

IMGC

L'INSTRUMENTATION AU SERVICE DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Journée Technique

MARDI 13 JUIN 2023

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

SUIVI SECURITAIRE EN COURS D'EXPLOITATION D'UN FUNICULAIRE EN HAUTE MONTAGNE



ARGOTECH

Par Delphine RAFFARD et Emilie ROUSSELLE

CONTEXTE

- MAITRE d'OUVRAGE : BOURG SAINT MAURICE
- MAITRE D'ŒUVRE: ACI Ingénierie
- OBJET : Surveillance des mouvements de piles et de poutres d'un funiculaire en haute montagne
- RISQUE : Les mouvements peuvent provoquer à court et moyen terme des dommages sur la superstructure (déplacement, basculement, tassement) induisant un danger vis-à-vis des usagers et des tiers.
- OBJECTIF DE L'ETUDE : Mise en place d'une instrumentation permettant de suivre en continu tout comportement anormal des piles et des poutres (déplacement, rotation, inclinaison) pouvant impacter l'intégrité de l'ouvrage.
- DATE DE L'ETUDE : de 2020 à nos jours

L'OUVRAGE



- L'ouvrage relie la commune de Bourg Saint Maurice à la station des Arcs 1600.
- Il fait 2 875m de long pour un dénivelé de 810 m
- Il est constitué de poutres en béton, supportant les rails, lesquelles reposent sur 154 piles en béton armé en appui sur des fondations superficielles.
- Au milieu du parcours, un système d'évitement central permet aux deux véhicules de se croiser.

LES DESORDRES

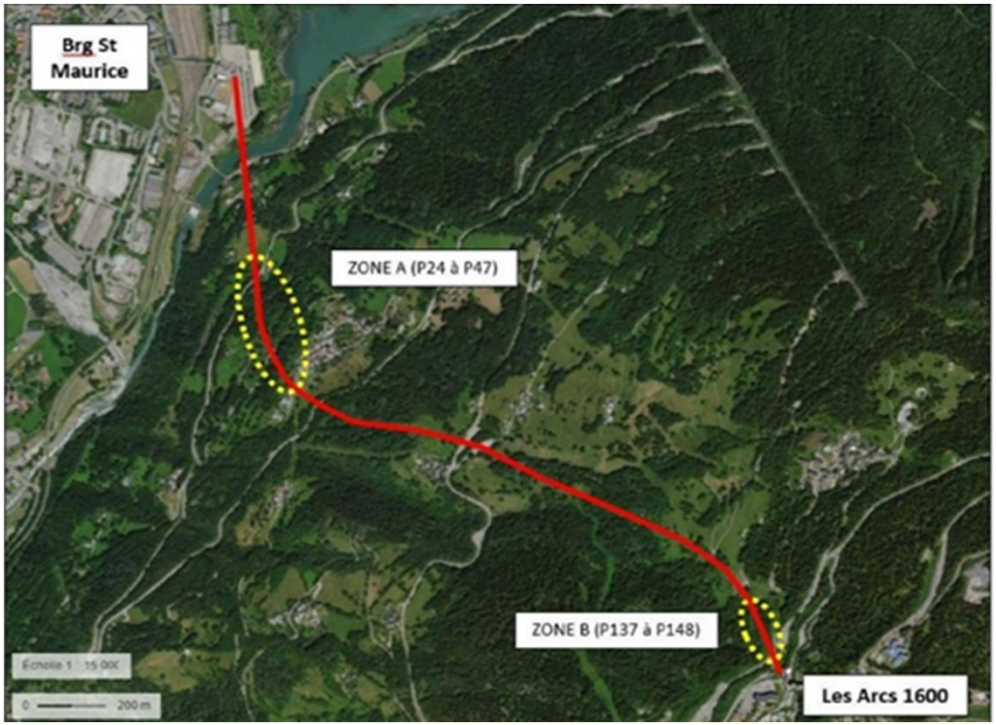
- Des désordres, comme des décalages longitudinaux entre les poutres, un rapprochement entre les abouts sont apparus au cours du temps.

- Dans la cadre d'une campagne de travaux initialisée par la commune, il a été décidé d'instrumenter certaines piles et poutres du funiculaire pour maitriser l'évolution et l'amplitude de certains mouvements observés, et pour maitriser la sécurité dans l'exploitation de l'ouvrage.

