Reconnaissance à l'avancement des tunneliers par muographie



Amélie Cohu, Antoine Chevalier, Davide Caiulo, Fabio Dogliotti (MUODIM : Data scientists)
Jacques Marteau (MUODIM - IP2I : Scientific expert)
Christophe Pichol-Thievend (MUODIM - CEO)



Introduction: Muodim et la muographie

Application aux tunneliers

Application à la ligne 16 : installations et résultats

Ouvrages observés sur d'autres chantiers (L17.2 , L15...)

Adaptations / améliorations des algorithmes

Une équipe qualifiée aux profils complémentaires



Christophe Pichol-Thievend | CEO | co-fondateur

- 25 ans d'expérience professionnelle
- 12 ans d'entrepreneuriat (création, développement, revente société conseil en performance industrielle)



Jacques Marteau | Directeur Scientifique | co-fondateur Expert physicien des particules et directeur adjoint de l'IP2i 15 ans de développement de la muographie (médaille innovation)

ENS, DEA de Physique théorique, PhD physique des particules.

<u>Rôle</u>: gestion et structuration de l'entreprise: stratégie, organisation, commercial, contractuel, PI et finances.

<u>Rôle</u>: stratégie scientifique, conception des expériences, suivi prises de données, supervision développement instrumental & méthodologique des projets R&D.

Compétences scientifiques et techniques | Compétences en gestion de projet R&D | Savoir-faire commercial | Expérience de la création, du développement et de la gestion d'entreprises



Antoine Chevalier

Data Scientist | Salarié – CDI

PhD Géophysique appliquée

12 ans d'expériences en

imagerie géophysique



Amélie Cohu

Data Scientist | Salariée - CDI

PhD Physique des particules

5 ans d'expériences en muographie



Kévin Jourde
Conseiller scientifique
Chercheur CEA - PhD Géophysique Expert en muographie et problème
inverse



Fabio Dogliotti

Data Scientist | Salarié – CDI

PhD Physique théorique

3 ans d'expérience en calcul

théorique



Davide Caiulo
Data Scientist | Salarié - CDI
PhD Physique des particules
8 ans d'expériences en physique des
particules



Jean-Christophe lanigro
Conseiller scientifique
Ingénieur génie mécanique CNRS
Conception & développement des
capteurs

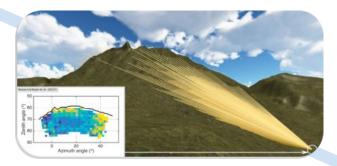
Fonctionnement de la technologie



L'atmosphère est bombardée constamment de rayons cosmiques de haute énergie

Les **muons** font partie des cascades de particules générées par ces bombardements

Les muons traversent la matière



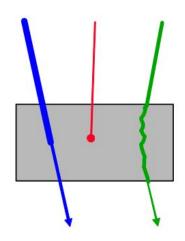
Il suffit d'un capteur pour cartographier une structure



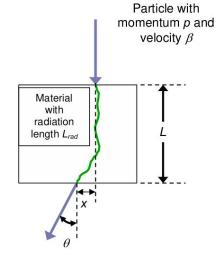
La technologie consiste à positionner un capteur devant la zone à explorer, capter les muons qui l'ont traversée, **analyser leurs trajectoires et en déduire la densité du milieu traversé**

Introduction

Muographie : principes généraux



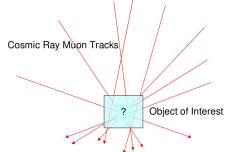
Différents types d'interactions entre les muons et la matière : trajectoires avec et sans diffusion (ligne verte et ligne bleue), trajectoires d'arrêt (ligne rouge).



Observables pour une mesure de diffusion : déplacement x, et angle θ (voir Schultz et al.).



Vue artistique de la production de "particules secondaires" après interaction des particules cosmiques primaires. Les muons font partie de ces cascades de particules qui se propagent jusqu'au sol (image de la NASA).



Caractéristiques générales des principes de la muographie.

