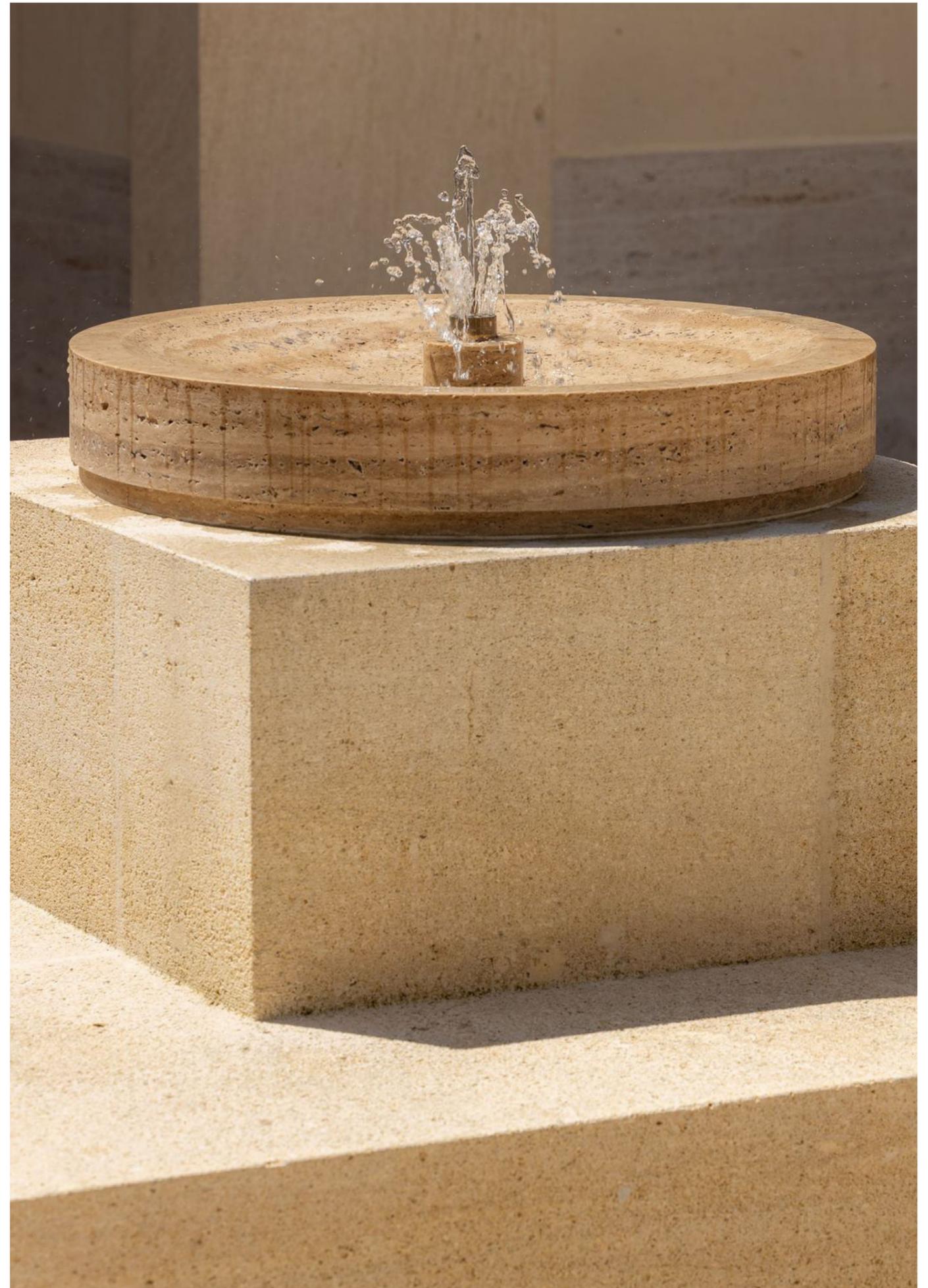








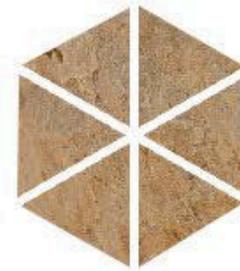
merci de votre
attention



15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023



Terre et Pierre
Expertise et Innovation

LA RENAISSANCE DE GUINET DERRIAZ 1912

Un projet de relocalisation industrielle, technologique
& écologique au service du savoir-faire français et du
dynamisme régional en Auvergne-Rhône-Alpes

GUINET.DERRIAZ

1912

CHRISTOPHE MARGAND

PRESIDENT DIRECTEUR GENERAL

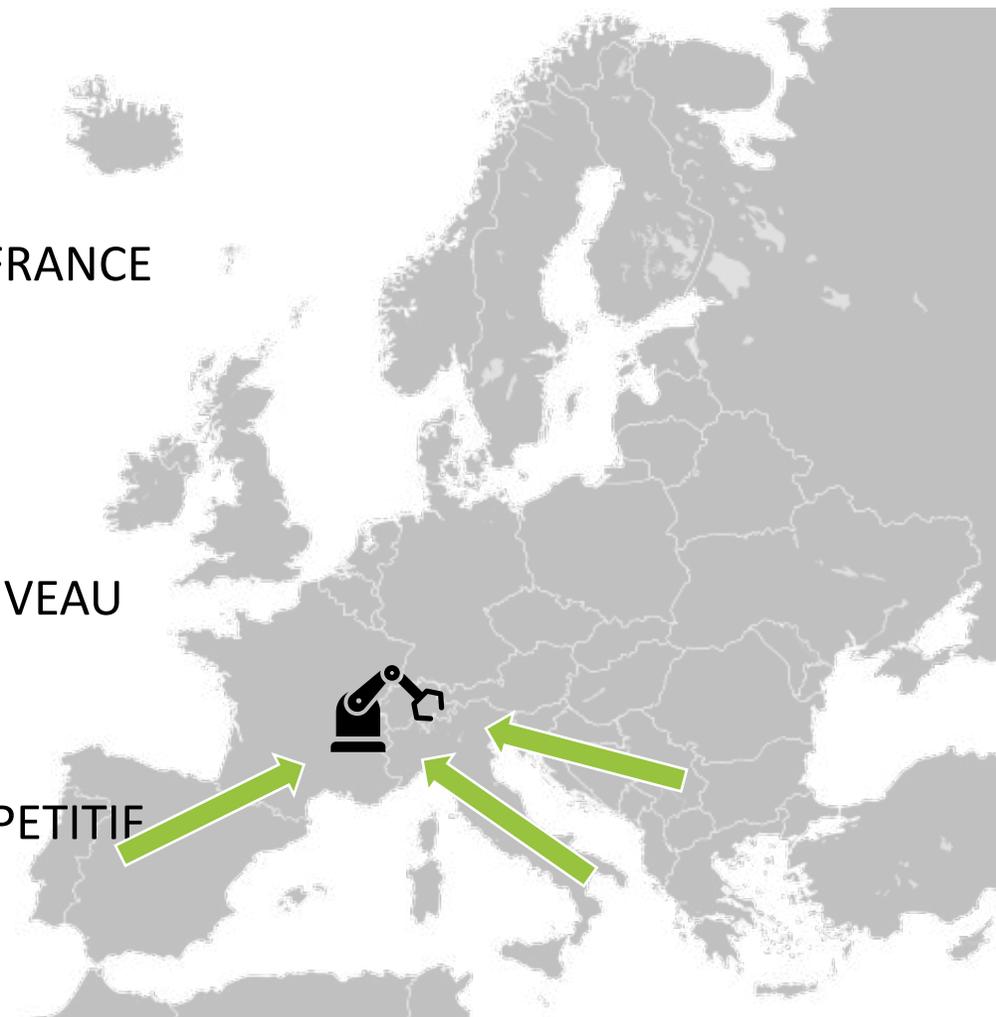
LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



NOTRE PROPOSITION

- PARTICIPER A LA REINDUSTRIALISATION DE LA FRANCE
- DIMINUER NOTRE IMPACT CARBONE
- VALORISER UNE MATIERE & PROPOSER UN NOUVEAU MARCHÉ (TRANCHES)
- INNOVER ET AUTOMATISER POUR RESTER COMPETITIF

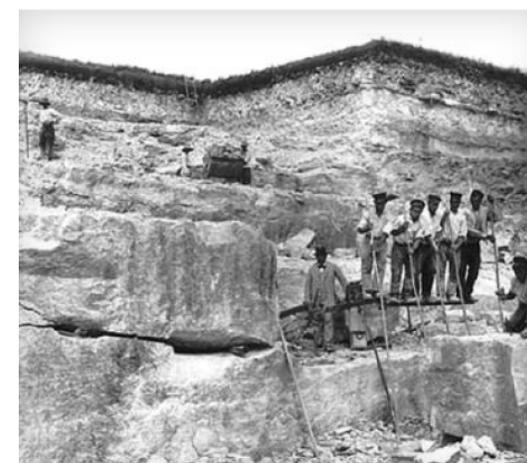
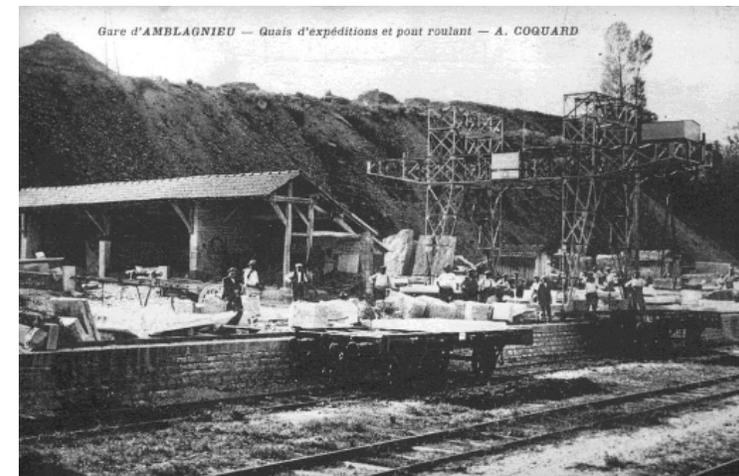


UNE FILIÈRE PROSPÈRE PENDANT DES SIÈCLES...

Depuis plusieurs siècles, les pierres de Villebois, Hauteville & Chandoré sont exploitées par les gens du pays pour un usage local.

Au XIXème siècle, l'exploitation de ces pierres connaît un essor remarquable et rentre dans l'ère industrielle.

Guinet-Derriaz a été créée en 1917 dans ce contexte florissant. La société fait partie du paysage local et a marqué son histoire. Au plus fort de son activité dans les années 50, Guinet-Derriaz recense 350 salariés et fait vivre un tissu industriel de plus de 1000 compagnons.



UNE FILIÈRE PROSPÈRE PENDANT DES SIÈCLES...

Les différents exploitants du bassin sont des PME qui n'ont pas pu réaliser les investissements industriels nécessaires pour devenir des ETI et produire ainsi efficacement et au bon prix, comme cela a été fait chez nos voisins européens.

Par conséquent, les blocs de marbres sont envoyés dans d'autres pays d'Europe (voire en Chine) pour y être façonnés puis revendus sur le marché mondial de la pierre naturelle.



TIMELINE

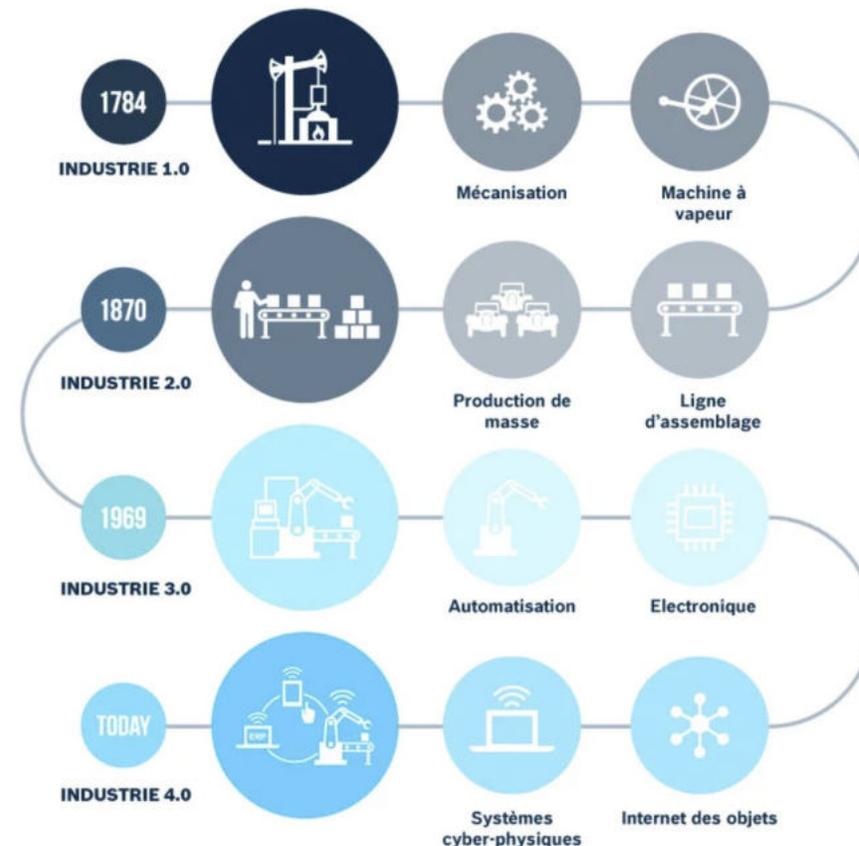


14 mois



USINE 4.0, C'EST QUOI?

- C'est l'intégration de technologies avancées pour créer des systèmes de fabrication intelligents, connectés et automatisés.
- Avantages principaux:
 - Augmentation de la productivité
 - Augmentation de la qualité
 - Meilleure flexibilité
 - Economies de coûts



LES TECHNOLOGIES UTILISEES

- Internet des objets (IoT) : Des capteurs et les appareils connectés permettent la collecte et l'analyse de données en temps réel.
- Big Data et Analytics : souligner l'importance de la prise de décision basée sur les données et de la maintenance prédictive.
- Robotique et automatisation : montrer comment les robots et les systèmes d'automatisation améliorent l'efficacité et réduisent les erreurs humaines.
- Intelligence artificielle (IA) : discuter du rôle de l'IA dans l'optimisation des processus de production et la possibilité d'opérations autonomes. (En cours d'implémentation)



MISE EN PLACE CHEZ GD1912

- Smart factory : les appareils IoT peuvent surveiller les opérations et améliorer la sécurité des travailleurs.
- Traitement automatisé de la pierre : les systèmes robotiques peuvent gérer la coupe, le façonnage et le polissage des pierres avec précision.
- Maintenance prédictive : l'analyse des données peut identifier les besoins de maintenance et prévenir les pannes d'équipement, garantissant ainsi une production ininterrompue.



L'USINE GUINET DERRIAZ

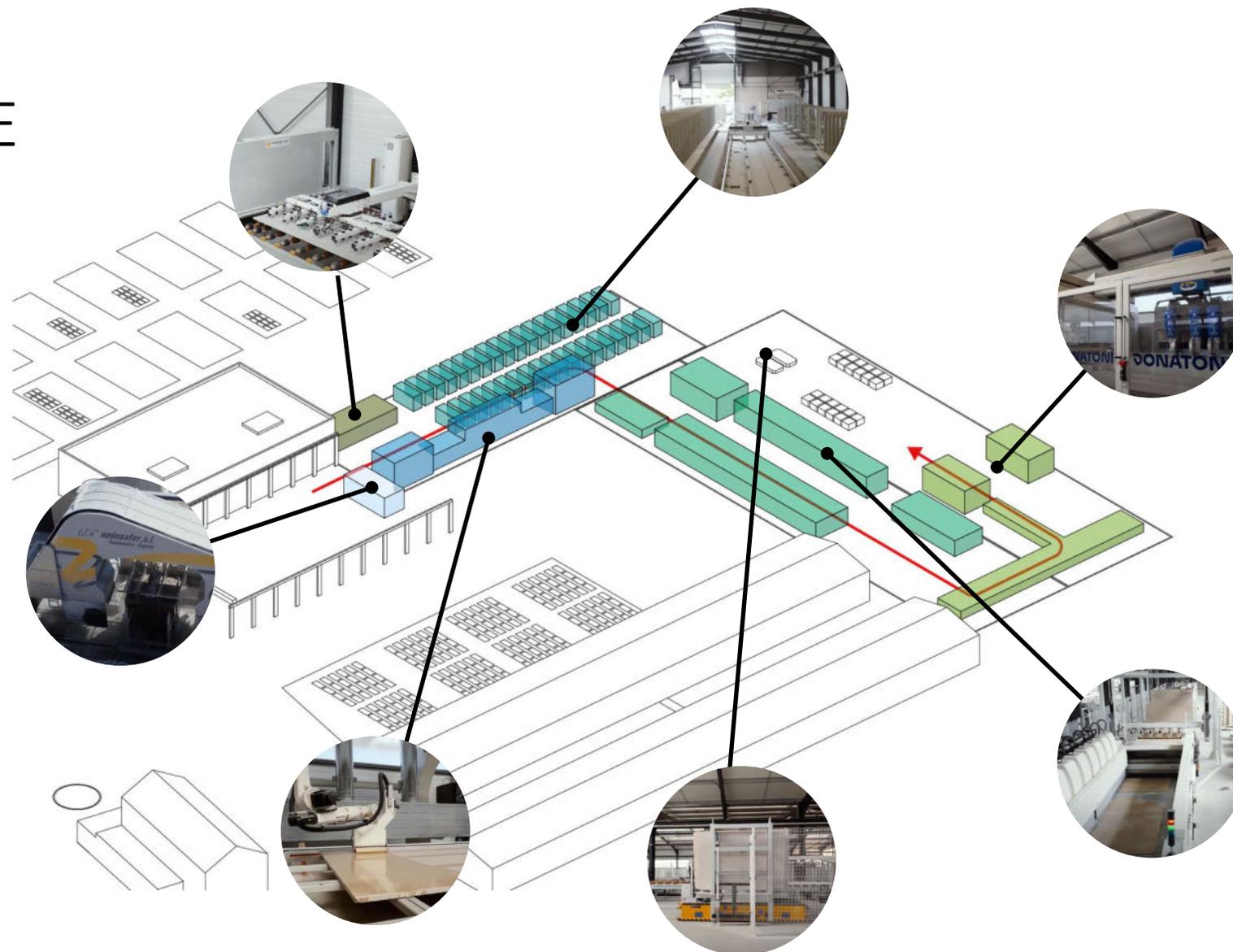


LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



PLAN USINE



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



LES AVANTAGES

- Efficacité améliorée : l'automatisation et les systèmes intelligents accélèrent les cycles de production, réduisent les déchets et augmentent le débit.
- Amélioration de la qualité : les capteurs avancés et les algorithmes d'IA permettent des mesures précises, résultant en des produits de qualité constante.
- Économies de coûts : les processus optimisés, les besoins en main-d'œuvre réduits et la maintenance prédictive entraînent des réductions de coûts et permettent ainsi d'investir dans d'autres innovations



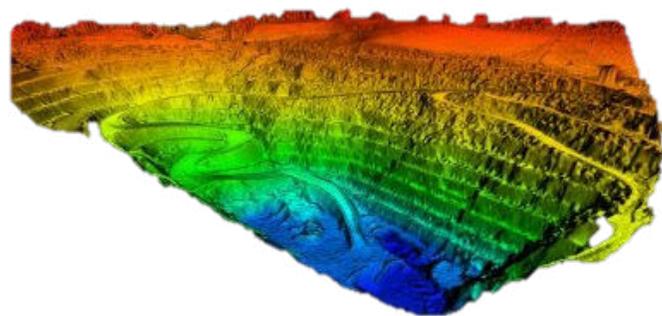
LES DEFIS

- Tendre vers une industrie décarbonée (Solaire)
- Former plus aux métiers de l'industrie (augmenter le vivier industriel en école, à l'université et par la formation professionnelle)
- Embauche d'apprentis & Création d'un nouveau cursus opérateurs machines CNC
- Requalification de la main-d'œuvre : Répondre au besoin de former et de perfectionner la main-d'œuvre pour s'adapter à l'évolution des rôles dans un environnement axé sur la technologie.
- Intégration et évolutivité : Il faut garantir l'intégration de différentes technologies et à la garantie de l'évolutivité.



CONCLUSION

- Rappel des avantages de l'usine 4.0 dans l'industrie de la pierre.
- L'importance d'adopter l'innovation et de s'adapter à l'évolution du paysage pour rester compétitif.
- Encourager l'exploration et l'adoption des technologies 4.0.



QUESTIONS/REPONSES



GUINET.DERRIAZ

1912

38390 - Porcieu Amblagnieu

Tel. : + 33 (0)4 74 88 49 26

Port. : + 33 (0)6 88 29 36 30

christophe.margand@guinet-derriaz.fr

www.guinet-derriaz.fr

QUELQUES APPORTS DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE AU CALCUL DES STRUCTURES MAÇONNÉES

M. Bagneris (Stono)

F. Dubois (LMGC)



De quoi parle t on ?

Structures

- Patrimoine
- Ouvrages du Génie Civil (ponts, murs de soutènement, etc)
- Bâtiment

Type d'analyse

- Mécanique
- Thermique
- Environnemental

Données existantes

Beaucoup de ressources bibliographiques disponibles les méthodes :

- Association Française de Génie Civil (AFGC) : « Evaluation structurale et conception de réparations des ouvrages d'art en maçonnerie » (2022).
- Traité de maçonnerie ancienne. Calcul - matériaux - diagnostic et réhabilitation. A. Popinet (2018).
- Thèses : Delbecq (1982), Block (2009), Grandjean (2009), Fantin (2017), etc.
- Articles dans des revues scientifiques.
- Documents professionnels : cerema, str

Mais aussi beaucoup de manques notamment sur :

- la construction des ouvrages et leurs évolutions,
- les matériaux,
- Les carrières.

Des données très « éparpillées »

Évaluation mécanique

Approches de calcul

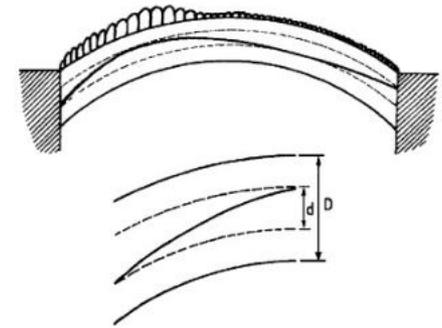
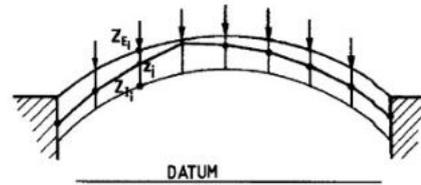
| Description géométrique Méthodes de calcul | Bloc à Bloc | Macro éléments | Milieu Continu |
|---|------------------------|--|---------------------------|
| Géométrie : Statique graphique, réseau de forces, etc | Méry, O'Dwyer | | |
| Calcul à la rupture Analyse limite | Voute, RING | UB-ALMANAC | FEM(optum) |
| Evolution système continu | FEM (texturé ou joint) | Systèmes à ressort Poutre équivalente | FEM (ad hoc, homogénéisé) |
| Evolution système discrets | DEM, FEM/DEM | | |

Évaluation mécanique

Approche statique « géométrique » - principe

Calcul de la ligne de pression :

- Équilibre des forces et des moments
- Vérification de quelques règles :
 - blocs rigides,
 - pas de glissement dans les joints,
 - contrainte de compression plus faible que celle de la pierre
- Se donner un domaine de chargements « supportables »



Méthodes connues

- Épures de Méry
- Réseau de force (O'Dwyer)

Il s'agit d'un problème hyperstatique (degré 3) on cherche un ensemble de solutions en ayant fixé 3 valeurs :

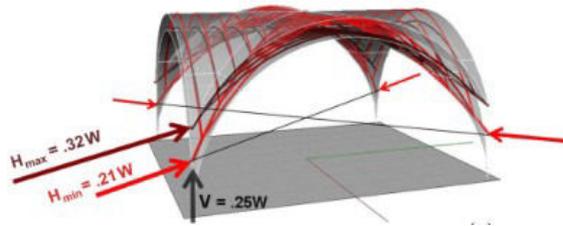
- force horizontale
- 2 points de passage de la ligne de pression

Évaluation mécanique

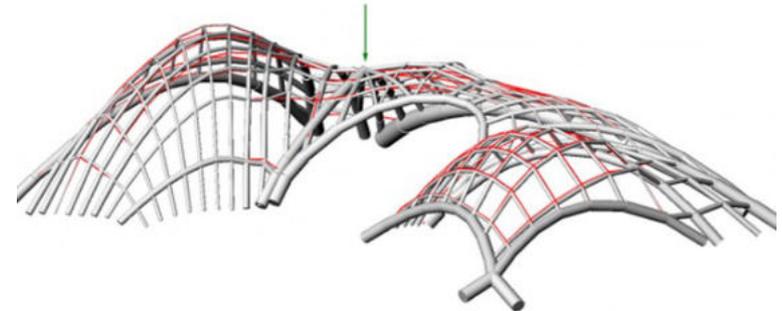
Approches statique « géométrique » – évolutions

- Informatisation des méthodes
- Passage au 3D
- Calcul évolution de structures

Block & Ochsenfdorf 2007



Block & Lachaeur 2014



<https://block.arch.ethz.ch/brg/>

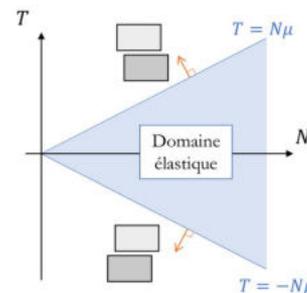
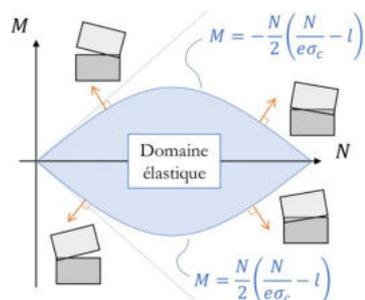
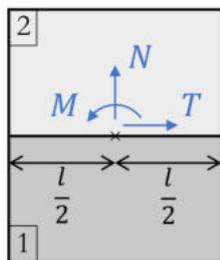
Évaluation mécanique

Etat limite - principe

On cherche la charge de ruine en assurant la compatibilité entre

- l'équilibre
- les critères de résistance (aux joints, dans la pierre).

Ne nécessite pas de calculer la solution tout le long du trajet de chargement.



- Analyse limite : principe du travail plastique maximal ; matériau élastoplastique parfait → charge limite
- Calcul à la rupture : principe des puissances virtuelles (approche cinématique par l'intérieur) ; matériau suffisamment ductile → charge extrême

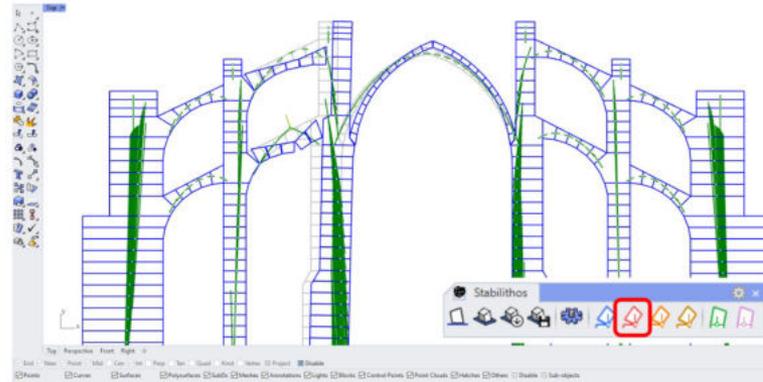
Par exemple Voûte (SETRA → CEREMA), Ring

Évaluation mécanique

Etat limite - évolutions

Par exemple Paul Nougayrède GSA - JNM2023

- 2D plus complexe
- Passage au 3D



Calcul de coefficients de sécurité

- Matériau
- Géométrie

Évaluation mécanique

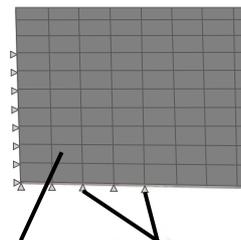
Description continue FEM - principe

On représente la maçonnerie par un milieu continu équivalent.
On ne voit pas les blocs ou les joints

Toute la phénoménologie peut être décrite par

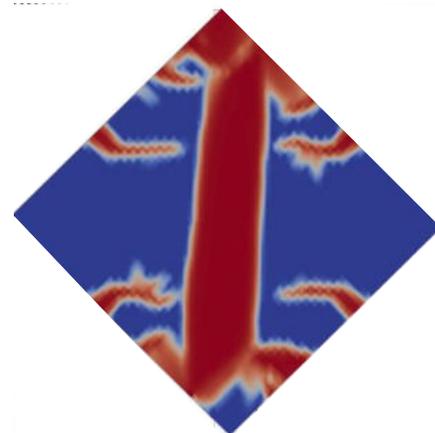
- Un modèle adhoc/phénoménologique (expérimental|numérique)
- Un modèle issue de l'homogénéisation (théorique|numé

Le modèle de comportement représente les non linéarités par de la plasticité et/ou de l'endomm

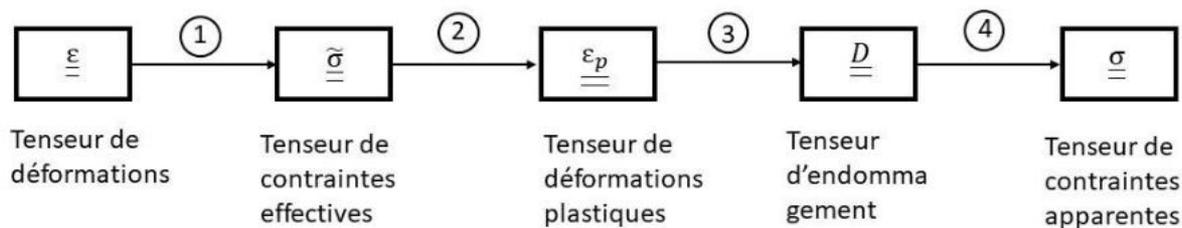
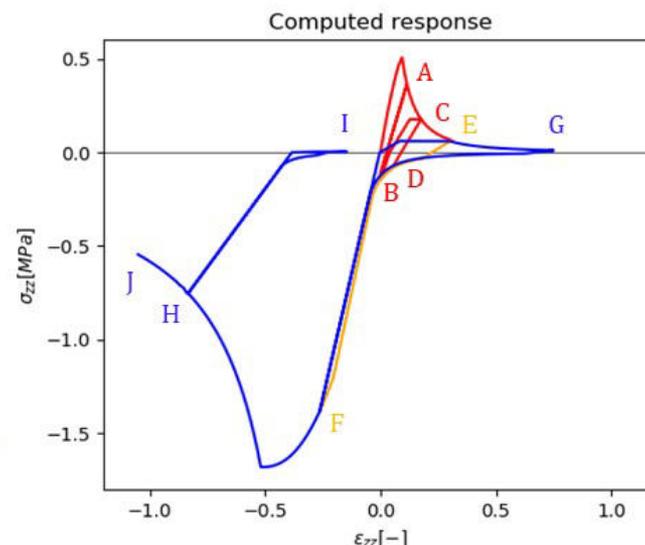
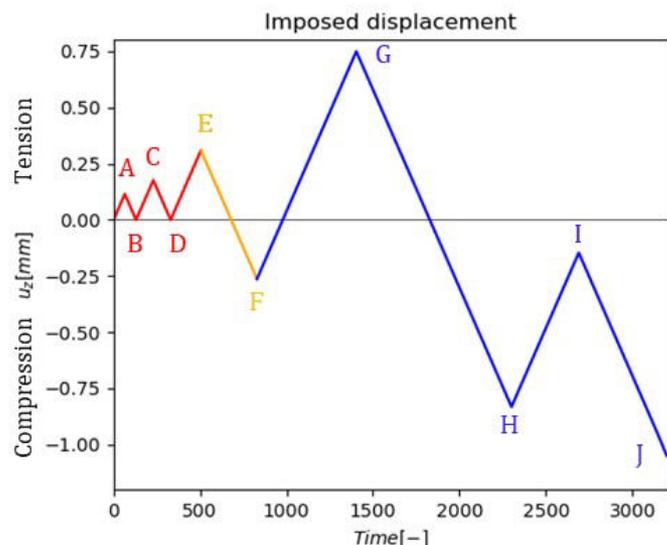
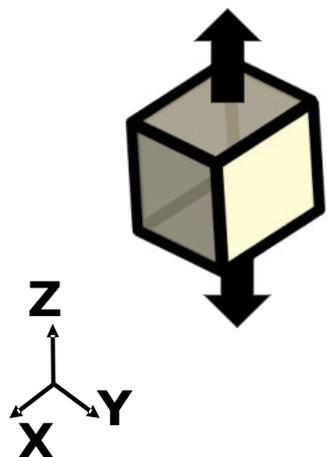


Homogenized
masonry

DOF constraints (x, y, z)



Évaluation mécanique



LMDC,

Évaluation mécanique

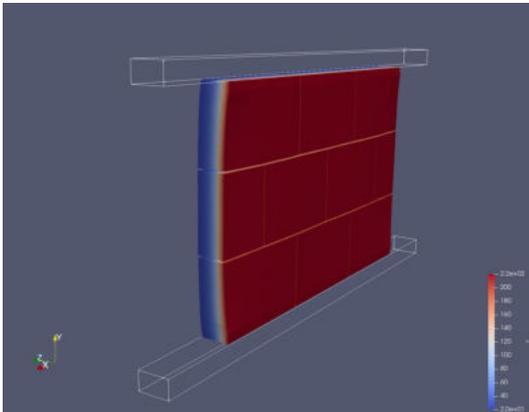
Description continue FEM – évolutions

- Enrichir les mécanismes (endommagement orthotrope)

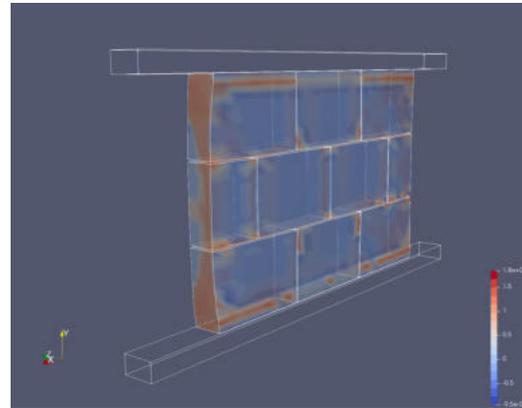
$$S^{eff} = S^0 + d_1 A_1 : S^0 + d_2 A_2 : S^0 + d_3 A_3 : S^0$$

Tisserand (2022)

- Prise en compte de couplage multiphysique (humidité, feu)



Température



Endommagement

A. Boukham
DEMMEFI

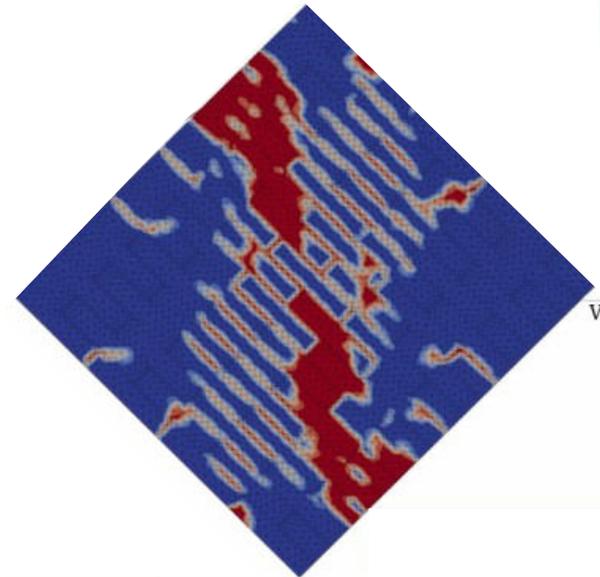
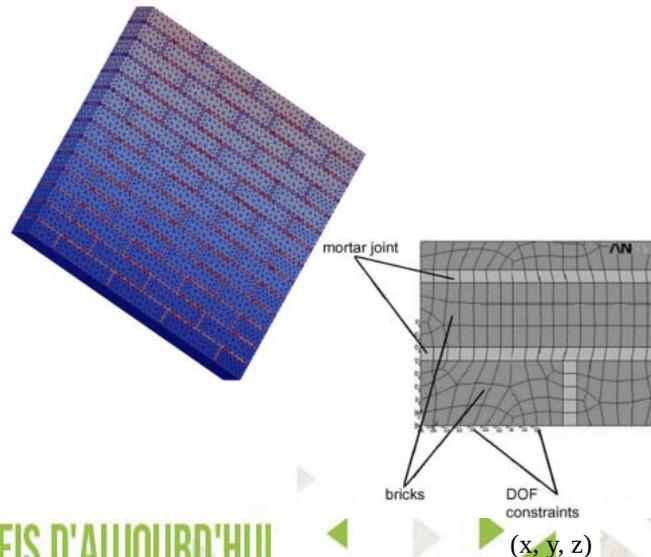
Évaluation mécanique

Description bloc à bloc (DEM|FEM + éléments joints|FEM texturé) - principe

- On représente explicitement les blocs et les joints/interfaces
- Le comportement du joint décrit une grande partie de la non linéarité

On distingue différents types d'approches :

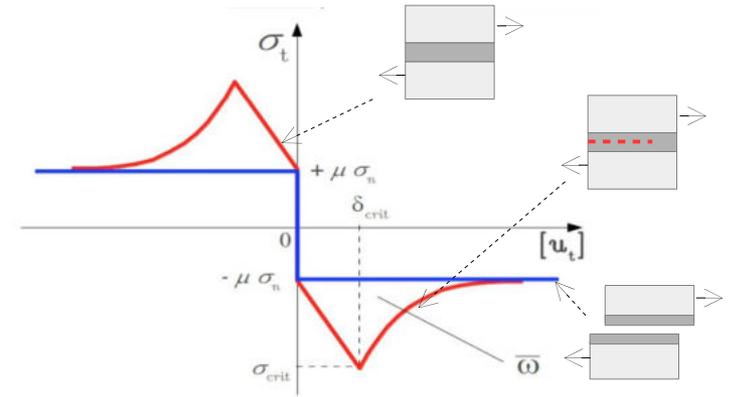
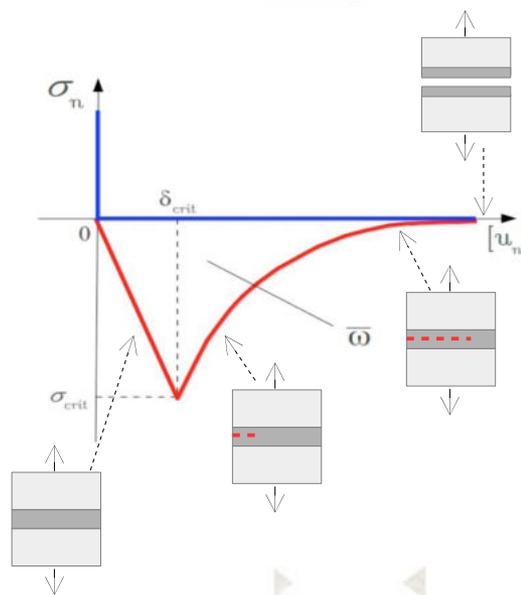
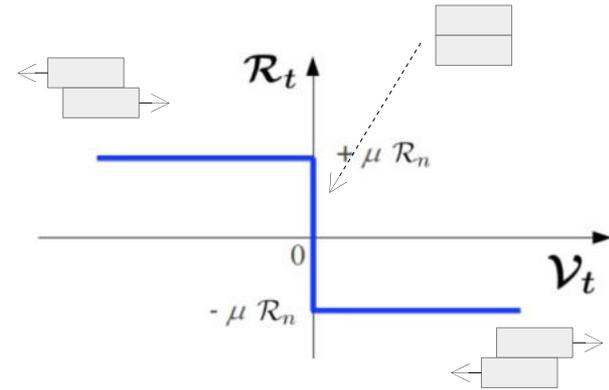
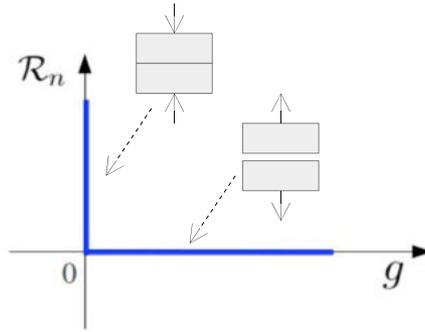
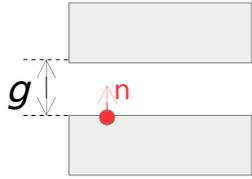
- milieu continu hétérogène
 - FEM avec joints (le joint est un interface sans épaisseur)
 - FEM texturé (le joint est maillé)
- milieu divisé
 - chaque bloc est « libre » (dynamique) et en interaction avec ses voisins



Évaluation mécanique

Description bloc à bloc - principe

Modèle de joints|contact

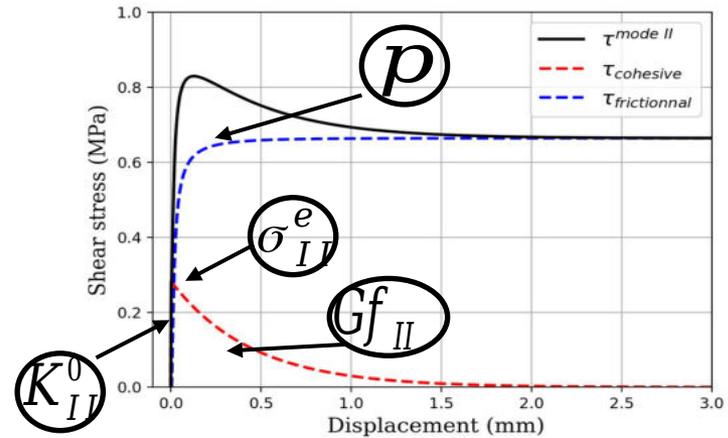
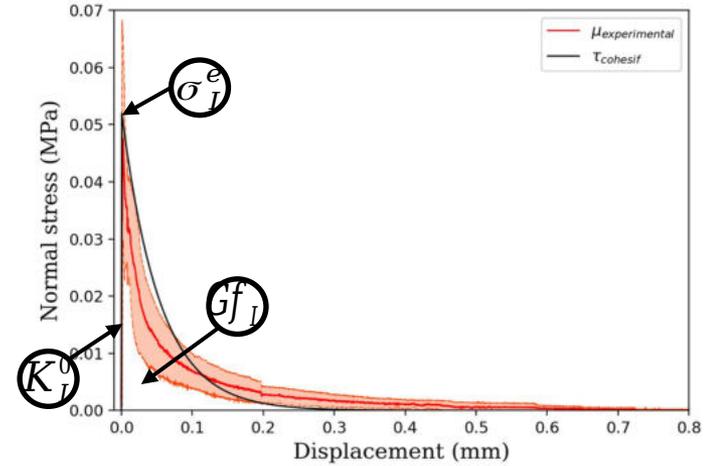


Évaluation mécanique

Description bloc à bloc - évolution



Caractérisation expérimentale

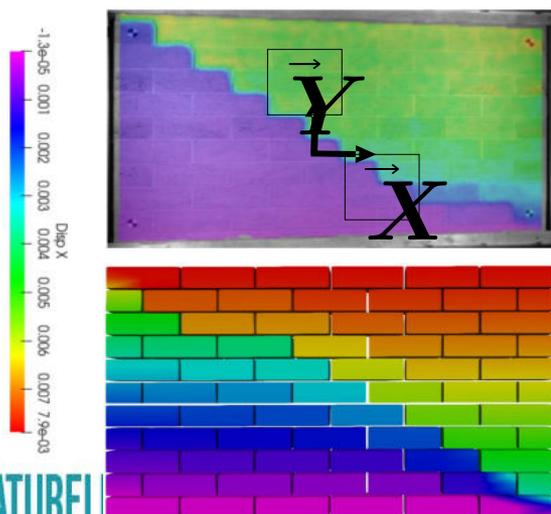
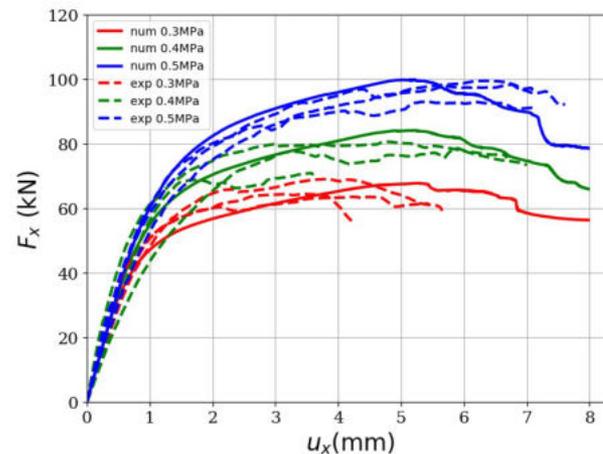


Évaluation mécanique

Description bloc à bloc - évolution



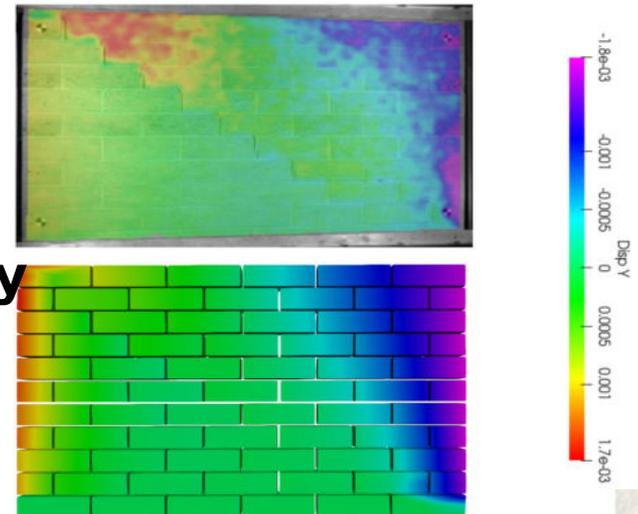
Approches hybrides FEM-DEM



EXP

NUM

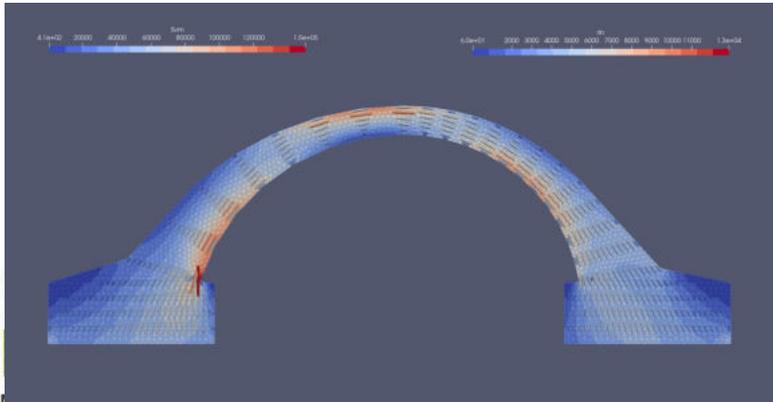
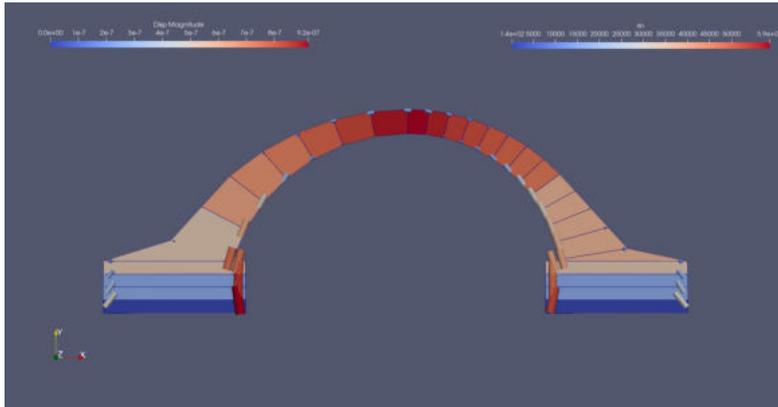
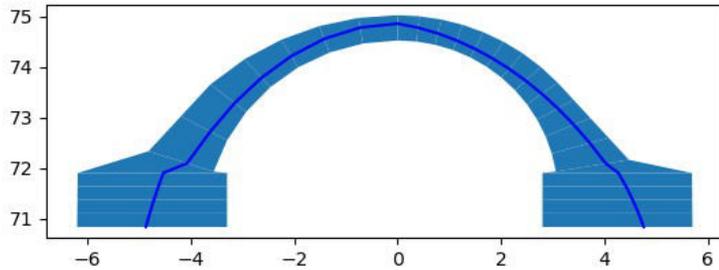
$U_x \leftrightarrow U_y$



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

Évaluation mécanique



En résumé

Statique graphique ou état limite

- Ligne de pression (LP)
- coefficient de sécurité (CS)

Approche DEM :

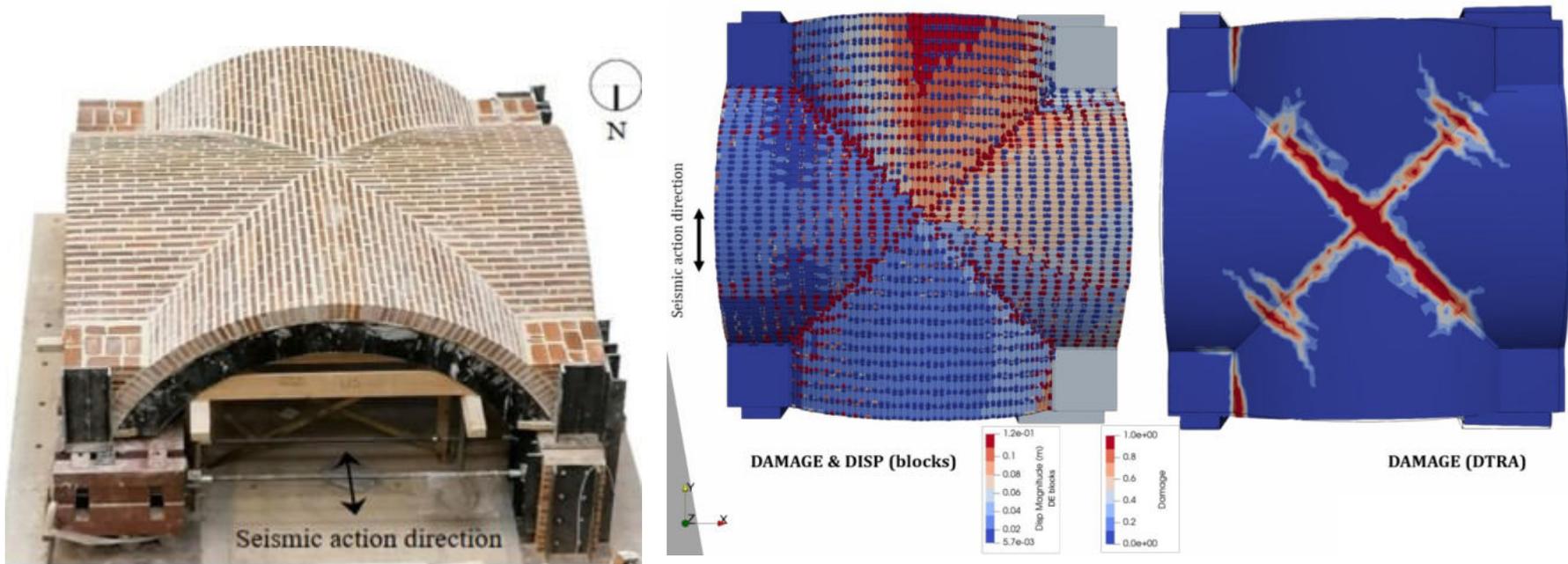
- Efforts dans les joints (→ LP+CS)
- Mouvement des blocs

Approche FEM|DEM

- Efforts dans les joints (→ LP+CS)
- Mouvement de la structure
- Etat de contraintes dans les blocs

Évaluation mécanique

Les approches avancées donnent des résultats similaires et complémentaires



A. Ferrante (2022)

Évaluation mécanique

Actions en cours

- MaGIS
- JNM
- PN DOLMEN
- Projets ANR : DEMMEFI, POSTFIRE, MENHIR, ALTIOR
- Chantier scientifique Notre-Dame (CNRS-MC)

Évaluation mécanique

Pas juste du calcul !!