LE DIAGNOSTIC

- Le funiculaire a au préalable, fait l'objet d'un suivi topographique pour identifier les zones qui présentent le plus de mouvement.

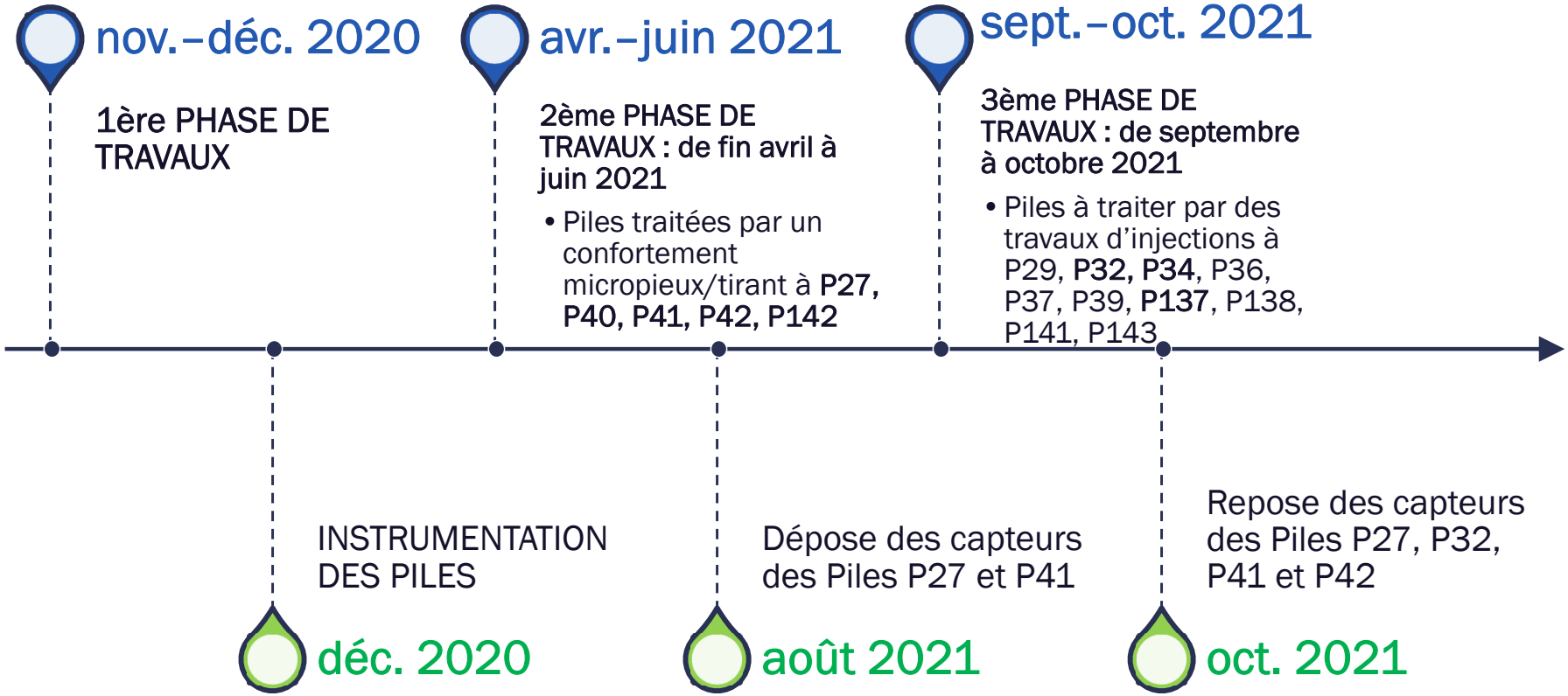
- Cette étude a conduit le maitre d'œuvre ACI Ingénierie et le BE EQUATERRE, spécialisé en géotechnique, à définir deux zones du tracé à surveiller : suivi en temps réel de certaines poutres et tête de pile, dans deux directions du plan horizontal, perpendiculairement à l'axe de la voie et dans l'axe de la voie.