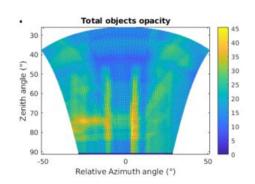
Commentaires:

- Méthode passive : utilisation du flux de muons atmosphériques en provenance aléatoire du ciel (pas d'injection de signal).
- Absorption : les muons sont arrêtés préférentiellement par les matériaux plus denses.
- Diffusion : les muons sont plus déviés par les matériaux les plus denses, et par les plus "gros" noyaux (Plomb, Uranium)

Illustration sur 3 cas d'usage

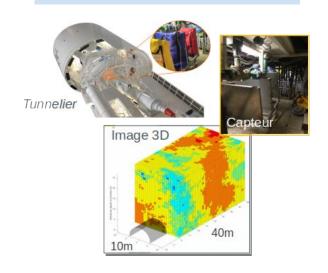
Nucléaire:

Image 2D de la structure d'un cristallisoir

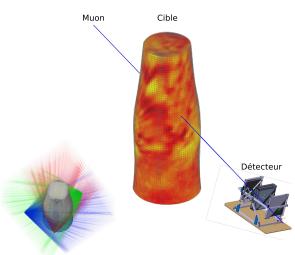


Tunneliers:

Reconnaissance à l'avancement des futures lignes de métro du Grand Paris Express



Sidérurgie: Image 3D d'un haut fourneau en fonctionnement



KPI techniques :

- 6 capteurs à disposition (location)
- **3** contrats en cours (tunnelier + industriel)
- **5 POC** réalisés auprès de 4 industriels
- **TRL de 4 à 8** selon les marchés visés et les cas d'usage



Introduction: Muodim et la muographie

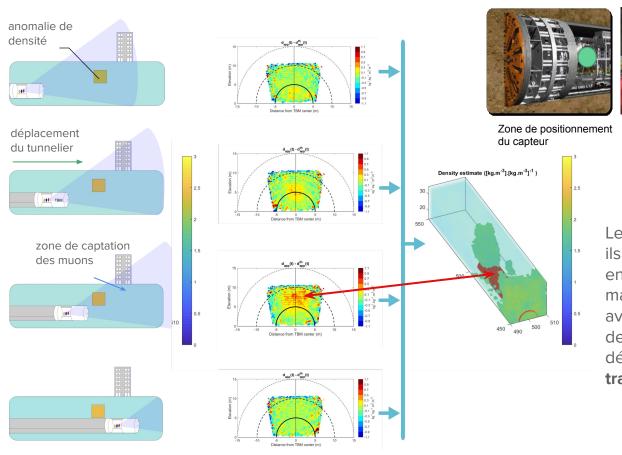
Application aux tunneliers

Application à la ligne 16 : installations et résultats

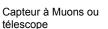
Ouvrages observés sur d'autres chantiers (L17.2 , L15...)

Adaptations / améliorations des algorithmes

Introduction: Comment cela fonctionne sur un tunnelier?







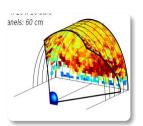
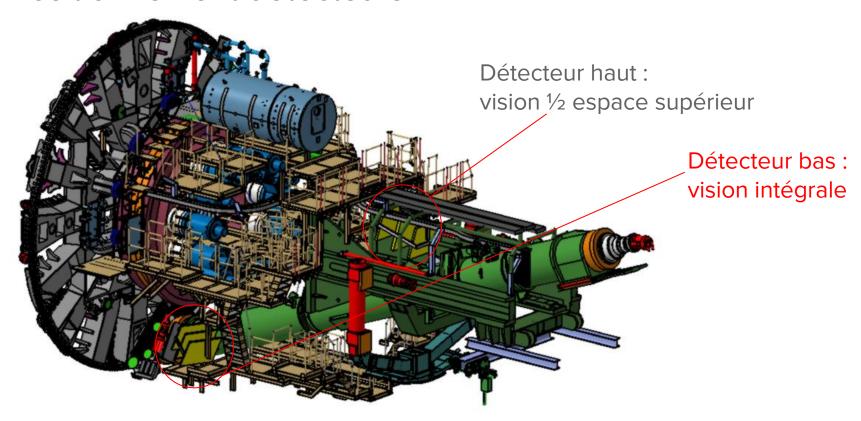