- Modélisation géométrique 3D
 - Archives : plans, etc
 - Relevés : scanner laser, photogrammétrie + reconstruction de modèles
 - Génération automatique à partir d'une sémantique architecturale
- Caractérisation des propriétés mécaniques
 -
- Caractérisation de l'état « actuel »
 - Mesures de vibrations (ambiantes ou forcées)
 - Chargement
- Écosystème d'information (bases de données, archives, nuages de points, etc)
 - Comment partager les informations

Évaluation Thermique

Évaluation de la performance énergétique d'une structure en maçonnerie

Problématiques

- Caractérisation des propriétés thermo hydrique de la pierre.
- Caractérisation des assemblages mur, mur+ouverture, etc.
- Bâtiments tests.
- Disposer d'un outil de simulation du « composite » (pierre + isolant + enduit)
- Disposer d'un outil de simulation à l'échelle de la structure (energy+)

Différentes actions de recherche

- OEHM (Région Occitanie/FEDER)
- Innovation et Solution pour Lutter contre la Surchauffe Urbaine (PN ISSU)

Évaluation environnementale

Évaluation de la performance environnementale de la maçonnerie

- Analyse de cycle de vie, avec analyse de l'impact
 - Production du matériau
 - Intervention (maintenance, réparation, renforcement)
 - Potentiel de re-emploi (économie circulaire)

Actions en cours

- PN Dolmen,
- projet ANR Menhir

- Introduction
- Traduction de la forme en géométrie constructive
- L'appareillage : du continu au discret
- Quelques applications d'une méthodologie
- Conclusion

- Introduction

projets en cours

ANR DEMMEFI, ANR MENHIR, ANR ALTIOR, ANR POSTFIRE

Projet National DOLMEN

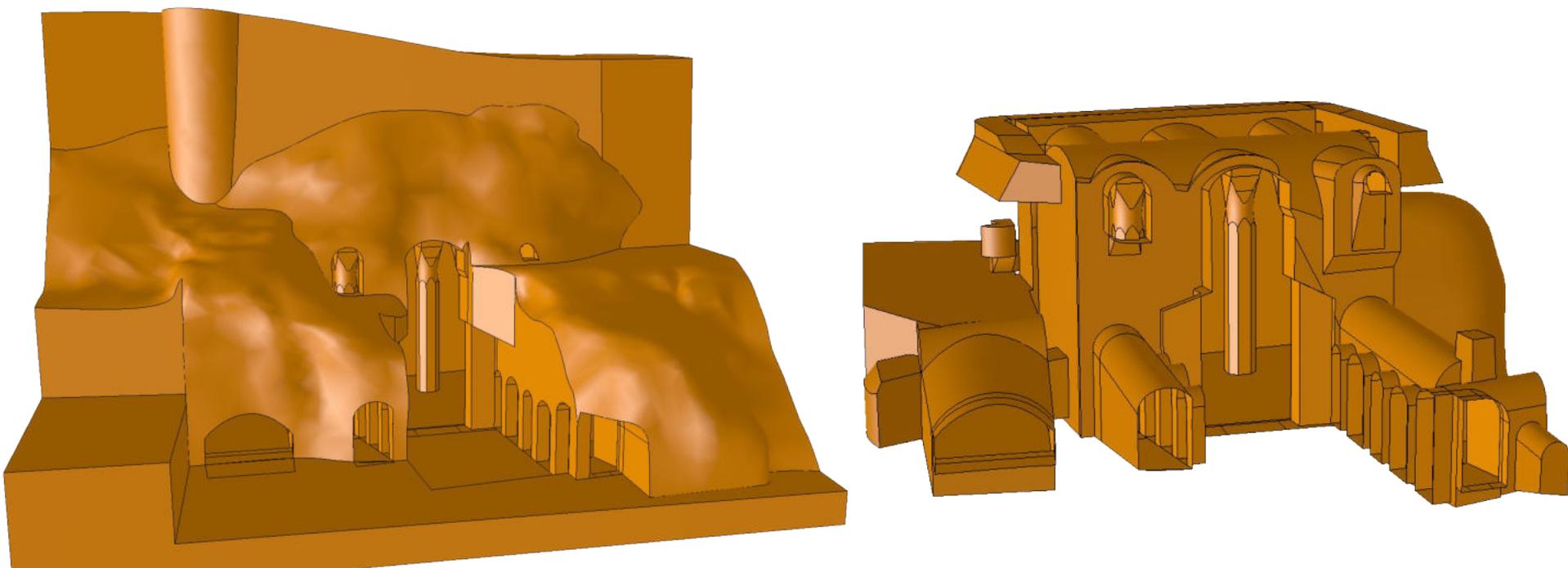
collaboration chercheurs | ingénieurs | artisans

transfert de technologie

- Traduction de la forme en géométrie constructive



- Traduction de la forme en géométrie constructive



- Traduction de la forme en géométrie constructive

Nuage de points

Recherche de primitives (plans, cylindres, ...)

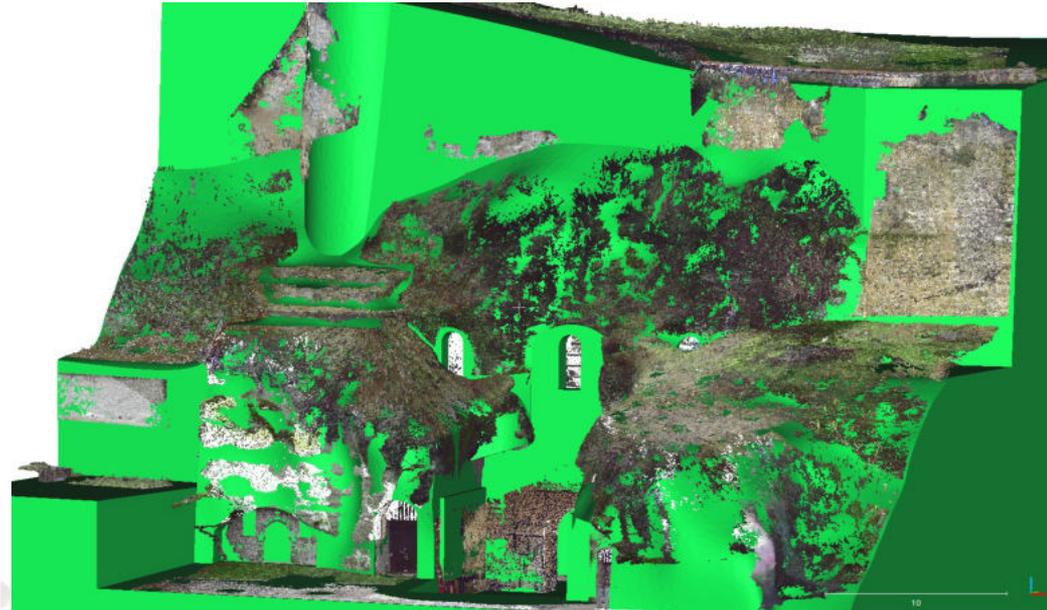
Formes libres interpolantes

Principes régulateurs

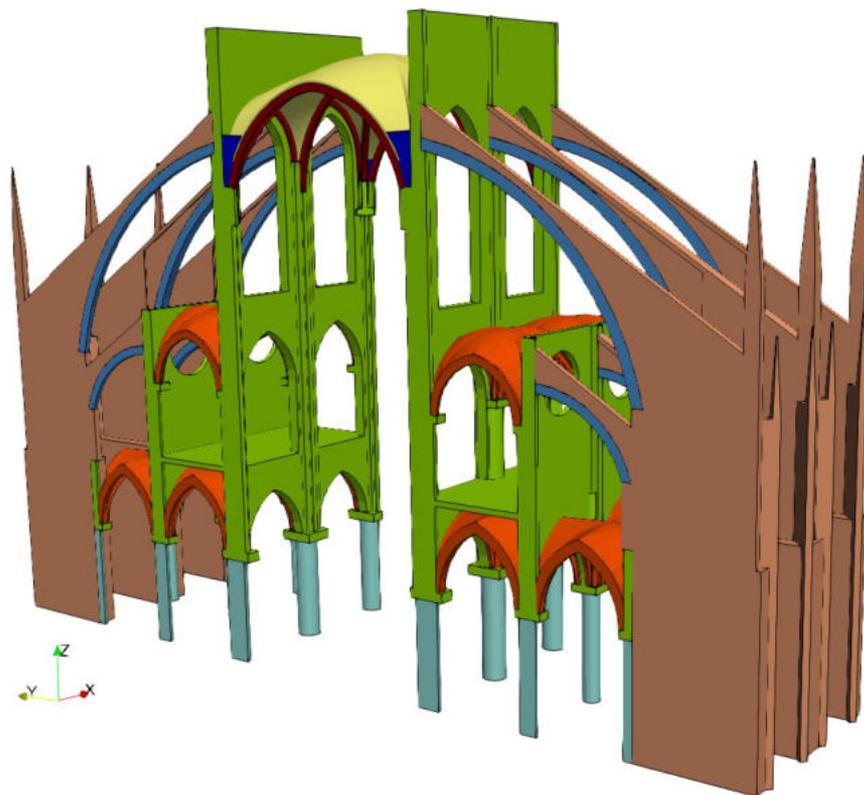
→ travaux Laboratoire

MAP GAMSAU

ANR MONUMENTUM







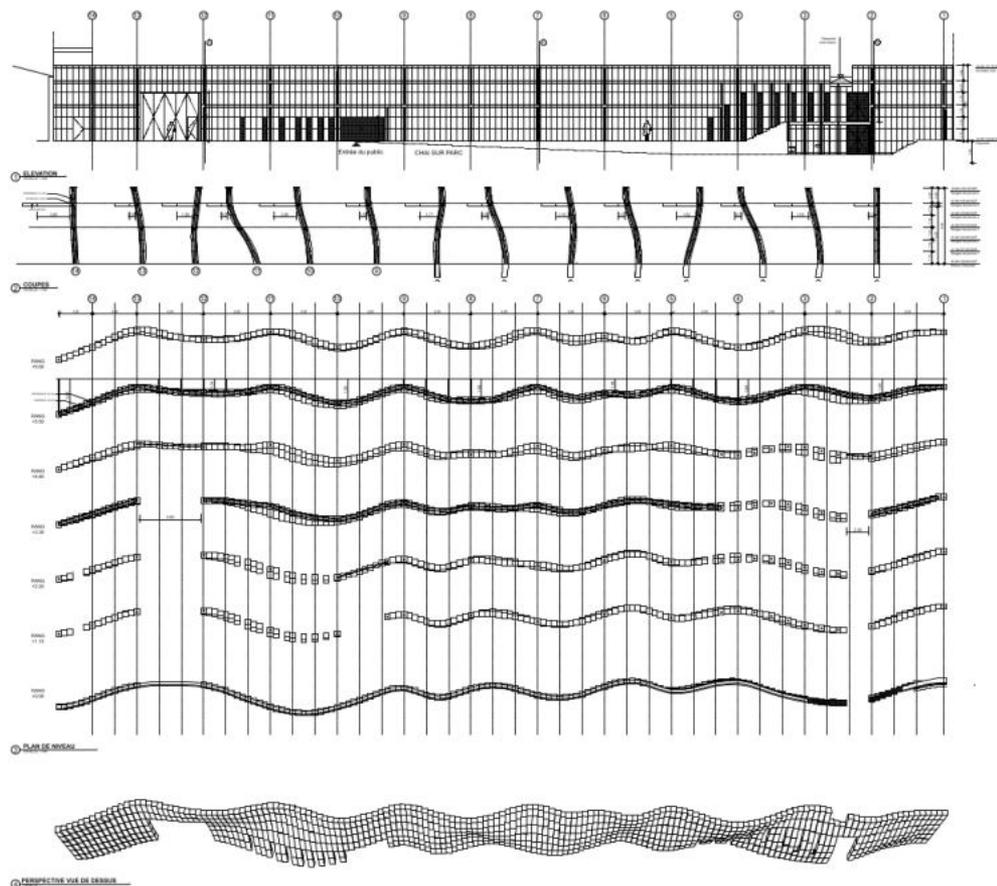
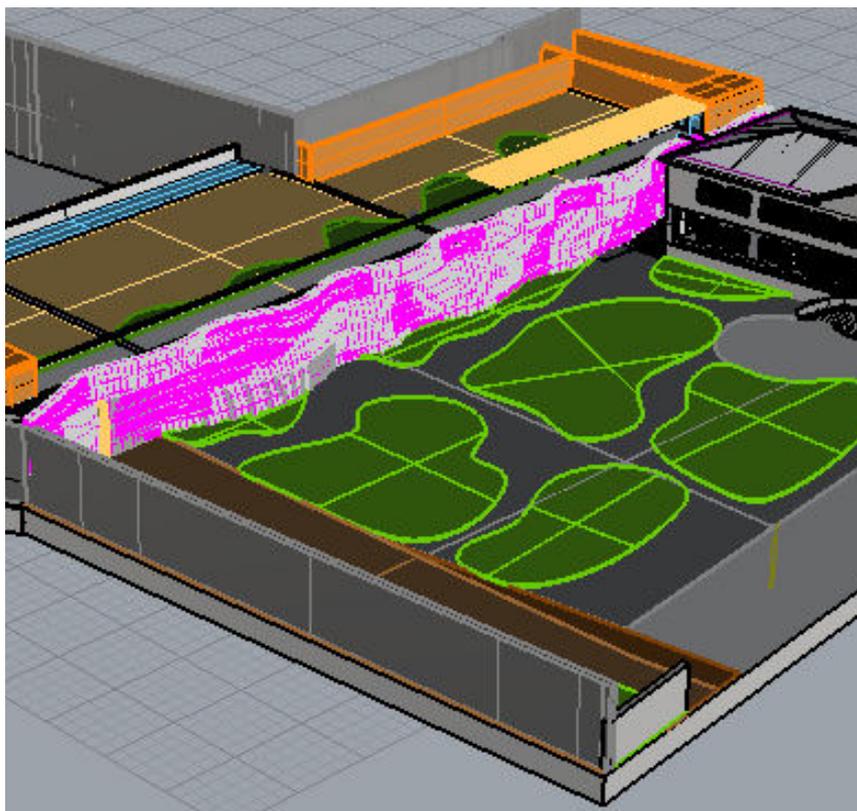
Nuage de points : Andrew Tallon

ANR DEMMEFI

Chai de la Maison Delas Frères 2019

ŠTONO

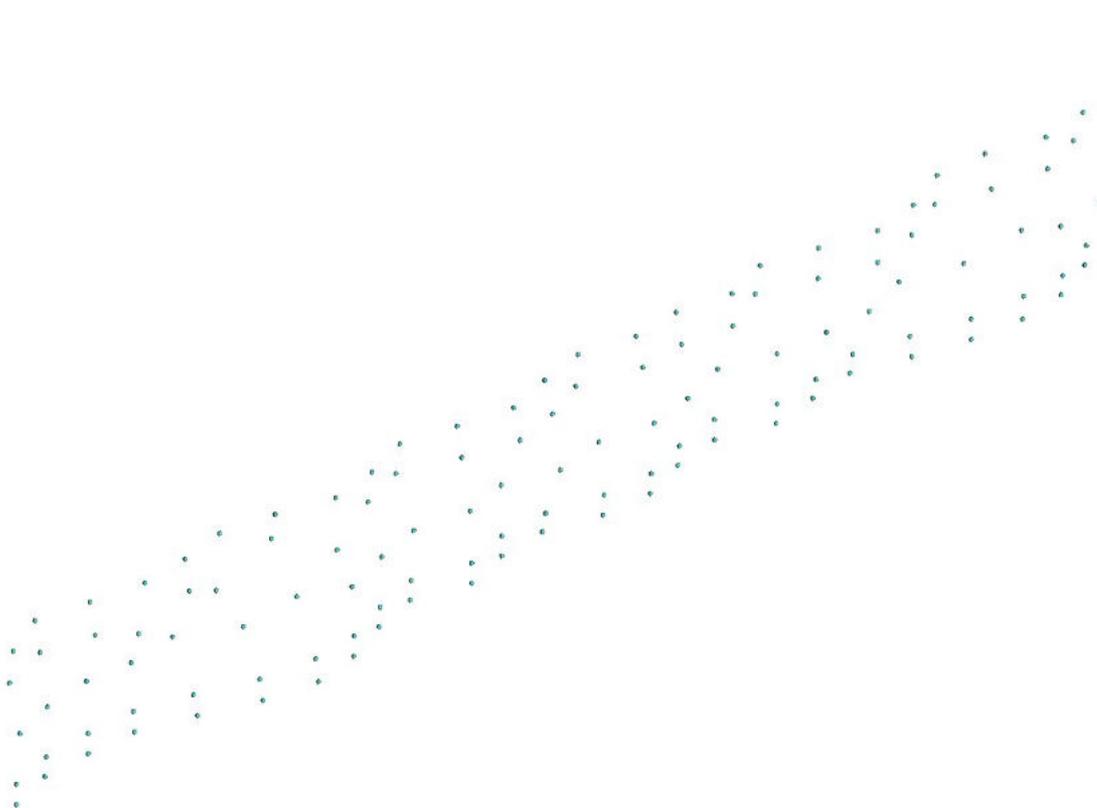




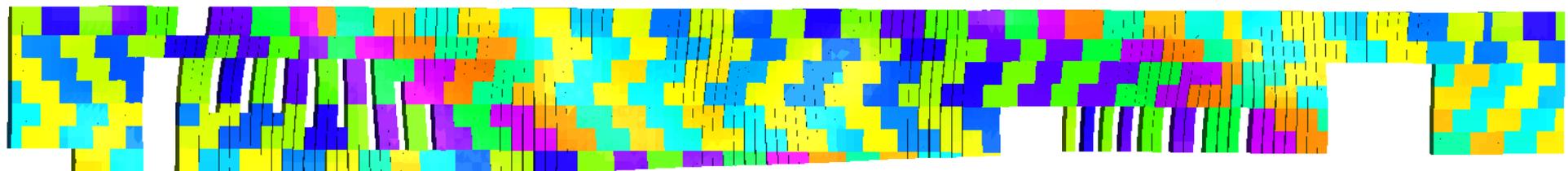
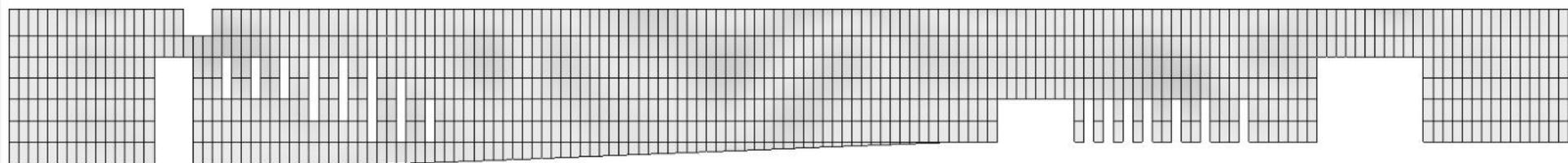
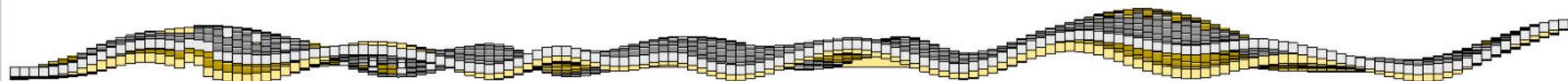
Maquette numérique et plan : C.F. Svenstedt Architectes

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



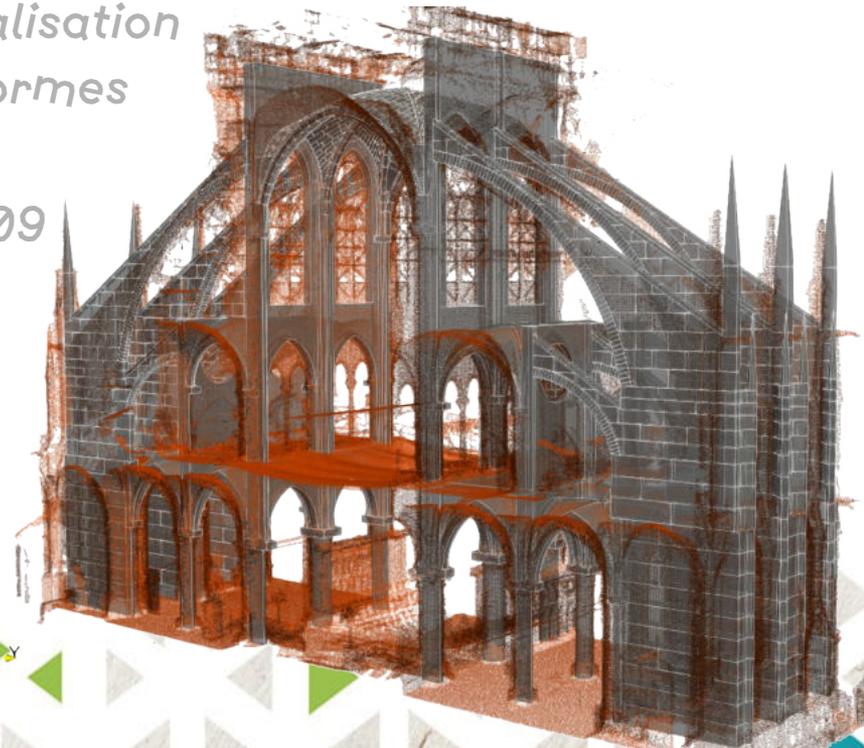
```
24 DATA;
25 #10-SHAPE REPRESENTATION RELATIONSHIP(' ', #195, #38);
26 #11-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#205, #206, #207, #208, #209),
27 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310131287065421, 1., 2.07696236950051),
28 .UNSPECIFIED.);
29 #12-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#210, #211, #212, #213, #214),
30 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.303209017253134, 1., 2.07248792059744),
31 .UNSPECIFIED.);
32 #13-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#215, #216, #217, #218, #219),
33 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.307773375466673, 1., 2.07920164532211),
34 .UNSPECIFIED.);
35 #14-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#220, #221, #222, #223, #224),
36 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.306696488266973, 1., 2.07622796766258),
37 .UNSPECIFIED.);
38 #15-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#225, #226, #227, #228, #229),
39 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.306295230305588, 1., 2.04506454341199),
40 .UNSPECIFIED.);
41 #16-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#230, #231, #232, #233, #234),
42 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310960338501776, 1., 2.07788022572236),
43 .UNSPECIFIED.);
44 #17-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#235, #236, #237, #238, #239),
45 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.303353063867313, 1., 2.0404207041075),
46 .UNSPECIFIED.);
47 #18-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#240, #241, #242, #243, #244),
48 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.290073199186546, 1., 2.09302893466172),
49 .UNSPECIFIED.);
50 #19-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#245, #246, #247, #248, #249),
51 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.302996723504993, 1., 2.04595658983505),
52 .UNSPECIFIED.);
53 #20-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#250, #251, #252, #253, #254),
54 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.30740052185594, 1., 2.07694523357071),
55 .UNSPECIFIED.);
56 #21-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#255, #256, #257, #258, #259),
57 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310435439159235, 1., 2.07691032353423),
58 .UNSPECIFIED.);
59 #22-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#260, #261, #262, #263, #264),
60 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.30645266477243, 1., 2.07939822037415),
61 .UNSPECIFIED.);
62 #23-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#265, #266, #267, #268, #269),
63 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310730604414349, 1., 2.07882017202846),
64 .UNSPECIFIED.);
65 #24-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#270, #271, #272, #273, #274),
66 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310316777608336, 1., 2.07756820200165),
67 .UNSPECIFIED.);
68 #25-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#275, #276, #277, #278, #279),
69 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.302941276012131, 1., 2.07264956278232),
70 .UNSPECIFIED.);
71 #26-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#280, #281, #282, #283, #284),
72 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.306655850175148, 1., 2.08275376744007),
73 .UNSPECIFIED.);
74 #27-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#285, #286, #287, #288, #289),
75 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.310512365203786, 1., 2.07848327693469),
76 .UNSPECIFIED.);
77 #28-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#290, #291, #292, #293, #294),
78 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.304516577709766, 1., 2.07490272920018),
79 .UNSPECIFIED.);
80 #29-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#295, #296, #297, #298, #299),
81 .UNSPECIFIED, .F., .F., (4, 1, 4), (0.307627099907227, 1., 2.07895757944507),
82 .UNSPECIFIED.);
83 #30-B SPLINE CURVE WITH KNOTS(' ', 3, (#300, #301, #302, #303, #304)
```



- L'appareillage : du continu au discret

Formes à pôles | du point au volume

*Contribution à la conception et à la réalisation
des morphologies non-standard : les formes
pascaliennes comme outil,
M. Bagnēris, Université Montpellier, 2009*



ANR DEMMEFI

- Quelques applications d'une méthodologie

Eglise abbatiale de Sénanque

Renzo Wieder, Equilibre Structures

Gymnase Alain Mimoun – Issy Les Moulineaux

Artibal Architectes, Outarex, Rocamat, Normacadre

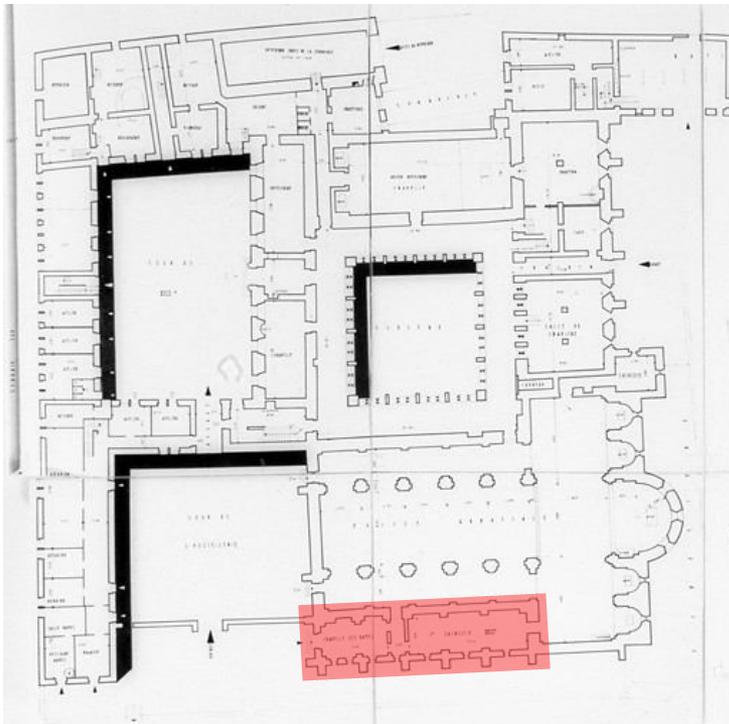
- Observations de désordres
 - tassements différentiels
 - dévers murs gouttereaux
 - fissures
- Méthodologie d'analyse
 - histoire
 - éléments discrets
 - statique et sismique EC6 / EC8
- Préconisations