LES TRAVAUX PREVUS SUITE AUX DIAGNOSTICS

- Réaliser le changement de 242 appareils d'appuis et rotules environ.
- Rechemiser 28 massifs béton situés entre les chevêtres et les appareils d'appui et agrandir ponctuellement par des bossages 5 chevêtres.
- Confortement par micropieux/tirant sur 5 piles
  Traitement par des travaux d'injections sur 10 piles
- Les travaux devaient être obligatoirement réalisés avant le début d'exploitation hivernale 2020-2021 du funiculaire

LES TRAVAUX PREVUS SUITE AUX DIAGNOSTICS - phasage



LES OBJECTIFS DE LA MISE SOUS SURVEILLANCE

Poursuivre l'exploitation du funiculaire

- L'instrumentation doit permettre la continuation de l'exploitation du funiculaire dans des conditions de sureté optimales avant, pendant et après les travaux de réfection des appuis des poutres et des fondations des piles. La réalisation de cet objectif passe par la mise en place d'un système d'alerte.

- L'instrumentation doit également permettre d'identifier d'éventuels problèmes de fondations ou/et de mouvements de sols et de sécuriser l'exploitation du funiculaire.



LES OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE AVANT ET PENDANT LES TRAVAUX

L'instrumentation prévue

- L'instrumentation du funiculaire doit permettre :
  - Le suivi des déplacements de l'ouvrage en fonction des mouvements du sol (glissement, tassement)

  ➢ **Alerter lorsque la vitesse d'évolution des déplacements dépasse le seuil d'alerte. Ce qui entrainera l'arrêt immédiat de l'exploitation du funiculaire**

  - Ponctuellement , le suivi de la « respiration » de l'ouvrage en fonction des passages des véhicules: suivi sous trafic

LES MOUVEMENTS A SURVEILLER

L'instrumentation prévue

Suivi par rapport aux glissements de surface

Double instrumentation sur 8 piles :
Inclinomètre bidirectionnel sur chevêtre des piles et inclinomètre bidirectionnel sur une poutre

- ZONE A ⟶ : P27, P31, P32, P32A, P40, P41, P42
- ZONE B ⟶ P142

Suivi par rapport à des potentiels défauts de portance

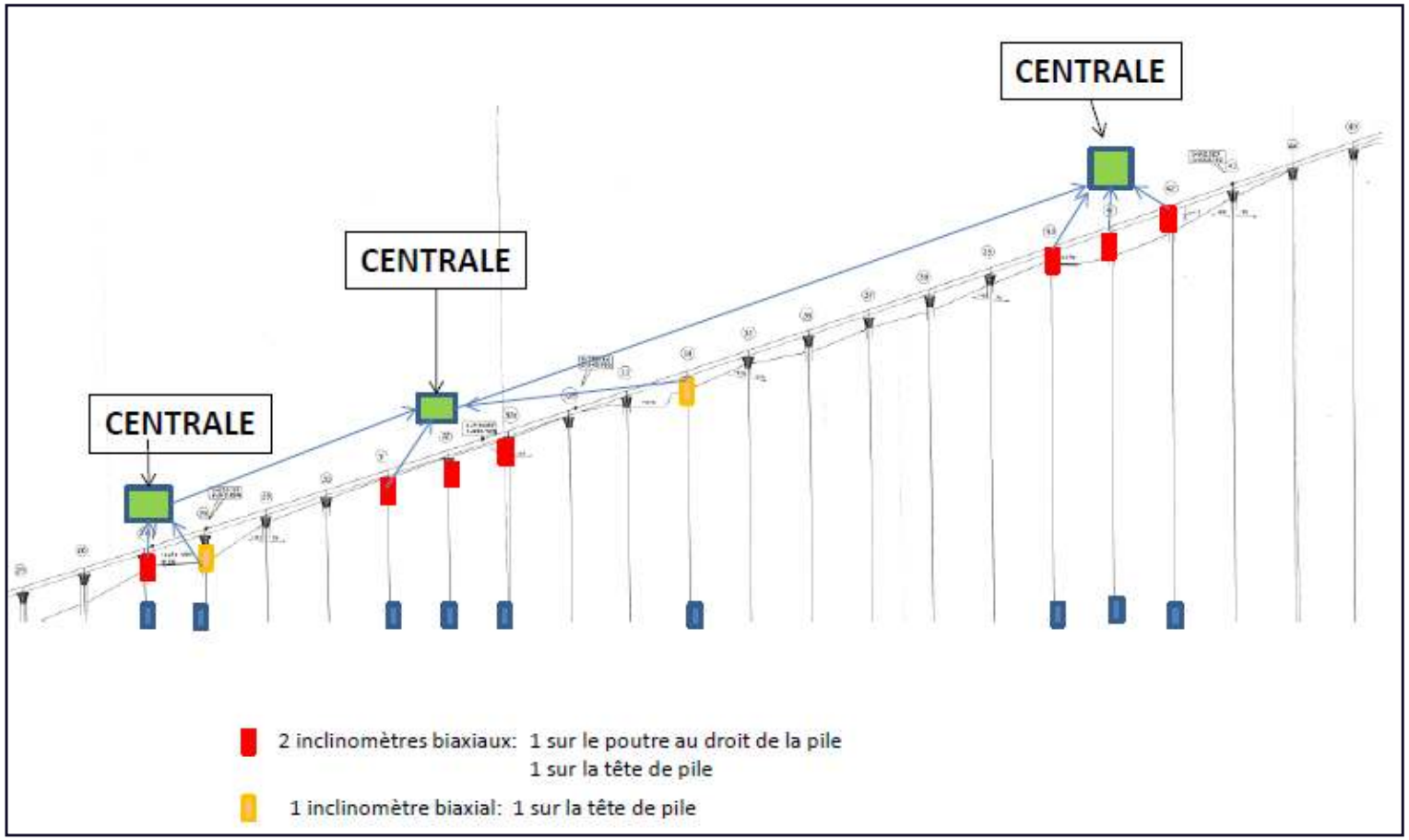
Un inclinomètre bidirectionnel sur le chevêtre de 4 piles