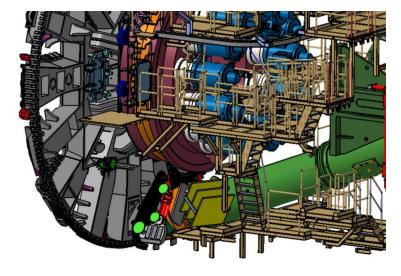
Image de coupe obtenue sur la densité

Les capteurs sont placés sur le tunnelier où ils fonctionnent de manière **autonome**. Ils enregistrent le passage des muons de manière continue quand le tunnelier avance. Puis, des algorithmes reconstituent des **images 3D** de **contraste de densité** (et détection d'anomalies), directement **transmises aux postes de travail**.

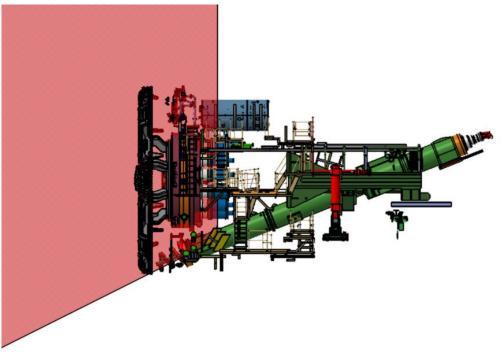
Positionnement détecteurs



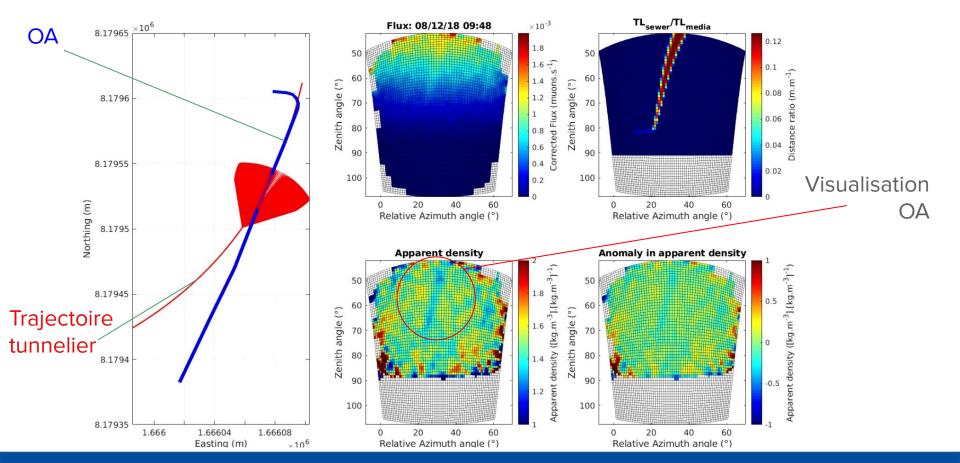
Positionnement détecteurs



Détecteur bas : champ de vision théorique



Exemple de détection d'OA



REX, cas d'usage courants :

Analyses ponctuelles:

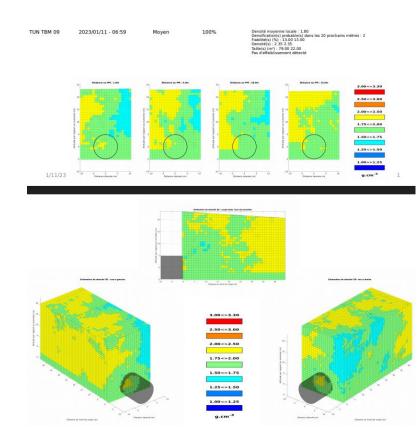
- Détection d'OA
- Détection du bâti de surface
- Détection de structures naturelles
- Détection d'anomalies de densité