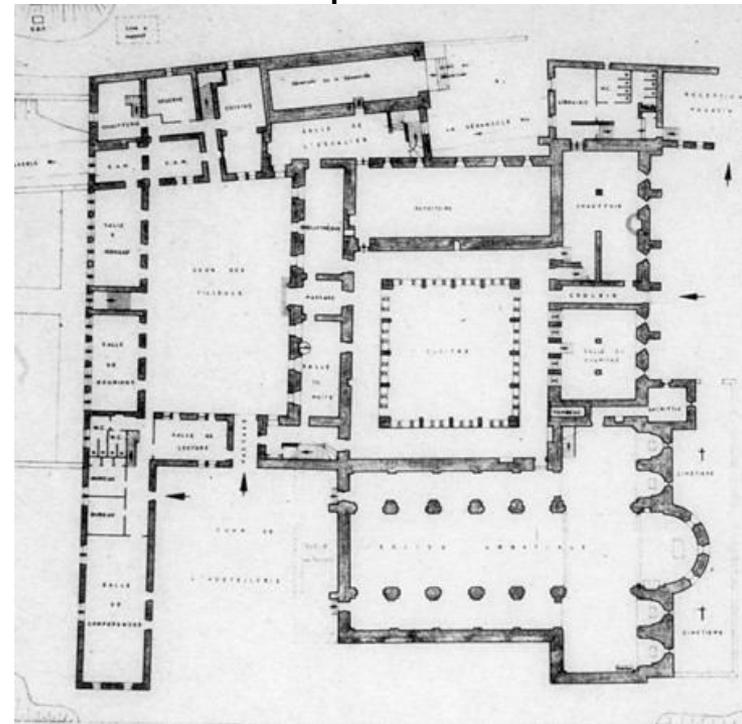
Eglise Abbatiale de Sénanque XIII^s

■ Histoire

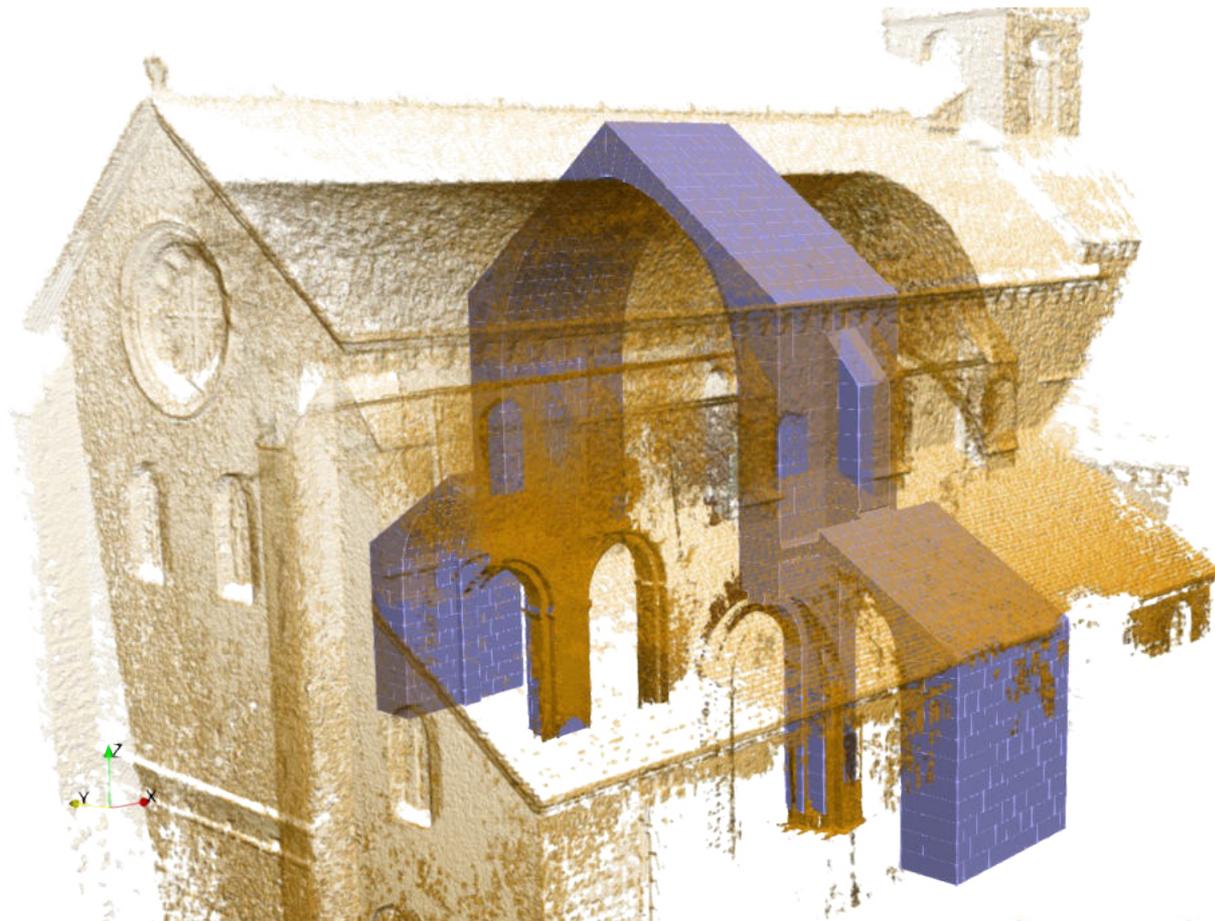
avant 1974



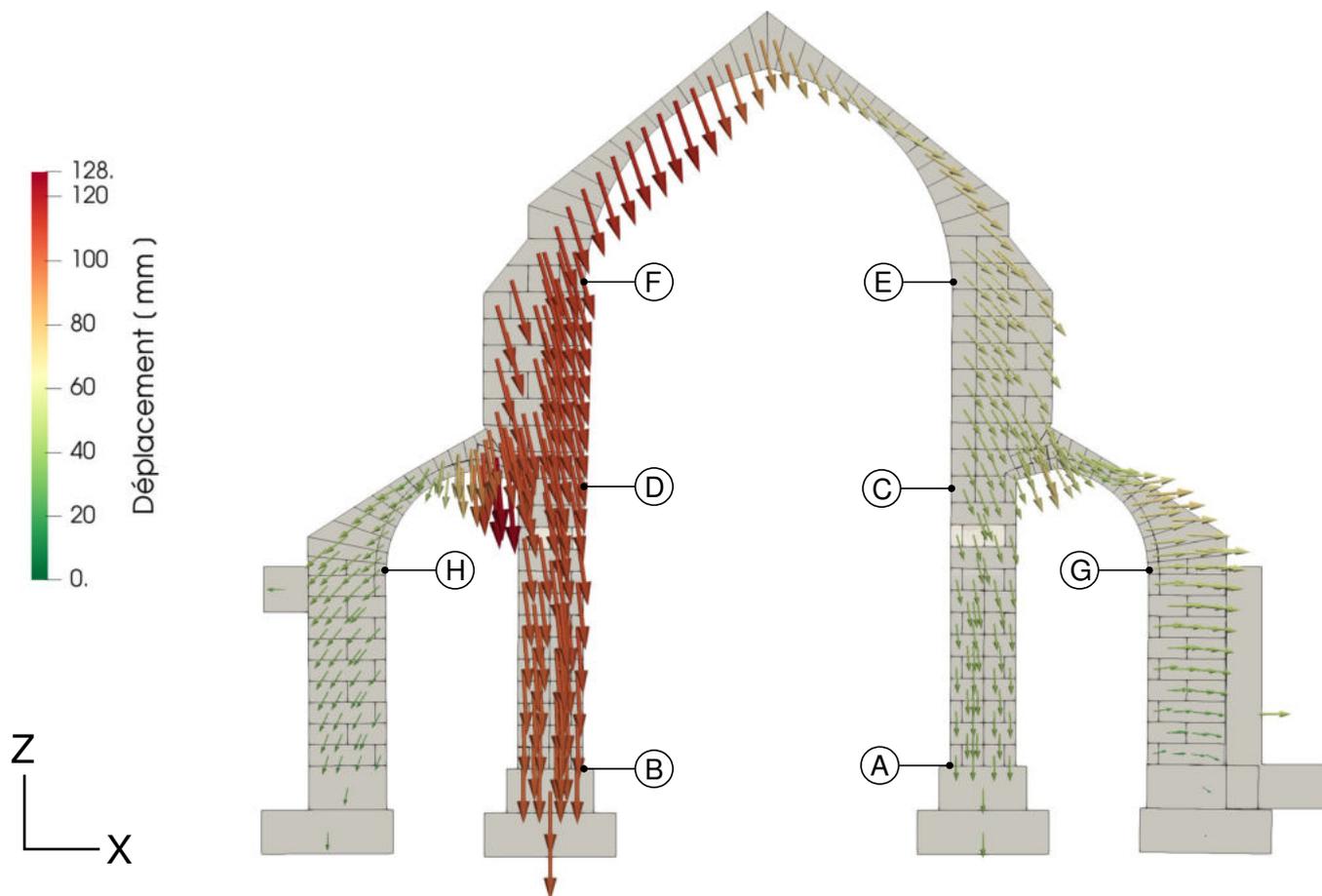
après 1974



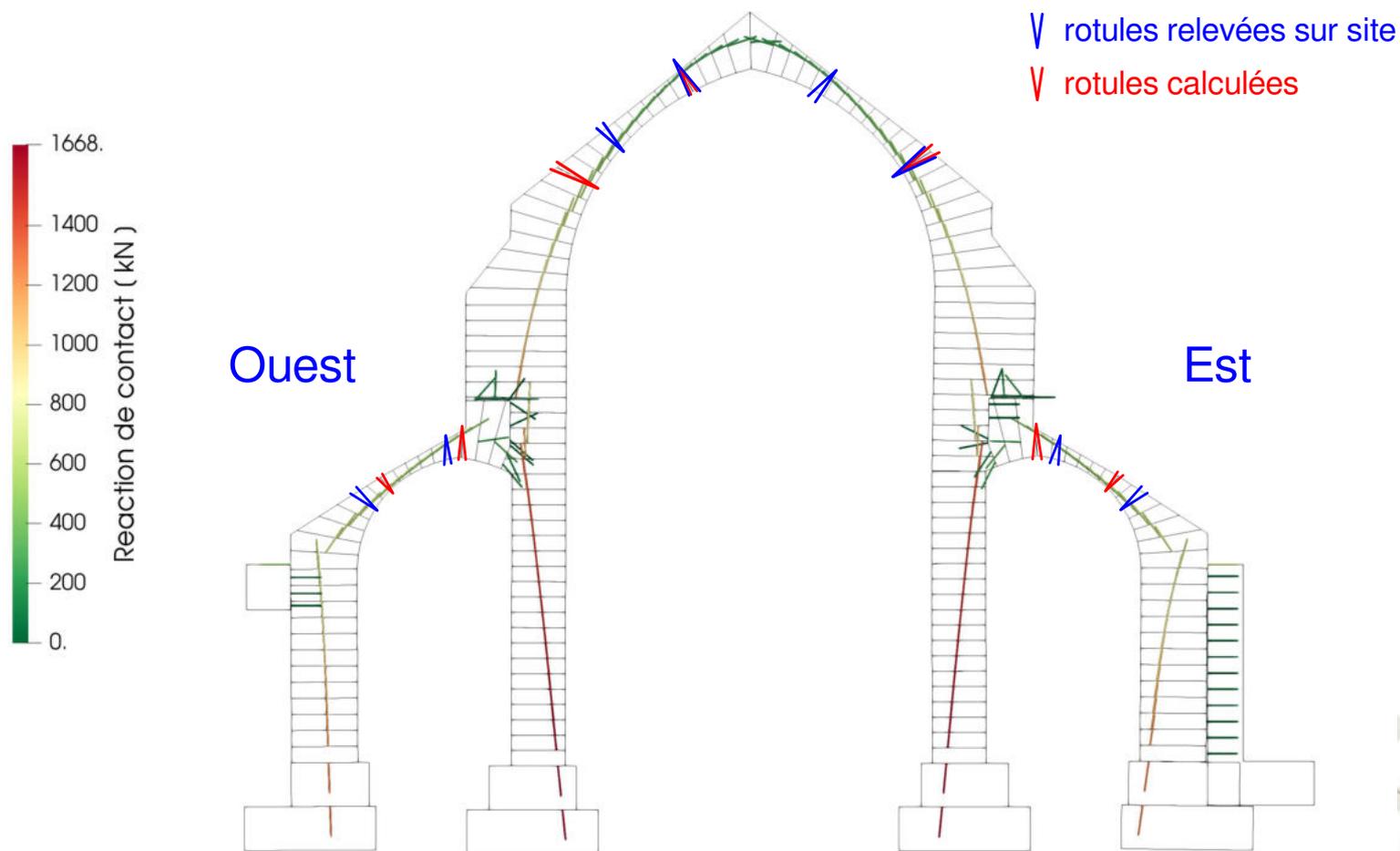
- Modélisations



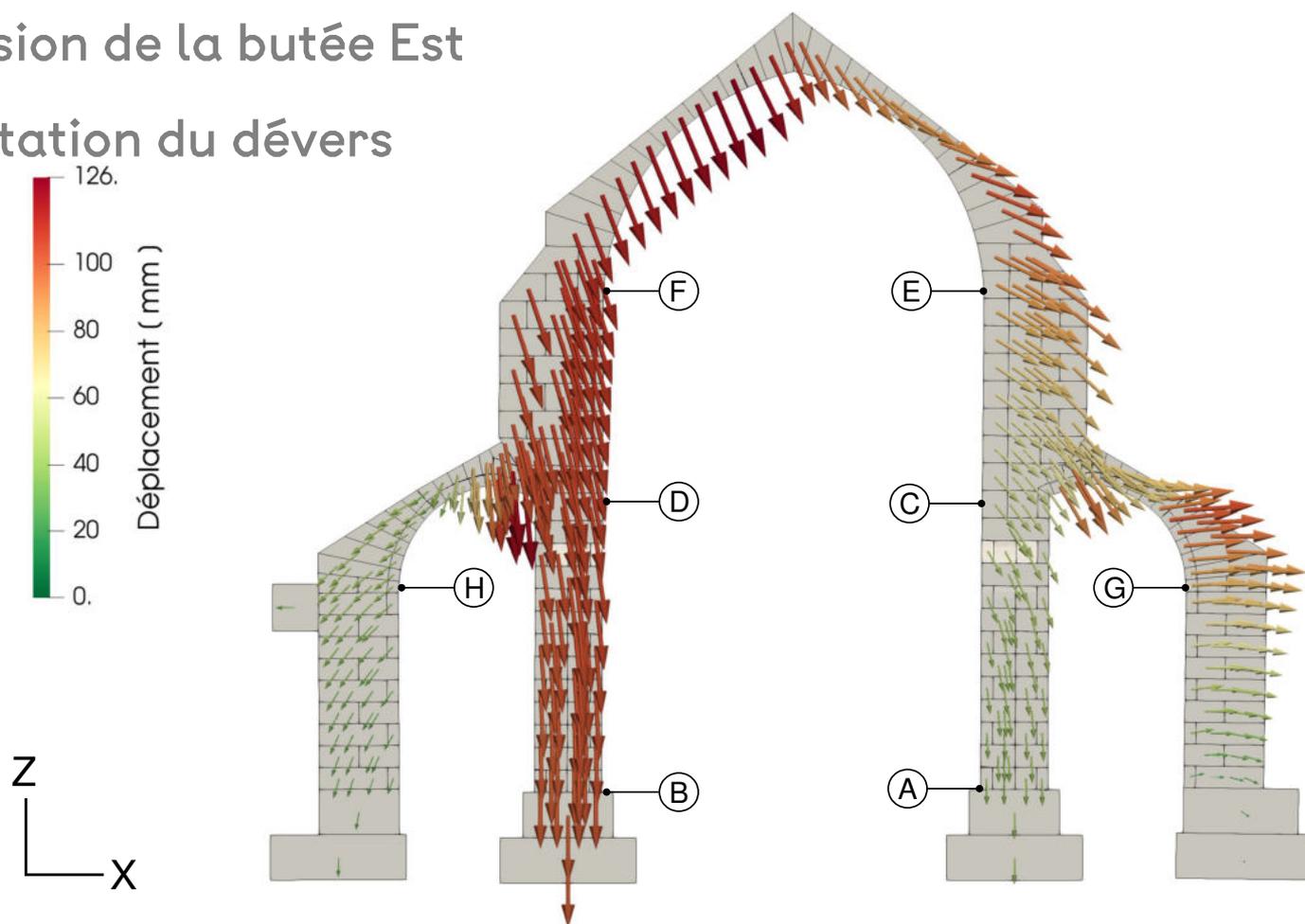
Phase 1 - 1230 / 1974



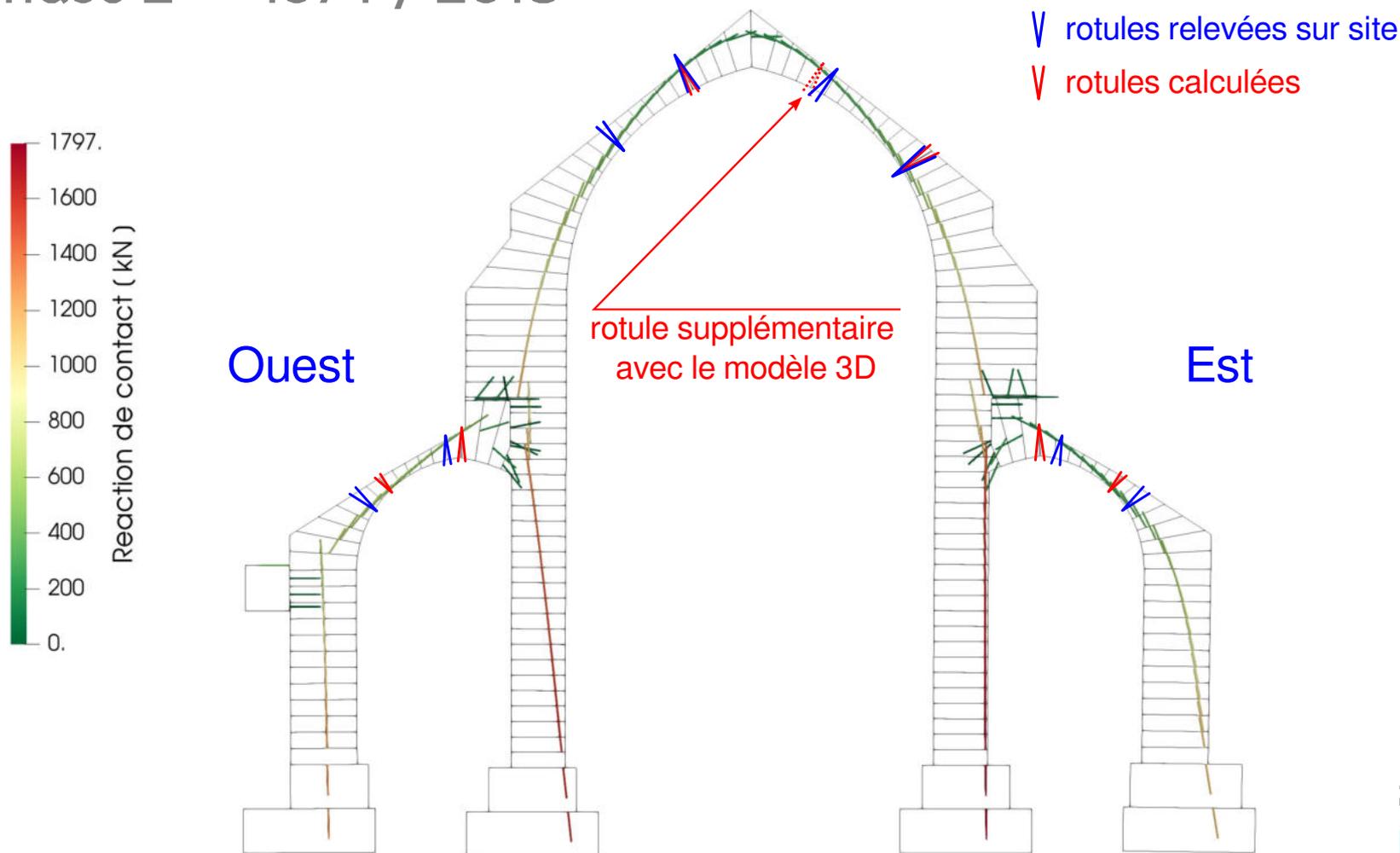
- Phase 1 - 1230 / 1974



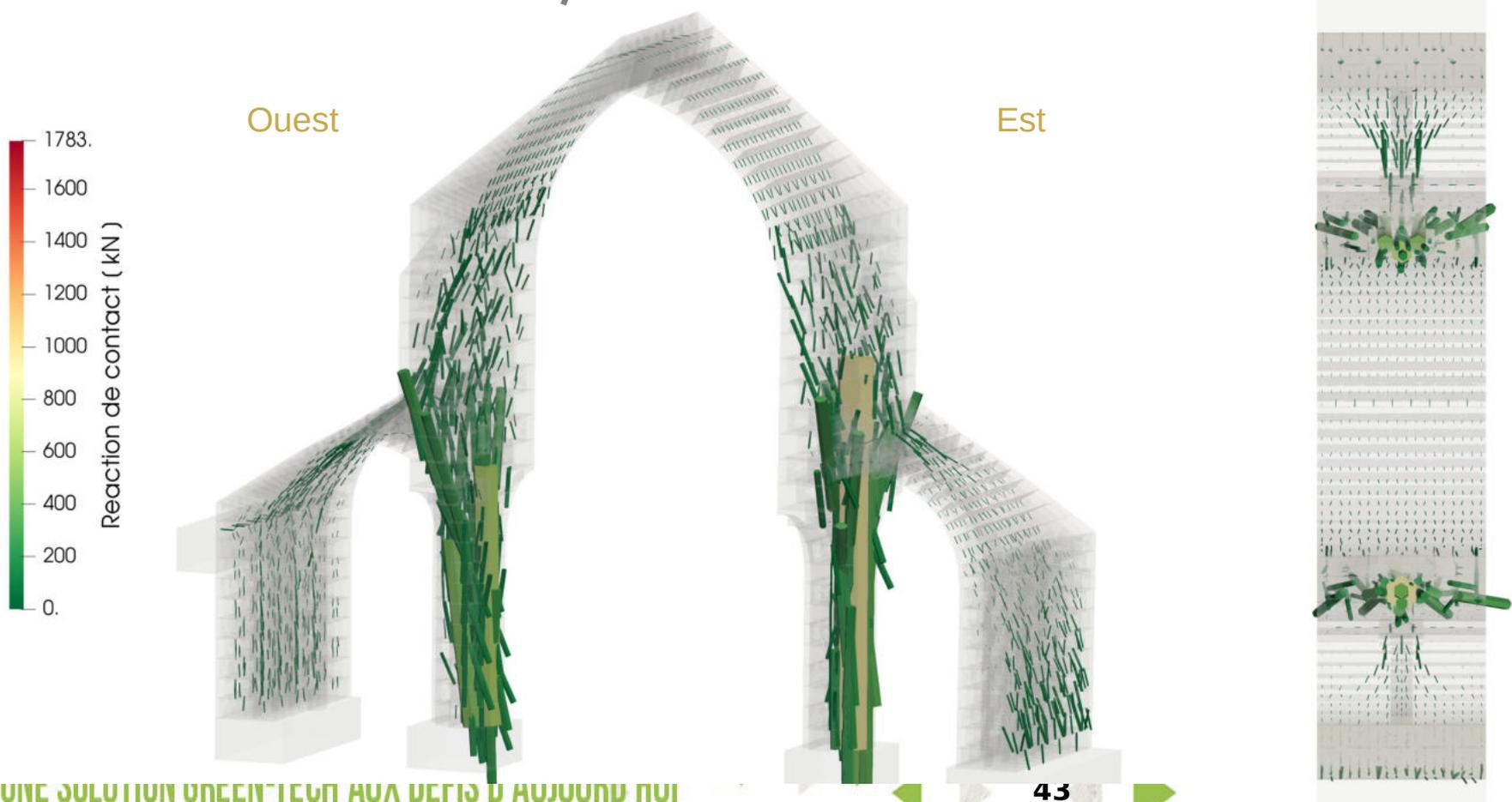
- Phase 2 - 1974 / 2018
 - suppression de la butée Est
 - augmentation du dévers



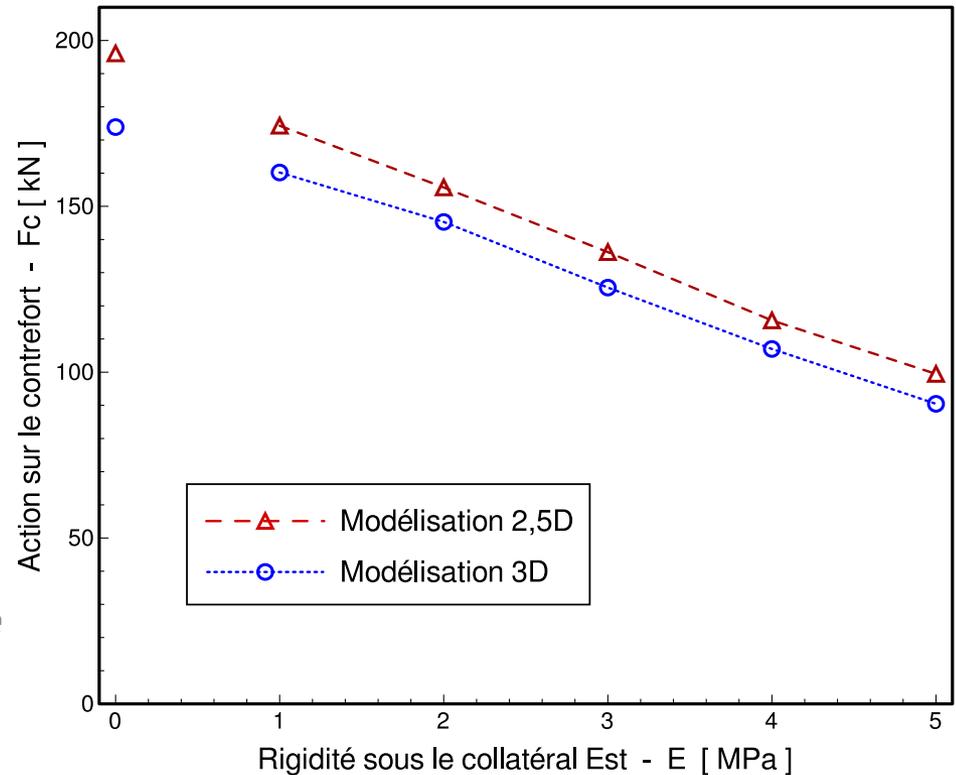
Phase 2 - 1974 / 2018



Phase 2 - 1974 / 2018



- Phase 3 - 2019
 - ajout de contreforts Est
→ butées simples
 - chargements
→ statique
→ sismique
 - méconnaissance du sol
→ approche paramétrique



- Phase 3 - 2019
 - ajout de contreforts Est
 - butées simples
 - solutions non invasives





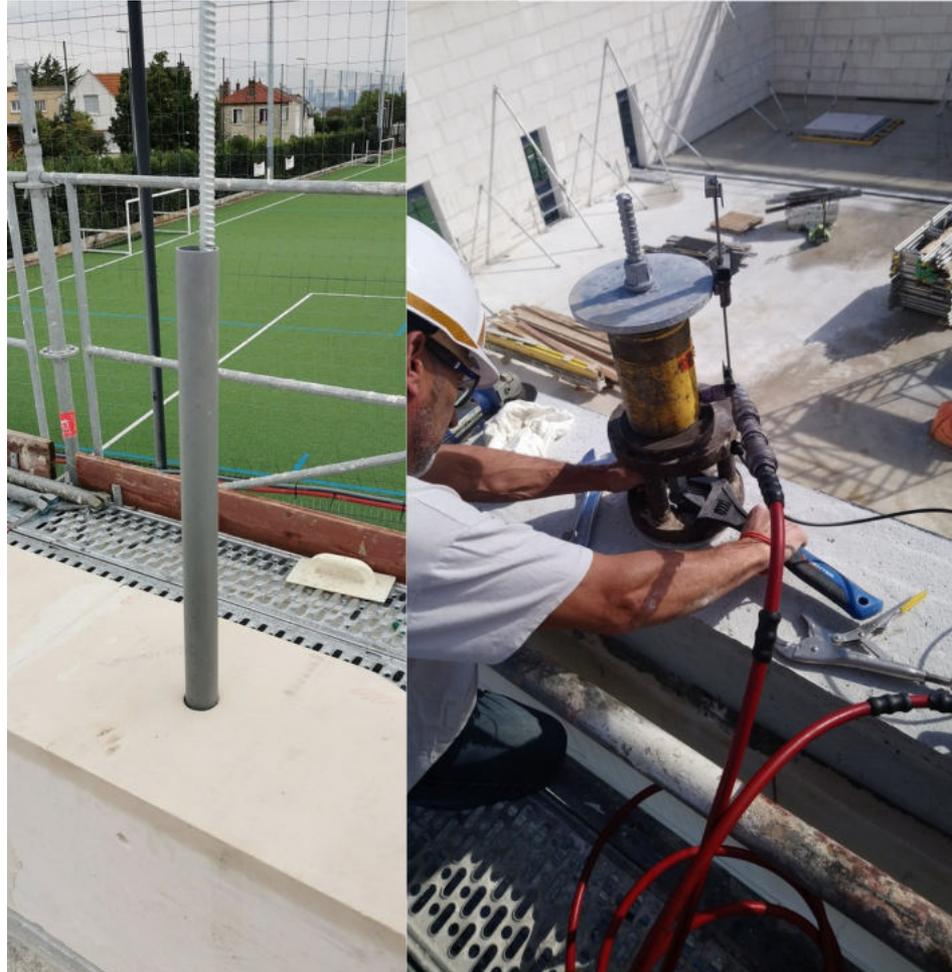
LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

- Enveloppe élancée et porteuse d'une charpente acier
 - plan : 27 x 22m
hauteur : 12m
 - pierre de Tervoux
Massangis
épaisseur 40cm
 - dalle R+1 /chaînage
béton armé



- Enveloppe élancée et porteuse d'une charpente acier
 - plan : 27 x 22m
hauteur : 12m
 - pierre de Tervoux
Massangis
épaisseur 40cm
 - dalle R+1 /chaînage en tête
béton armé
 - 15 tirants de précontrainte

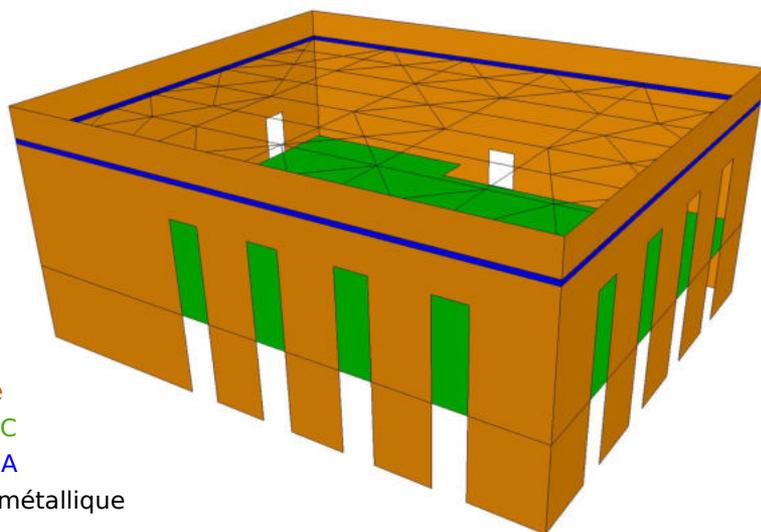


- Enveloppe élancée et porteuse d'une charpente acier
 - plan : 27 x 22m
hauteur : 12m
 - pierre de Tervoux
Massangis
épaisseur 40cm
 - dalle R+1 /chaînage en tête
béton armé
 - 15 tirants de précontrainte
 - murs sur appuis rotulés



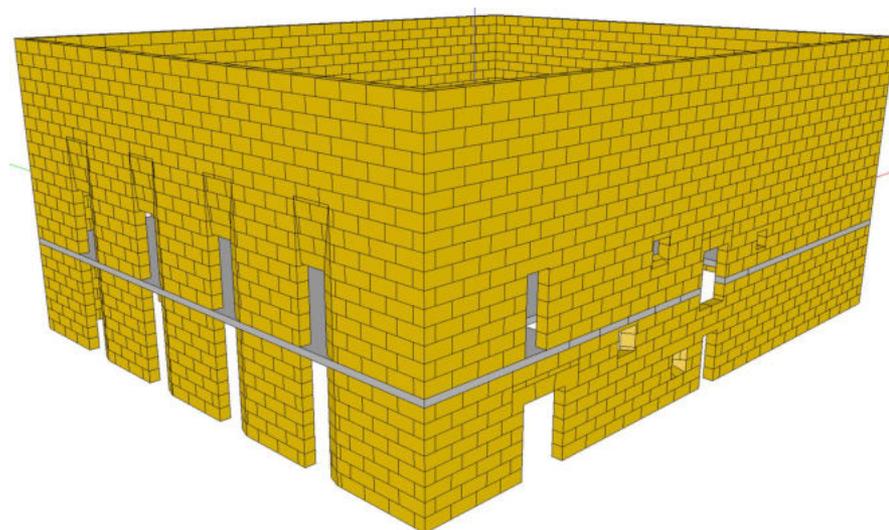
▪ Modélisations et Outils

Modèle éléments finis (Code-Aster)



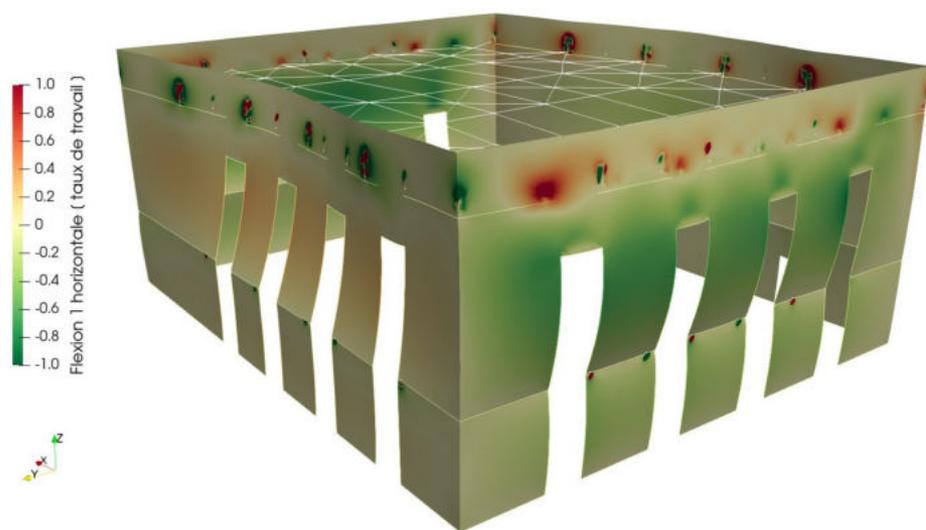
Maçonnerie
Dalle PHRDC
Chainage BA
Charpente métallique

Modèle éléments discrets (LMGC90)

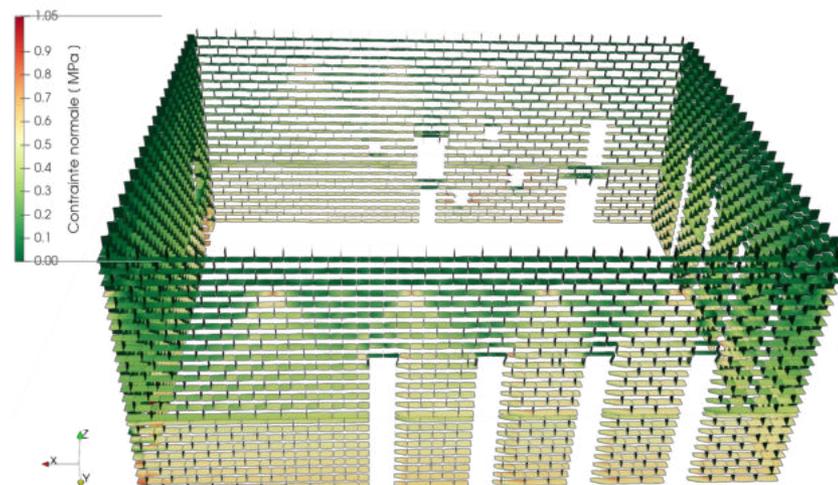


■ Modélisations et Outils

Modèle éléments finis (Code-Aster)



Modèle éléments discrets (LMGC90)



- Conclusion

apports de la recherche

besoin nombreux de développement

→ A encourager !

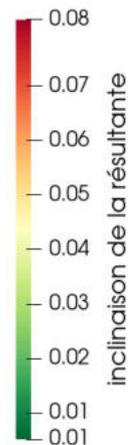
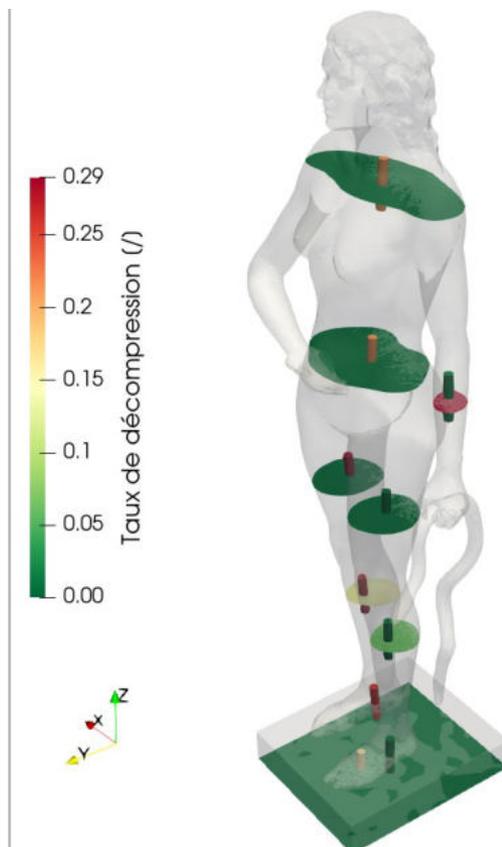
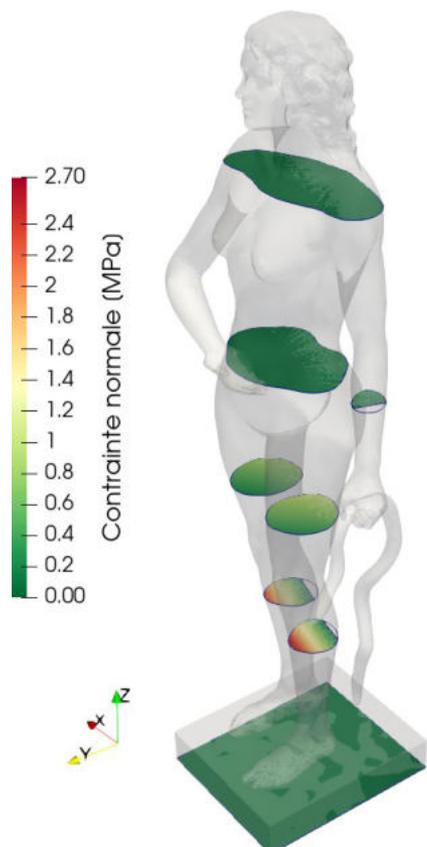




Photographies : Philippe Fournier



Sanam Khatibi | Les tailleurs de pierre Nantais | L'atelier des sculpteurs



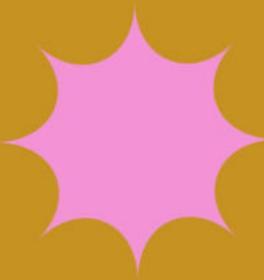


15.09.2023  8.30 → 18.30



GÉNIES DE PIERRE

Art et Techniques d'un matériau
de construction



Laboratoire de Mécanique
et Génie Civil
860 rue de St-Priest
34090 Montpellier



ŠTONO



Merci de votre attention

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023



Terre et Pierre
Expertise et Innovation

LES ENJEUX ET LES DÉFIS DE LA CONSTRUCTION BAS-CARBONE

LE CAS DE LA PIERRE NATURELLE D'ORNEMENT ET DE CONSTRUCTION

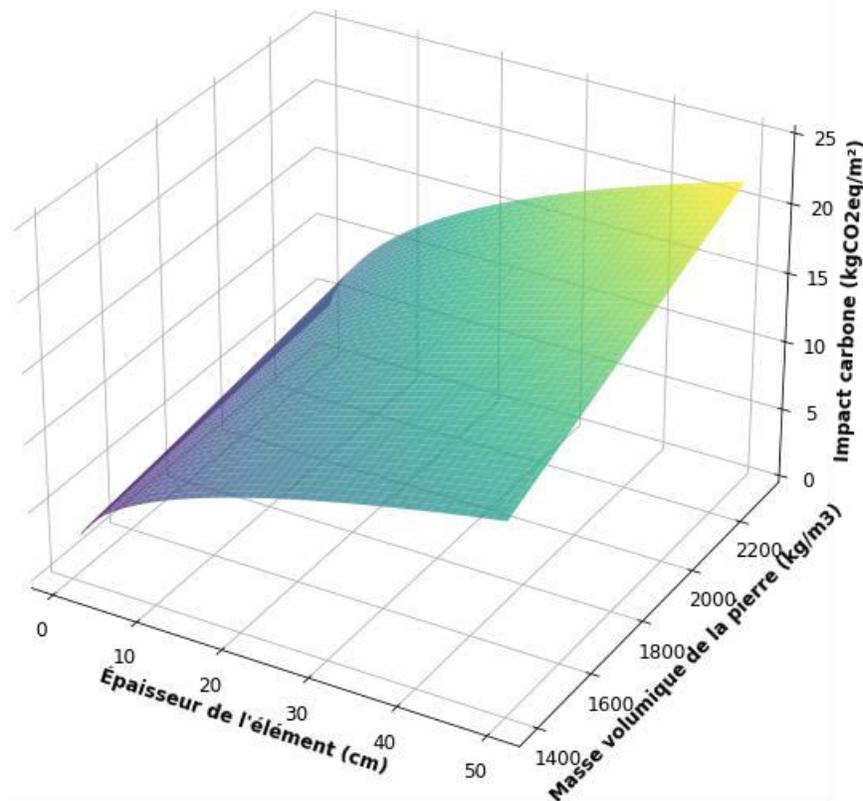
Tristan PESTRE

Chef de projet – CTMNC département ROC

pestre.t@ctmnc.fr



Terre et Pierre
Expertise et Innovation



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

PROGRAMME

1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

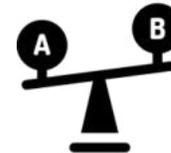
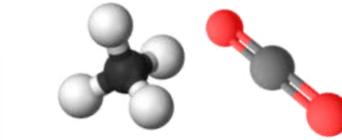
2. CYCLE DE VIE DE LA PIERRE

3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

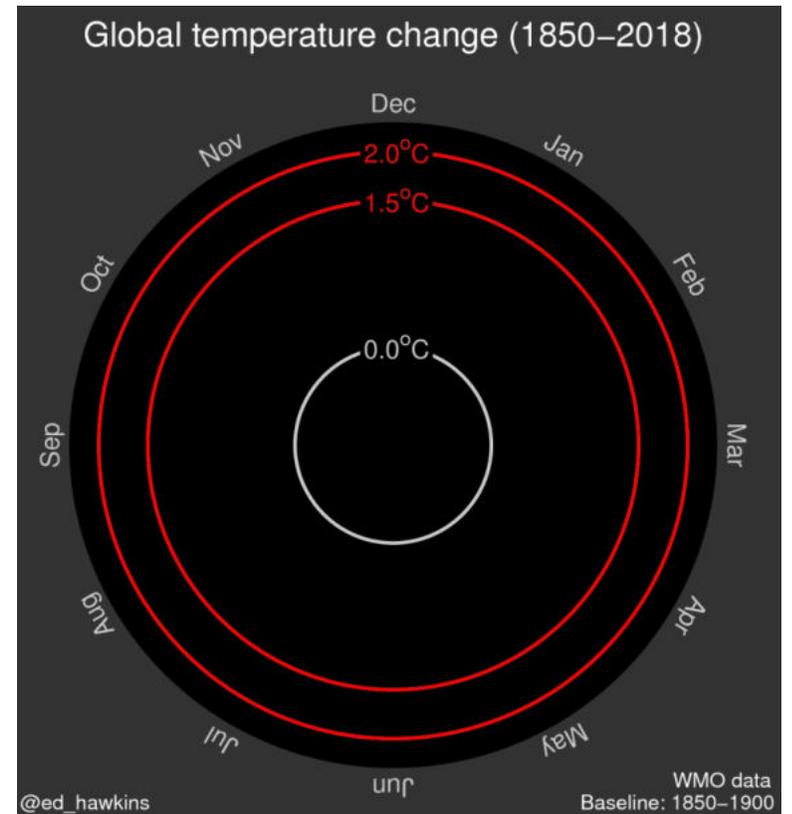
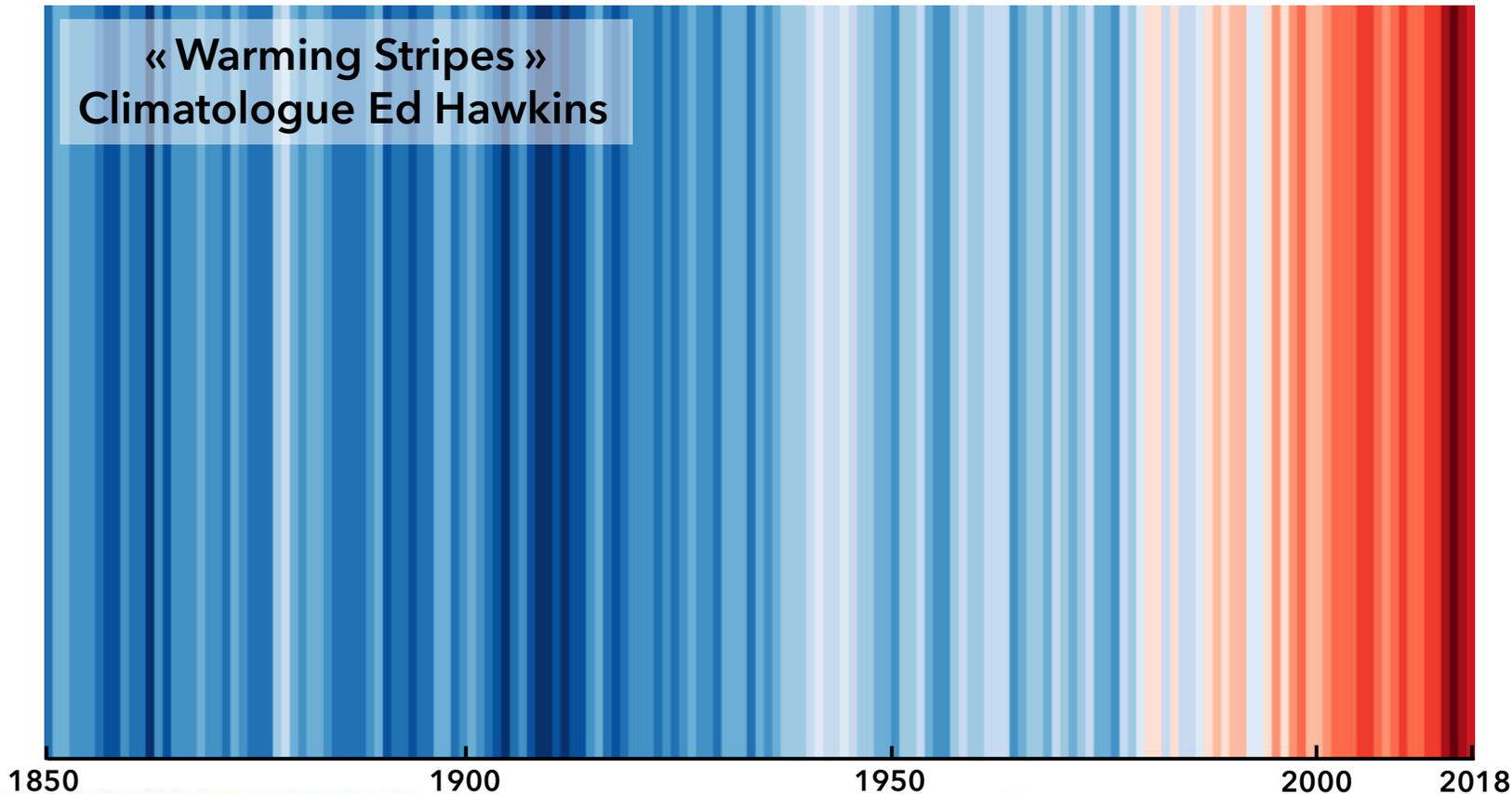
5. PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES PIERRES

6. CONCLUSION



1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

La notion de changement climatique



1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION



Les conséquences du changement climatique

- **Sur les gisements**

- Sécheresses,
- Incendies,
- Inondations,
- Tempêtes,
- Organismes xylophages, ...

NB: rôle des forêts anciennes dans le stockage de carbone^{1,2}

1 : C.H. Cannon <https://doi.org/10.1038/s41477-021-01088-5>

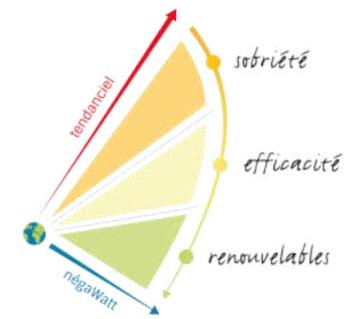
2 : K. Calder <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12197>

- **Sur les bâtiments**

- Surchauffes,
- Mouvements de terrains,
- Inondations, tempêtes, ...



1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION



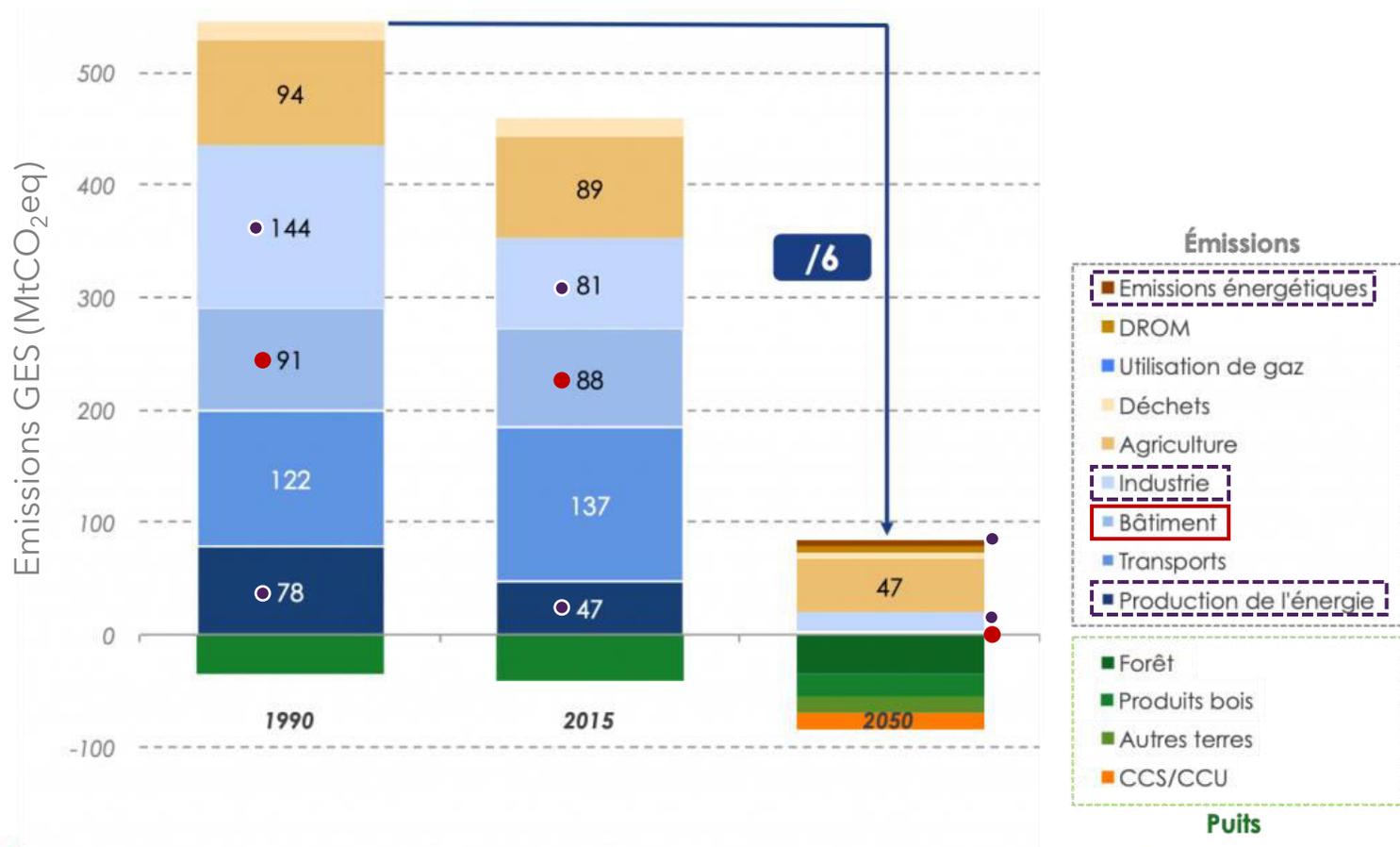
©Association négawatt - www.negawatt.org

Les stratégies de lutte contre le changement climatique

- Stratégie **N**ationale **B**as-**C**arbone (SNBC), introduite par la **L**oi de **T**ransition **E**nergétique pour la **C**roissance **V**erte (LTECV).
- Feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique.
- Orientations stratégiques pour TOUS secteurs d'activité (dont industrie et bâtiment).
- Trajectoire de réduction des Emissions de Gaz à Effet de Serre (EGES) jusqu'à 2050, avec des « budgets carbone ».
- Exemple : **industrie** & **bâtiment** [MtCO₂eq] :
 - **75** de 2019 à 2023 ; **65** de 2024 à 2028 ; **53** de 2029 à 2033.
 - **77** de 2019 à 2023 ; **59** de 2024 à 2028 ; **42** de 2029 à 2033.

1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

SNBC : évolution des émissions nettes de GES (MtCO₂eq)



Bâtiment scopes 1, 2 et 3
≈ 33% (en 2020)
des EGES Nationales



Vers des bâtiments neutres
en carbone en 2050

1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

Répercussions des orientations sur le secteur du bâtiment



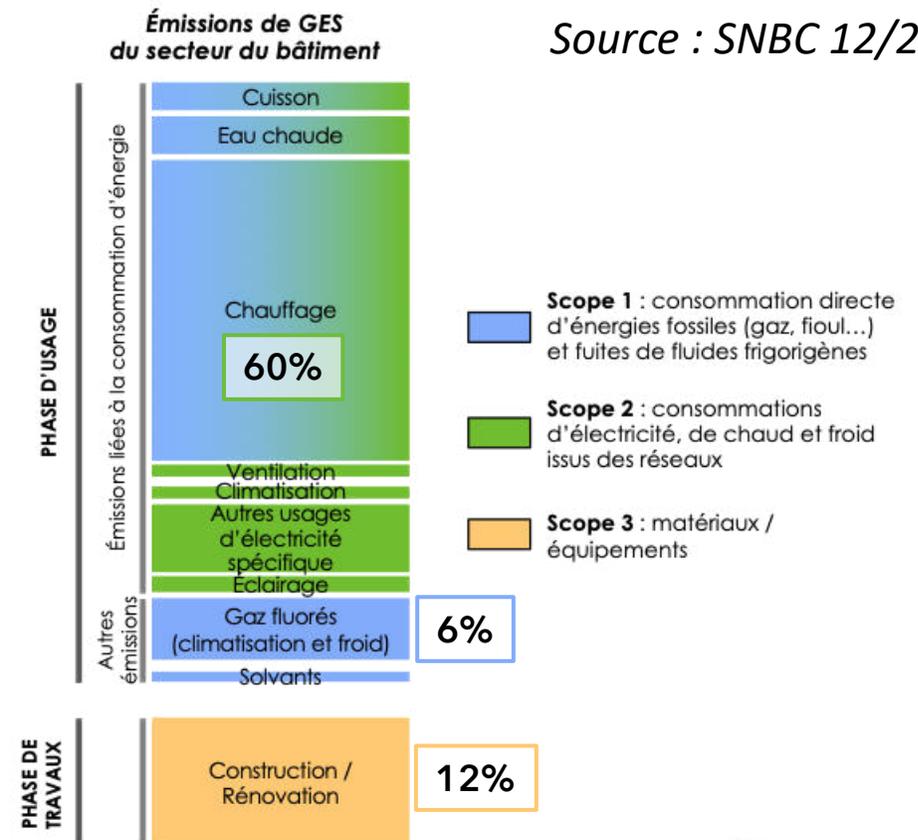
- **Neuf** : **RE2020** « Réglementation environnementale 2020 »
 - Réduction des consommations énergétiques (conception, enveloppe et systèmes),
 - Réduction des émissions de gaz à effet serre (en phase d'usage, mais aussi sur le reste du cycle de vie). Évolution progressive des seuils carbonés :
 - Sur le bâti et ses équipements : - **35%** entre 2022 et 2031.
 - Sur les émissions associées aux consommations : - **50%** entre 2022 et 2025.
 - Amélioration de la prise en compte du confort en période chaude.
- **Existant** : **DPE** « Diagnostic de performance énergétique »
 - Affichage d'une « note » énergie et carbone des logements,
 - Obligatoire pour la vente et la location,
 - Audits énergétiques avant-vente (bâtiments **F** et **G** ; puis **E** en 2025 et **D** en 2034).