- ZONE A ⟶ P28, P34
- ZONE B ⟶ P137, P140

Les piles instrumentées

Zone A : piles 24 à 47

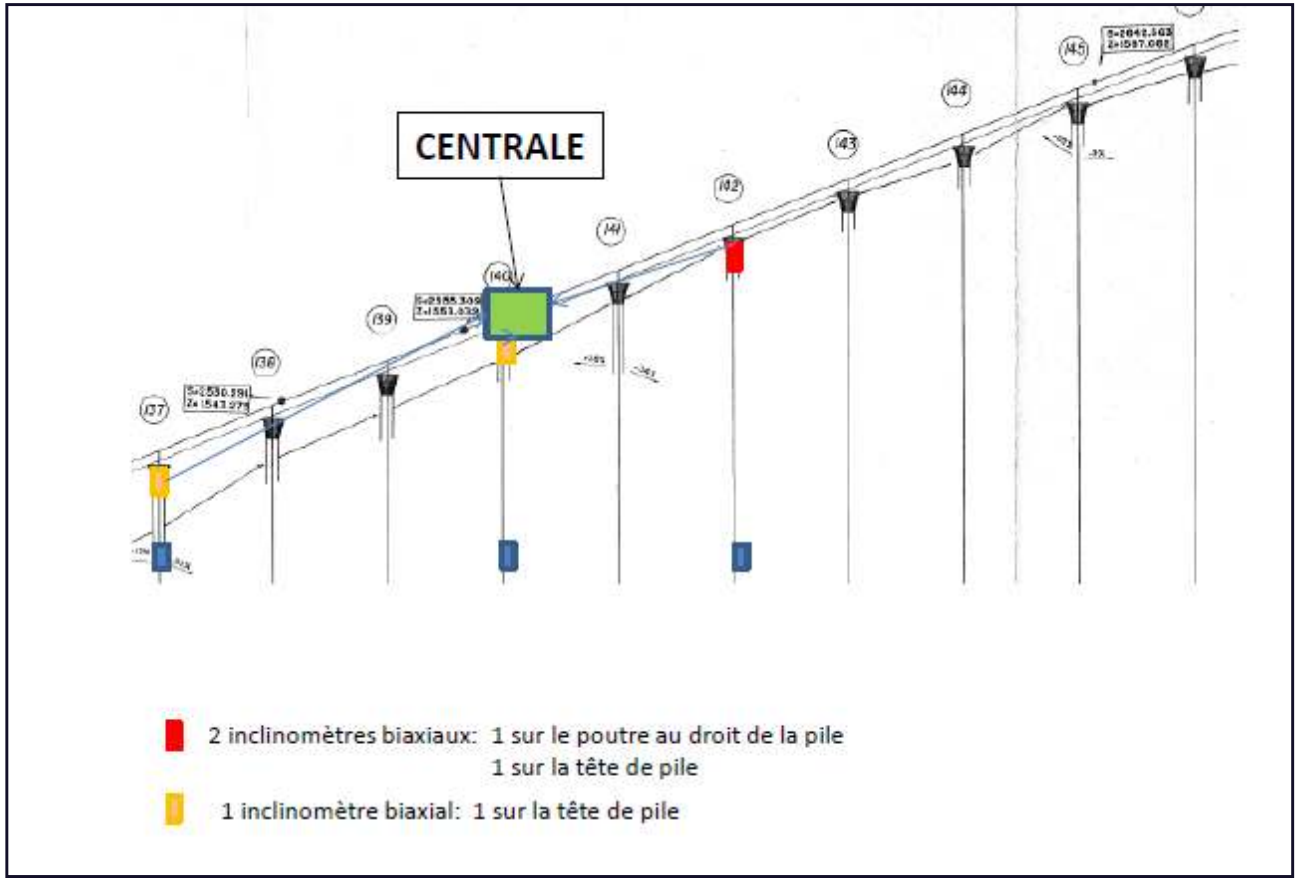
Les piles les plus exposées à des potentiels glissement de surface : 27 ; 31; 32 ; 32A,40 ;41 ;42