Alertes:

- Rétro-analyse dureté de la roche (L15-T2B)
- Confirmation faible densité / zones décomprimées (L16)
- Franchissement zones de transition

Rétro-analyse globale :

- Estimation densité moyenne générale
- Passage par des zones mal référencées



Exemple de rapport fourni



Introduction: Muodim et la muographie

Application aux tunneliers

Application à la ligne 16 : installations et résultats

Ouvrages observés sur d'autres chantiers (L17.2 , L15...)

Adaptations / améliorations des algorithmes

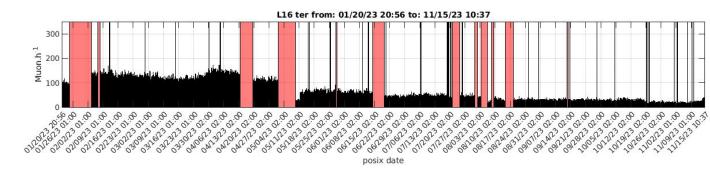
Historique des installations sur la ligne L16

3 installations au total (17/06/22 → 15/11/2023) :

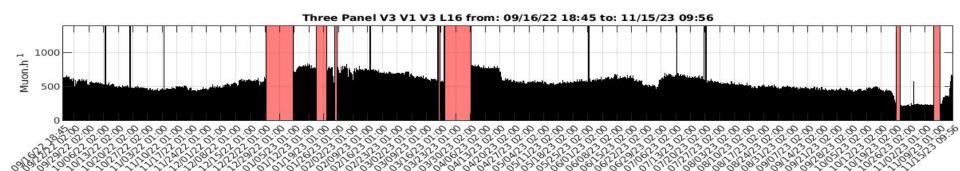
- 17/06/2022 : 4 plans de détection (2 doublets, détecteur "bas"), 3 PMs
 → détecteur endommagé le 11/08/2022
- 16/09/2022 : détecteur "haut" (L16bis)
 - → changement convertisseur: 20/01/2023, 30/03/2023, 08/11/2023
 - → installation onduleur 03/02/2023
- 22/12/2022 : détecteur "bas" expérimental (L16ter)
 - → installation onduleur 03/02/2023

Résultat L16 : acquisition continue des données

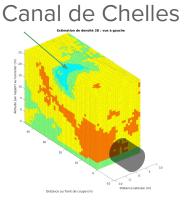
Détecteur n°2 (en position basse)



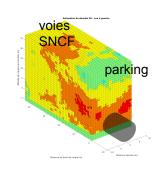
Détecteur n°1 (en position haute)

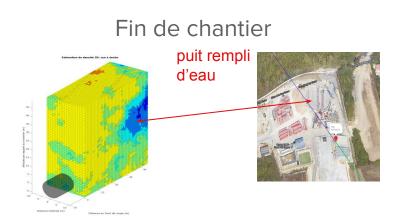


Résultat obtenus pour la L16 : Ouvrages observés pendant le chantier de la L16

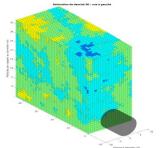


Gare de Chelles

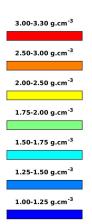








zone de faible densité : fondations? tassement de terrains?





Introduction: Muodim et la muographie

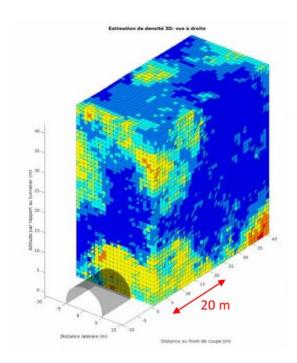
Application aux tunneliers

Application à la ligne 16 : installations et résultats

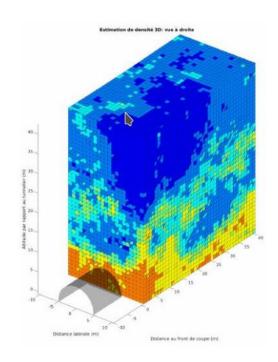
Ouvrages observés sur d'autres chantiers (L17.2 , L15...)