1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

Postes d'émissions du bâtiment ;
Et rôle potentiel de la pierre naturelle

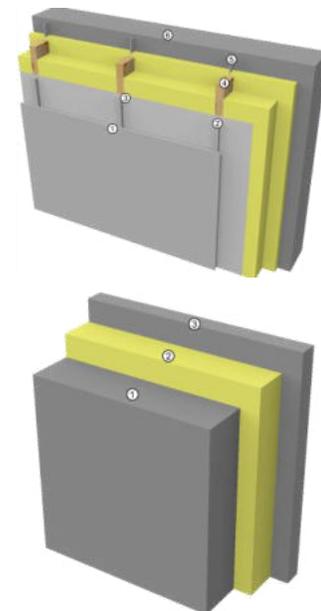
- Chauffage (- déperditions, + apports)
- Construction (produits et équipements)
- Electricité spécifique (électrodomestique, informatique)
- Climatisation (pompes à chaleur)
- Eau chaude sanitaire



1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION

Enjeux pour les produits et constructions en pierre naturelle

- Bâtiments **neufs** et **existants** : solutions potentiellement différentes.
- Evaluation des gains (- de chauffage, - de clim., + de confort).
- Justification de l'impact environnemental des produits (FDES) et des ouvrages (ACV bâtiment).



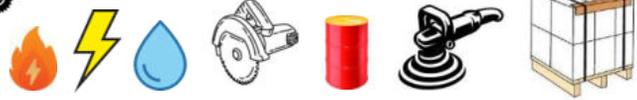
Enjeux pour la filière

- Evaluation des EGES (**industrie**), plan de décarbonation :
 - - (ou mieux), de transport,
 - - d'énergie fossile,
 - + de rendement et de valorisation des coproduits.
- Confrontation aux alternatives et positionnement (**bâtiment**).

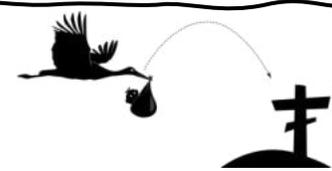


2. LE CYCLE DE VIE DE LA PIERRE NATURELLE

Etapes du cycle de vie d'un produit type

- A1: Extraction en carrière 
- A2: Transport carrière - atelier de façonnage 
- A3: Façonnage en atelier (et éventuelles finitions), emballage 
- A4: Transport atelier - chantier 
- A5: Installation dans le bâtiment 
- B: Vie en œuvre / entretien 
- C1: Déconstruction du bâtiment 
- C2: Transport des matériaux déconstruits 
- C3-C4-D: Traitement (élimination ou revalorisation) des matériaux de déconstruction.




Cycle de vie « du berceau à la tombe ».
Comme toute activité humaine :
Effets environnementaux et sanitaires,
Utilisation de ressources naturelles.

3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

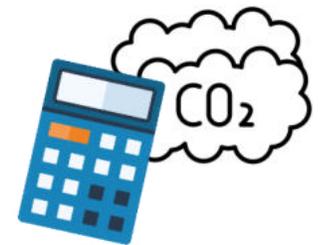
Données environnementales

- **Du constat d'une problématique :**

- Manque d'informations sur l'impact carbone des éléments en pierre,
- Besoin de données rapidement (éco-conception, appels d'offres, ...),
- FDES chronophages, coûteuses et spécifiques.

- **À la proposition d'une solution :**

- Analyse des FDES et ACV publiées (INIES, littérature),
- Création d'un modèle d'estimation de l'impact carbone (différents paramètres variables en entrée),
- Mise en forme d'un outil et diffusion à la profession.
- **Calculatrice carbone sur le site du CTMNC.**



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Détails sur la calcullette carbone

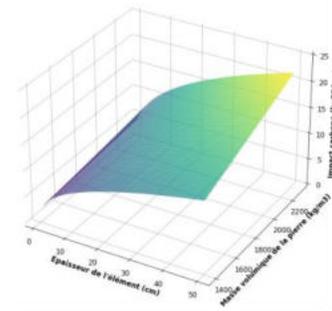
1. Sélection des données

- Etudes selon NF EN 15804+A1/CN (normes des FDES),
- Épaisseurs et densités des produits connues,
- Cycle de vie complet (A à D).

| Catégorie / Produit / Unité | Unité | Total | Total | Total | Total | Total | Total |
|-----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Extraction de la pierre | kg CO ₂ eq / kg | 0,175 | 0,175 | 0,175 | 0,175 | 0,175 | 0,175 |
| Transport de la pierre | kg CO ₂ eq / kg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Production de ciment | kg CO ₂ eq / kg | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 |
| Production de béton | kg CO ₂ eq / kg | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 | 0,275 |
| Transport de béton | kg CO ₂ eq / kg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Installation de béton | kg CO ₂ eq / kg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Entretien de béton | kg CO ₂ eq / kg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Déconstruction de béton | kg CO ₂ eq / kg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Total | kg CO ₂ eq / kg | 0,450 | 0,450 | 0,450 | 0,450 | 0,450 | 0,450 |

2. Modélisation

- Impact sur le réchauffement climatique (kgCO₂eq) par unité de masse (/kg), extrapolation par unité de surface (/m²).



3. Mise en forme

- Fichier de calcul Excel avec macros (formulaire pour saisie simplifiée),
- Intégration de repères pour situer les résultats (DED et FDES pierre).

3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Aperçu de la calculette carbone

Estimation de l'impact carbone des produits en pierre naturelle

Terre et Pierre
Expertise et Innovation
CTMNC

Renseigner ici les différents transports entre l'usine et le chantier.
Les propriétés de la pierre permettent d'estimer l'impact sur le reste du cycle de vie.

Transport Usine- Chantier

Type de transport 1
Transport par camion

Distance transport 1 [km]
100

Type de transport 2

Distance transport 2 [km]

Type de transport 3

Distance transport 3 [km]

Propriétés de la pierre

Épaisseur de pierre [cm]
23

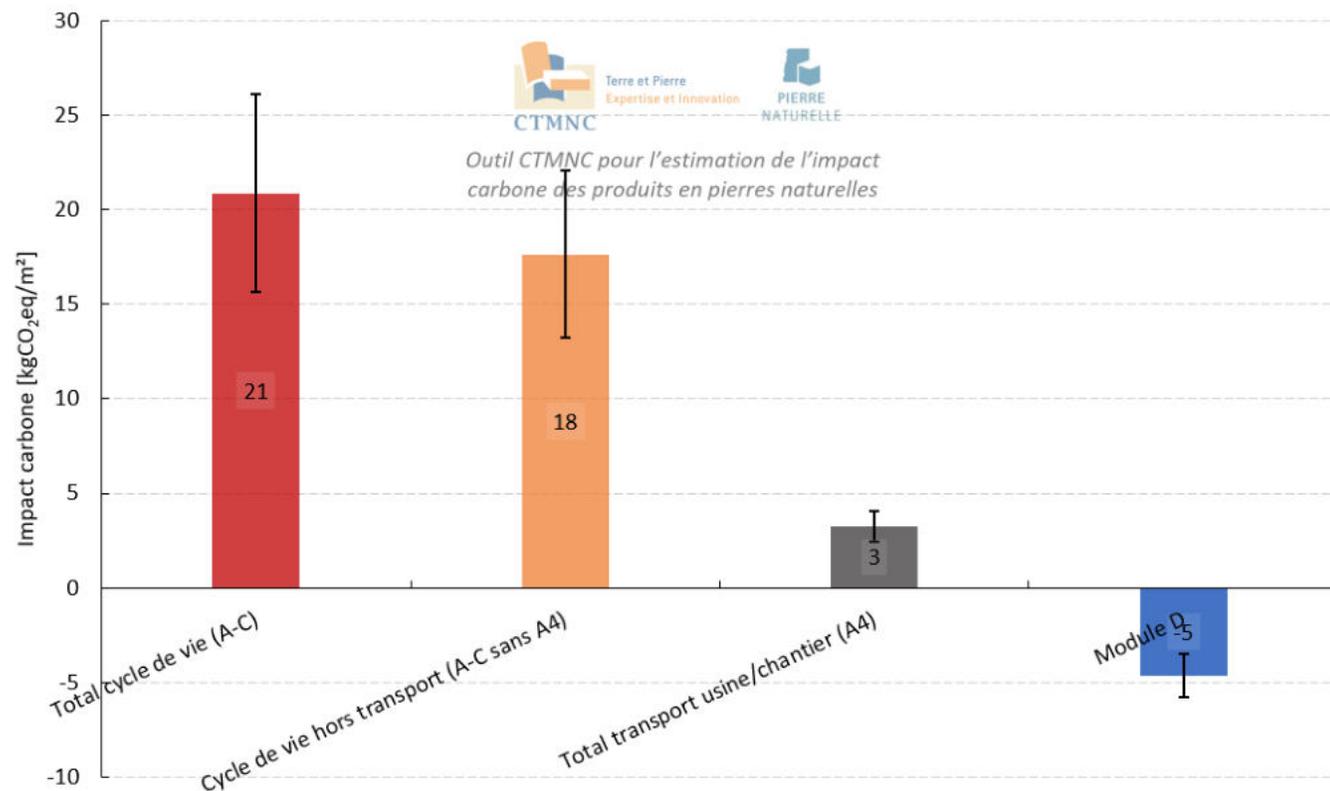
Masse volumique de la pierre [kg/m3]
1750

Coefficient de sécurité
Type configurateur (FDES)

Sauvegarder et Calculer

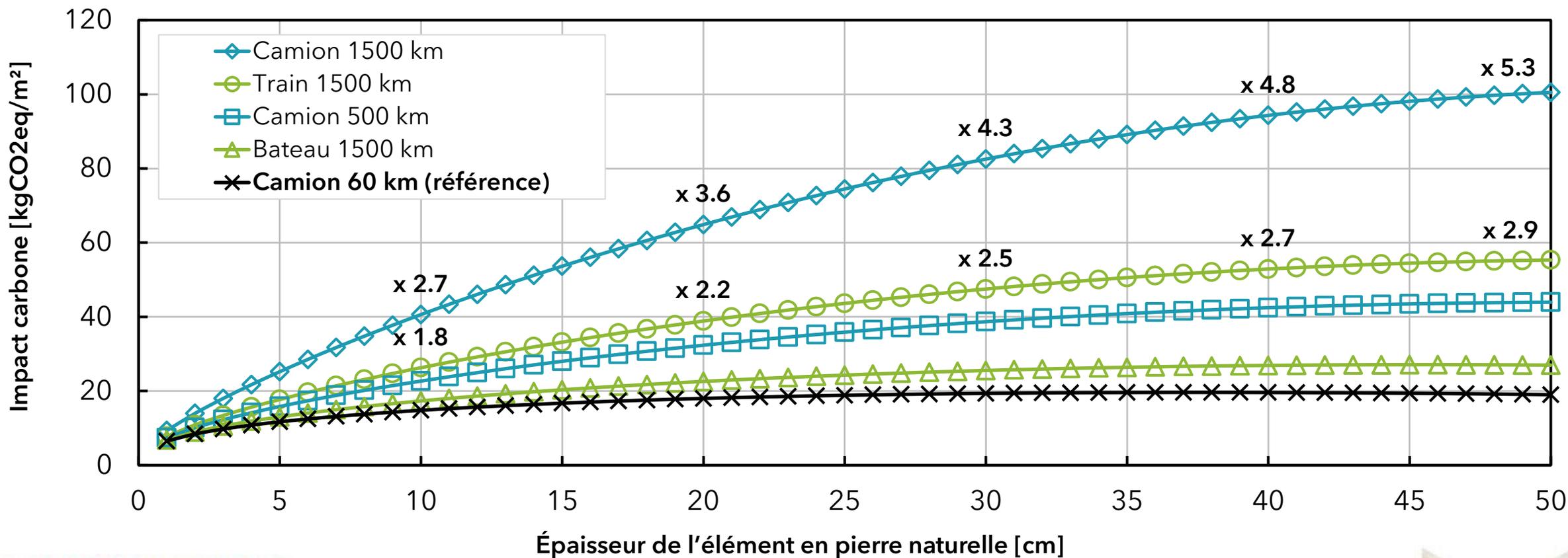
Effacer et Fermer

Évaluation de l'impact environnemental du produit en pierre naturelle



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

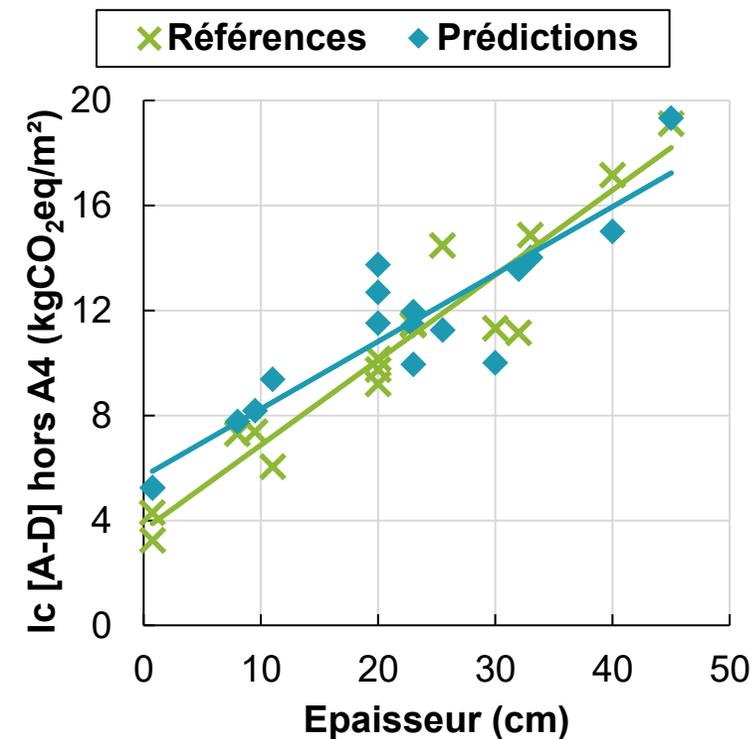
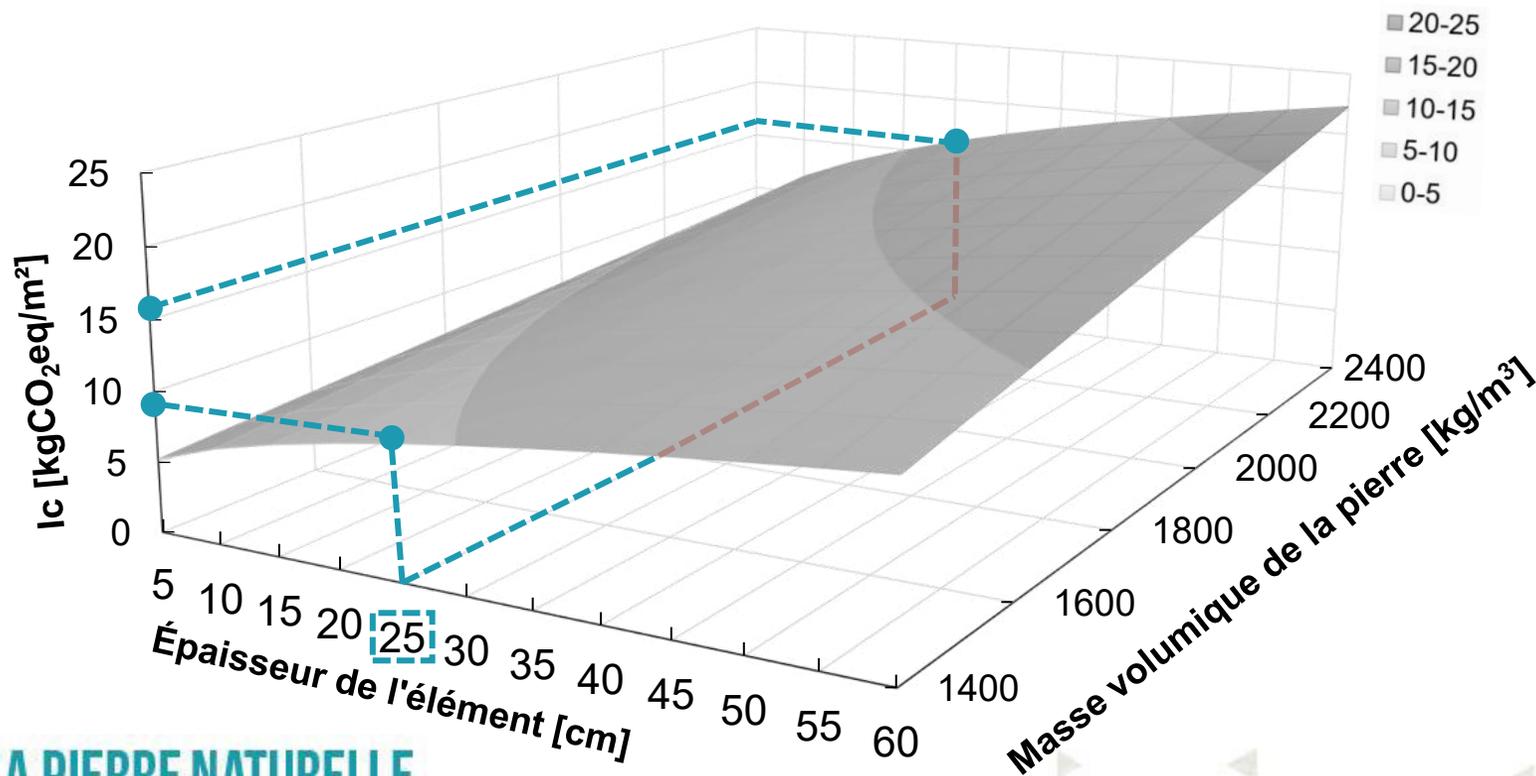
Résultats types générés grâce au modèle de la calculette carbone



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Un impact carbone variant (un peu) selon les éléments !

Impact carbone « Ic » des éléments de construction en pierre naturelle, sur le cycle [A-D], hors transport usine-chantier :



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Valorisation de la calculette carbone

4. Exploitation et communication

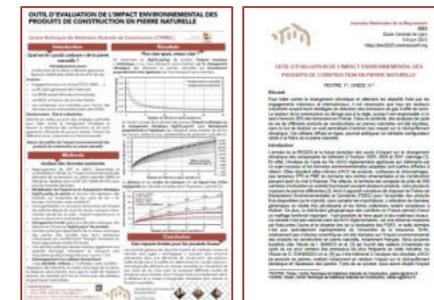
- Poster + article de conférence JNM 2023,
- Article Buildings & Cities :

The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings

- Résultats temporaires lors de la réalisation de FDES,
- Bilan carbone de la filière (plan de décarbonation SNROC),
- Evaluation des impacts environnementaux local vs import (étude retombées économiques SNROC VEIA).

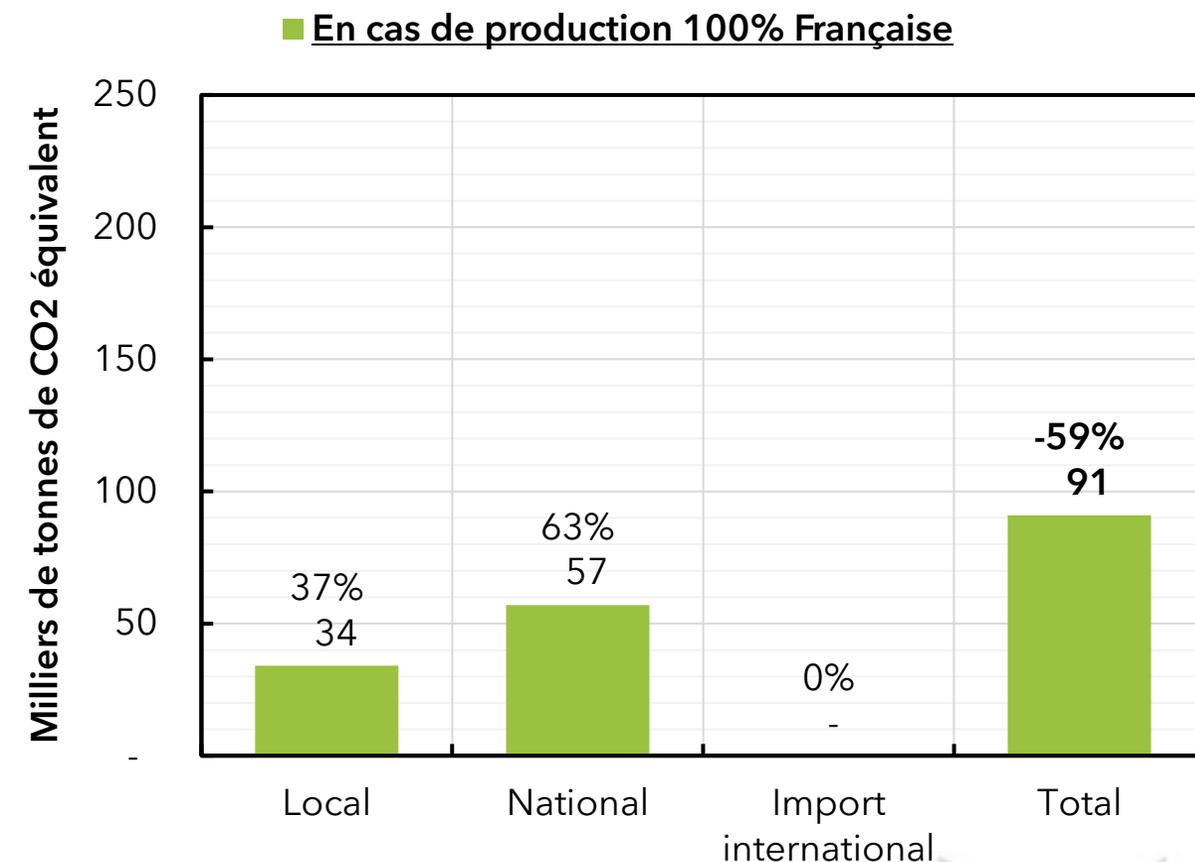
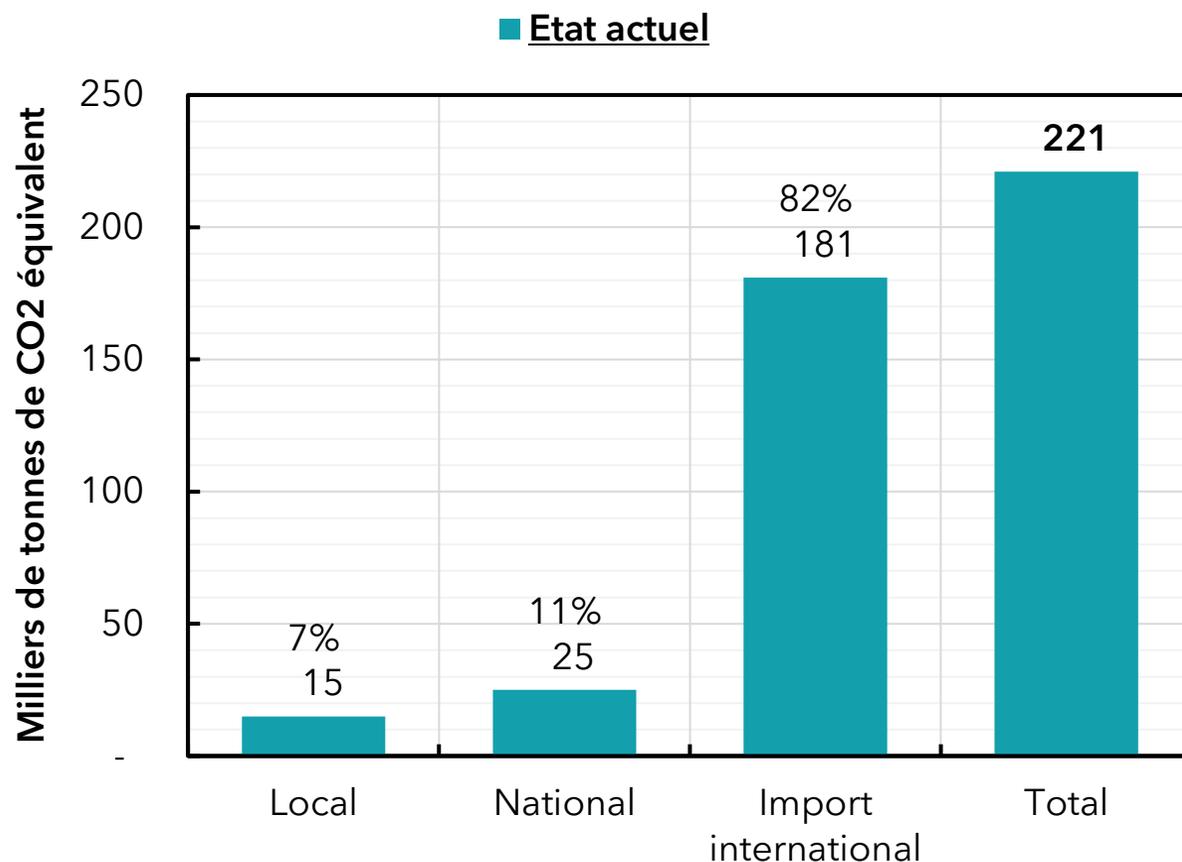
5. Perspectives

- Nourrir le modèle (nouvelles FDES), étendre à d'autres indicateurs environnementaux, d'autres produits, ...
- Configurateur de FDES à moyen terme (lauréats de l'appel à accompagnement #Fais ta FDES n°3, ADEME et alliance HQE-GBC).



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Exemple d'application de la calculette : bilan carbone de la filière ROC

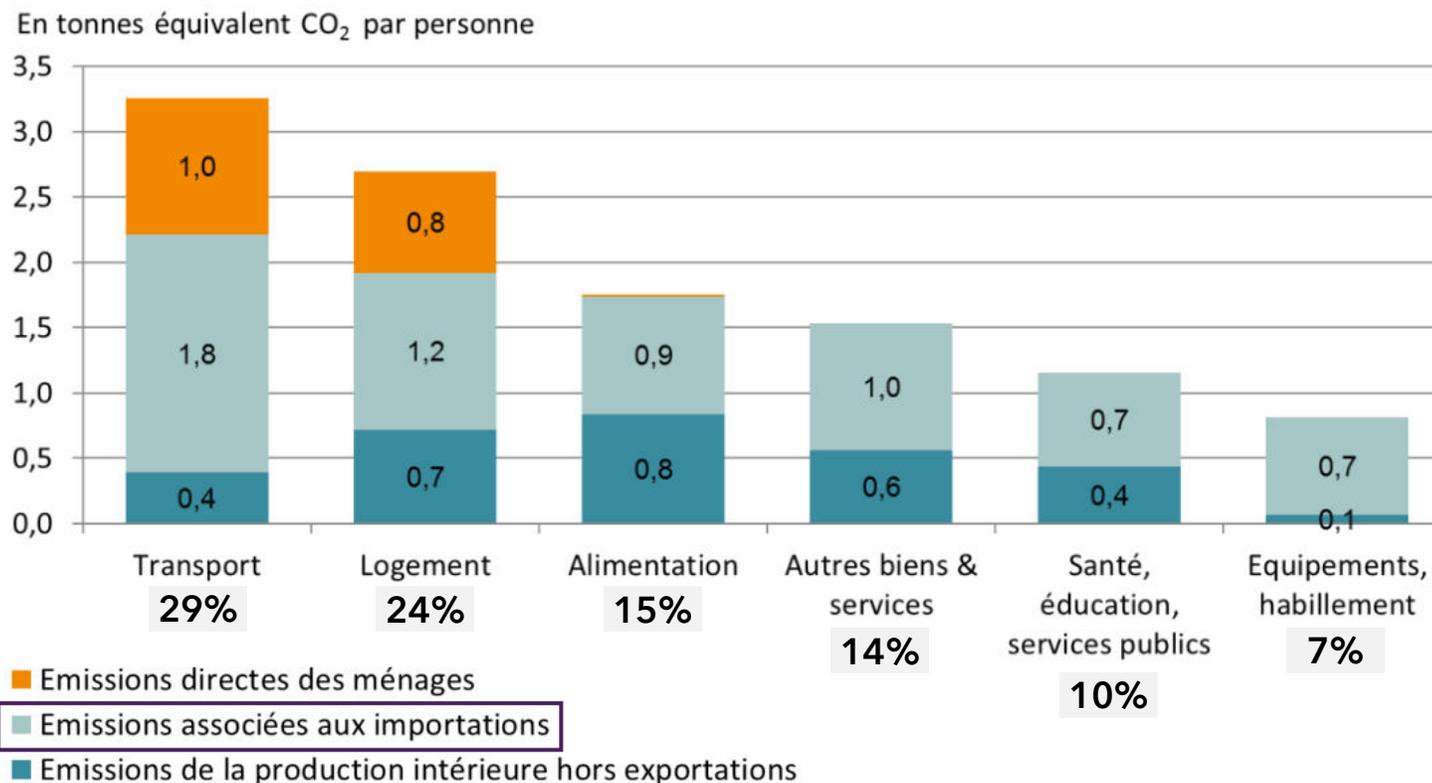
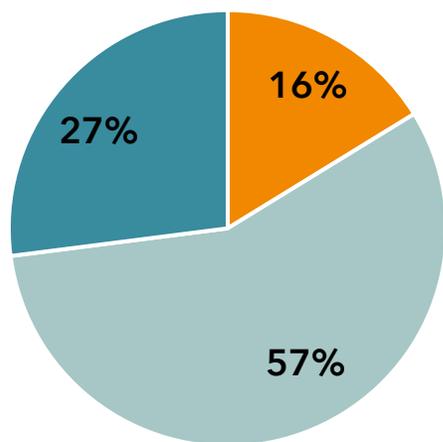


3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

L'impact des importations, source identifiée dans la SNBC :

Empreinte carbone des Français par postes de consommation en 2018 (biens et services)

Source : SNBC, Synthèse, Mars 2020



Note : L'empreinte porte sur les trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O)

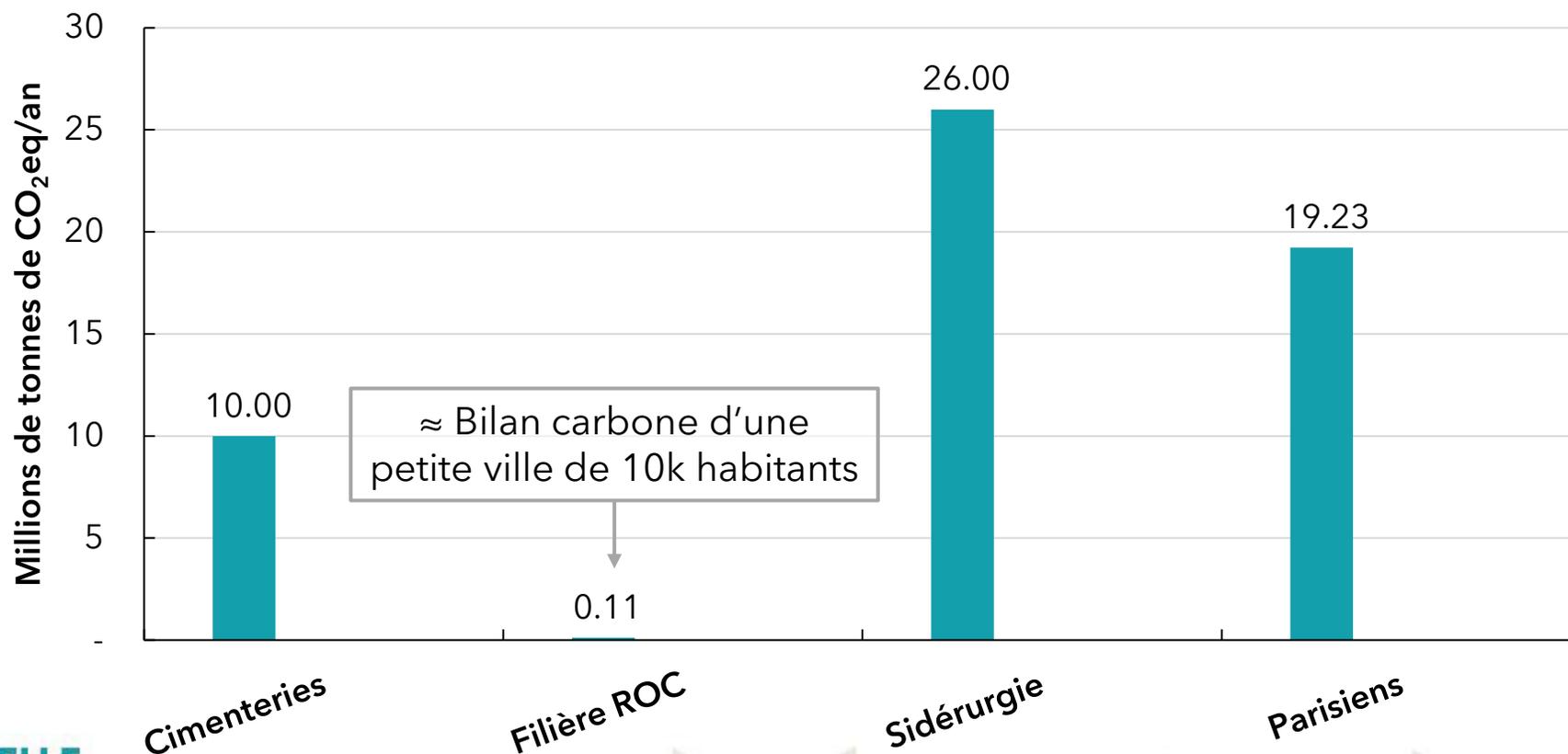
Champ : France + Drom (périmètre Kyoto)

Sources : Citepa, AIE, FAO, Douanes, Eurostat, Insee. Traitements : SDeS, 2019.

3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

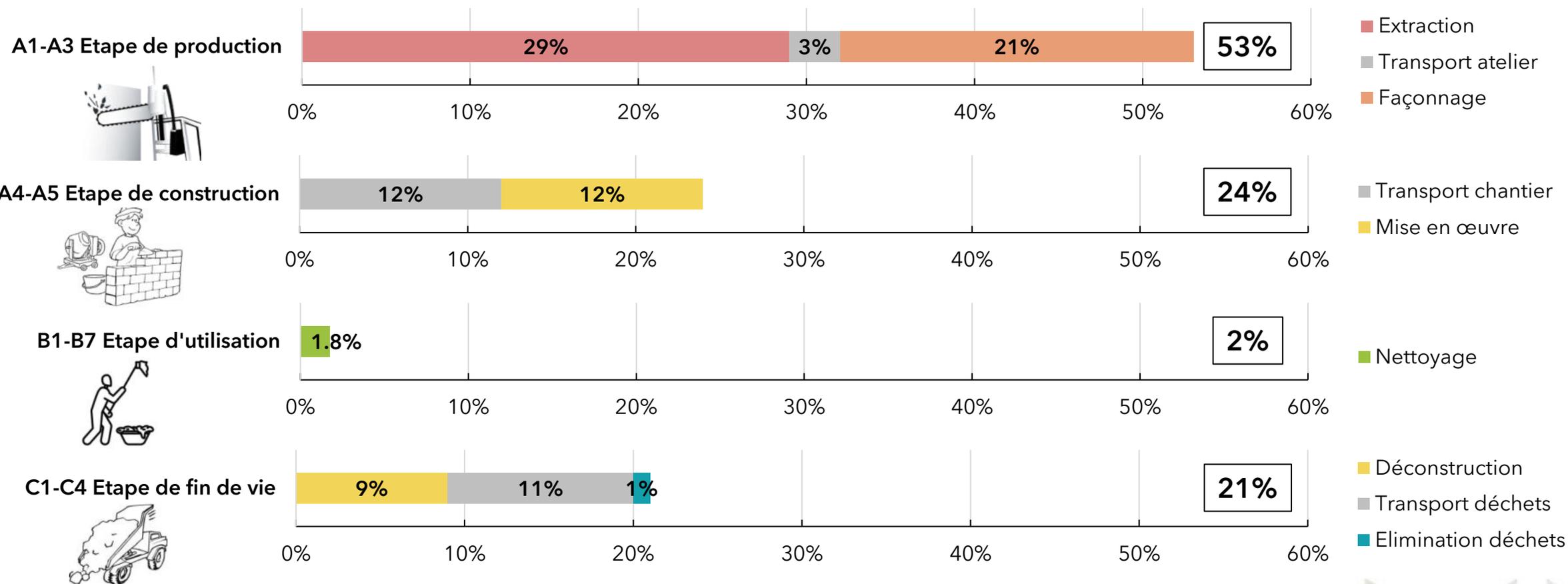
Situer le bilan carbone ROC par rapport à d'autres postes d'émissions

- Filière ROC \approx 221 000 tCO₂eq pour **TOUT** le cycle de vie (**PRODUCTION** \approx 50% du total).



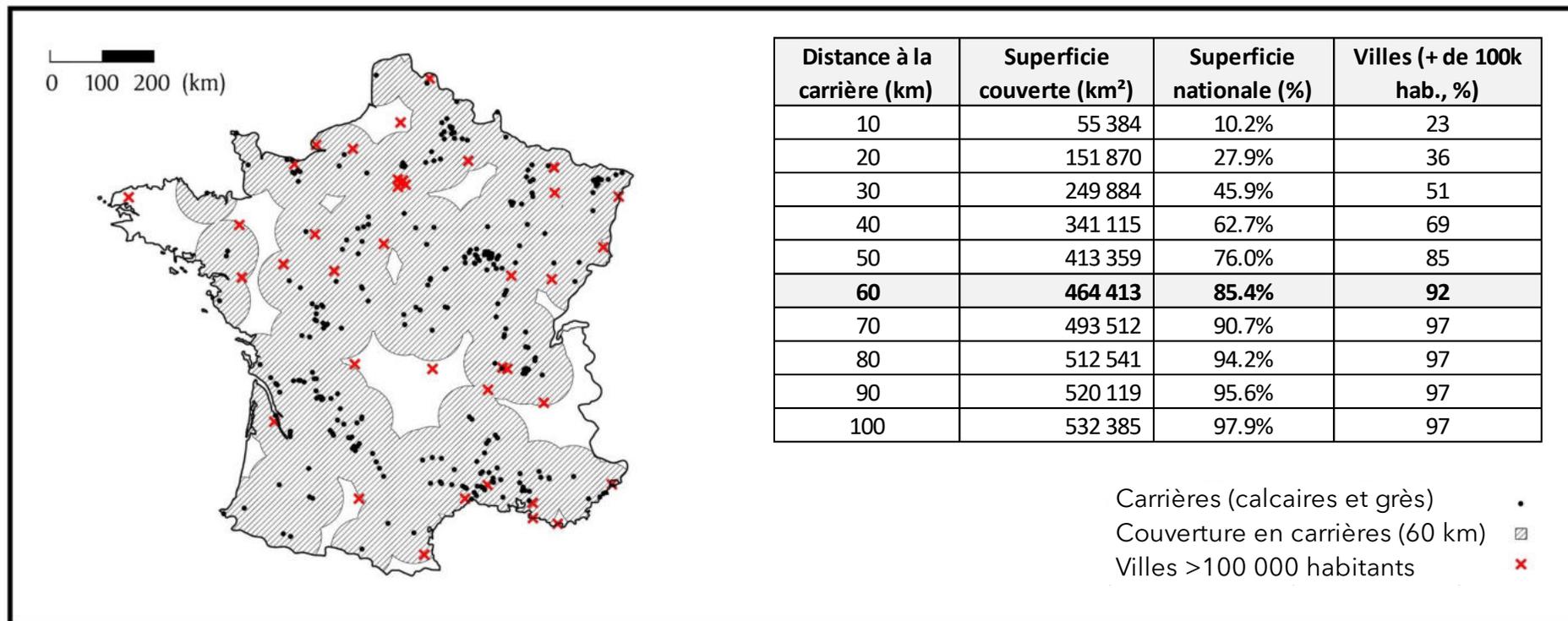
3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Impact carbone par étapes du cycle de vie, pierre massive (article B&C)



3. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS ROC

Des gisements potentiellement locaux ! ... (article B&C)



À déplacer avec modération ... (comme vu précédemment)

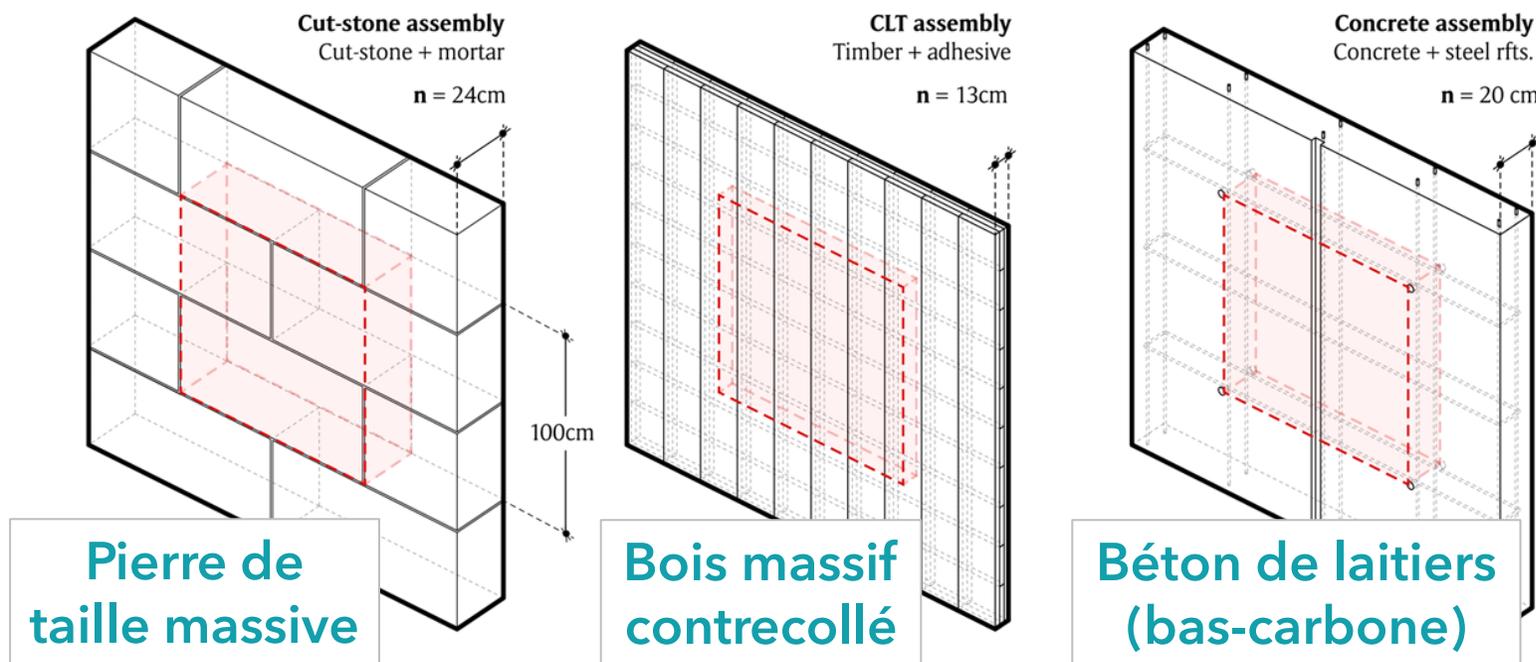
De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», Buildings & Cities 2023, DOI: 10.5334/bc.278

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

Comparaison à l'échelle de la paroi (article B&C 2023)

De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», *Buildings & Cities* 2023, DOI: [10.5334/bc.278](https://doi.org/10.5334/bc.278)

Functional unit (FU) for comparative LCA
(1m² Load Bearing Wall)



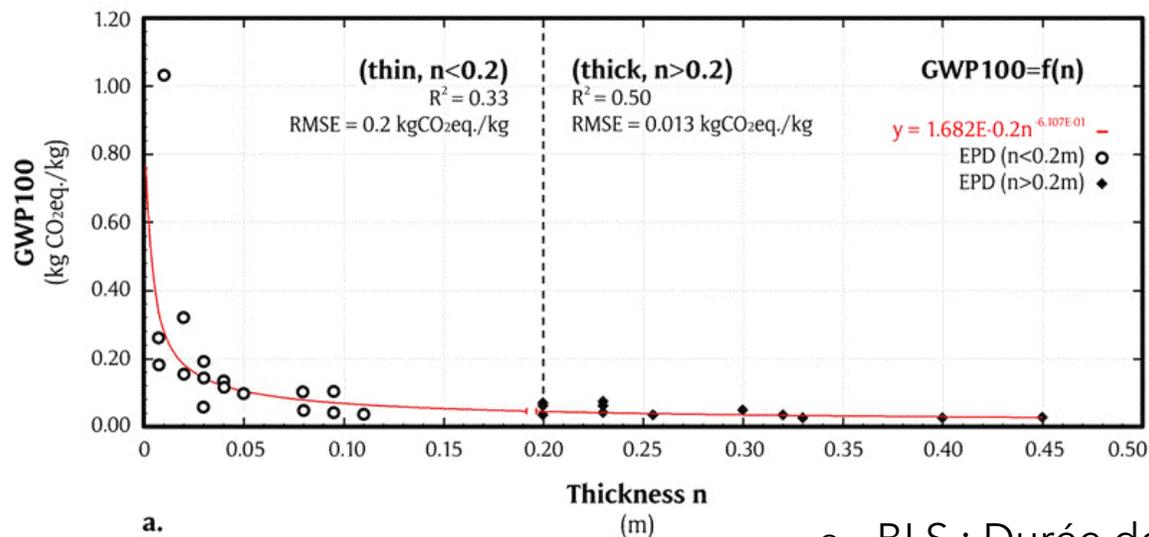
FU = 1m x 1m x n

n = typically implemented thickness (four story high collective housing developments, industry average)

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

Pour déterminer l'impact carbone de la pierre de taille : méthodologie proche de celle de la Calculette carbone (article B&C 2023)

Stone volumetric carbon impact model
(NF EN 15804+A1)



$$GWP_{TH} = \delta n^\epsilon \quad (n > 0, 2)$$

| BLS | TH = 100 ans | | TH = 200 ans | |
|-----|--------------|------------|--------------|------------|
| | δ | ϵ | δ | ϵ |
| 50 | 1,68E-02 | -6,107E-01 | 1,775E-02 | -6,113E-01 |
| 100 | 1,456E-02 | -5,789E-01 | 1,726E-02 | -6,061E-01 |

- BLS : Durée de vie du bâtiment (an)
- TH : Horizon temporel pour le calcul des EGES (an)
- n : épaisseur du produit (m)
- GWP : potentiel de réchauffement global (kgCO₂eq/kg)

De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», *Buildings & Cities* 2023, [DOI: 10.5334/bc.278](https://doi.org/10.5334/bc.278)

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

Impact en fonction de l'épaisseur

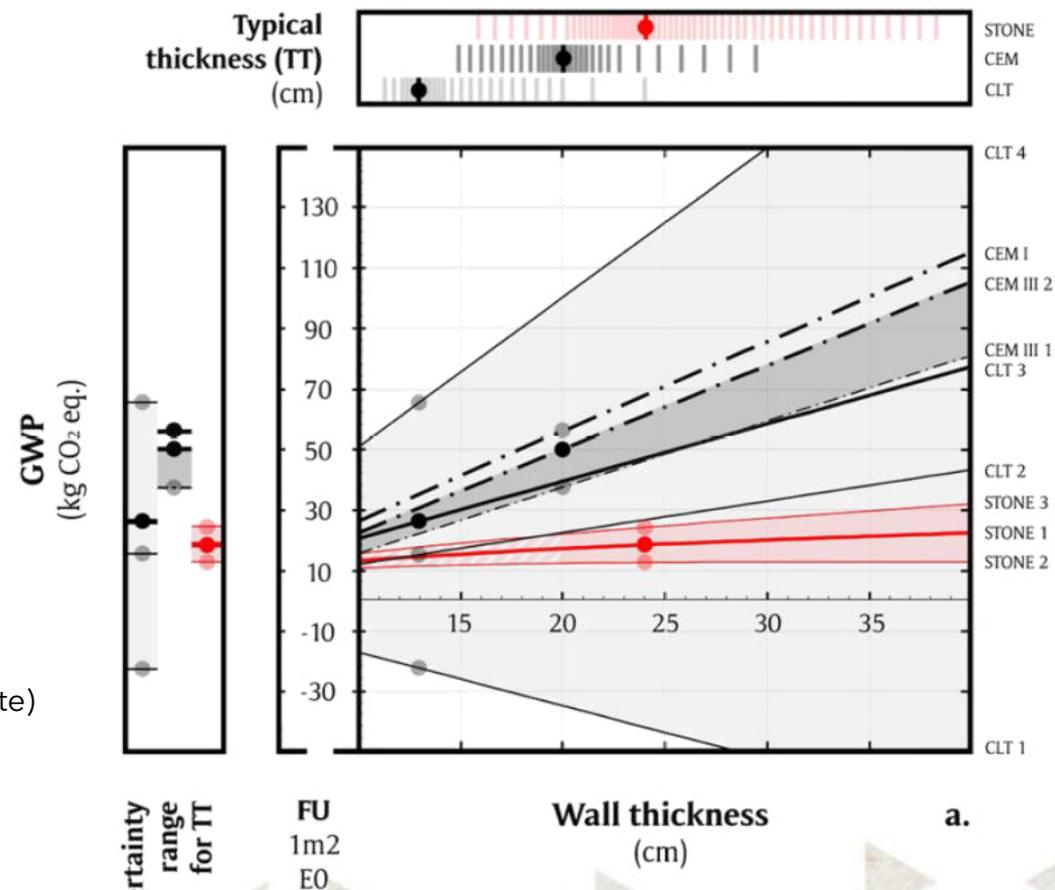
- Pour le massif : relativement faible variabilité du GWP (impact carbone) ;
- Faible incertitude sur le GWP ;
- Bon positionnement par rapport aux alternatives, avec des performances supplémentaires /UF.