Les piles instrumentées

Zone B : piles 137, 140 et 142

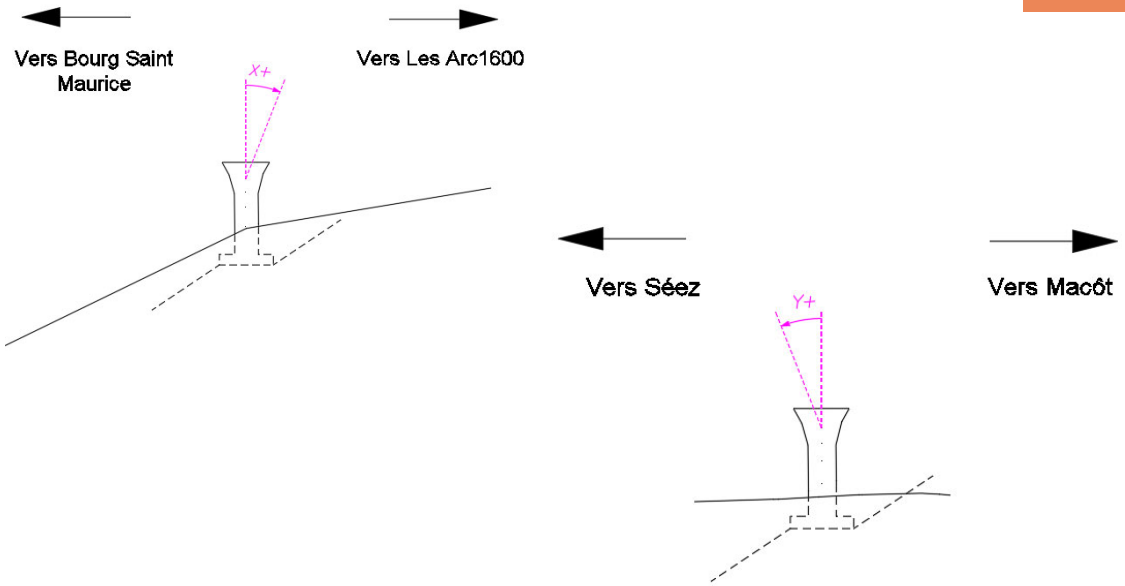
La pile la plus exposée à des potentiels glissement de surface: P142