Adaptations / améliorations des algorithmes

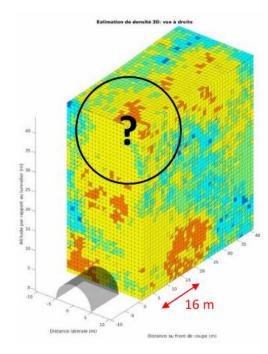
Passage sous la Marne : L15 T2B (Razel-Bec / Eiffage)



PM 1639,22 : TBM à -20m de la Marne

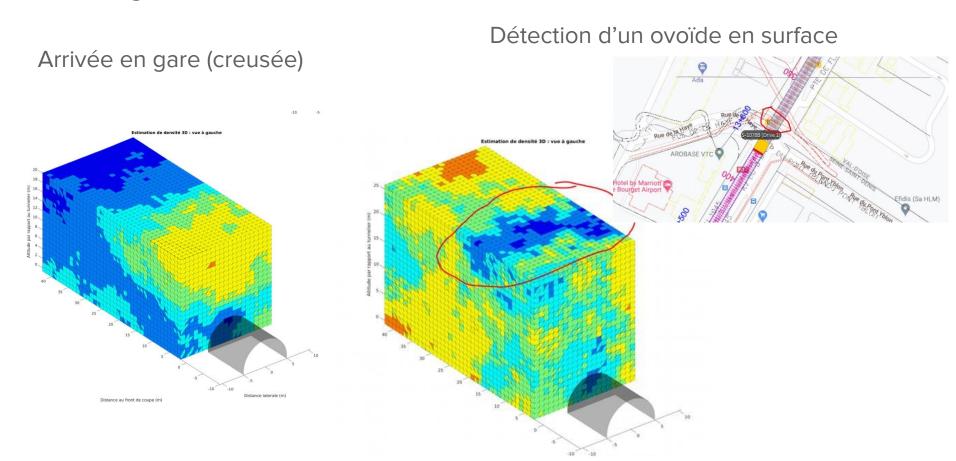


PM 1681,02 : TBM sous la Marne, à 20 m du début



PM 1735,06 : TBM sous la marne, à 16 m de la fin

Ouvrages observés sur L17.1 & .2





Introduction: Muodim et la muographie

Application aux tunneliers

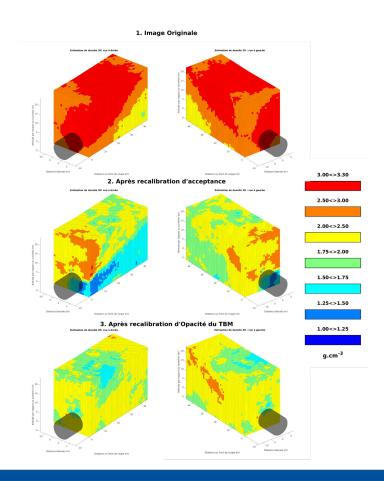
Application à la ligne 16 : installations et résultats

Ouvrages observés sur d'autres chantiers (L17.2 , L15...)

Adaptations / améliorations des algorithmes

Améliorations / Adaptations des algorithmes

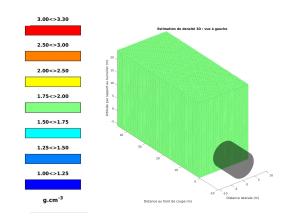
- génération automatique de 2 à 3 rapports par jour, téléversés sur plateforme (FTP...)
- correction des erreurs liées à des fichiers de navigations "erronés" ou manquants
- symétrisation de l'acceptance (perturbée à la calibration)
- correction liée à la prise en compte de l'opacité du tunnelier
- adaptations des algorithmes de tracking aux contraintes de l'expérience