- STONE 3 : estimation haute du modèle
- STONE 2 : estimation médiane du modèle
- STONE 1 : estimation basse du modèle
- CEM I : béton CEM I
- CEM III 2 : béton CEM III (allocation physique des laitiers)
- CEM III 1 : béton CEM III (allocation économique des laitiers)
- CLT 4 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse croissante)
- CLT 3 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse à palier)
- CLT 2 : stockage durant la repousse de l'arbre (replanté)
- CLT 1 : stockage pendant la pousse de l'arbre

Comparative dynLCA
(1 m² load-bearing wall functional unit)

GWP₁₀₀
(50 years building life span)

De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», *Buildings & Cities* 2023, DOI: [10.5334/bc.278](https://doi.org/10.5334/bc.278)



4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

Impact dans le temps (dynamique)

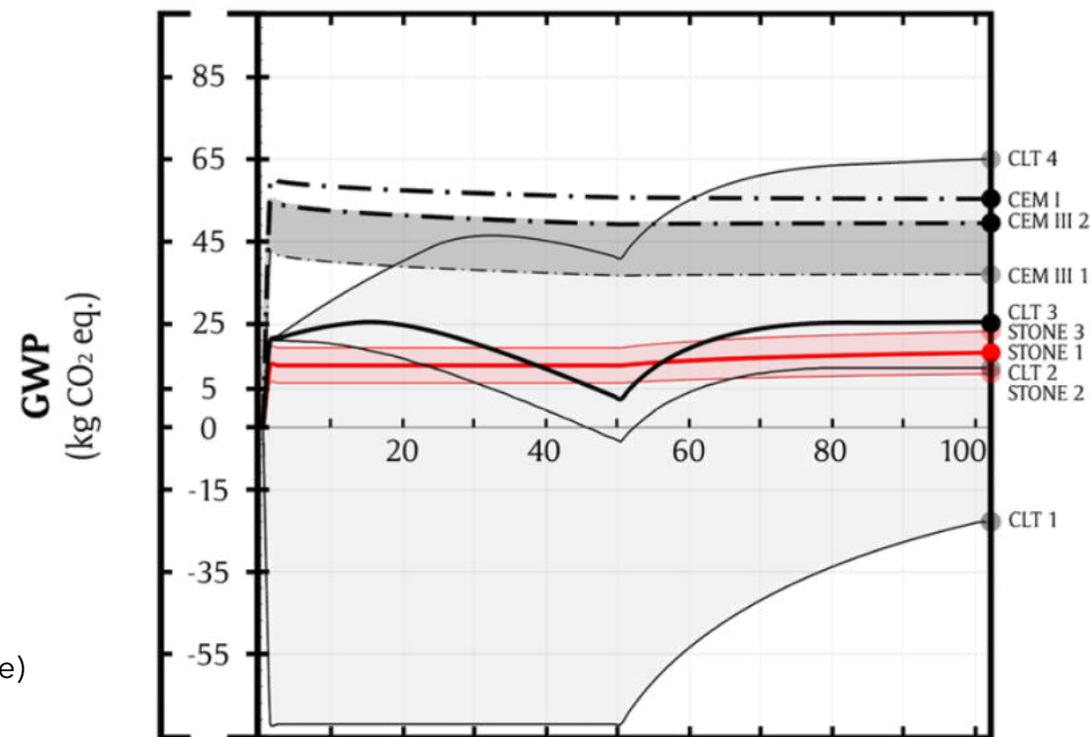
- Une faible variabilité temporelle des émissions,
- Pierre massive : une solution durable à ajouter aux existantes (**mixité**).
- **Le bon matériau, au bon endroit, en bonne quantité.**

- STONE 3 : estimation haute du modèle
- STONE 2 : estimation médiane du modèle
- STONE 1 : estimation basse du modèle
- CEM I : béton CEM I
- CEM III 2 : béton CEM III (allocation physique des laitiers)
- CEM III 1 : béton CEM III (allocation économique des laitiers)
- CLT 4 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse croissante)
- CLT 3 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse à palier)
- CLT 2 : stockage durant la repousse de l'arbre (replanté)
- CLT 1 : stockage pendant la pousse de l'arbre

Comparative dynLCA
(1 m² load-bearing wall functional unit)

GWP_{dyn}
(50 years building life span)

De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», *Buildings & Cities* 2023, DOI: [10.5334/bc.278](https://doi.org/10.5334/bc.278)



FU
1m²
E0

Time Horizon
(years)

a.

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

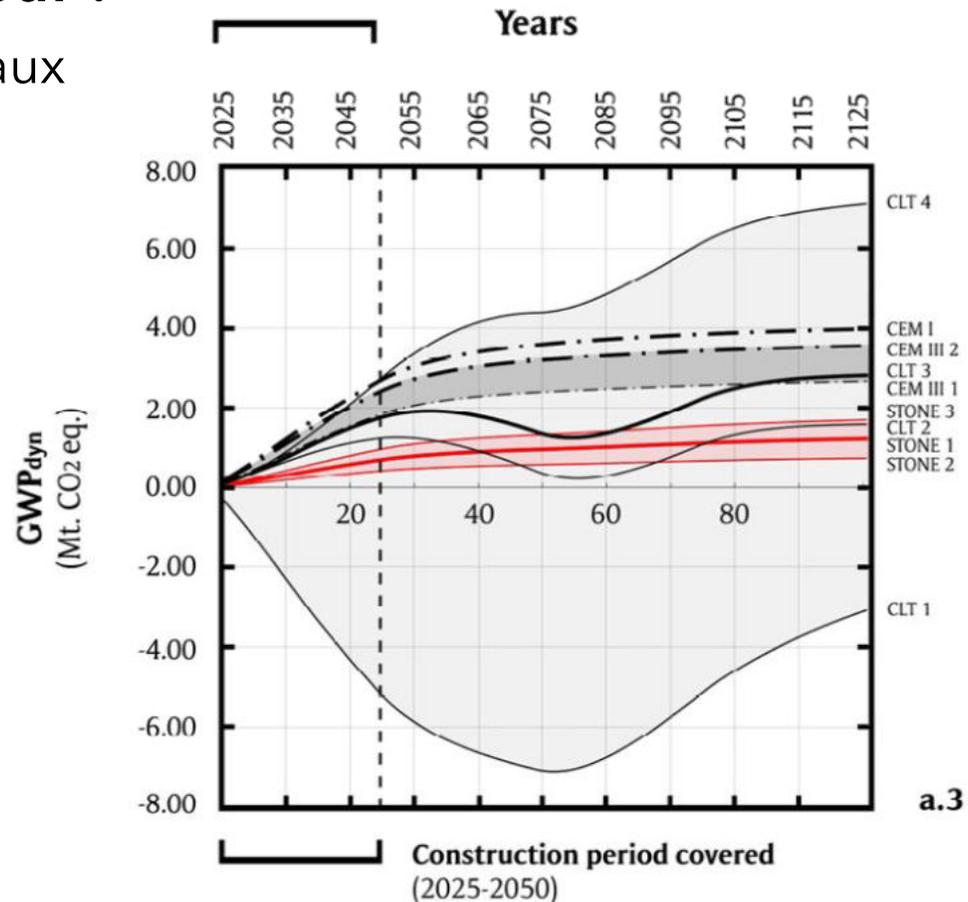
Projections à l'échelle du parc immobilier neuf :

Mise en œuvre des alternatives dans 30% des nouveaux projets sur la période 2025-2050 (au lieu du CEM I) :

- Pierre massive (Stone 2) : - 2,77 MtCO₂eq
- Béton bas-carbone (CEM III 2) : - 0,43 MtCO₂eq
- Bois massif CLT (CLT 3) : - 1,18 MtCO₂eq

- STONE 3 : estimation haute du modèle
- STONE 2 : estimation médiane du modèle
- STONE 1 : estimation basse du modèle
- CEM I : béton CEM I
- CEM III 2 : béton CEM III (allocation physique des laitiers)
- CEM III 1 : béton CEM III (allocation économique des laitiers)
- CLT 4 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse croissante)
- CLT 3 : stockage durant la repousse + évitement de stockage (pousse à palier)
- CLT 2 : stockage durant la repousse de l'arbre (replanté)
- CLT 1 : stockage pendant la pousse de l'arbre

a. 50 years BLSs
(TH<100)



De Toldi & Pestre, «The relevance of cut-stone to strategies for low-carbon buildings», Buildings & Cities 2023, DOI: 10.5334/bc.278

4. COMPARAISON À L'ÉCHELLE PAROI ET BÂTIMENT

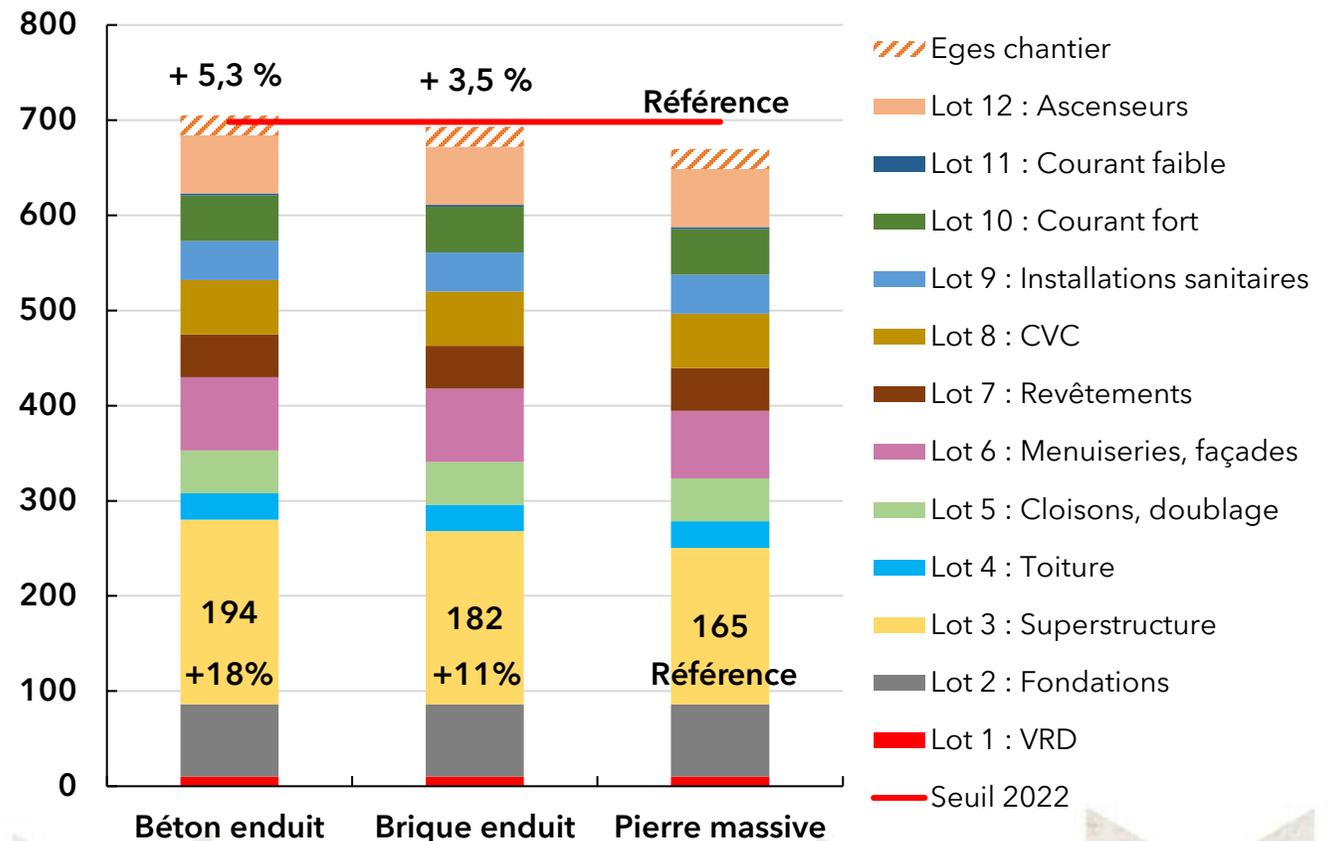
Résultats à l'échelle du bâtiment (Étude Pouget Consultants actualisée).

- Remarque : valeurs pour lot superstructure, (refends, dalles, poteaux, ... ?).
- Ecart /m² :

| Structure : | Ic [kgCO ₂ eq/m ²] | Ecart / pierre |
|-------------|---|----------------|
| Béton | 42,5 | x 3,3 |
| Brique | 29,5 | x 2,3 |
| Pierre | 12,7 | - |

Nécessite réflexion en amont des projets + optimisation multi-lots !

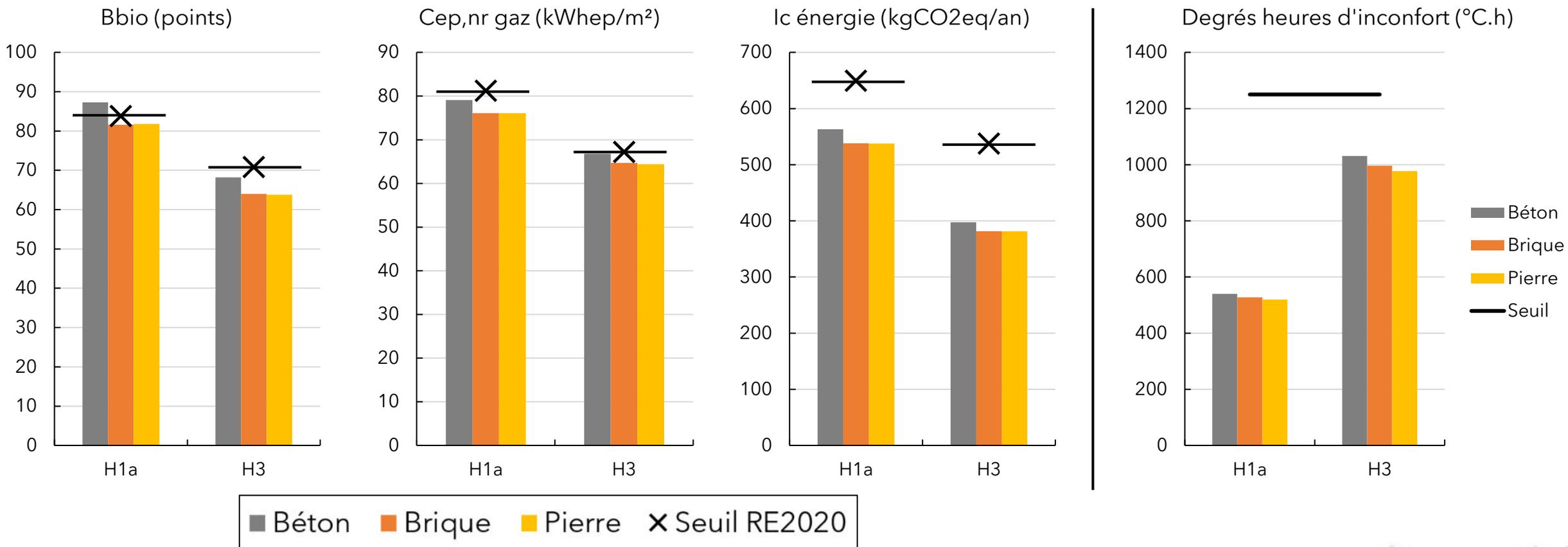
IC construction (kgCO₂eq/m²)



Immeuble collectif conçu en RT2012 étudié selon la RE2020. Isolé par l'intérieur, chauffage et ECS gaz individuel.

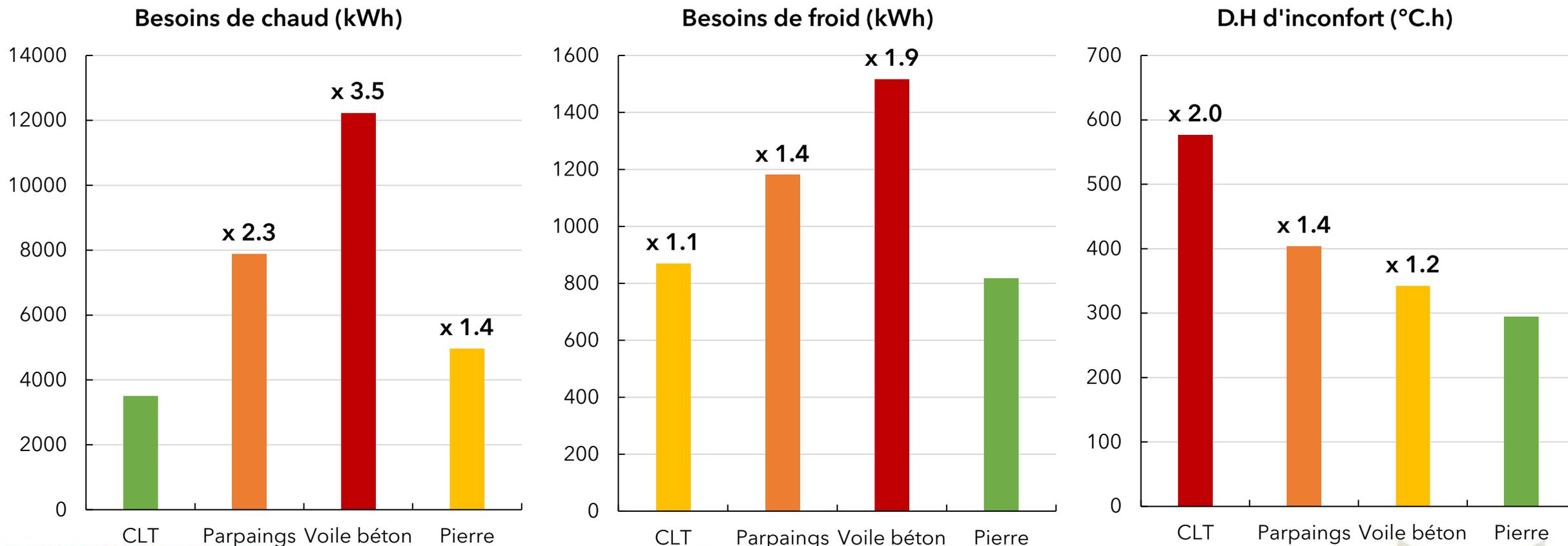
5. LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES PIERRES

Gains énergétiques et de confort potentiels (rappel, étude Pouget Consultants)



5. LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES PIERRES

Gains énergétiques et de confort potentiels (STD)



5. LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES PIERRES

Gains énergétiques et de confort potentiels (STD)

| Parois verticales (non isolées) | Besoins de chaud (kWh) | Puissance de chauffage (kW) | Besoins de froid (kWh) | Puissance de climatisation (kW) | T° moy. sans chauffage (°C) | T° min. sans chauffage (°C) | T° max. sans chauffage (°C) | D.H d'inconfort (°C.h) |
|--|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| CLT + cloisons bois | 3 499 (0%) | 2 106 (0%) | 869 (+6%) | 2 244 (+10%) | 16,9 (0%) | 4,7 (-4%) | 31,9 (+6%) | 577 (+96%) |
| Parpaings enduits + cloisons parpaings | 7 881 (+125%) | 4 106 (+95%) | 1 180 (+44%) | 3 326 (+63%) | 16,2 (-4%) | 2,8 (-43%) | 31,7 (+5%) | 404 (+37%) |
| Voile béton + cloisons béton | 12 231 (+250%) | 6 083 (+189%) | 1 516 (+85%) | 4 478 (+120%) | 15,9 (-6%) | 2,2 (-55%) | 31,6 (+5%) | 342 (+16%) |
| Pierre massive + cloisons pierre | 4 955 (+42%) | 2 657 (+26%) | 818 (0%) | 2 037 (0%) | 16,5 (-2%) | 4,9 (0%) | 30,2 (0%) | 295 (0%) |

6. CONCLUSION

La pierre naturelle, un secteur durable ?

| Critères de durabilité | Analyse |
|--|---|
| Atténuation du changement climatique | ✓ Faible impact carbone des éléments de construction en pierre |
| Adaptation au changement climatique | ✓ Propriétés inertielles, durabilité, résistance mécanique, résistance au feu, ... |
| Gestion de l'eau | ✓ Processus en boucle fermée (carrière et atelier), installation en voie sèche possible pour certains produits |
| Economie circulaire | ✓ Déchets (et coproduit) facilement réemployables, réutilisables, recyclables |
| Prévention / réduction de la pollution | ✓ Faibles impacts environnementaux (↘ ozone photochimique, ↘ acidification, ↘ eutrophisation, ↘ écotoxicité, etc.). |
| Préservation de la biodiversité | ✓ Mesures de protections adoptées, faible superficie exploitée et systématiquement réaménagée en fin d'activité |

LES ENJEUX ET LES DÉFIS DE LA CONSTRUCTION BAS-CARBONE

LE CAS DE LA PIERRE NATURELLE D'ORNEMENT ET DE CONSTRUCTION

MERCI DE VOTRE ATTENTION



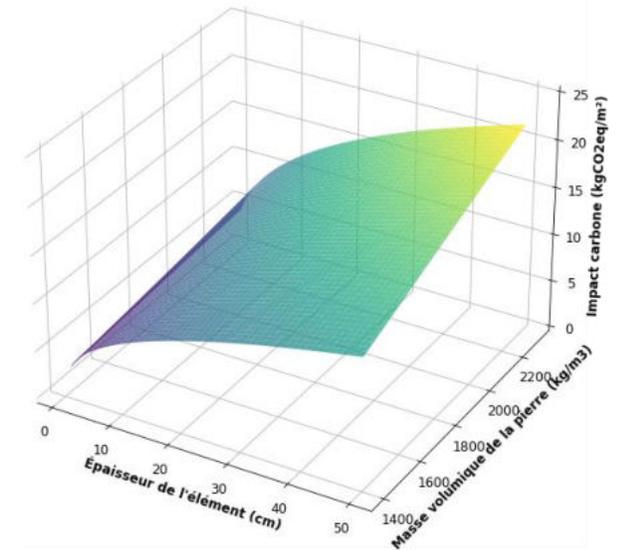
Terre et Pierre
Expertise et Innovation



Tristan PESTRE

Chef de projet – CTMNC ROC

pestre.t@ctmnc.fr



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023



Terre et Pierre
Expertise et Innovation

DES CHANTIERS REMARQUABLES



Grain
d'Orge

Taille de pierre



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE:**

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en taille de pierre: La voute



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE:**

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en taille de pierre: La voute

Avantage: simple à réaliser et à poser



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE:**

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en taille de pierre: La voute

Avantage: simple à réaliser et à poser

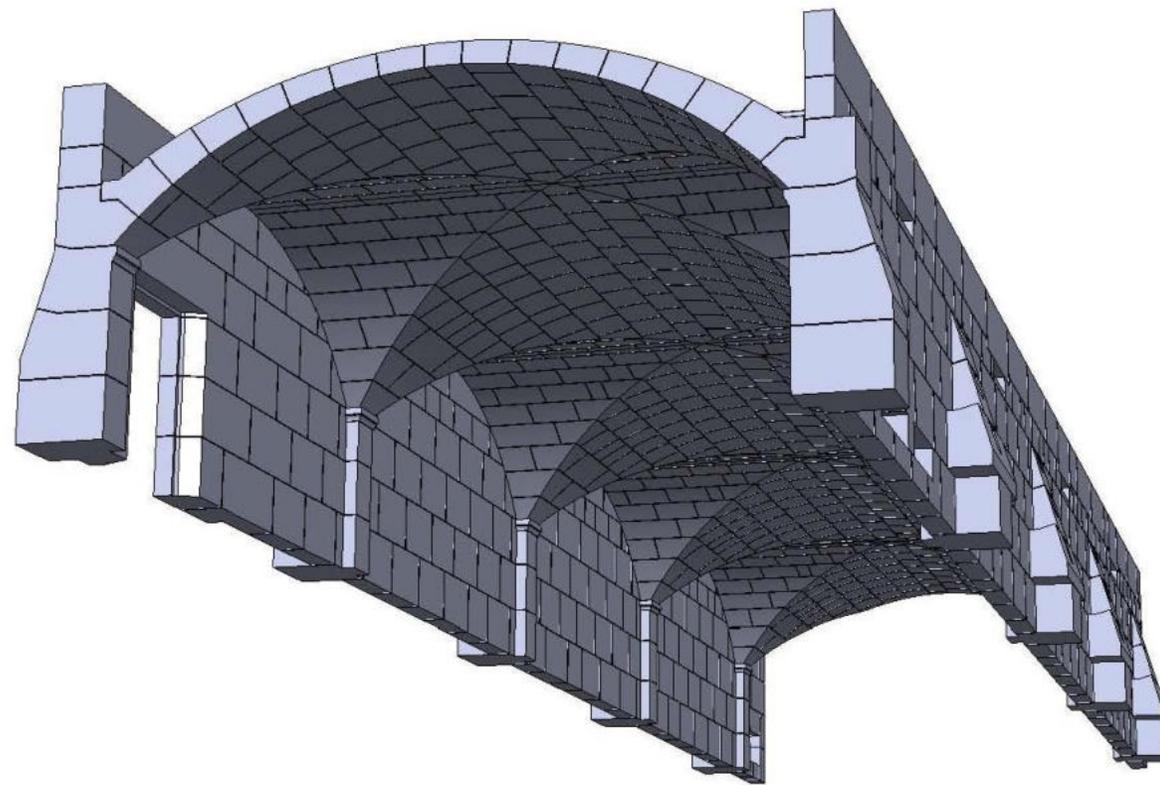
Inconvénient: nécessite un contre-buttage important



Réalisation de la cave du domaine Jean-Louis CHAVE
des vins de l'Hermitage
Mauves (Ardèche)

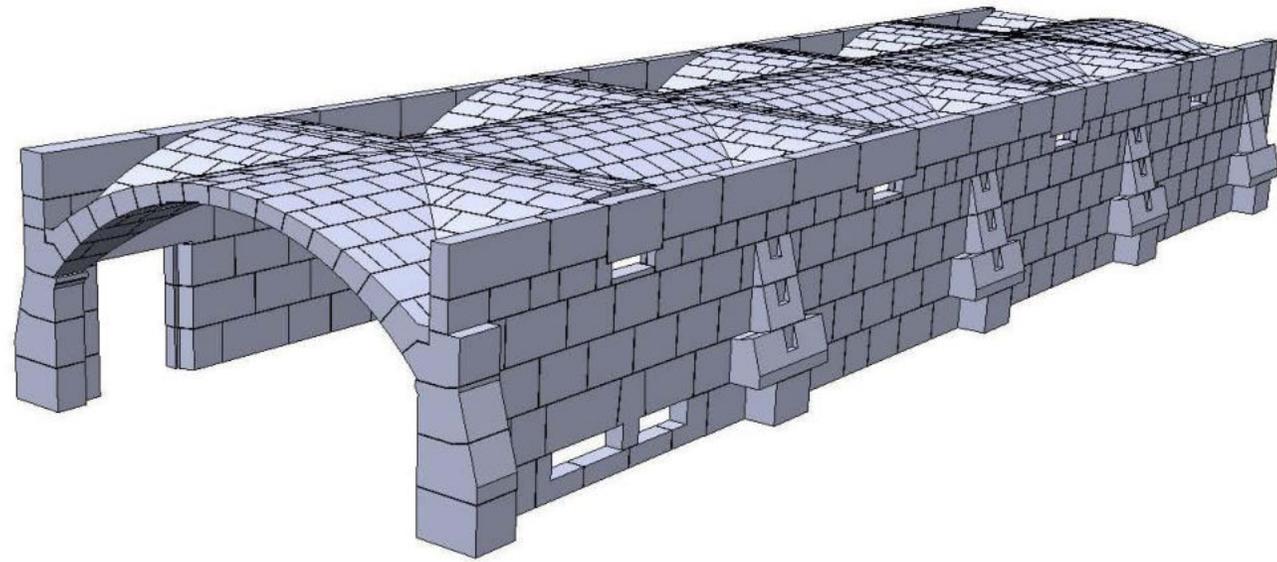
Maquette en bois
réalisée par
l'architecte.
Voute d'arêtes en
arc surbaissé ,
sommiers en repos
sur piliers.





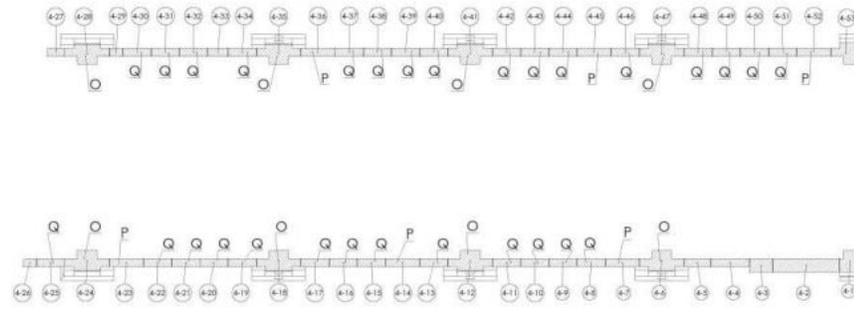
©atelier du grain d'orge

Modélisation en 3D du projet sur la base des plans de l'architecte. (DAO Solidworks)

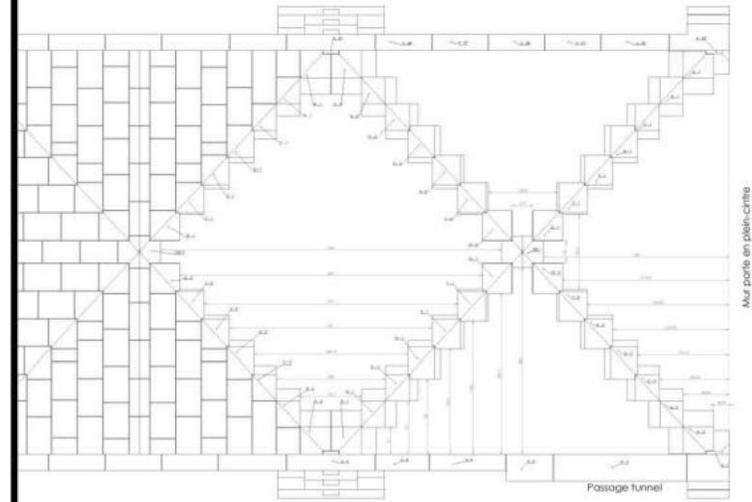


©atelier du grain d'orge

L'appareillage des pierres est entièrement défini à ce stade, le calepin est réalisé avec numérotation de chaque pierres. La voute fait 32m x 8m x 5m de haut

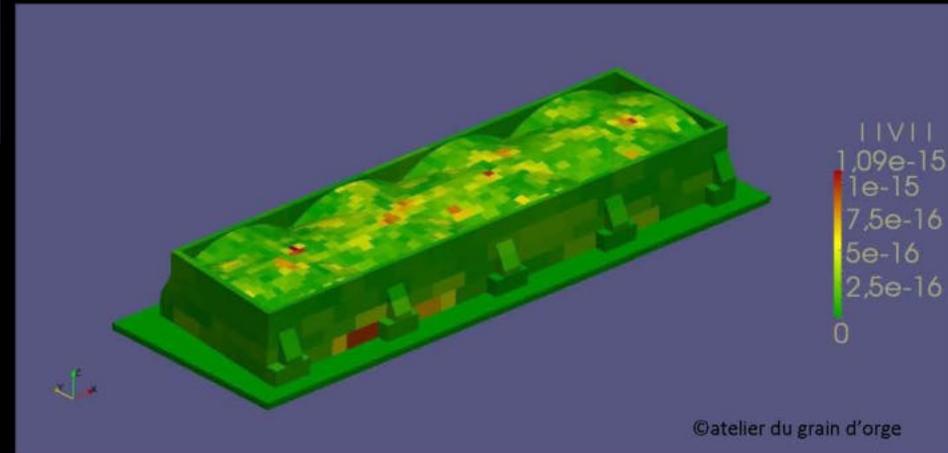
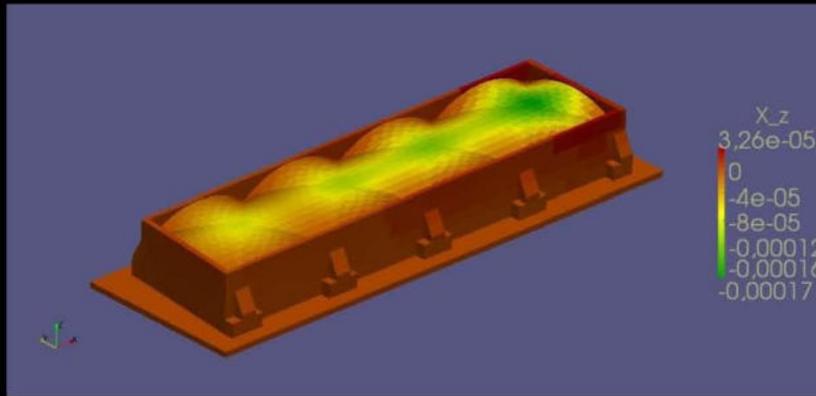


ASSISE 4



Arçons
Croisés de voûtes

Chaque assise est référencée (type et numéro de blocs) permettant au maçon de réaliser la pose correctement. Au total, 1118 éléments sont ainsi répertoriés et constituent l'ensemble de l'ouvrage



L'analyse numérique par éléments discrets définit les déplacements sous contrainte ainsi que les vitesses d'accélération. Un rapport détaillé d'analyse de structure permet aux bureaux de contrôle de valider les calculs et permet d'apporter au maître d'ouvrage toutes les garanties en terme d'assurances à la construction.



Après réalisation des fouilles, les murs sont élevés, le montage de la structure d'échafaudage commence.

Le coffrage est inséré entre les murs et supporté par un ensemble d'échafaudage par l'intérieur. Le réglage altimétrique est soigneusement vérifié pour garantir une pose correcte des sommiers sur les têtes de piliers. Chaque chevron correspond au joint de pose des pierres





©Atelier du grain d'orge

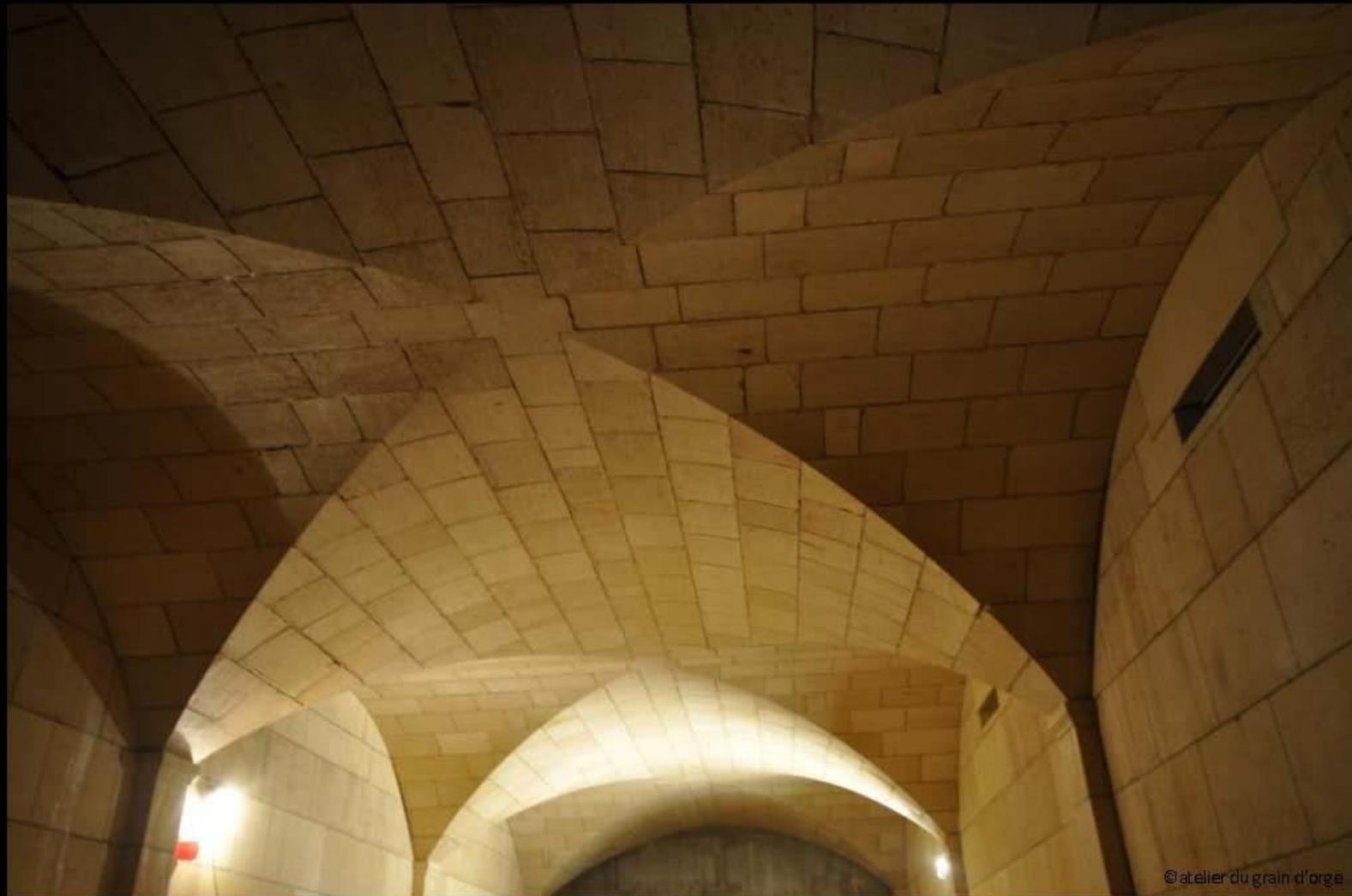
La pose commence par les arêtiers qui relient chaque piliers entre eux formant ainsi les croisée qui vont reprendre la charge de la voute.



A ce stade, la voûte est fermée. Il est nécessaire de caler les murs avec du gravier compacté et de charger les reins de la voûte avant le décintrement de l'ouvrage.



Vue intérieure de la cave après décoffrage, seuls les joints restent à reprendre



© atelier du grain d'orge

Vue longitudinale



Les pièces de vin commencent à prendre place pour quelques années...
L'observation préalable sur 12 mois avec pour seule régulation la pierre,
a démontré une stabilité des conditions de température et
d'hygrométrie idéale.

La « part des anges » commence à nourrir la pourriture noble qui
apparaît sur les pierres, gage d'une cave saine et propice à l'élaboration
d'un grand cru.

DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE:**

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en taille de pierre: La voute

Avantage: simple à réaliser et à poser

Inconvénient: nécessite un contre-buttage important

Alors que fait-on quand on ne peut pas contrebuter?



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE:**

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en taille de pierre: La voute

Avantage: simple a réaliser et a poser

Inconvénient: nécessite un contre-buttage important

Alors que fait-on quand on ne peut pas contrebuter?