Le dispositif d'acquisition

Inclinomètres biaxiaux



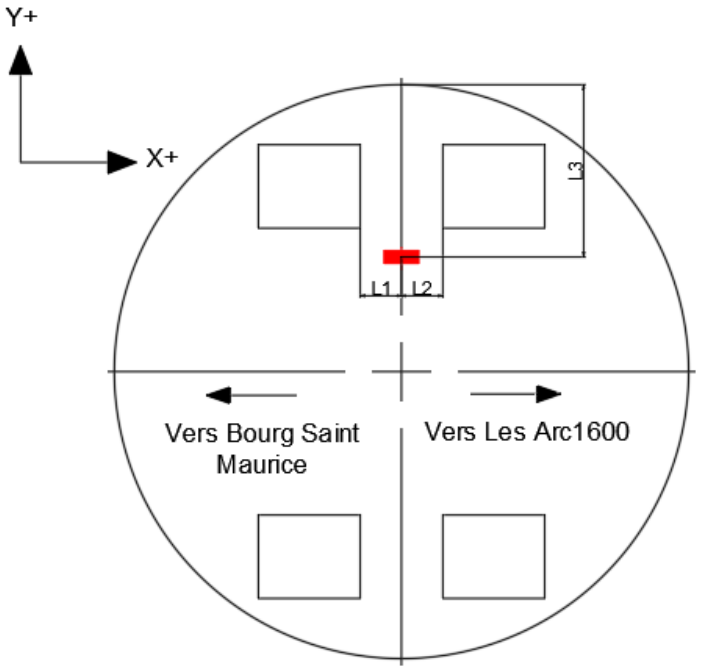


Plage 60° - Précision : 0.02 ° - Fréquence maximale d'acquisition 100Hz

Le dispositif d'acquisition

Instrumentation inclinométrique des 13 têtes de piles

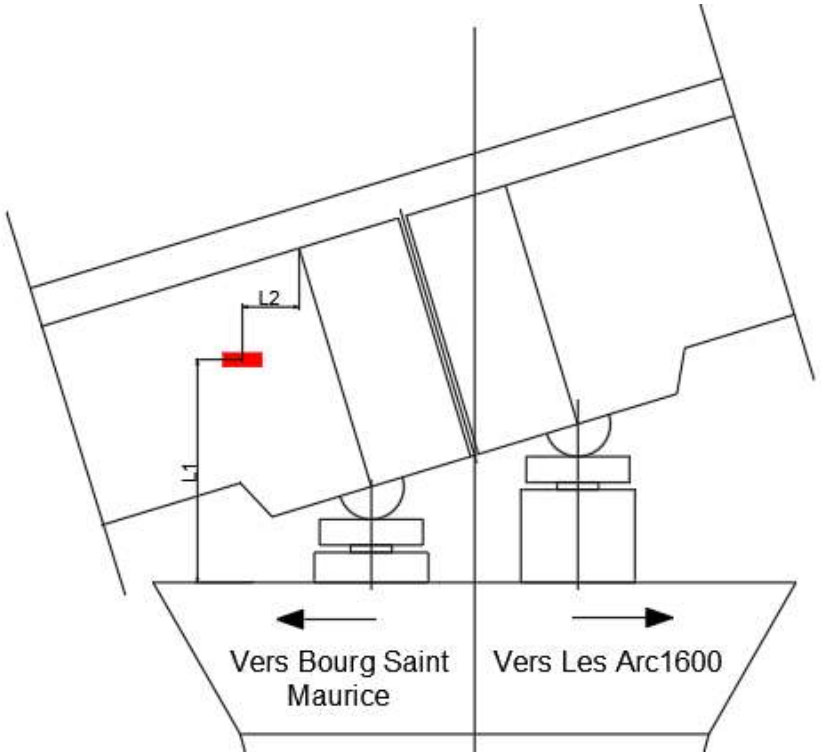
TETE DE PILE





Le dispositif d'acquisition

Instrumentation inclinométrique des 8 poutres







Le dispositif d'acquisition

Mouvements pouvant être mesurés grâce au dispositif

Mouvement possible	Prise en compte	Inclinomètre mis à contribution
Basculement d'une pile dans l'axe du funiculaire	✓	Inclinomètre sur tête de pile
Basculement d'une pile dans l'axe perpendiculaire au funiculaire	✓	Inclinomètre sur tête de pile, et par entrainement inclinomètre sur about de poutre
Déplacement dans la pente d'une pile (sans basculement)	✓	Inclinomètre sur about de poutre (perte d'altitude induisant une variation d'angle de la poutre)
Tassement d'une pile sans déplacement latéral et sans basculement	✓	Inclinomètre sur about de poutre (perte d'altitude induisant une variation d'angle de la poutre)
Toutes combinaisons des mouvements précédents	✓	Les 2 inclinomètres seront sollicités
Déplacement d'ensemble généralisé, sans basculement, de plusieurs piles successives	✖	Si pas de variation d'angle, pas de mouvement détectable par inclinomètre