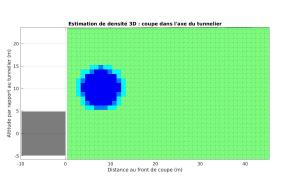


Développement d'un simulateur dédié aux TBM

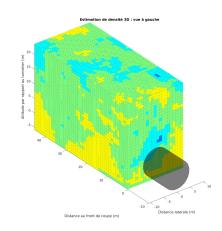
Pour améliorer la qualité de la reconstruction, un simulateur a été développé pendant le chantier 2023 :

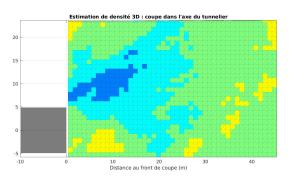
- Simule les données d'une anomalie connue sur la trajectoire d'un TBM,
- Reconstruit une image 3D à partir des données simulée (connue),
- La reconstruction est dépendante de la vitesse du TBM, du parcours, de la profondeur moyenne et de la structure générale du milieu,
- Ouvre la porte à une R&D intensive pour optimiser les reconstructions.





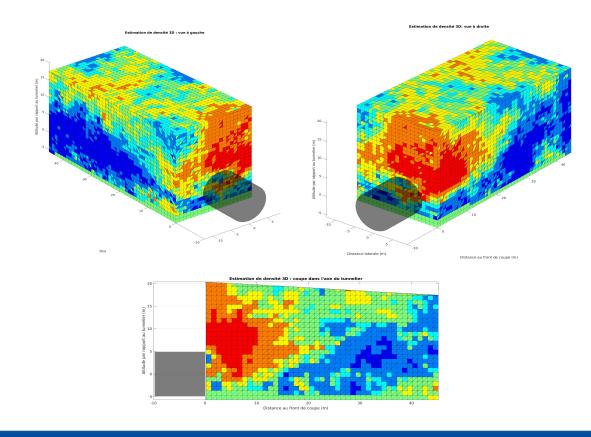






Reconstruction 3D

Potentiels de reconstruction avec le détecteur "bas" initial



- + **résolution** (voxels volume ½ par rapport aux actuels)
- vision intégrale (position basse)
- nécessité de déporter l'
 électronique en position haute
 (inondations possibles) MAIS la
 partie sensible pour la
 détection (scintillateurs + fibres)
 peut être immergée



Conclusions & perspectives

Une technologie robuste, déjà éprouvée sur de nombreux chantiers du Grand Paris Express (L15-T2C, L15-T2B, L16, L17 : 8 détecteurs embarqués).

Coûts contrôlés (mise en place, opérations, démontage)

Fonctionnement en continu 24/7, interventions humaines limitées sur site, contrôles à distance, transfert de données/rapports automatiques.

Vision lointaine: seule technologie capable d'anticiper des anomalies sur 40 mètres et plus, sans perturbation induite par l'environnement.

Technologie évolutive : potentiel d'optimisation des capteurs, de leur positionnement et des algorithmes de traitement.

Simulateur du fonctionnement et de la reconstruction des anomalies rencontrées par un TBM pour l'optimisation.

Implications sur l'augmentation de la résolution d'autant plus pertinente que la technologie est intégrée en amont

Proposition d'implantation de détecteur au plus bas du TBM pour un système de reconnaissance avec une résolution 8x supérieure à l'existant!

MUODIM CONTACTS contact@muodim.com Christophe Pichol-Thievend, CEO & Business Development christophe.pichol@muodim.com 06 71 10 28 70

www.muodim.com

Jacques Marteau, Technical & Scientific Director

MUODIM

CONTACTS

contact@muodim.com

Christophe Pichol-Thievend, CEO & Business Development christophe.pichol@muodim.com 06 71 10 28 70

Jacques Marteau, Technical & Scientific Director <u>jacques.marteau@muodim.com</u>

www.muodim.com