On peut contraindre le matériau afin que l'assemblage soit auto-stable



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE** précontraint:

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE** précontraint:

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre

Avantage: simple à réaliser et à poser



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- **FRANCHISSEMENT SIMPLE** précontraint:

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre

Avantage: simple à réaliser et à poser

Inconvénient: aucun



DES CHANTIERS REMARQUABLES

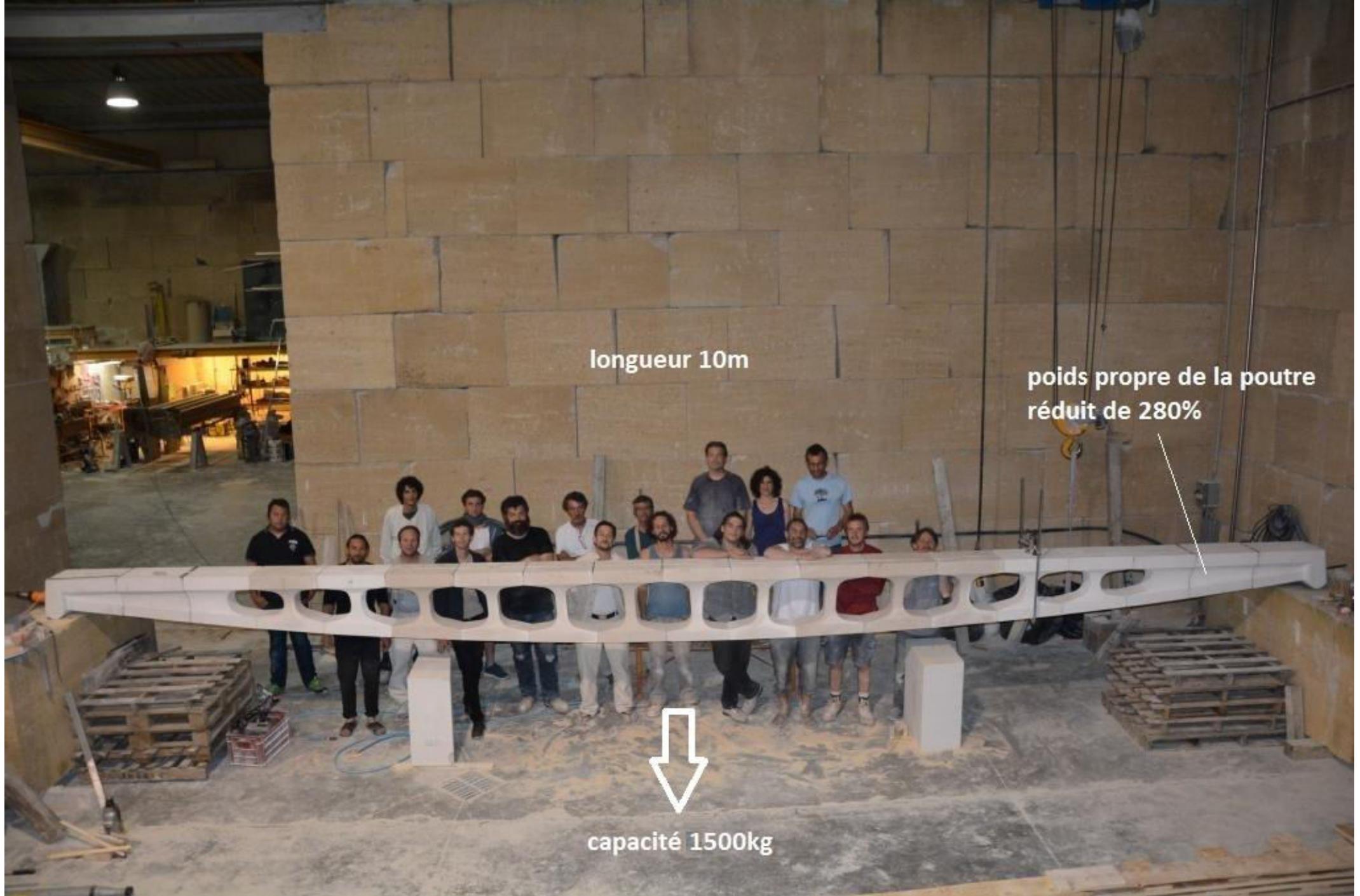
- **FRANCHISSEMENT SIMPLE** précontraint:

Moyen de franchissement le plus courant pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre

Avantage: simple a réaliser et a poser

Inconvénient: aucun



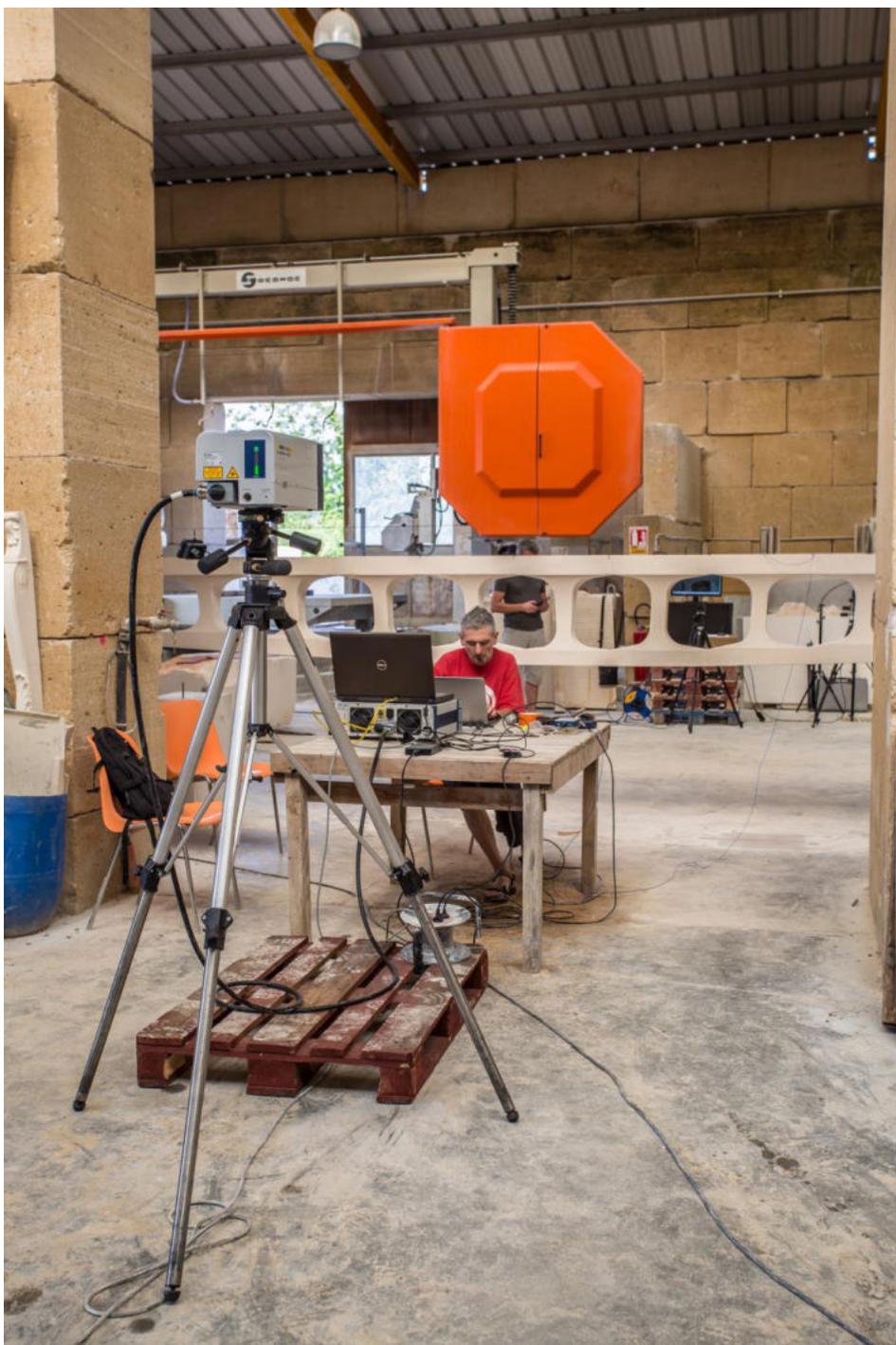


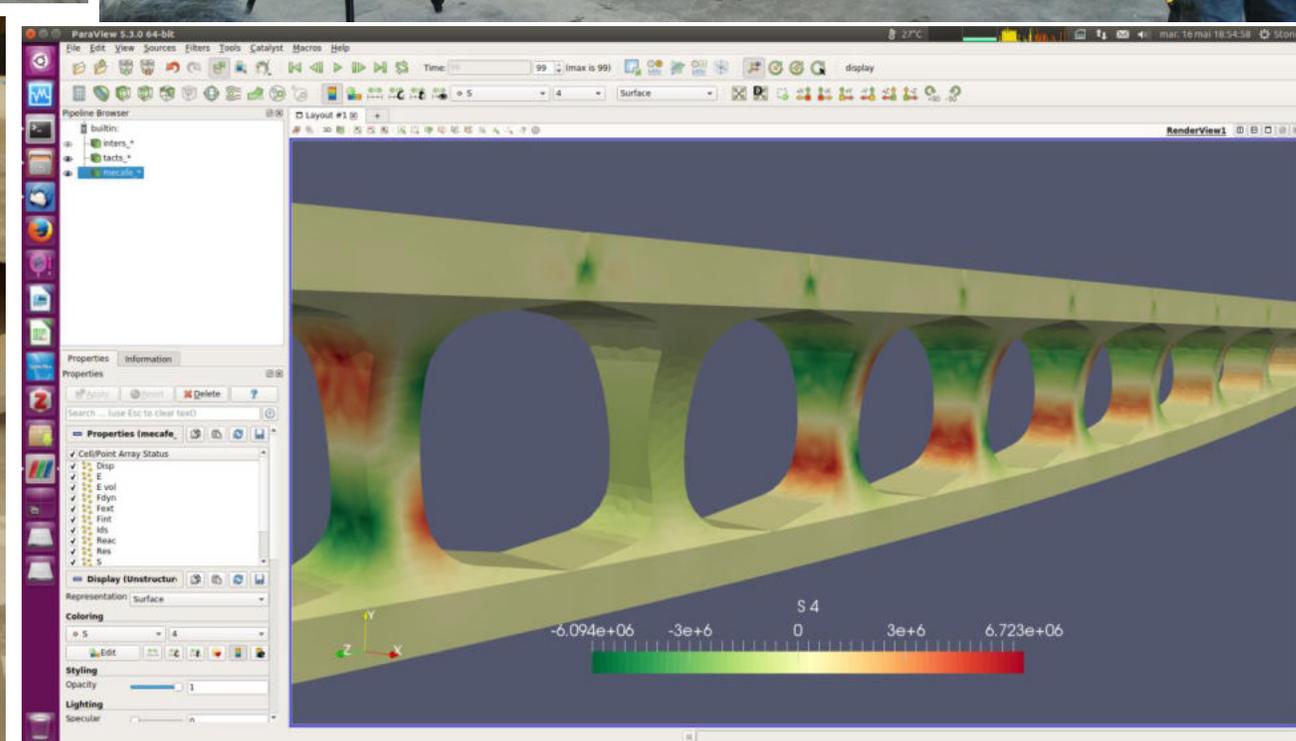
longueur 10m

poids propre de la poutre
réduit de 280%

capacité 1500kg







DES CHANTIERS REMARQUABLES

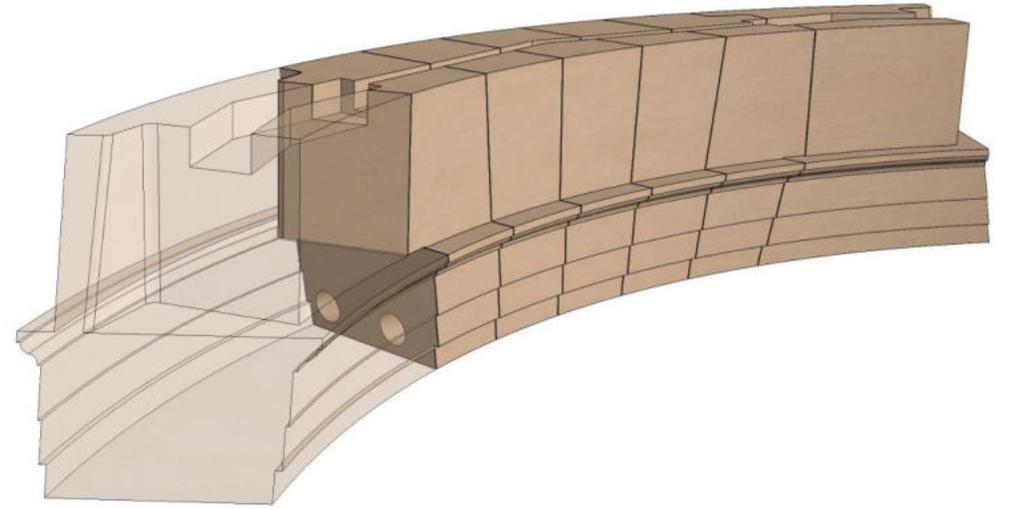
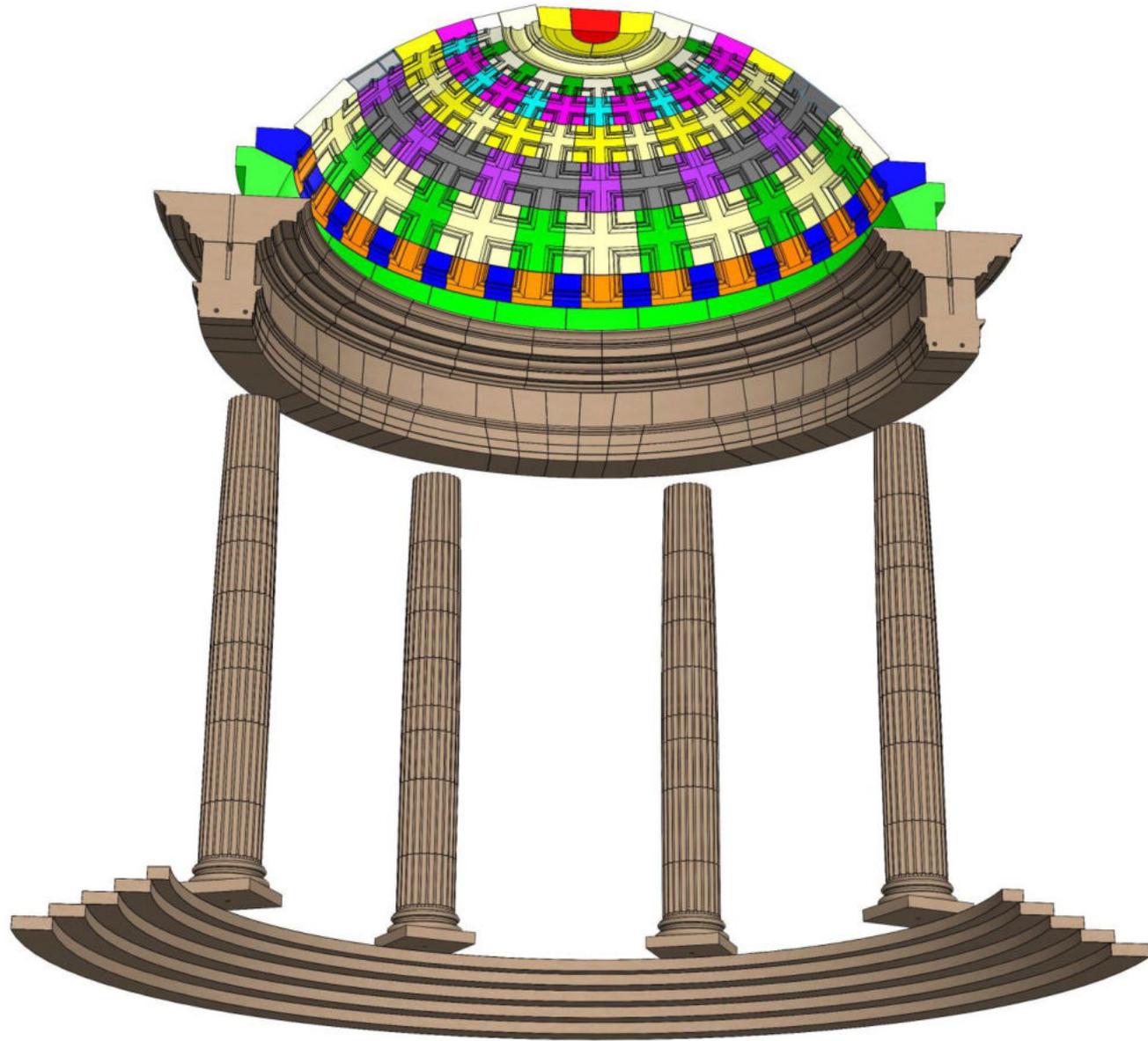
- **FRANCHISSEMENT SIMPLE** précontraint:

Moyen de franchissement alternatif pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre pas droite

Avantage: simple à réaliser et à poser

Inconvénient: aucun

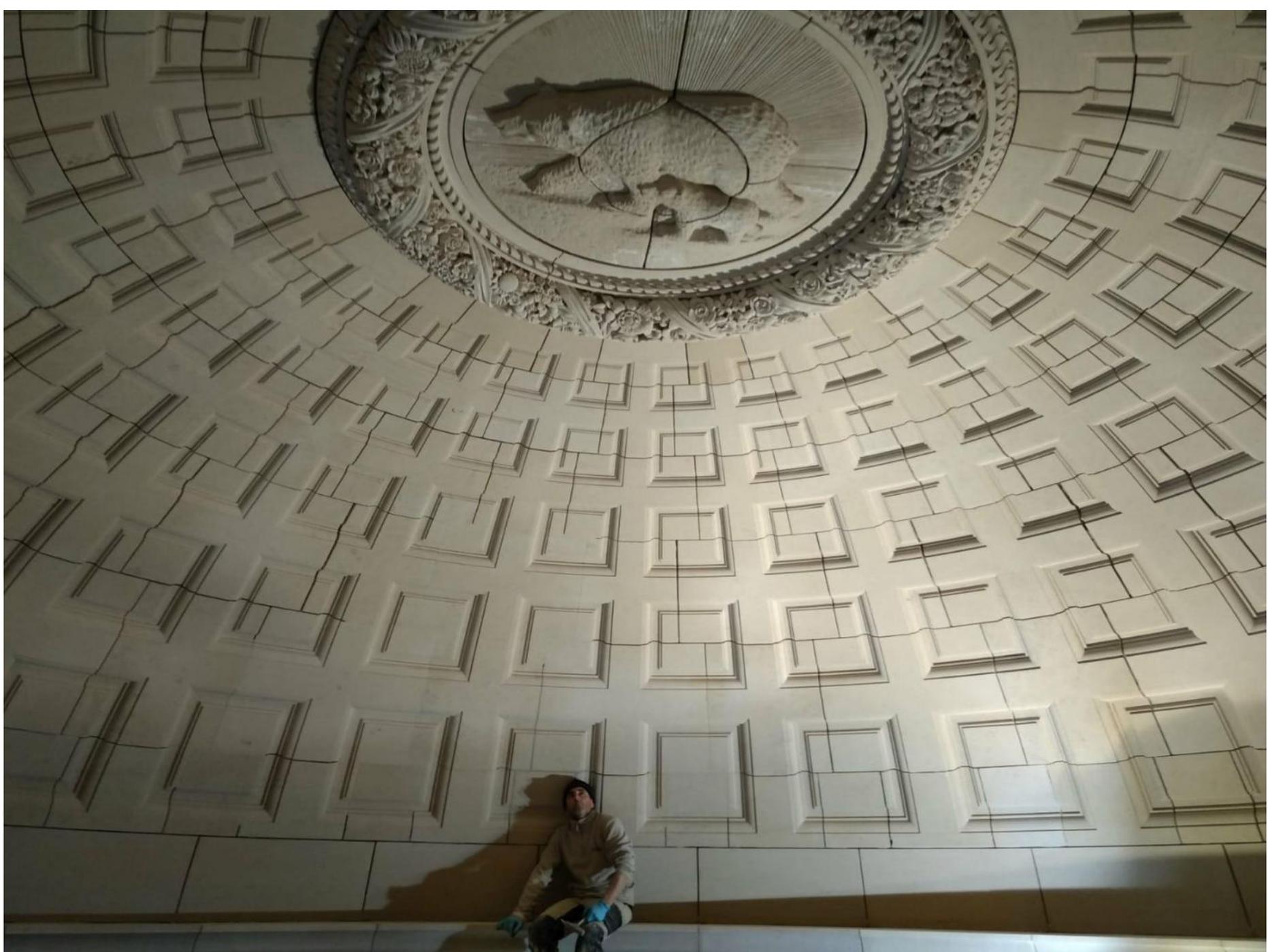








SNBR/A.JL.B



DES CHANTIER REMARQUABLES

- FRANCHISSEMENT (moins) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement coton pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre en zig zag



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- FRANCHISSEMENT (moins) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement coton pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre en zig zag

Avantage: résoudre un problème pas si simple à réaliser et à poser



DES CHANTIERS REMARQUABLES

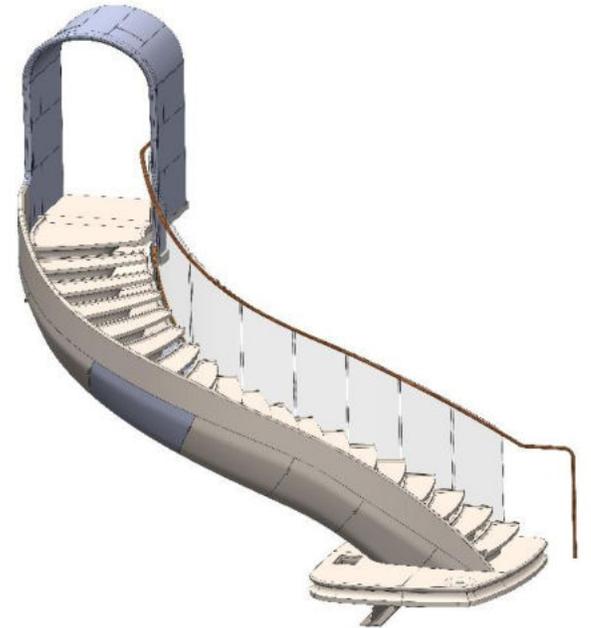
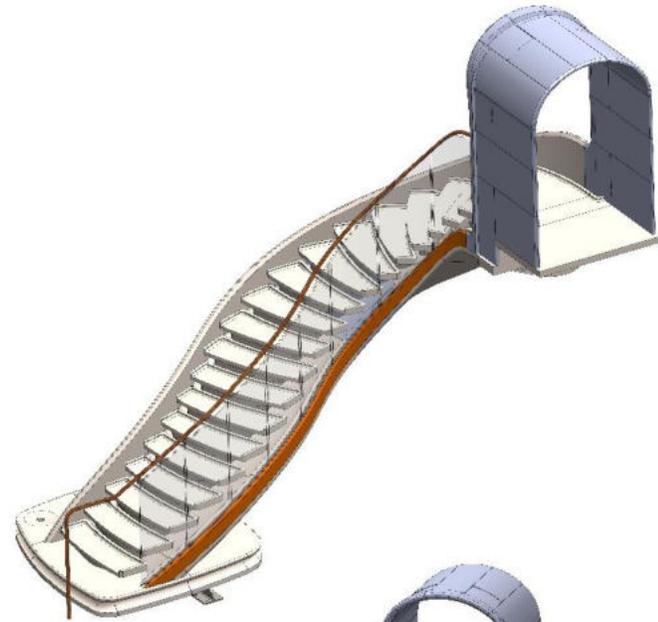
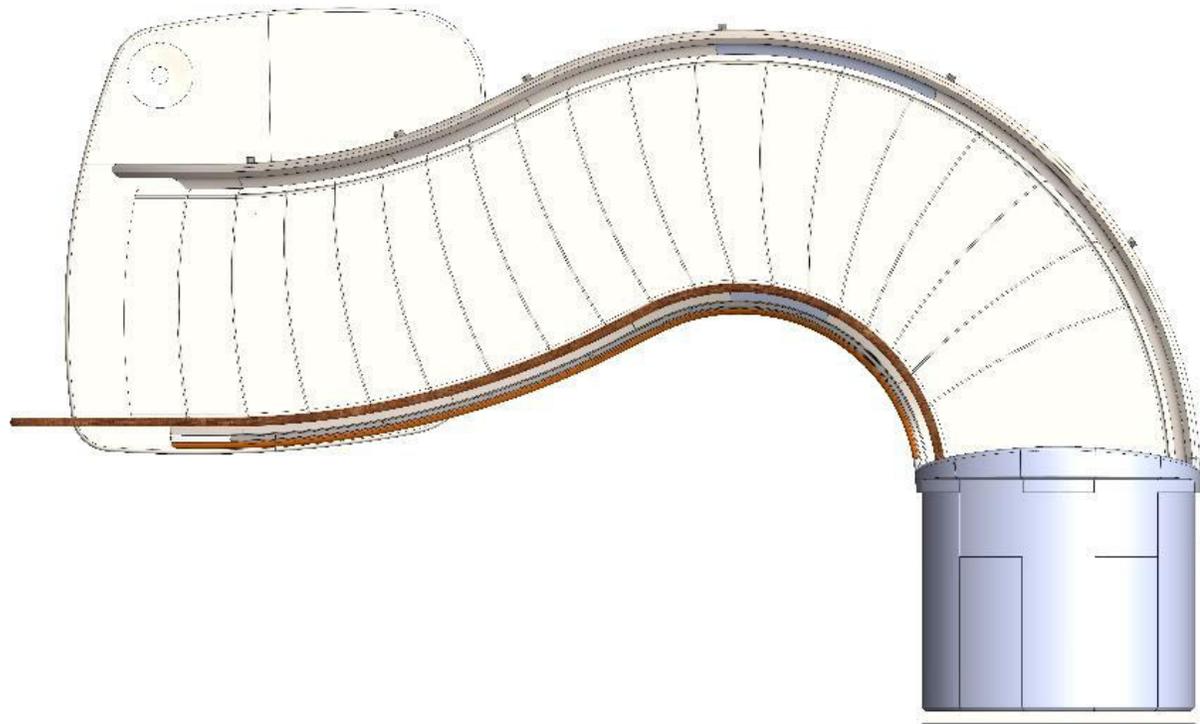
- FRANCHISSEMENT (moins) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement coton pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre en zig zag

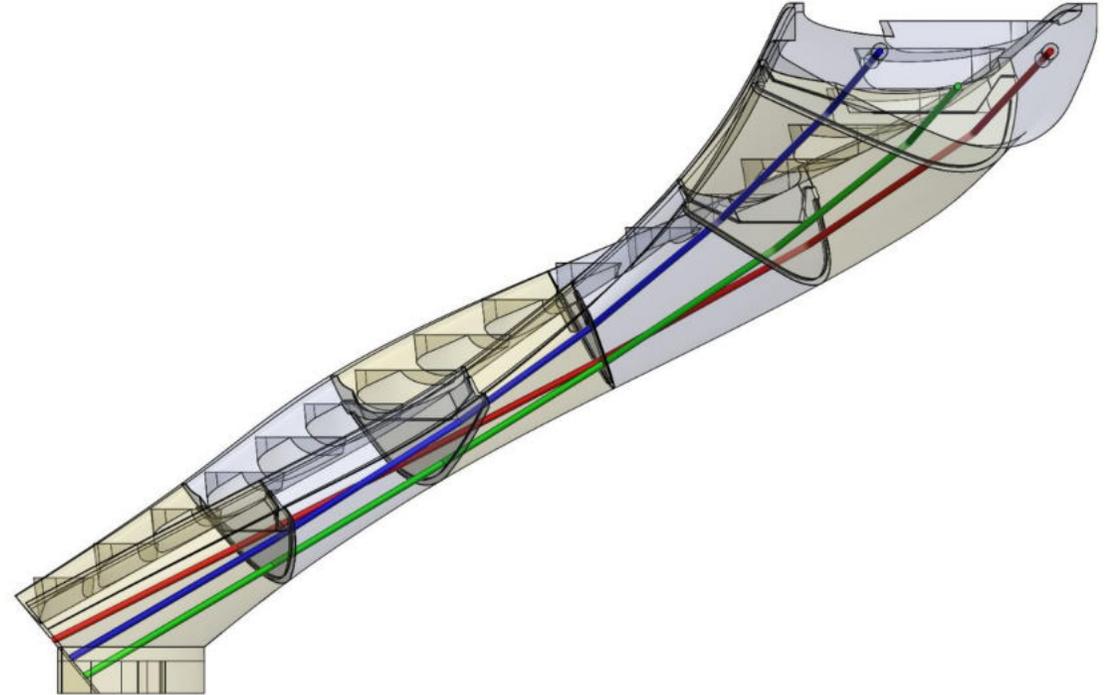
Avantage: résoudre un problème pas si simple à réaliser et à poser

Inconvénient: aucun en dehors de tous les problèmes...

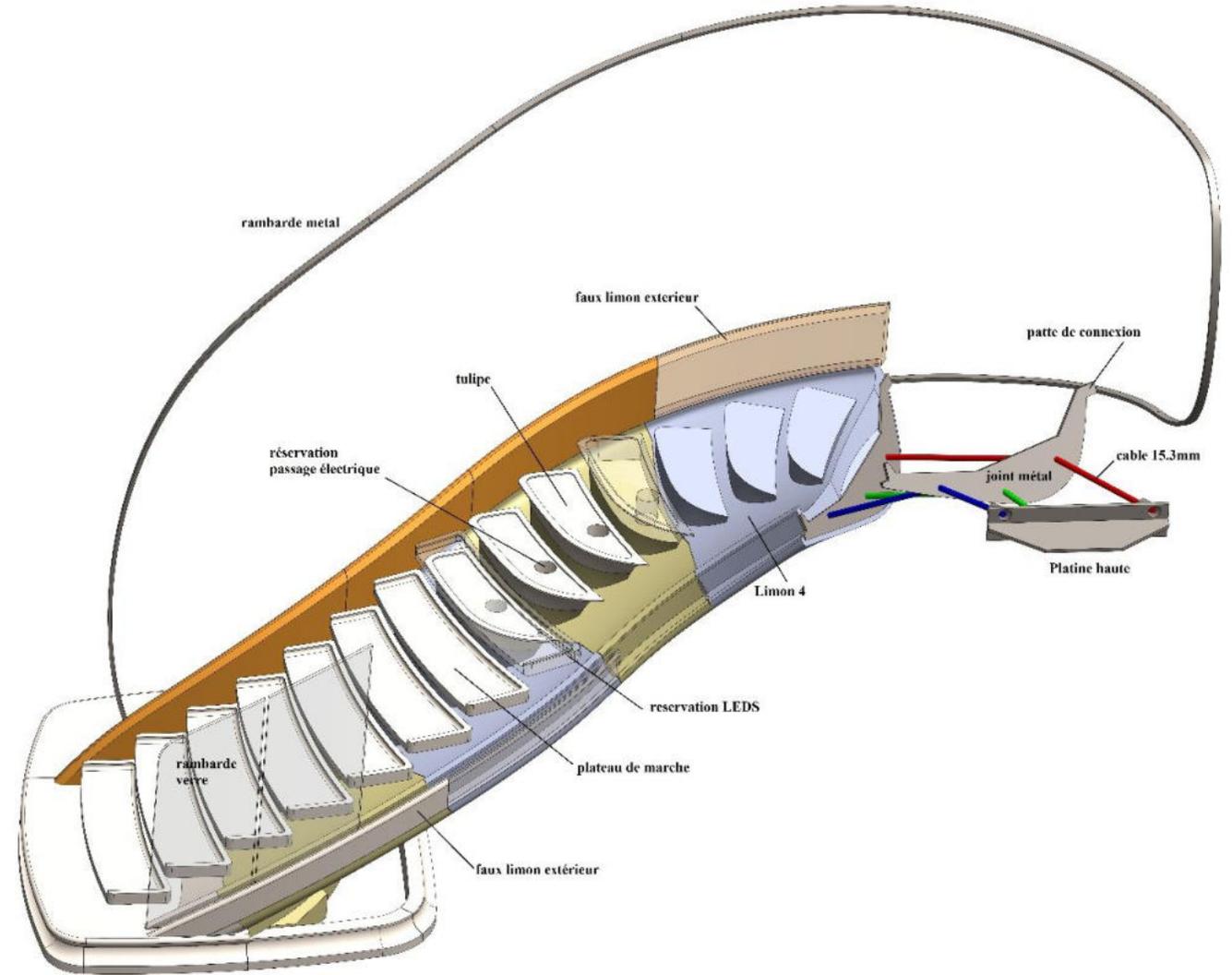
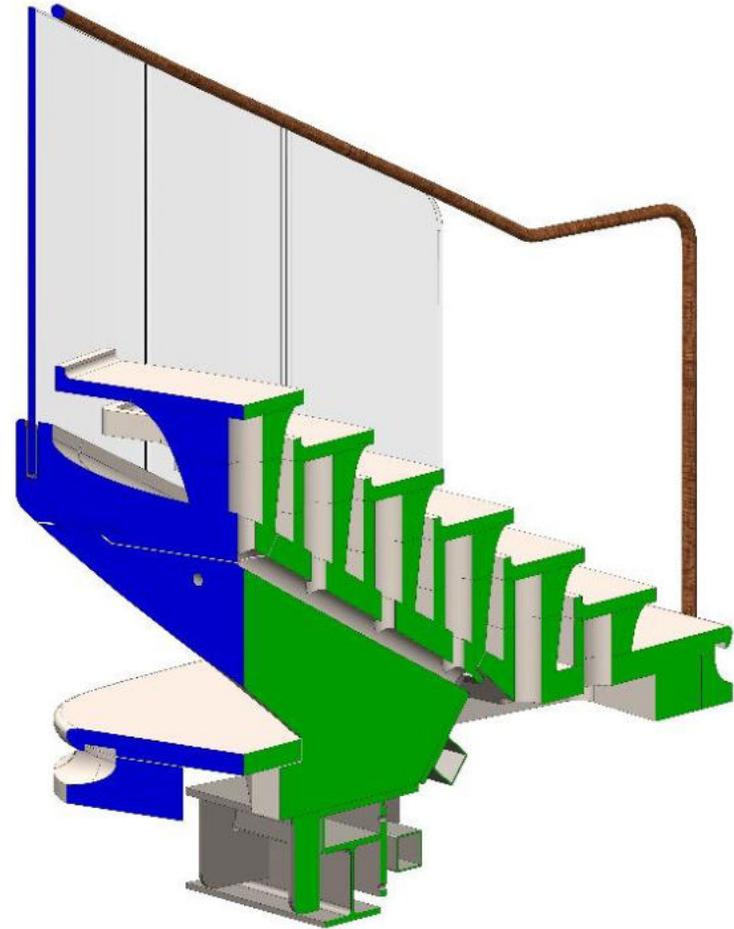




- Escalier quart tournant, ligne de foulée en S
- 6 voussoirs en pierre calcaire
- 3 câbles
- Joints
 - platines métalliques
 - encollage
- Appuis
 - pivot en partie basse
 - ponctuel en partie haute
- Validation aux Eurocodes
 - chargements, combinaisons ELS et ELU, EC6 et EC2



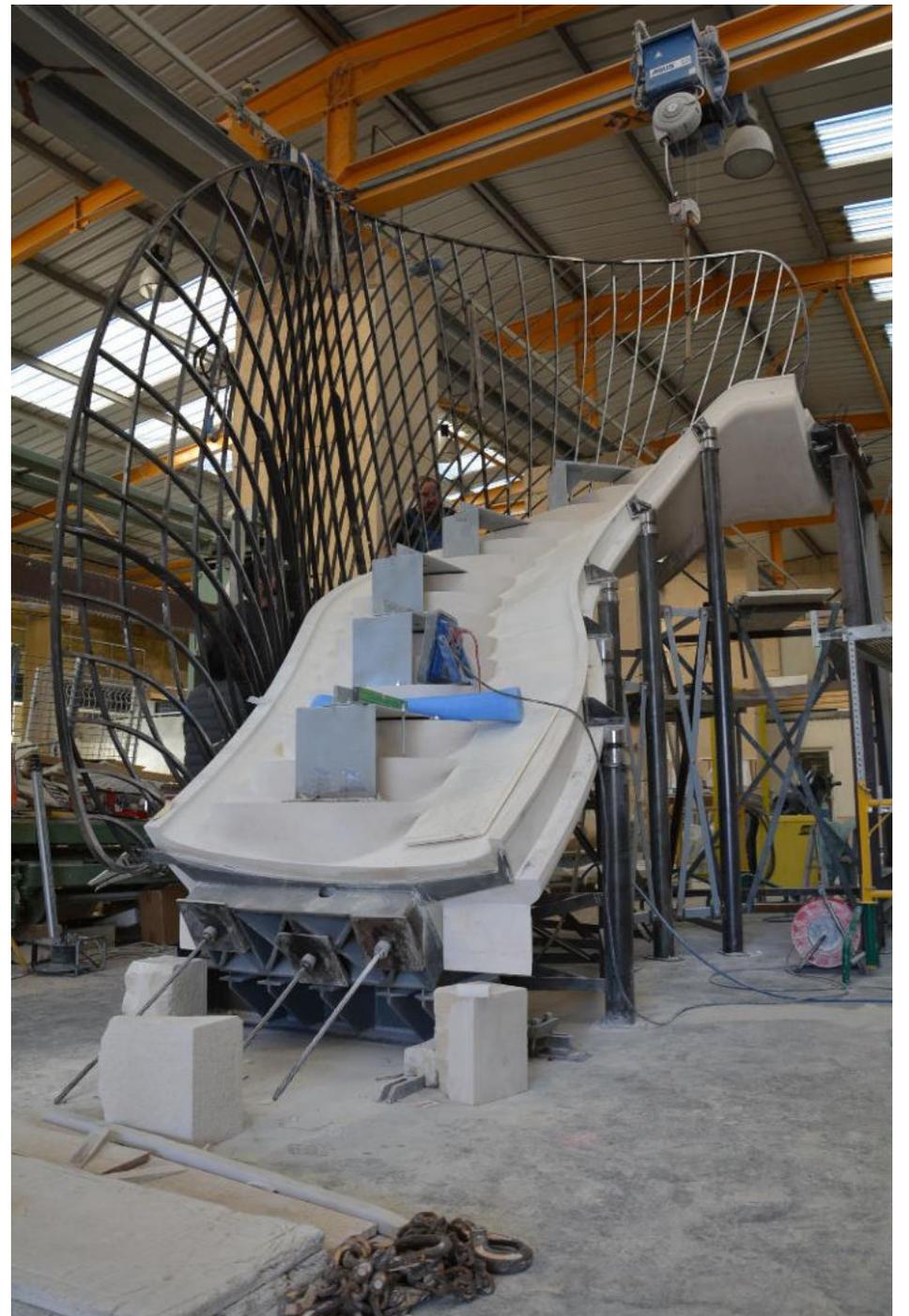
- Conception CAO



- Découpe au fil & Usinage Robot



- Appareillage à blanc en atelier





DES CHANTIERS REMARQUABLES

- FRANCHISSEMENT (pas) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement antinaturel pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre sans les mains...



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- FRANCHISSEMENT (pas) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement antinaturel pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre sans les mains...

Avantage: créer des problèmes pas du tout simple à réaliser et à poser.



DES CHANTIER REMARQUABLES

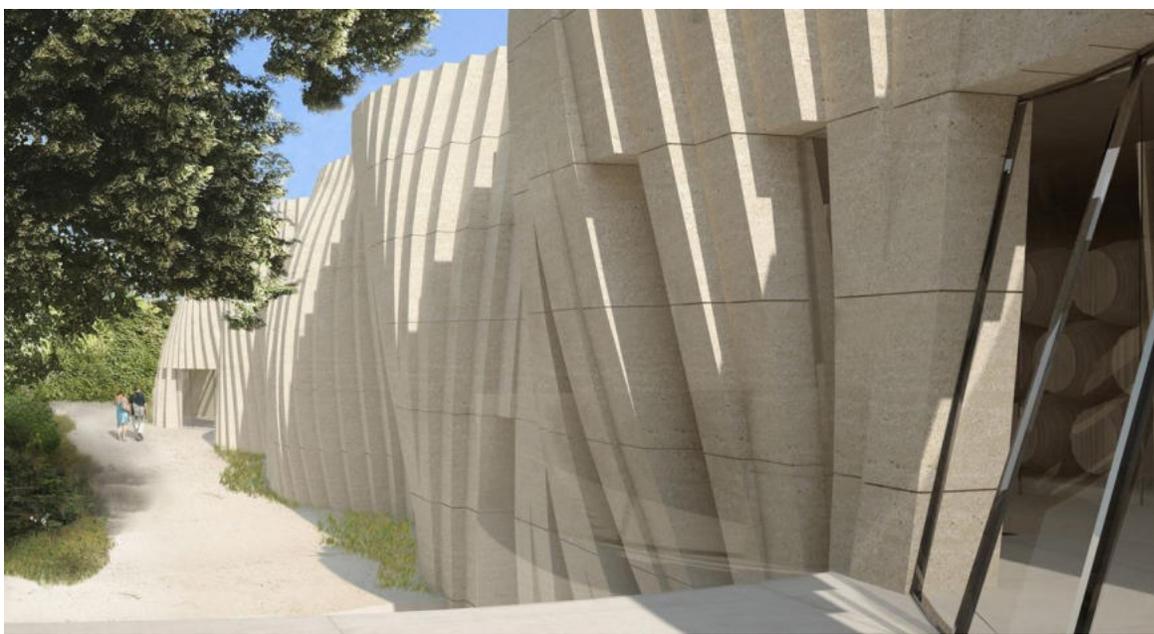
- FRANCHISSEMENT (pas) SIMPLE précontraint:

Moyen de franchissement antinaturel pour franchir un espace en pierre précontrainte: La Poutre sans les mains...

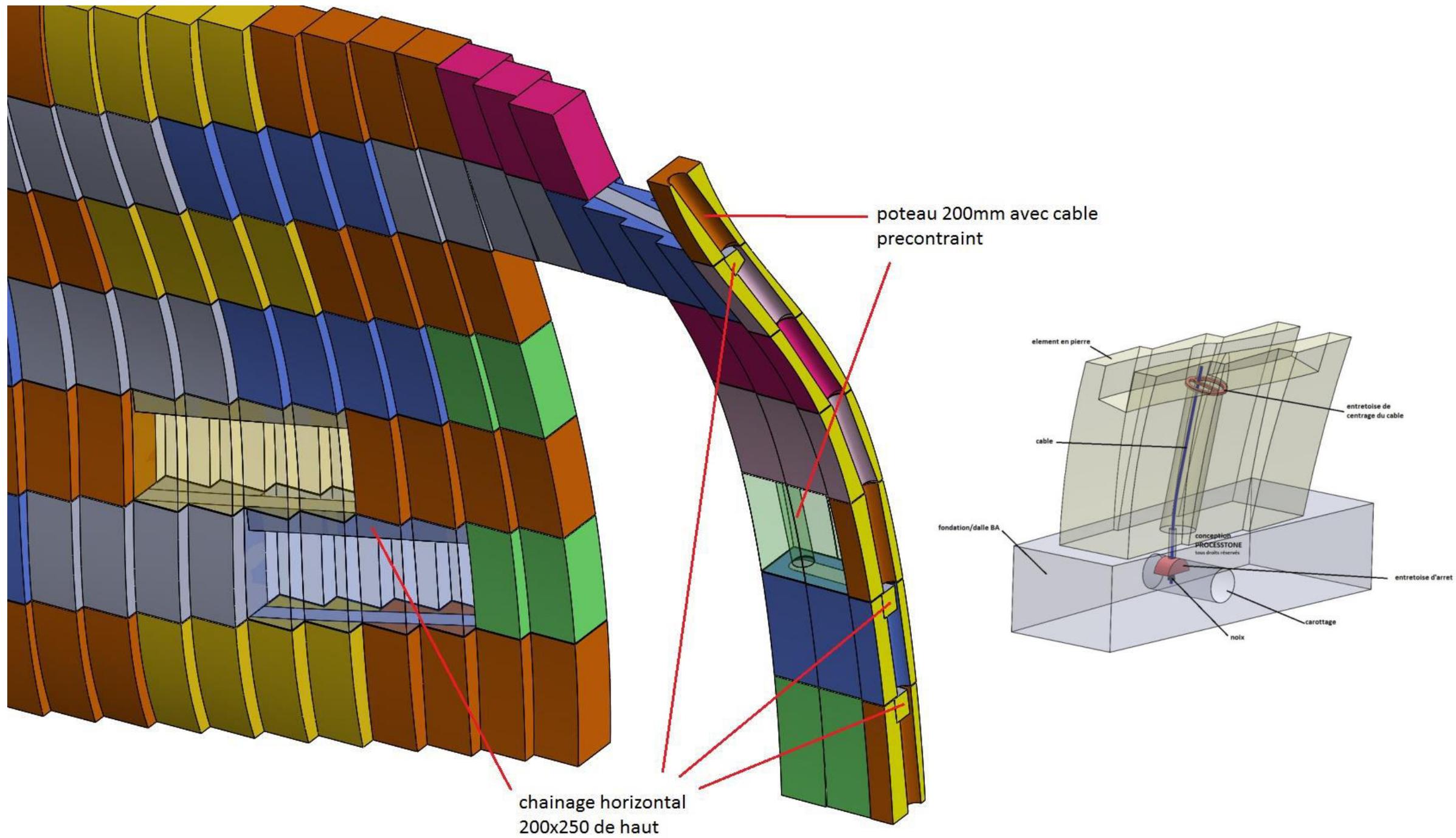
Avantage: créer des problèmes pas simple à réaliser et à poser

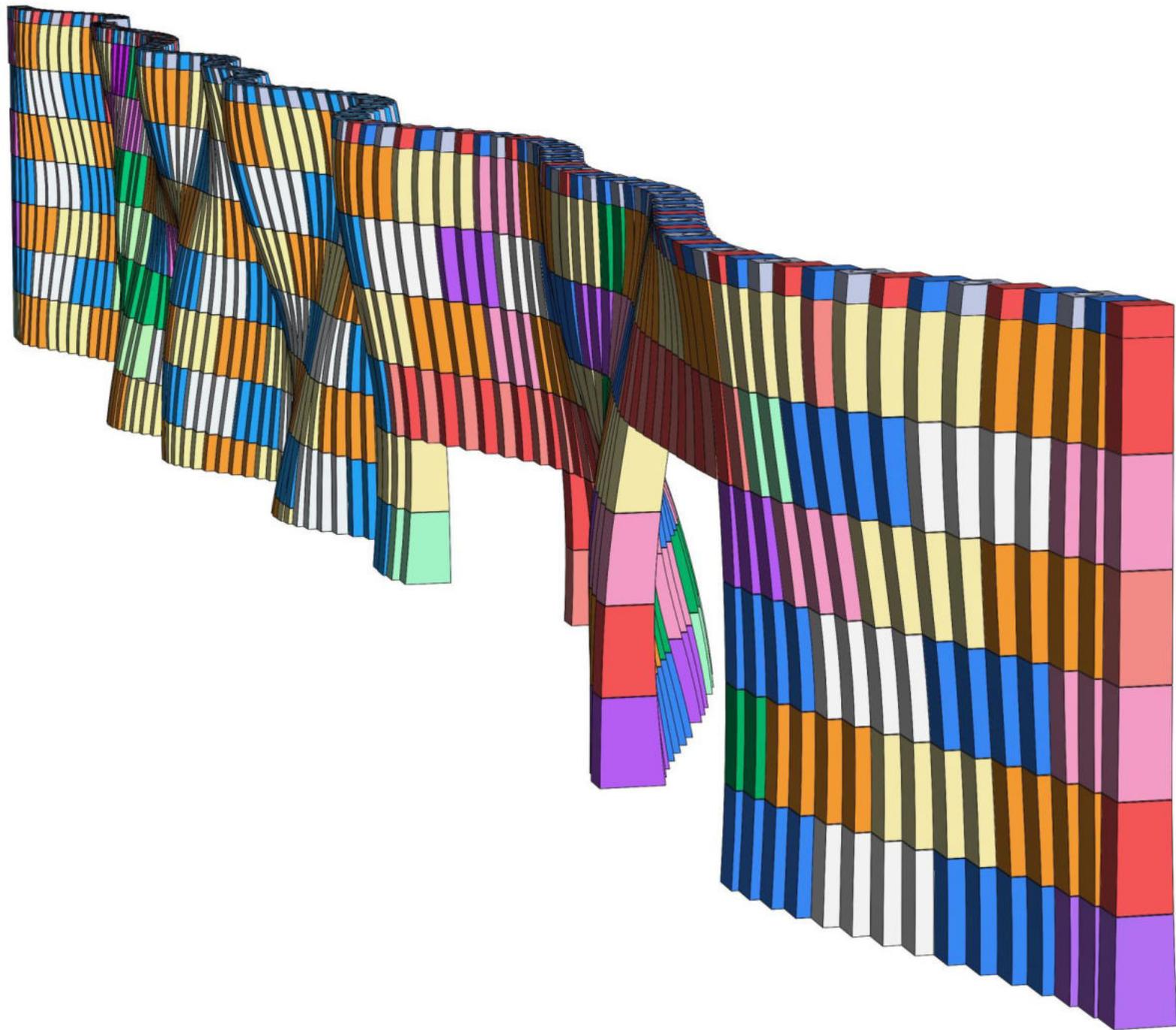
Inconvénient: tous.

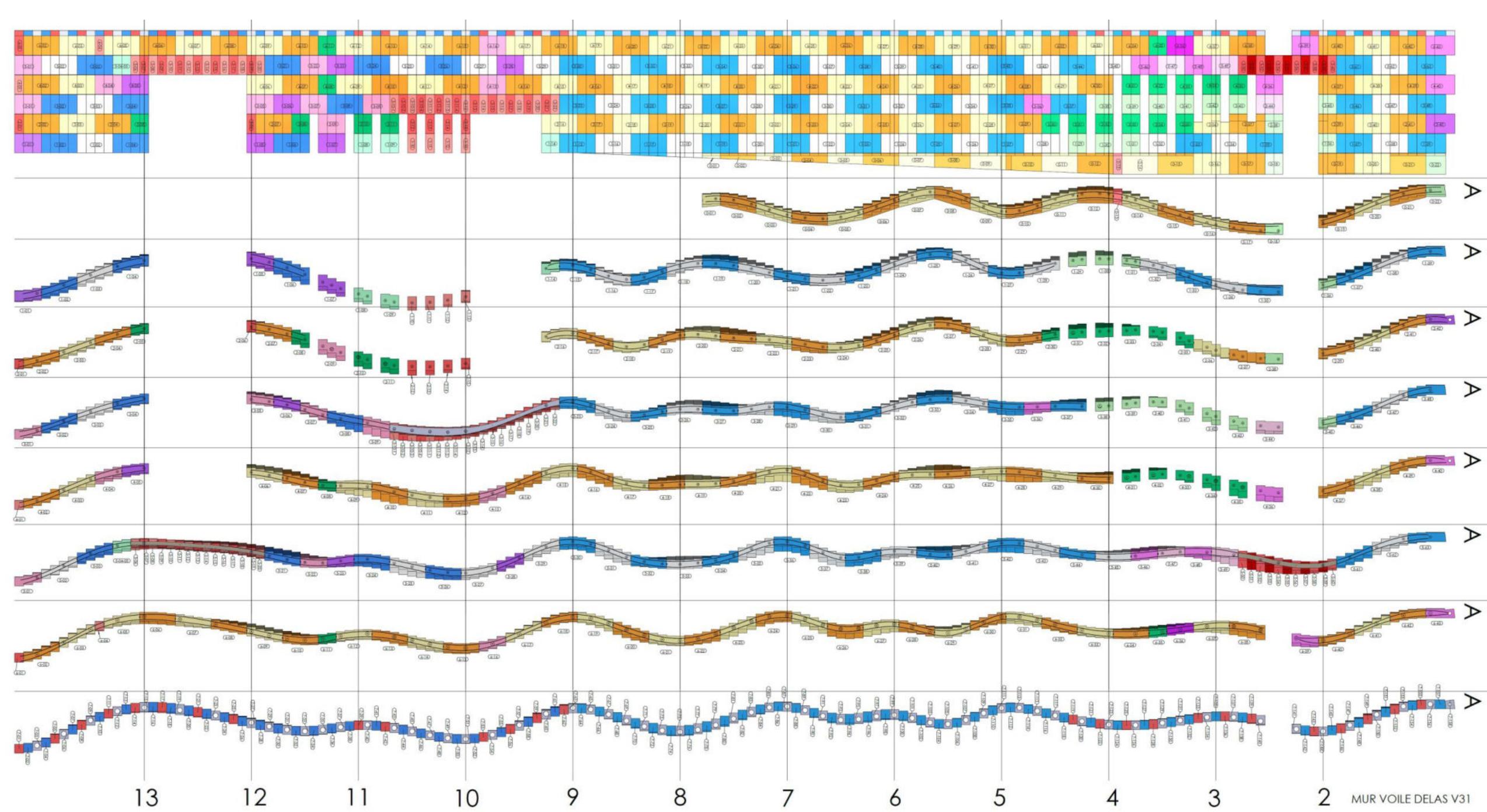




Carl Frederick Svenstedt
Bagneris-Cherblanc-Chastel







13

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

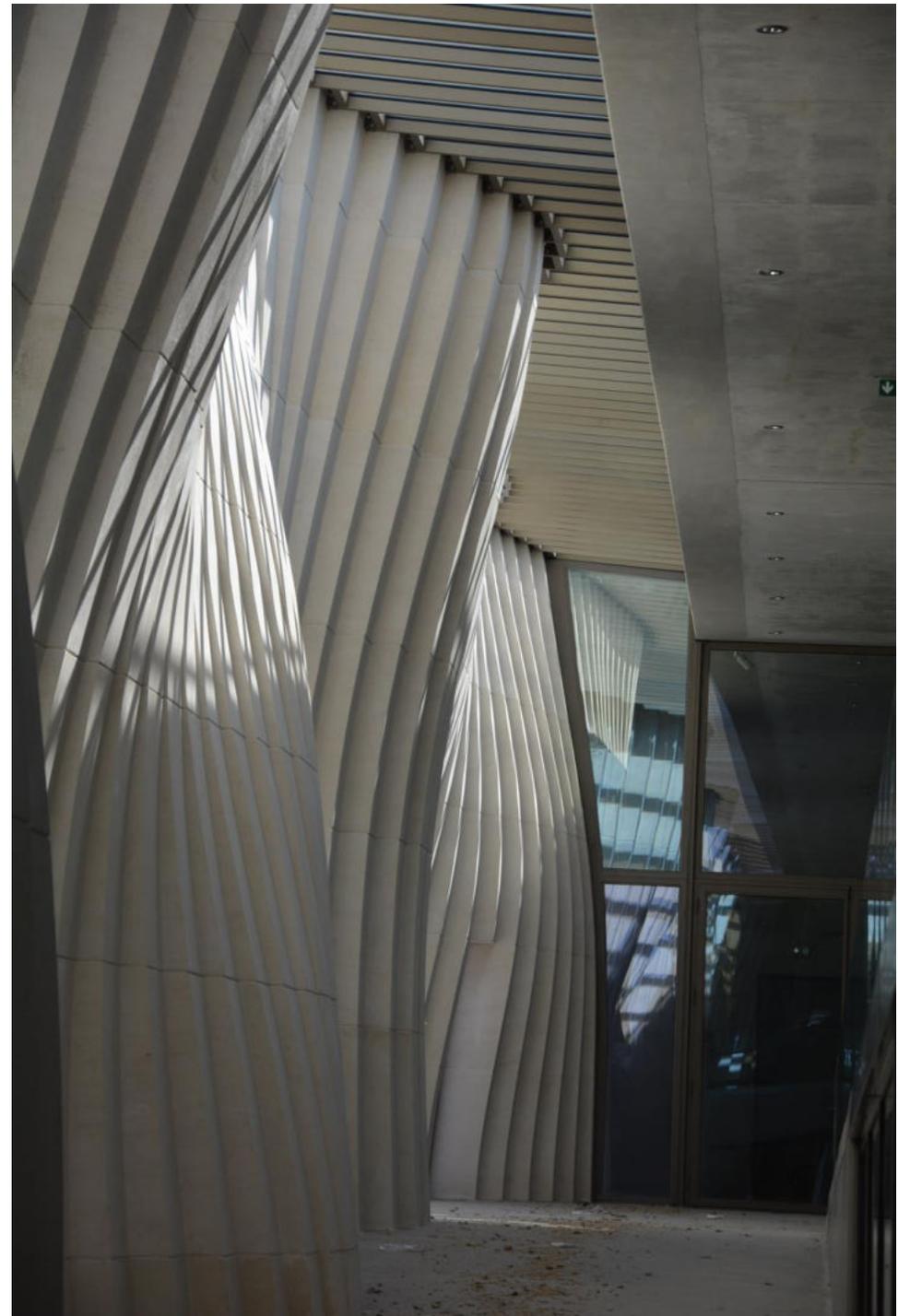
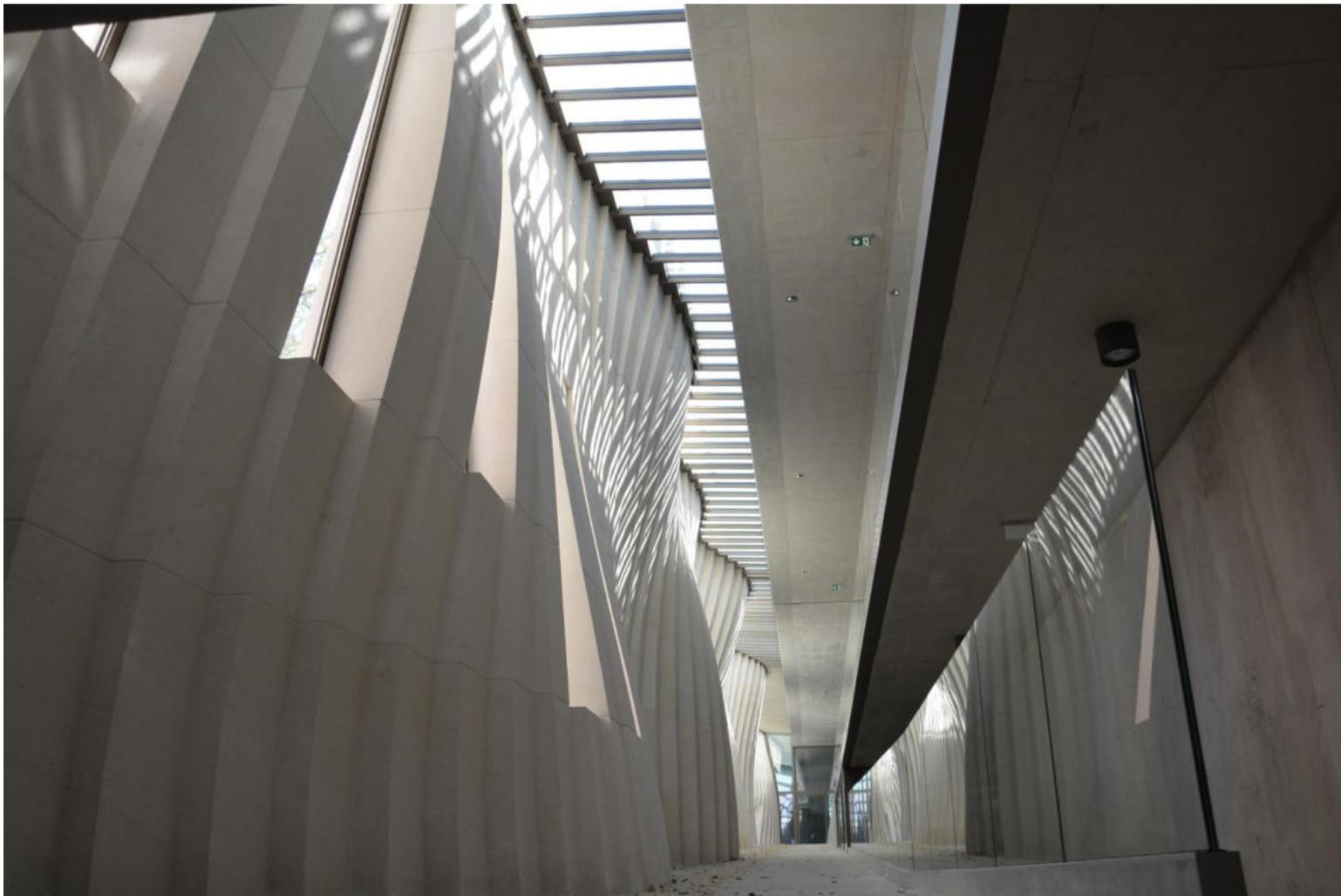
MUR VOILE DELAS V31



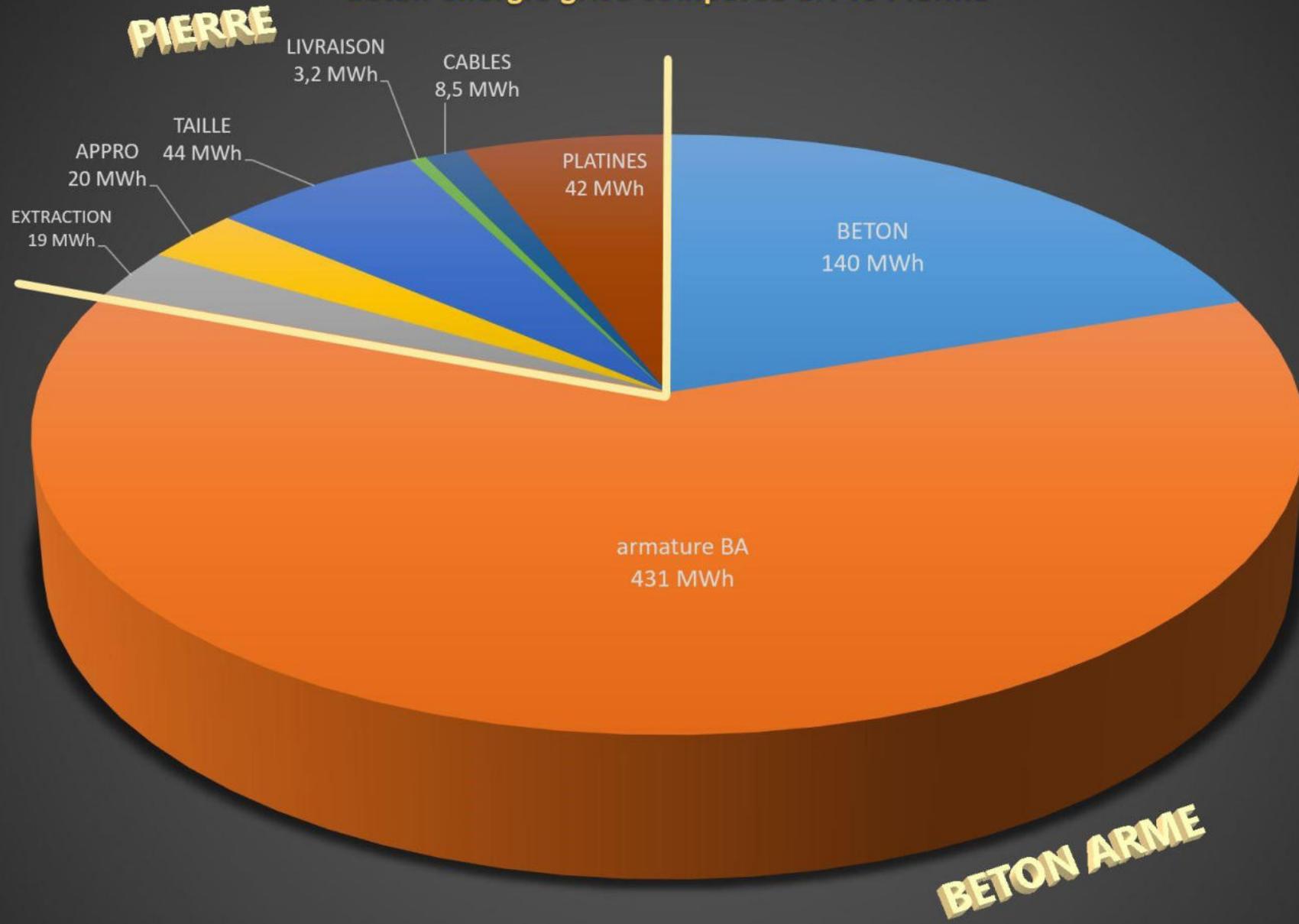








détail energie grise comparée BA vs PIERRE



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- Encore?



Remi Tessier: escalier précontraint
conception BRAUD/CHASTEL/BAGNERIS/CHERBLANC
2021-2022



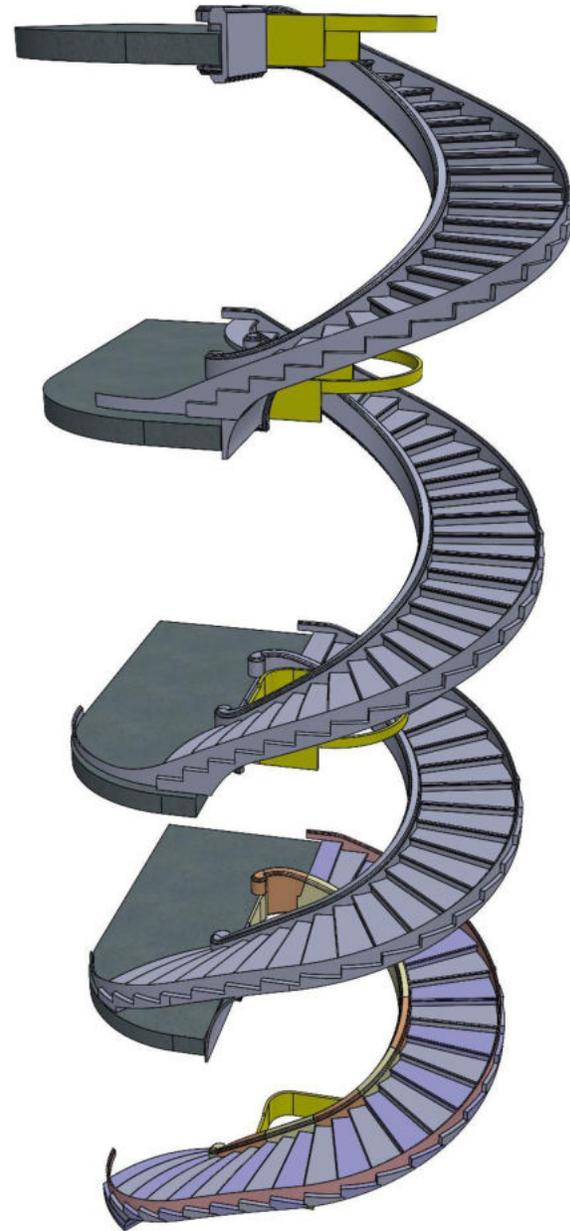
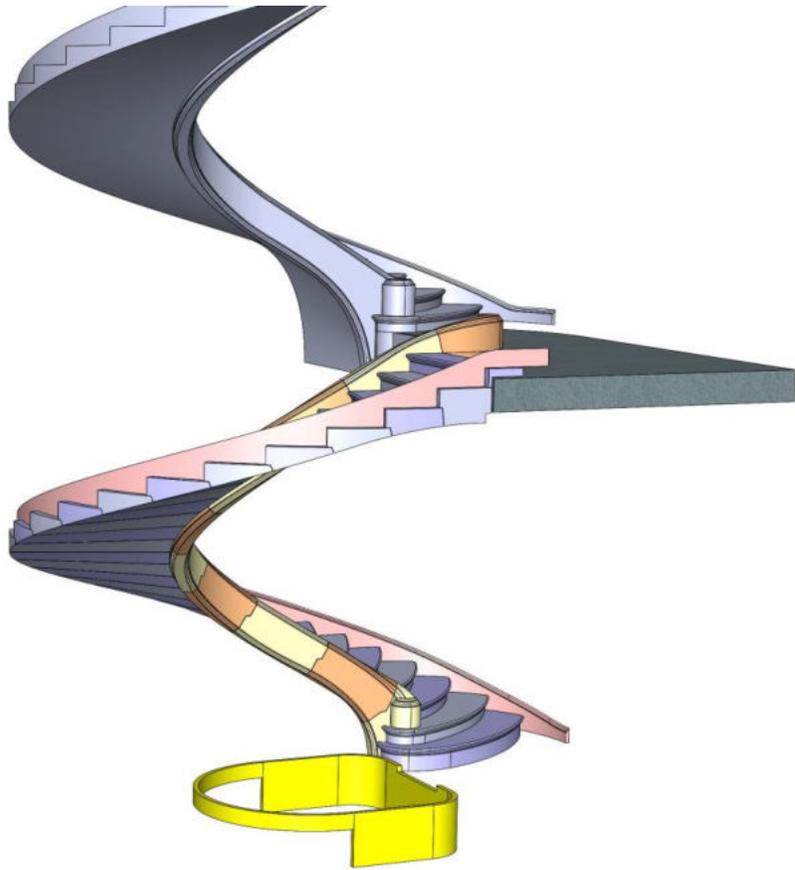


Peter Marino
Smc/Hermès N.Y
2022-2023

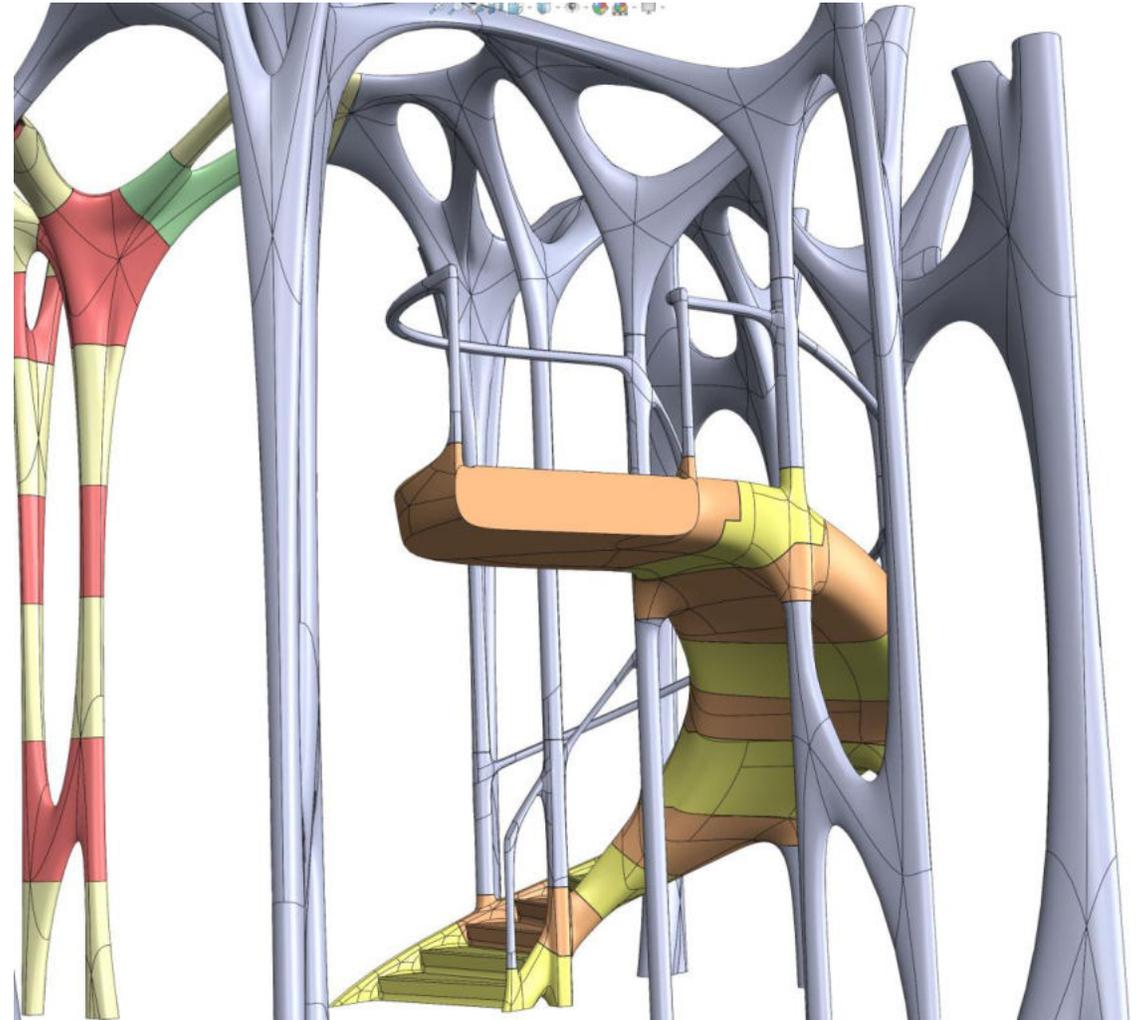
Amin Taha
Smc: 1200m³ taillé-2022-2023



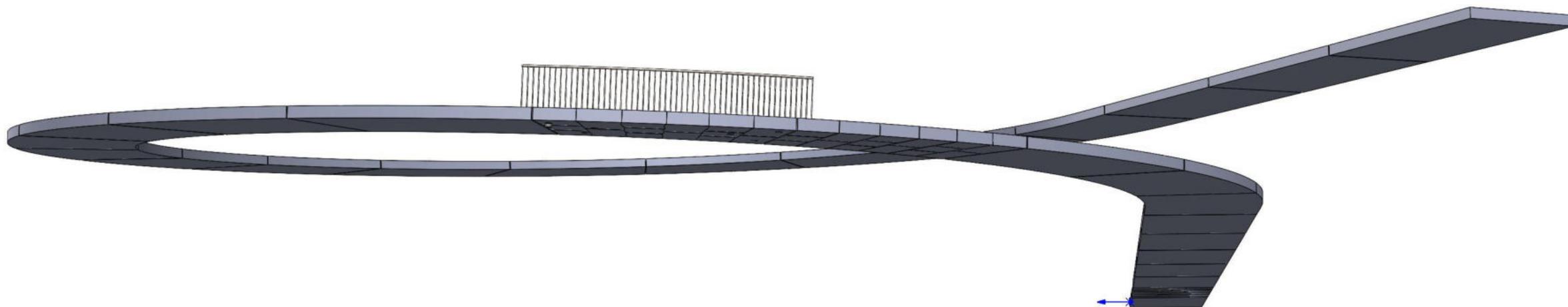
Remi Tessier: escalier à la française
conception BRAUD-CHASTEL/BAGNERIS-CHERBLAN
2023



Smc (2024)



Nous sommes nus
Passerelle composée de 28 tabliers
précontraints sur poteaux
200m³ de blocs de carrière
(2024)

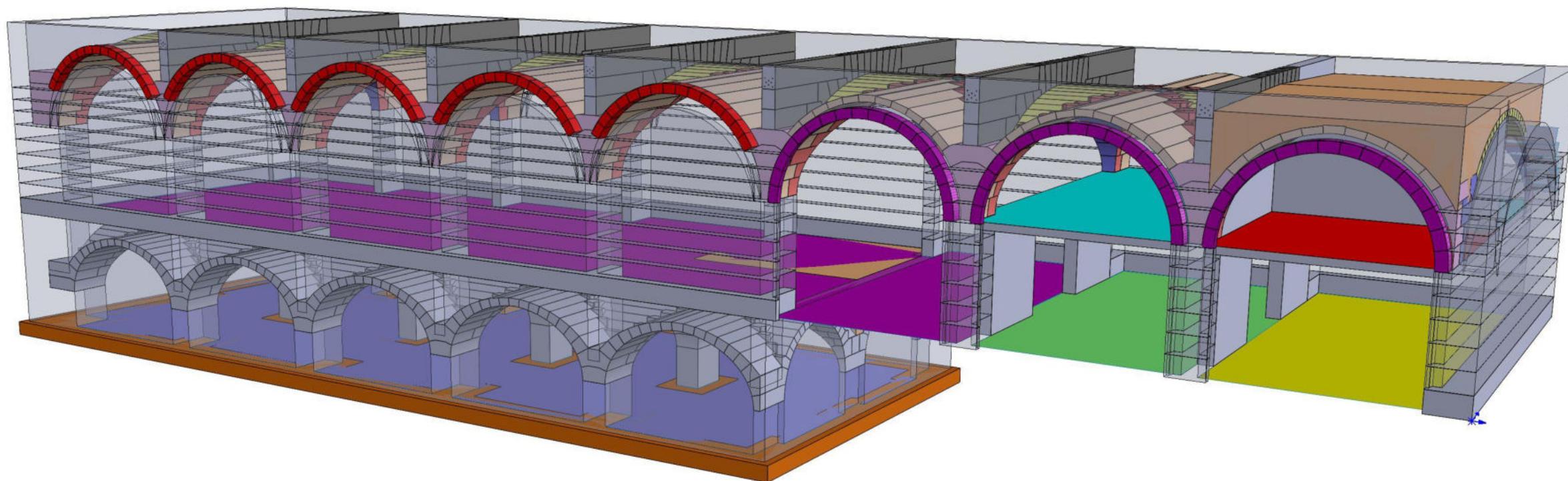


Carl Fredrik Svenstedt

Chai sur deux niveaux constitué de 1000m² de voutes

4000m³ de blocs de carrière

2024-2026



DES CHANTIERS REMARQUABLES

- FRANCHISSEMENT (du pas):

Après la Poutre droite, en zigzag, sans les mains...allons nous enfin bâtir en pierre?

Avantage: on peut faire plein de trucs sans trop d'énergie

Inconvénient: encore beaucoup d'énergie pour convaincre.

Merci à tous pour votre attention.



15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023





ROCAMAT



FABRIQUÉ
EN FRANCE



Rénovation du Stade Alain Mimoun à Issy les Moulineaux (92)

Un chantier remarquable en maçonnerie

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Sommaire

- **Les carrières de roches ornementales**
 - La géologie et les carrières
 - L'industrie de la transformation de la pierre

- **La maçonnerie en pierre naturelle (neuve)**

Rénovation du Stade Alain Mimoun à Issy les Moulineaux *en cours*

- Principe de faisabilité
- Focus sur la réglementation en vigueur (DTU 20.1, Eurocode 6)
 - ✓ Rappels sur les règles de calcul : NF EN 1996-1-1 (2022)
- Calepinage de l'ouvrage
- Dimensionnement (Vol.1)
- La mise en œuvre de la maçonnerie
- Le prix de la pierre et l'influence des méthodes d'extraction

STONO modèles & simulations
pour l'ingénierie



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

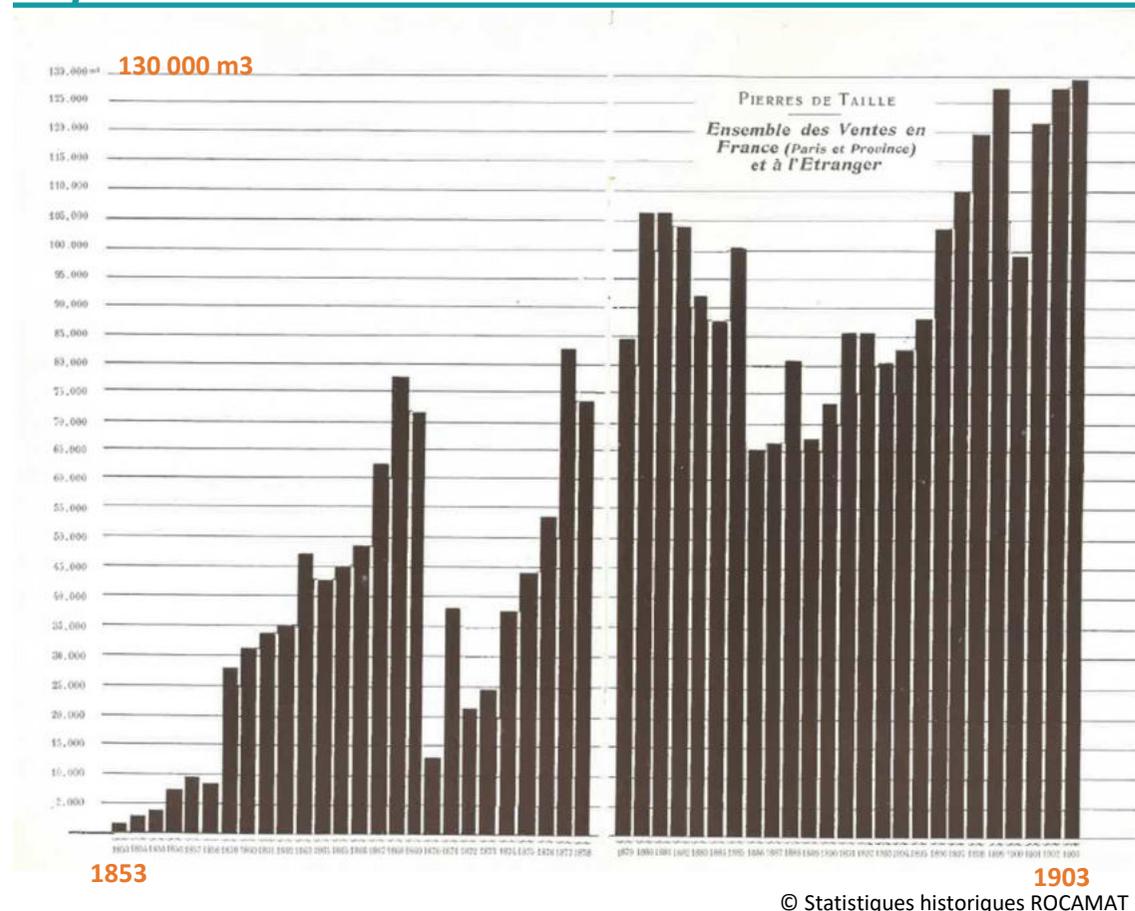
La géologie assure la proximité chantiers/ressources

- **Les Pierres « calcaires » (jaune)**
 - Une spécialité française
 - Une vitrine Paris, Bordeaux.....
 - La pierre de taille pour le bâtiment
- **Marbres & pierres marbrières (rouge et orange)**
 - Les pierres qui prennent le poli
 - Une spécialité italienne
 - La décoration et les sols
- **Les Granits (bleu)**
 - Le roi des aménagements urbains et du funéraire
- **Les Grés**
 - Bâtiments et voirie
- **L'ardoise**
 - Couverture



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

La pierre de taille : une ressource abondante



- 300 carrières en France
- Production nationale **260 000 m³** blocs bruts
© Statistiques UNICEM 2020
- Production ROCAMAT actuelle 25 000 m³
- Capacités d'extraction possibles 100 000 m³
- Réserves autorisées ROCAMAT 4 à 5 millions de m³ de blocs
- Réserves accessibles ROCAMAT 1600 hectares

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

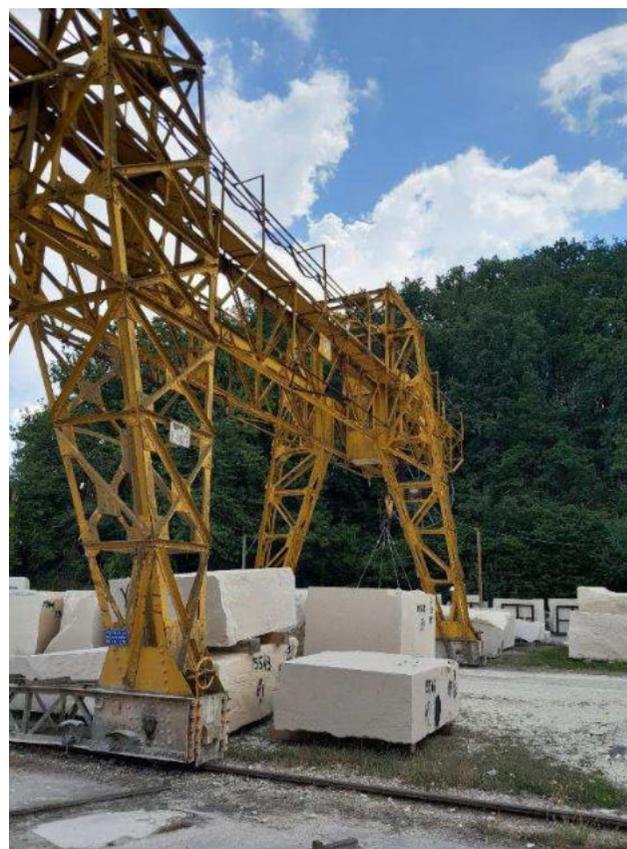
Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Le travail de la pierre massive – un savoir-faire français très ancien

ROCAMAT



e-cahier CSTB n° 7 1950 Usine de Chauvigny ROCAMAT



Usine de Chauvigny ROCAMAT aujourd'hui 2023



ENTRÉE DE LA CARRIÈRE DE CHATEAU-GAILLARD (Vieux)

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

ROCAMAT

La carrière de Tervoux à Chasseneuil de Poitou (86) : choix d'une pierre homogène avec les caractéristiques requises



- Matériau régional
- **Gisement homogène et de volume**
- Capacités d'extraction
- 10 000 m³ par an à 2000 m³

Les blocs sont prédécoupés à l'aide d'une haveuse

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

La carrière de Massangis (89) : une pierre adaptée au soubassement

ROCAMAT



POLYCOR



- **Matériau haut gamme** et historique (Palais de Tokyo, pieds Tour Eiffel)
- **Hauteur de la masse exploitée : 21 m**
- Capacités d'extraction 14 000 m³ par an

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Les pierres de construction de l'ouvrage



Massangis Clair Nuancé

- MV : 2350 kg/m³
- Porosité ouverte : 13,4 %
- R_{cmoy} : 92,7 MPa



Tervoux

- MV : 2040 kg/m³
- Porosité ouverte: 24,7 %
- R_{cmoy} : 27,5 MPa

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Un chantier complexe ...

■ Analyse et problématiques

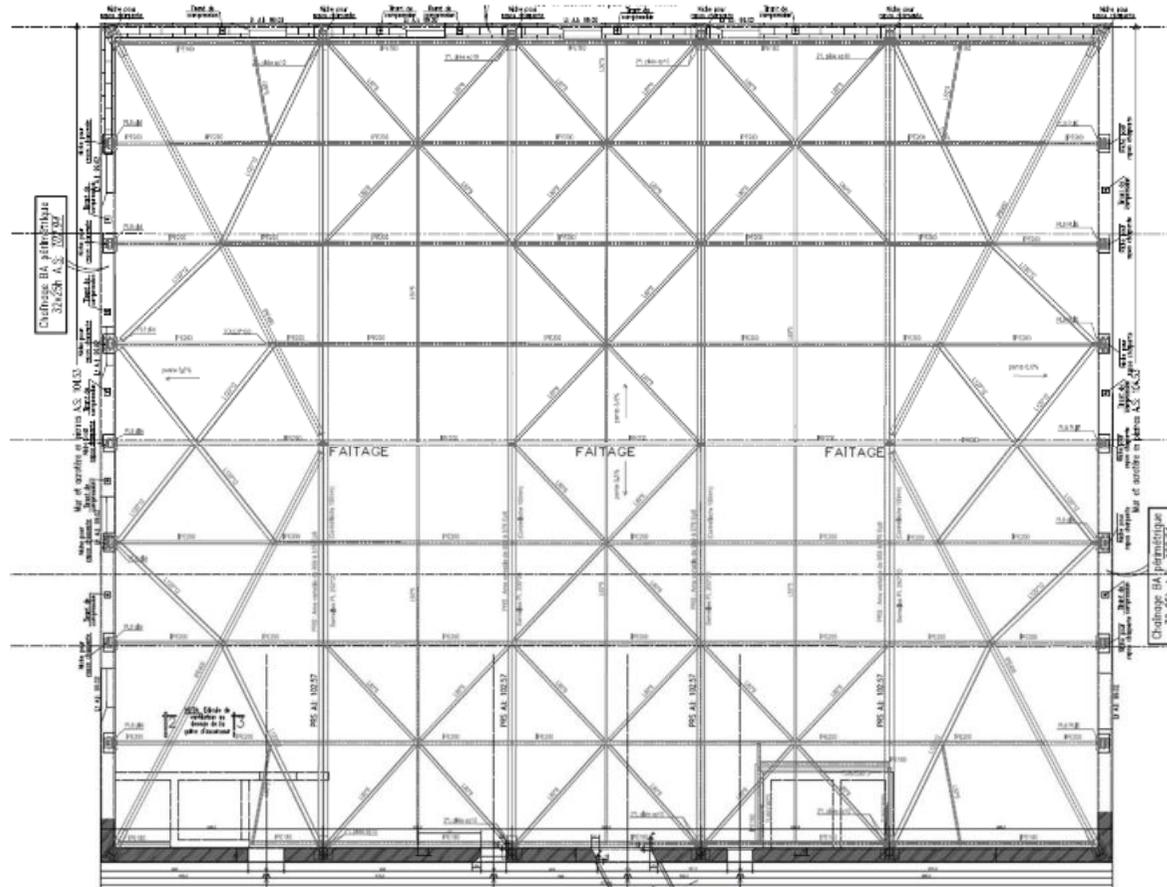


- **4 volumes/phases** : 850 m³ au total de **Pierre massive taillée**
- Grande hauteur (12 m) et grande portée (27 m)
- La pierre est porteuse et contrevente le bâtiment
- Rigidités différentielles en structure mixte béton armé, acier et pierre



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Planimétrie



Plan : 27 x 22 m
Hauteur : 12 m

Descentes de charges sur la
maçonnerie :
2700 daN ELU par appui

LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Principe de faisabilité et dimensionnement

■ Etude de faisabilité

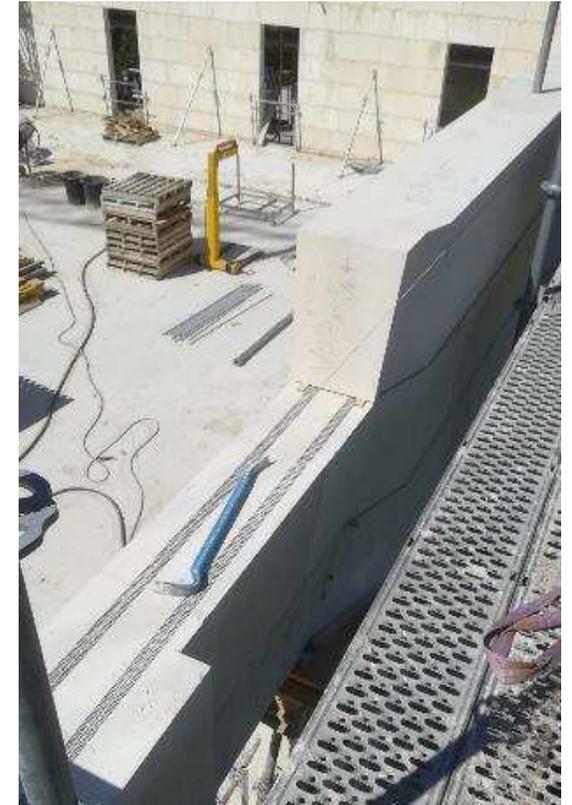
➤ Méthode de calcul

Maçonnerie précontrainte

Modélisation : Calculs éléments finis et éléments discrets

■ Principe structurel (Table de tennis – Vol.1)

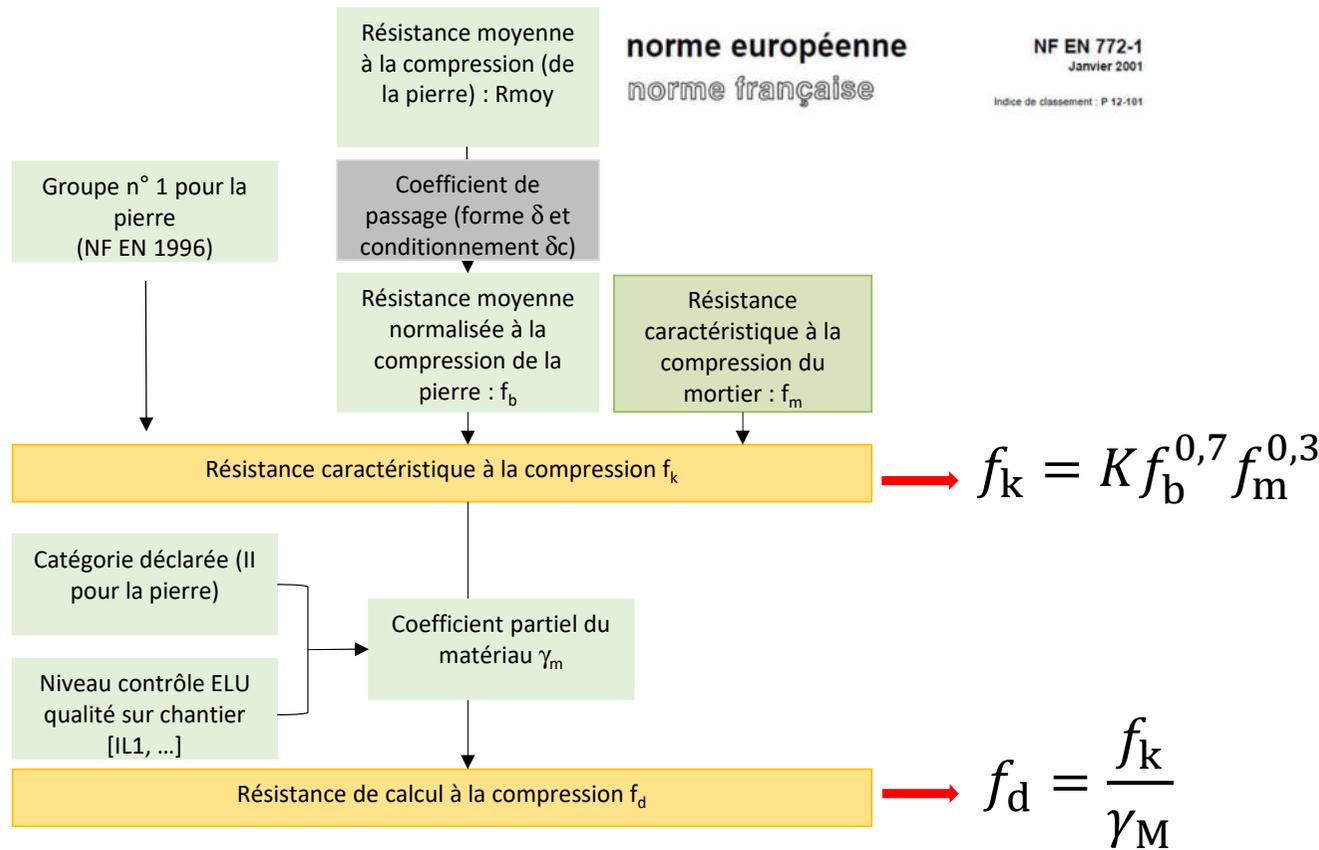
- Elévation en Tervoux / Soubassement en Massangis
- Epaisseur : 40 cm
- Renforcement de la maçonnerie par armatures en acier diamètre 16 mm (**Murfor** ©)
- **15 tirants de précontraintes verticaux T16**
- maçonnerie en R+1 sur appuis **néoprènes pour libérer les rotations en pied**
- hauteur de PHRDC – dalle BA : +4m
- hauteur couverture - charpente métallique : +10.4m
- hauteur d'acrotère : +12m
- la dalle du PHRDC et la couverture sont portées par la maçonnerie
- Charpente en structure acier qui se comporte en diaphragme



Eléments en Tervoux avec armatures horizontales Murfor

Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

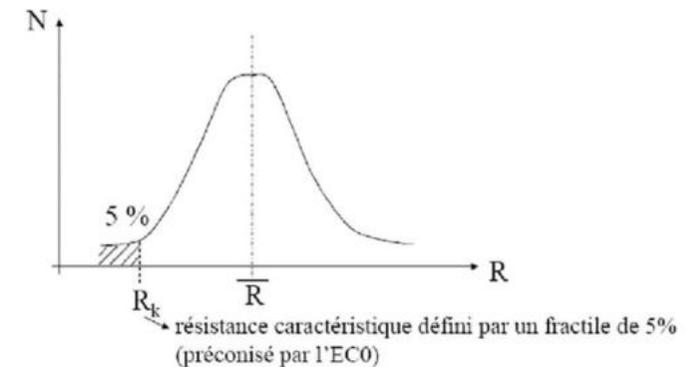
Les critères de l'Eurocode 6 : la résistance à la compression



La première catégorie regroupe les éléments dont la résistance à la compression est déclarée avec une probabilité de 5% de ne pas atteindre cette valeur avec un séchage des éprouvettes à l'air ambiant, (niveau de confiance de 95%).

Le niveau d'exigence étant plus faible pour des éléments de **catégorie II**, il sera compensé par une valeur de confiance γ_m plus élevée.

La pierre en tant qu'élément plein fait partie de la **catégorie II** du groupe n° 1.



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

La résistance à la flexion

Résistance à la flexion selon un plan

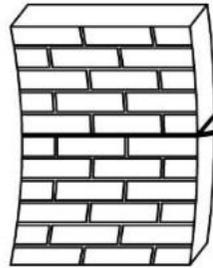
$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = f_{xd} Z$$

$$Z = \frac{t^2}{6}$$

(par mètre linéaire de mur)

$$f_{xd} = \frac{f_{xki}}{\gamma_M}$$

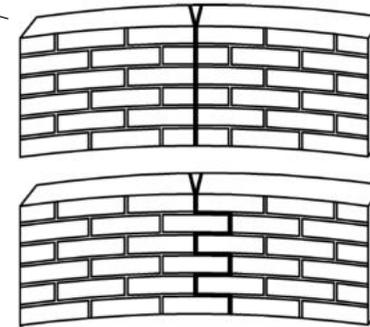


a) Plan de rupture parallèle aux joints d'assise, f_{xk1}

| Éléments de maçonnerie | f_{xk1} (MPa) | | |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| | Mortier d'usage courant | Mortier de joint mince | Mortier allégé |
| Terre cuite | 0,10 | 0,15 | 0,10 |
| Béton de granulats courants ou légers | 0,10 | 0,20 | ‡ |
| Béton cellulaire autoclavé | 0,10 | 0,15 | 0,10 |
| Pierre reconstituée | 0,10 | ‡ | ‡ |
| Pierre naturelle | 0,10 | ‡ | ‡ |

‡ La combinaison de mortier/élément n'est généralement pas utilisée ou la valeur est non disponible.

Tableau 16 Valeurs de la résistance caractéristique à la flexion dont le plan de rupture est parallèle aux lits de pose, f_{xk1}



b) Plan de rupture perpendiculaire aux joints d'assise, f_{xk2}

| Éléments de maçonnerie | f_{xk2} (MPa) | | |
|--|--------------------------------|------------------------|----------------|
| | Mortier d'usage courant | Mortier de joint mince | Mortier allégé |
| Terre cuite | 0,40 | 0,15 | 0,10 |
| Béton de granulats courants ou légers | 0,40 | 0,30 | ‡ |
| Béton cellulaire autoclavé de masse volumique ρ | $\rho < 400 \text{ kg/m}^3$ | 0,20 | 0,20 |
| | $\rho \geq 400 \text{ kg/m}^3$ | 0,40 | 0,30 |
| Pierre reconstituée | 0,40 | ‡ | ‡ |
| Pierre naturelle | 0,40 | 0,15 | ‡ |

‡ La combinaison de mortier/élément n'est généralement pas utilisée ou la valeur est non disponible.

Tableau 17 Valeurs de la résistance caractéristique à la flexion dont le plan de rupture est perpendiculaire aux lits de pose, f_{xk2}

Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

La résistance au cisaillement

Coefficient de frottement caractéristique (§5.7.2.3)

(4) $\mu_f = 0,4$ (mur charge hor.)

(5) $\mu_f = 0,6$ (rupture joint hor. continue)

(1) $\mu_f = \tan \varphi$; $\varphi \rightarrow$ EN 1052-3 (joint d'assise)

(2) $\mu_f = \tan \varphi$; $\varphi \rightarrow$ EN 1052-4 (coupure cap.)

$$f_{vk} = f_{vk0} + \mu_f \sigma_d < f_{vlt}$$

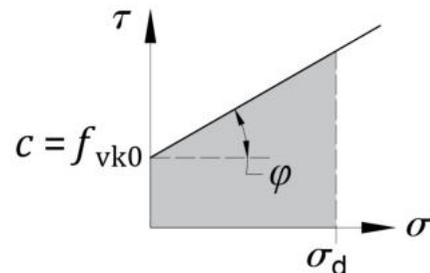
Résistance caractéristique initiale au cisaillement, sans compression

Valeur limite de f_{vk}

$$= 0.065 f_b$$

$$= 0.045 f_b \text{ (béton cellulaire - AN)}$$

Contrainte de compression moyenne sur la partie comprimée, en utilisant la combinaison d'actions appropriée



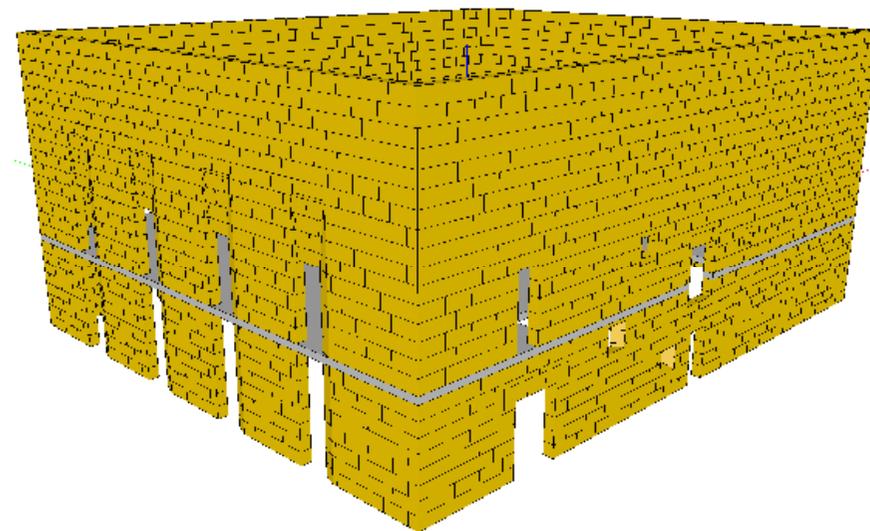
Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Modélisations et outils par le BET STONO

Ouvertures des joints dues aux efforts de cisaillement/flexion



Modèle aux éléments discrets (Code LMG90)



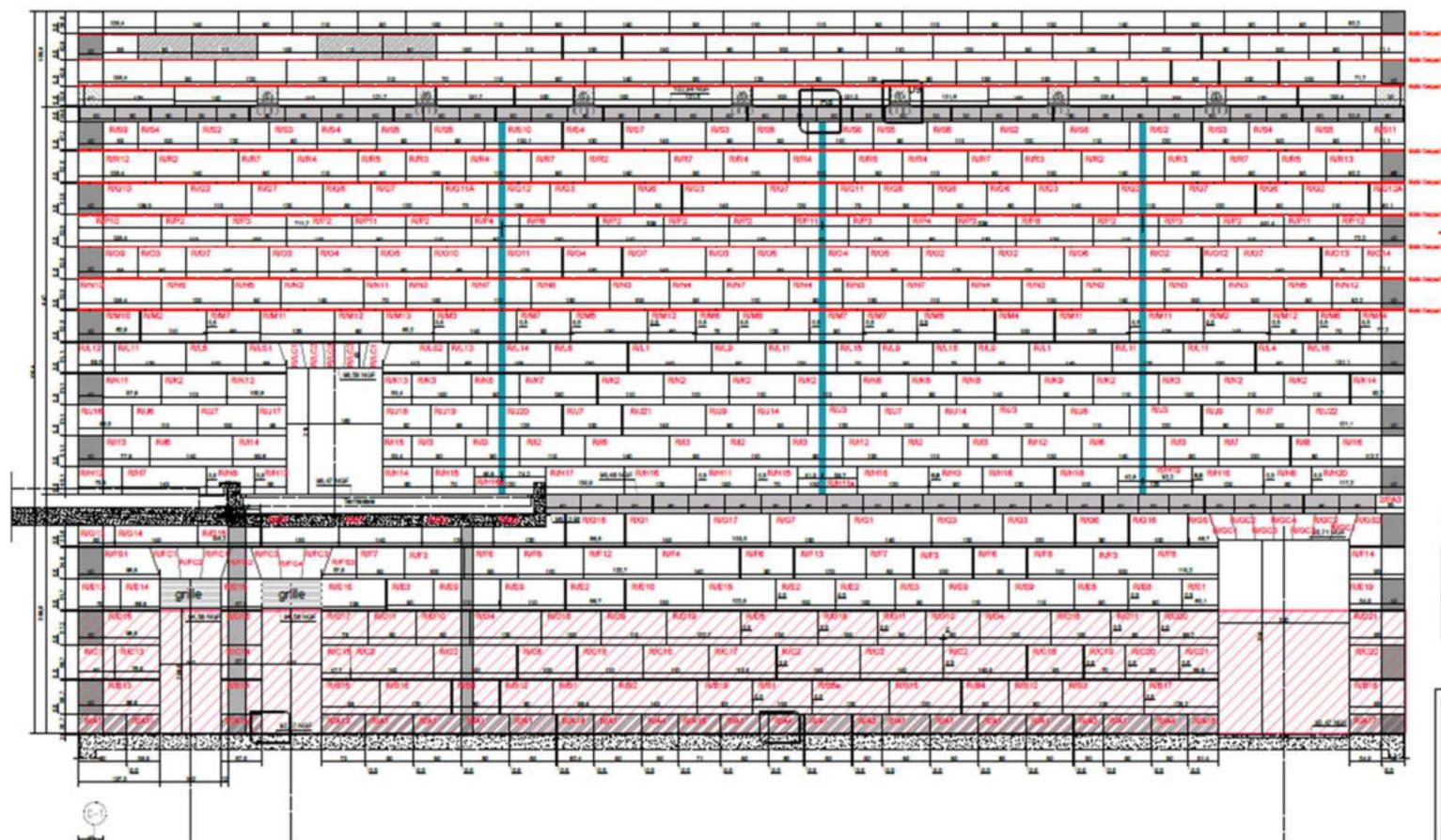
LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Calepinage de l'ouvrage – Façade EST



Dans l'attente des plans Gros Oeuvre, Menuiserie et serrurerie "Bon pour execution"

| NO | DATE | Modifications |
|----|------------|---|
| 1 | 02/07/2023 | Plan de calepinage initial |
| 2 | 03/07/2023 | Modification des hauteurs de pierre |
| 3 | 04/07/2023 | Intégration des joints armés |
| 4 | 05/07/2023 | Finalisation des dimensions |
| 5 | 06/07/2023 | Correction des erreurs de transcription |
| 6 | 07/07/2023 | Validation finale |

Gymnase Alain MIMOUN
 9 rue RABELAIS
 92130 ISSY LES MOULINEAUX

Calepinage de principe
 Façade EST

Soubassement en Pierre d'EUVILLE
 Elevation en pierre de TERVOUX

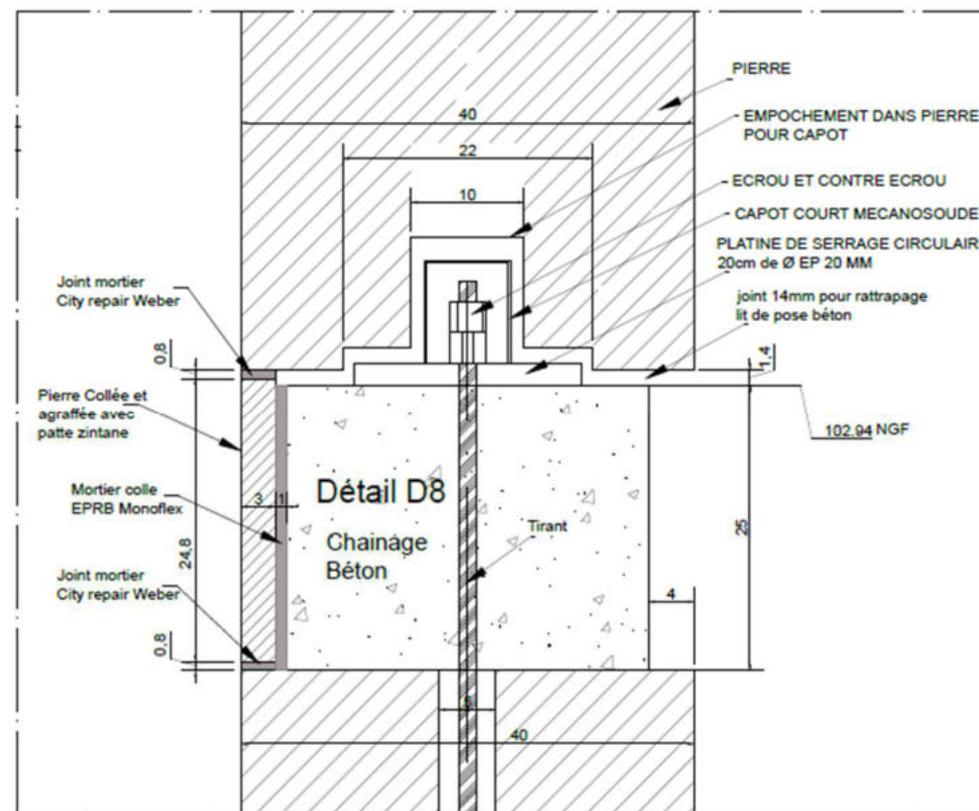
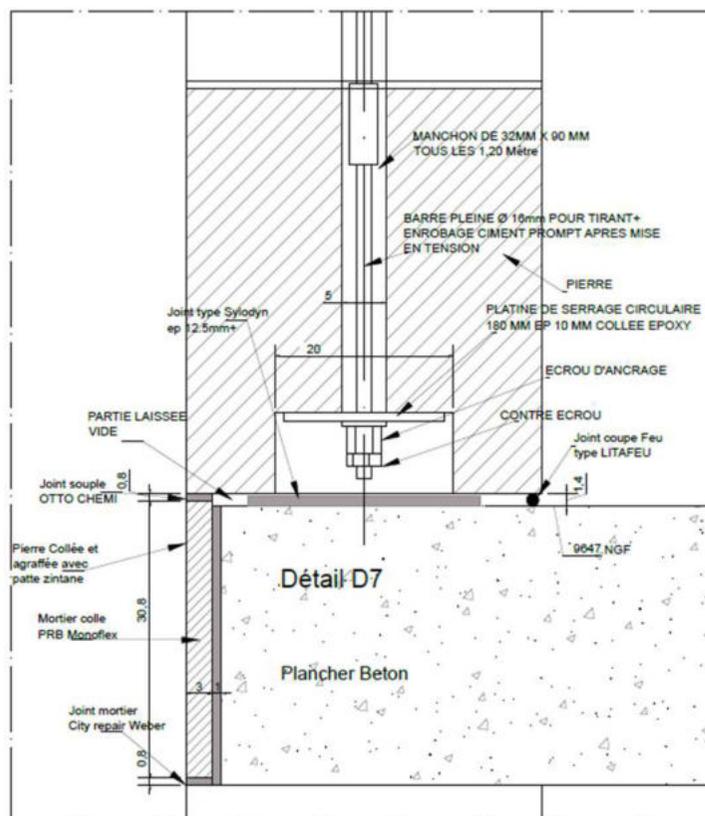
LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Détails constructifs – Façade NORD



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

La réalisation du chantier



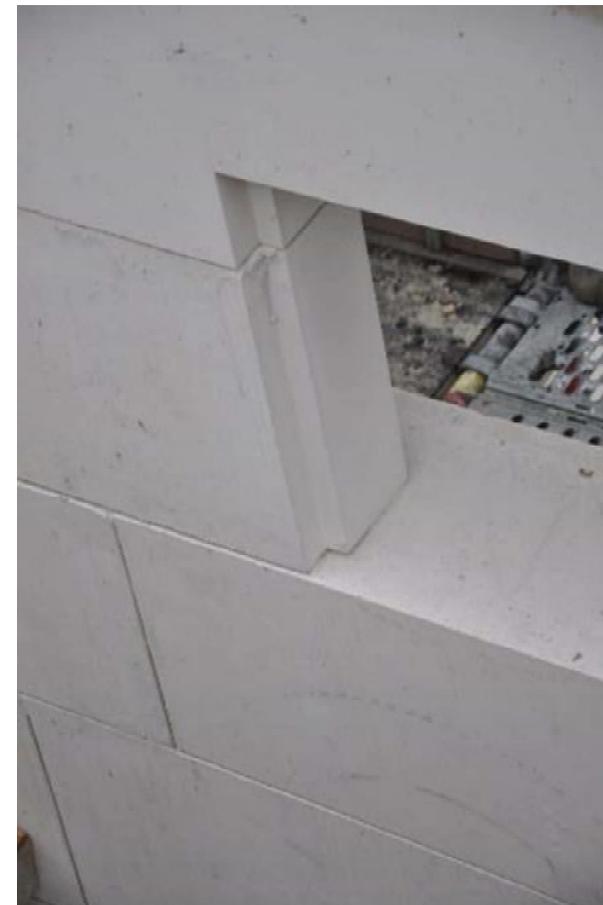
- Une réalisation **Rocamat Construction**
- Début de la première phase **juin 2022**
- Durée de la 1ère phase **1 mois et demi**
- Mise en œuvre de la maçonnerie :
 - Joints courants de montage selon le DTU 20.1 / épaisseur 10 mm
- Grue de chantier
 - Stockage permanent de 60 palettes environ
 - Approvisionnement hebdomadaire de 80 palettes (180 éléments en pierre) soit 6 camions par semaine



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Mise en œuvre de la maçonnerie (Vol.1-Table de tennis)

RCCAMAT



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

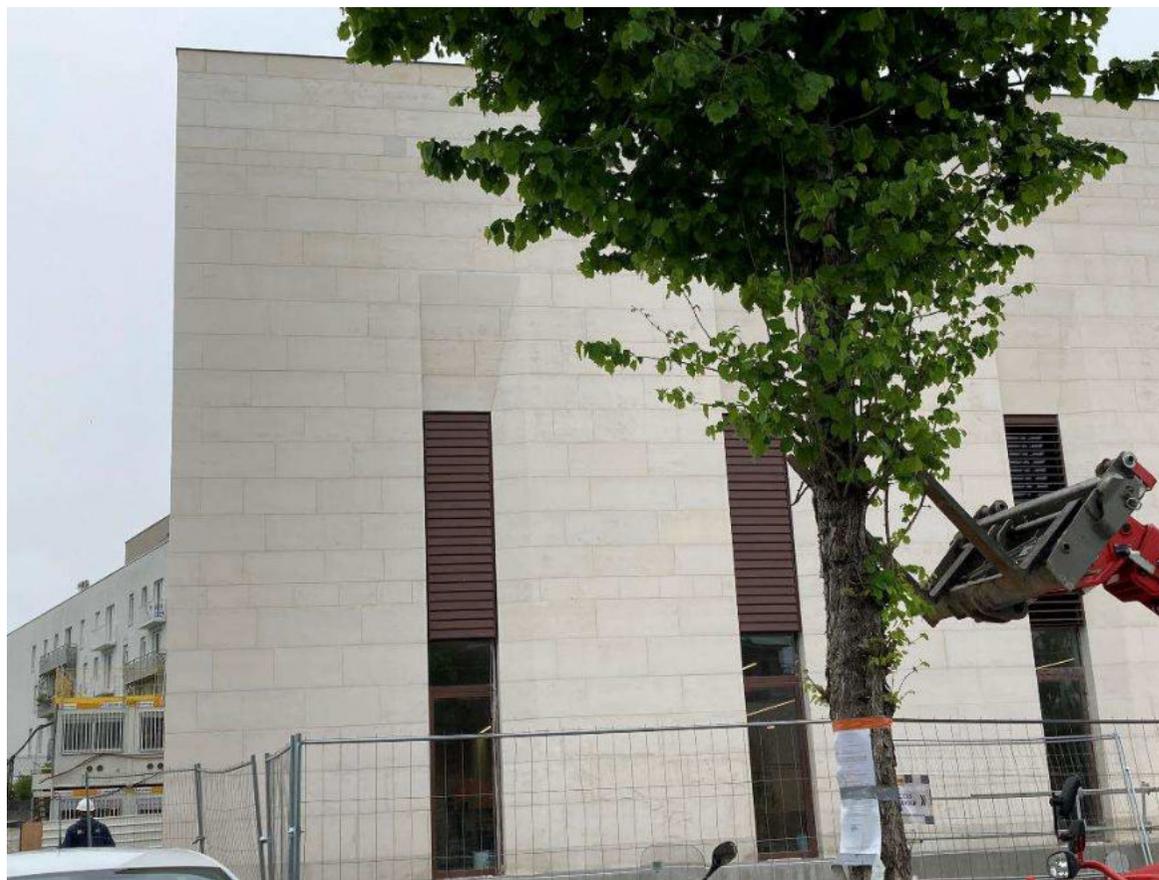
15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Un bâtiment « moderne » en maçonnerie

ROCAMAT



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

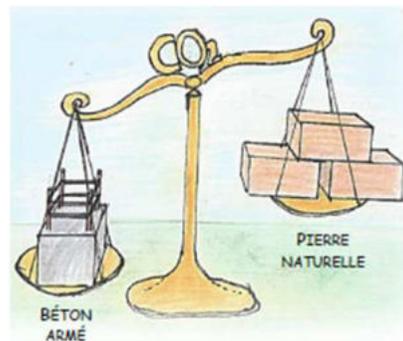
15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023



Rénovation du Stade Alain Mimoun (92)

Les avantages de ces choix

- Comparés aux autres solutions, **les murs en pierre de taille française** (épaisseur par ex. 24 cm) :
- **1,4 moins impactant** en carbone que les alternatives en CLT (12 cm)
- **2,7 fois moins impactant** en carbone que les alternatives béton bas carbone (20 cm)



Source : www.ingenieusecoledesponts.fr Elodie Donval

RCCAMAT



LA PIERRE NATURELLE
UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC / MERCREDI 5 JUILLET 2023

ROCAMAT

Merci de votre attention

carla.pani@rocamat.fr



15ÈME JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

LA PIERRE NATURELLE UNE SOLUTION GREEN-TECH AUX DÉFIS D'AUJOURD'HUI

MERCREDI 5 JUILLET 2023



Les enjeux de l'immobilier du
point de vue d'un aménageur
public...

... et les réponses à trouver du
côté des matériaux bio et
géosourcés



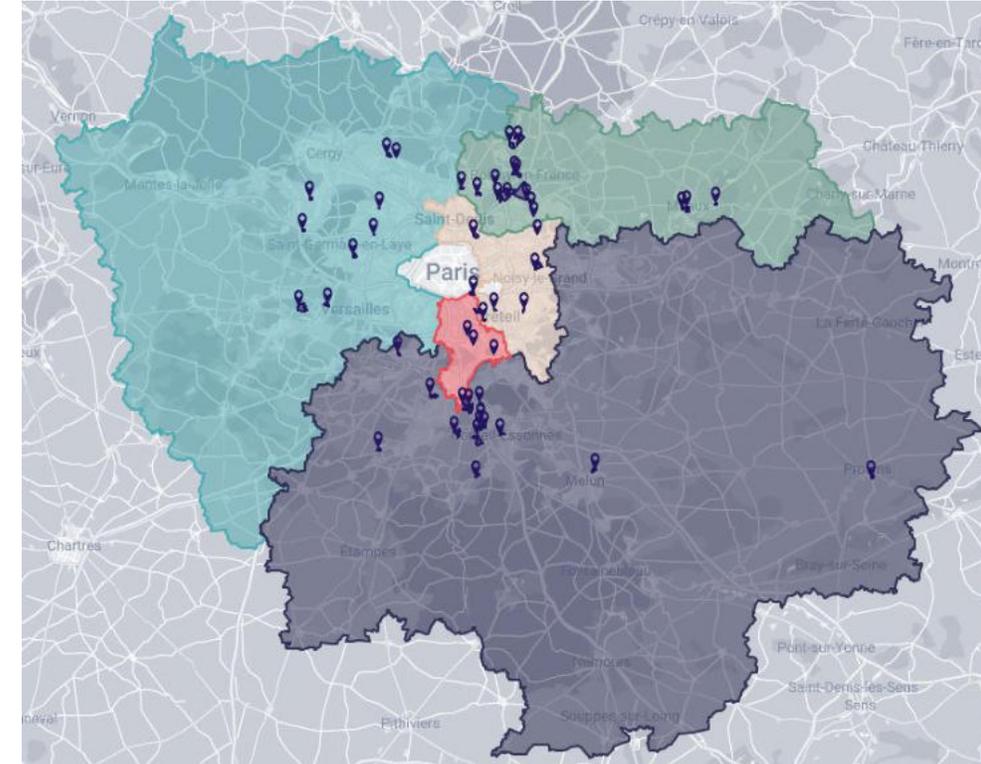
Présentation de GPA

Grand Paris Aménagement (+EPA ORSA + SPLA-IN Grand Paris Sud Aménagement + Roissy Pays de France Aménagement) : **un groupement d'aménageurs public** au service des collectivités

Ensemblier de l'aménagement / Environ 80 opérations / Aménageur public de référence en Île-de-France

Modalités d'intervention :

- Etudier la faisabilité et l'opportunité d'un projet urbain.
- Élaborer la programmation et la stratégie du projet
- Piloter le cadre juridique et financier et les études réglementaires
- Acquisition, gestion puis la transformation du foncier,
- Concevoir les espaces publics, réaliser les travaux de remise en état des sols et d'aménagement ou de renaturation
- Participer au programme d'équipement public de l'opération.
- Céder du foncier à des opérateurs (promoteurs, bailleurs, investisseurs)
- Copromotion, pour lesquels GPA s'associe avec un promoteur.



Les défis de l'immobilier aujourd'hui

- **Crise climatique, extinction de la biodiversité, cadre de vie & préservation de l'environnement, des défis** à aborder ensemble, de front, dans **une urgence à changer d'échelle**
- **Qualité des constructions** : sinistralité, réserves à réception, pérennité des façades, confort d'usage (taille des logements, espaces extérieurs, confort visuel, acoustique, thermique...)
- **Solvabilité des acquéreurs** : pouvoir d'achat, maîtrise des charges, performance énergétique
- Sans changement de paradigme, les **coûts** de construction ne vont pas diminuer, l'attractivité d'une **main d'œuvre fiable** est un défi



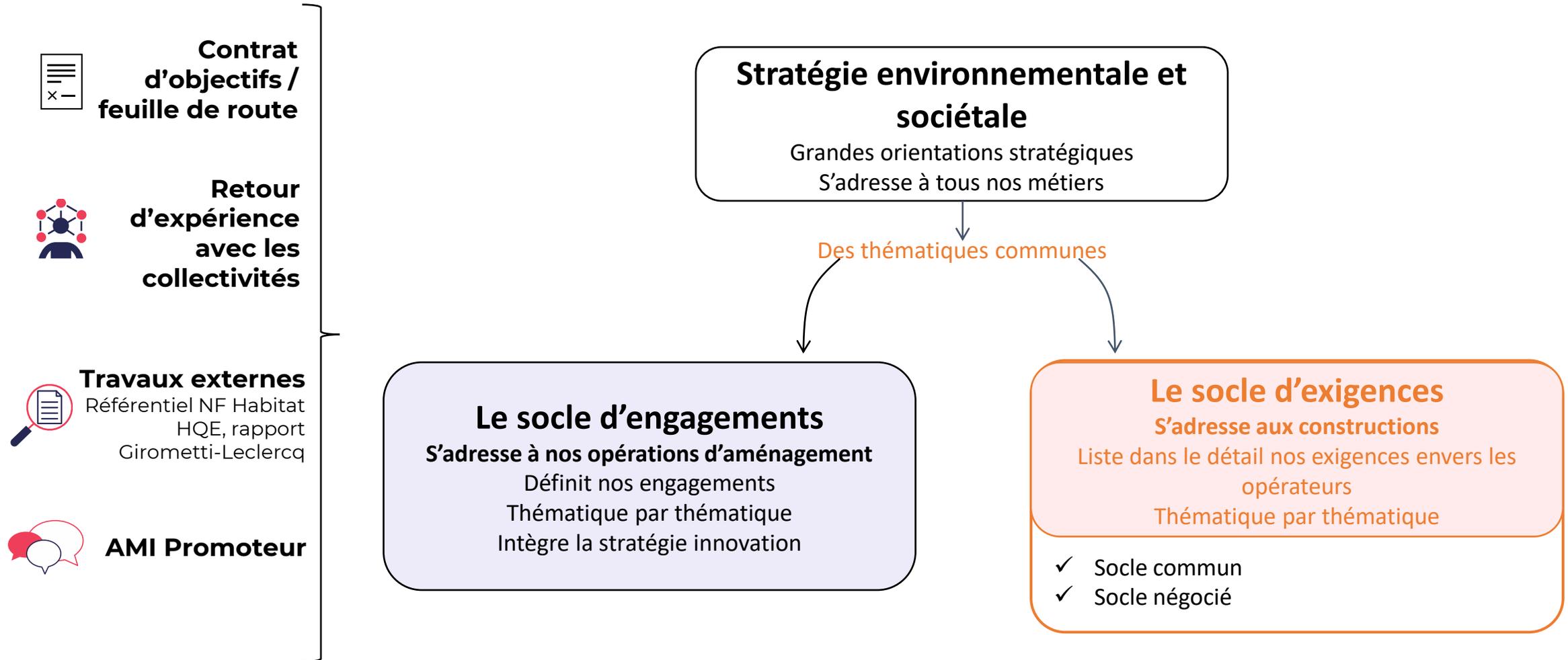
Les ambitions du groupe GPA

1. Un objectif central = (re)créer de la **qualité de vie** pour tous, et de façon durable, dans les quartiers où nous intervenons
2. **L'adaptation** aux conséquences du **changement climatique**
3. Agir dès aujourd'hui pour rendre possibles les zéro **carbone** net, zéro **artificialisation** nette et un renforcement de la **biodiversité** à horizon 2050
4. **Accompagner les collectivités** dans la durée pour les aider à renforcer le rayonnement de leurs territoires et leur fournir des solutions « clef en main » pour répondre à la diversité de leurs enjeux
5. **Entraîner les autres acteurs** de la fabrique de la ville pour faire émerger de nouvelles pratiques adaptées à nos objectifs et économiquement soutenables



« Réinventer le métier d'aménageur et être pionnier dans la transformation du secteur de la fabrique de la ville »

La stratégie environnementale de GPA



Une approche 360°



Socle d'engagements et d'exigences

- Des quartiers à vivre pour tous
- Des logements développant une meilleure qualité de vie

1/ Offrir un cadre de vie attractif, confortable et épanouissant, adapté aux conditions de vie d'aujourd'hui et de demain, à l'échelle du logement, du bâtiment et du quartier, y compris pour les plus fragiles

- Redonner sa place au monde végétal et animal
- Penser la nature en alliée pour les villes de demain

2/ Intégrer la biodiversité comme une composante urbaine et un commun à renforcer

3/ Faire entrer la fabrique de la ville dans les paradigmes de **l'économie circulaire et des circuits courts**

- Accélérer le réemploi aujourd'hui tout en le facilitant demain
- Développer les filières industrielles et l'emploi pour construire autrement

4/ Décarboner en profondeur la manière de concevoir et construire la ville

- Mieux mesurer pour agir de manière éclairée
- Favoriser le recours à des modes d'approvisionnement énergétiques vertueux
- Faciliter une mobilité décarbonée dans l'ensemble des décisions d'aménagement

5/ Contribuer à la dynamique et au rayonnement des villes et territoires en développant des dynamiques partenariales et solidaires favorables au vivre ensemble et à l'emploi à toutes les échelles

- Révéler les forces de chaque territoire en s'appuyant sur son identité et ses singularités
- Développer les solidarités et appuyer les projets porteurs de transformation

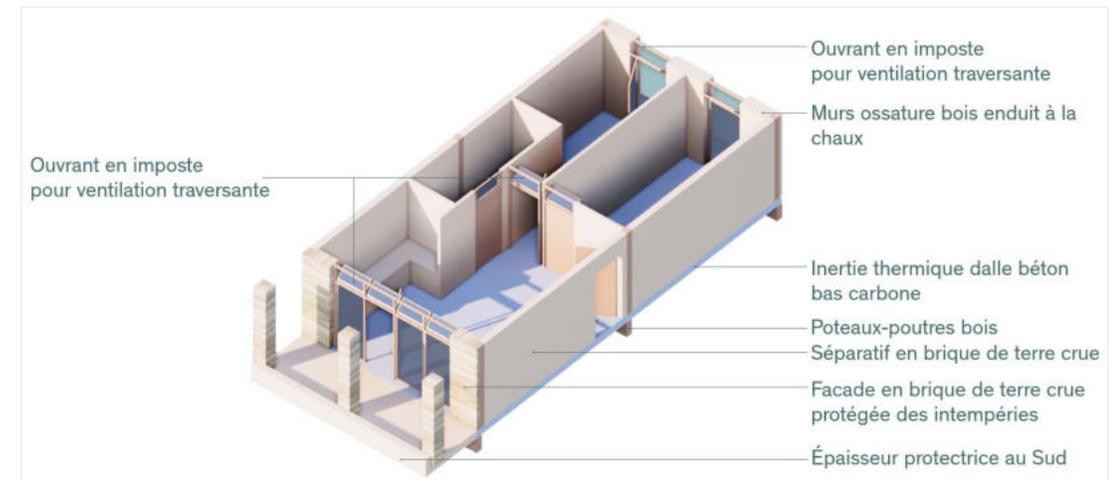
Quelques exigences phares pour la construction de projets immobiliers

1. Cession des fonciers par GPA à prix fixes pour limiter la spéculation
2. Systématisation de la mission complète confiée à l'architecte avec un niveau de rémunération plancher imposé
3. Interdiction de la sous-traitance en cascade (tâcheronnage) avec contrôle sur chantier



Quelques exigences phares pour la construction de projets immobiliers

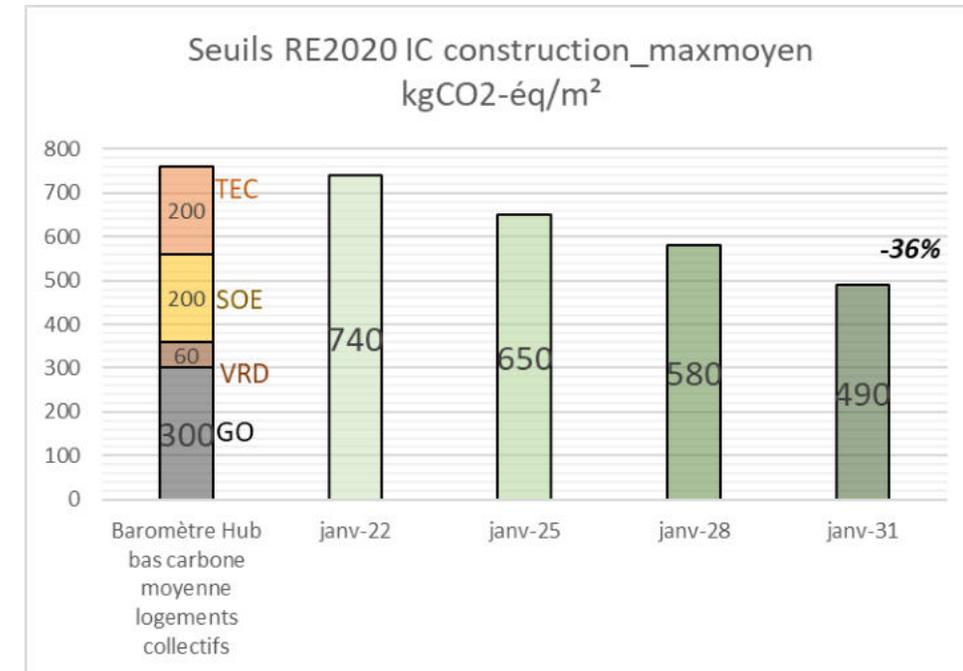
4. Qualité de l'air intérieur et acoustique : Exigences renforcées du NF Habitat HQE
5. Confort thermique vérifié en fichier météo « dimensionnant » pour été horizon 2050
6. Confort d'usage : surfaces vitrées minimales, T3 bi-orienté, T4 traversant
7. Vivre ensemble : Plafonnement de la taille des copropriétés, plafonnement du nombre de logements par palier
8. Surface minimale : par logement, par pièce, surface minimale de balcon



@Lambert Lenack

Quelques exigences phares pour la construction de projets immobiliers

8. Systématisation des principes structurels poteaux – poutres
9. Eventail de parement de façades restreint aux matériaux les plus pérennes
10. Dès maintenant → RE2025 // en 2025 → RE2028
11. Bâtiment biosourcé : 100% niv. 1, 50% niv. 2, 30% niv. 3
12. Clause possible d'imposition d'origine locale des matériaux
13. Eviter la construction de parking en infrastructure
14. 80% des projets auront recours aux filières « hors site » d'ici 2031



@GPA

Atouts, enjeux, opportunités des matériaux géosourcés & bas carbone pour la construction

PERENNITE DES FACADES & CARBONE

Des parements de façades durable... sans alourdir le bilan carbone !

Il n'y a pas plus durable que la pierre !

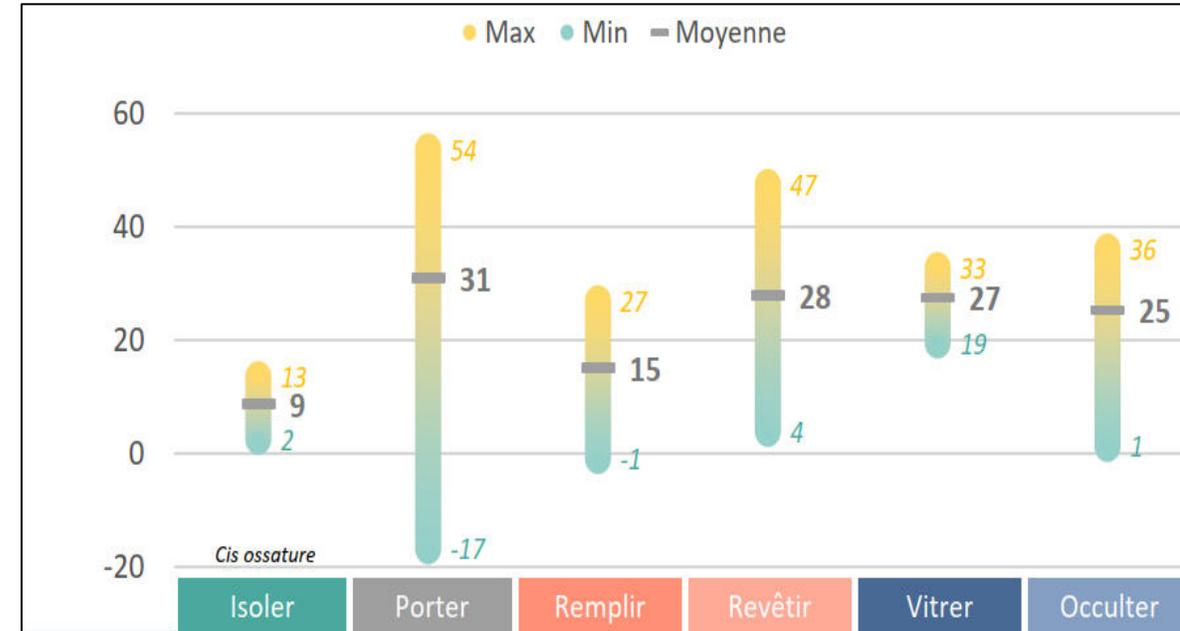
La façade représente **10 à 20%** de l'empreinte carbone. Le parement extérieur peut participer à hauteur de **30 %** du poids carbone de la façade.

→ *Pierres ou terre crue pour isoler, remplir, revêtir*

→ *Pierres 'porteuses' pour porter et revêtir*

X *Pierres agrafées ou semi-porteuses impliquent systèmes d'accroche lourds à fort impact carbone, servant seulement à revêtir*

Nécessaire frugalité → combiner les fonctions



@IFPEB

Atouts, enjeux, opportunités des matériaux géosourcés & bas carbone pour la construction

DECARBONATION, MIXITE MATERIAUX

Rationalisation de l'acte de construire nécessaire

Hybridation des modes constructifs & Mixité des matériaux

Moins de construction neuve, moins de béton, plus de matériaux bio/géo-sourcés

- *La pierre doit trouver des mariages « heureux » avec le bois*
- *Industrialisation, normalisation, répétitivité pour massifier l'usage de la pierre taillée*



Ville de Berne – Suisse - Patrick Thurston.



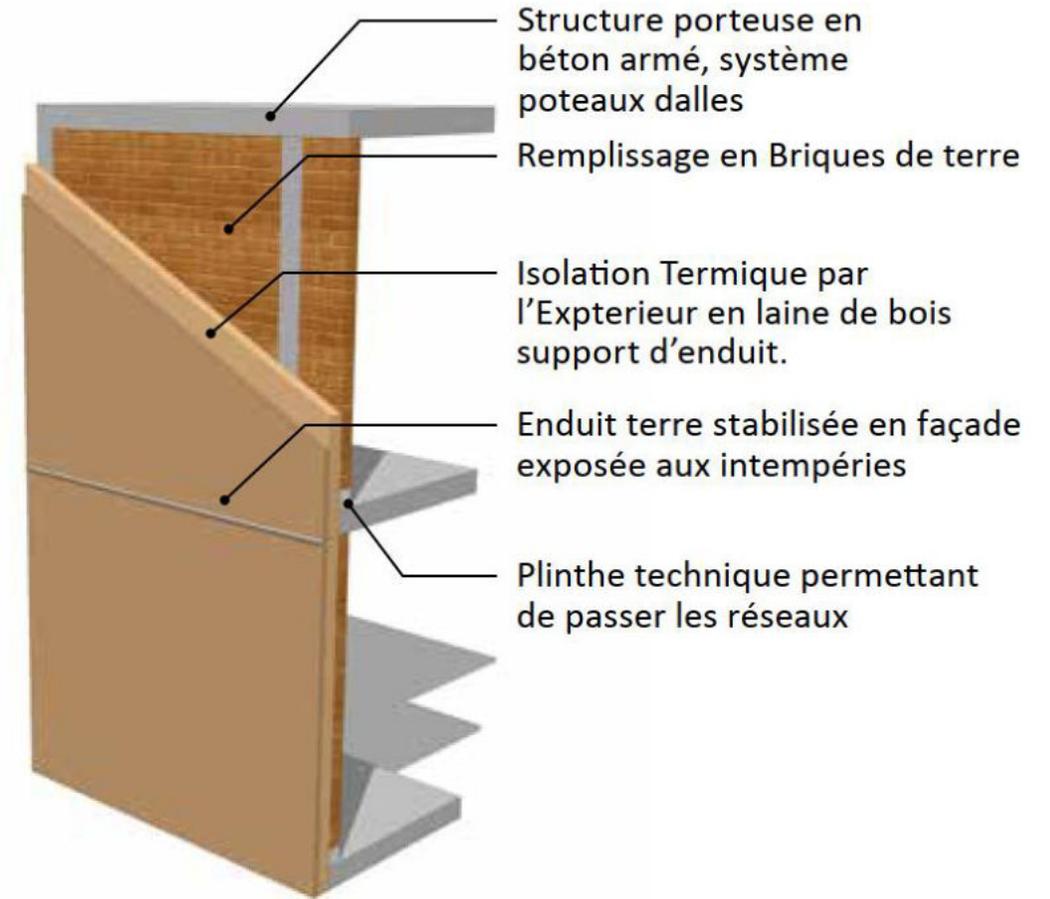
Habitat vernaculaire – Tadjikistan

Atouts, enjeux, opportunités des matériaux géosourcés & bas carbone pour la construction

#INERTIE THERMIQUE & CONFORT D'ETE

La fin (souhaitée) de l'ère du tout béton, la systématisation du principe poteaux-poutres, l'hybridation des modes constructifs incitée, vont induire moins d'inertie thermique

- *Pierres ou terres crues en remplissage, séparatifs, cloisonnements intérieurs, enduits...*
- *Apport d'inertie thermique & résilience*
- *S'inspirer de l'habitat vernaculaire*



@CRATerre