Le dispositif d'acquisition

Sondes température :

Gamme de température : -50°C à 150°C - Précision 0.1°C

BETON (6)





AIR (4)



Le dispositif d'acquisition

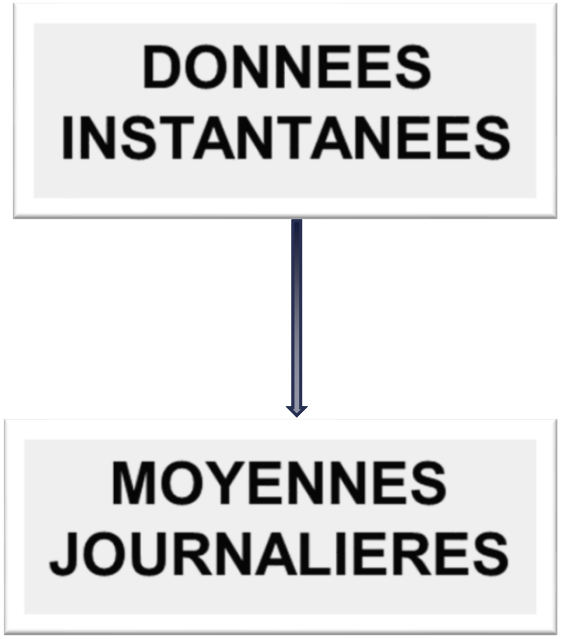
Les centrales d'acquisition



- Autonomes
- Synchronisation des données
- Possibilité d'acquisition rapide des données permettant d'étudier l'impact du passage d'un véhicule sur une pile
- Eliminer la perte de signal engendrée par la longueur de la chaine (environ 600m de câbles)

TRAITEMENT DES DONNEES

Informations en moyenne journalière



Avantage : limite le « bruit » dû à la variation journalière de température

TRAITEMENT DES DONNEES

Calcul de la vitesse de rotation

$$V_c^*(J_n) = R_c^*(J_n) - R_c^*(J_{n-1})$$

R_c : Rotation en moyenne journalière pour le capteur C
J : jour

TRAITEMENT DES DONNEES

Corrections thermiques

- Mesure corrigée par corrélation linéaire

➢ Mesure corrigée = Mesure non corrigée - β x (T –**Tref**)

- Coefficient β

➢ >0 en phase

➢ <0 en opposition de phase

- Corrélation

➢ $R^2 > 0.9$: très bonne

➢ $0.75 < R^2 < 0.9$: bonne

➢ $0.6 < R^2 < 0.75$: moyenne

➢ $0.45 < R^2 < 0.6$: mauvaise

➢ $R^2 < 0.45$: très mauvaise

TRAITEMENT DES DONNEES

Corrections thermiques au niveau des piles zone A

15/12/2020 au 21/02/2021

Inclinomètre	Direction	Coefficient (°/°C)	R^2	Coefficient (°/°C)	R^2
P27-I1	X	-0,0163	0,95	-0.0135	0.97
P28-I1	X	-0,0020	0,42	-0.0015	0.72
P31-I1	X	0,0023	0,13	-0.0006	0.10
P32-I1	X	0,0038	0,59	0.0045	0.91
P32A-I1	X	-0,0057	0,63	-0.0042	0.82
P34-I1	X	-0,0030	0,29	-0.0007	0.13
P40-I1	X	-0,0119	0,95	-0.0118	0.99
P41-I1	X	-0,0022	0,15	-0.0058	0.94
P42-I1	X	-0,0113	0,88	-0.0103	0.98
P27-I1	Y	0,0097	0,91	0.0045	0.72
P28-I1	Y	0,0013	0,33	-0.0001	0.00
P31-I1	Y	0,0134	0,62	0.0045	0.46
P32-I1	Y	-0,0007	0,01	-0.0055	0.85
P32A-I1	Y	0,0023	0,13	-0.0020	0.54
P34-I1	Y	-0,0077	0,85	-0.0079	0.95
P40-I1	Y	0,0064	0,84	0.0037	0.75
P41-I1	Y	0,0130	0,96	0.0107	0.97
P42-I1	Y	0,0061	0,69	0.0049	0.83

15/12/2020 au 31/03/2021

TRAITEMENT DES DONNEES

Corrections thermiques au niveau des piles zone B

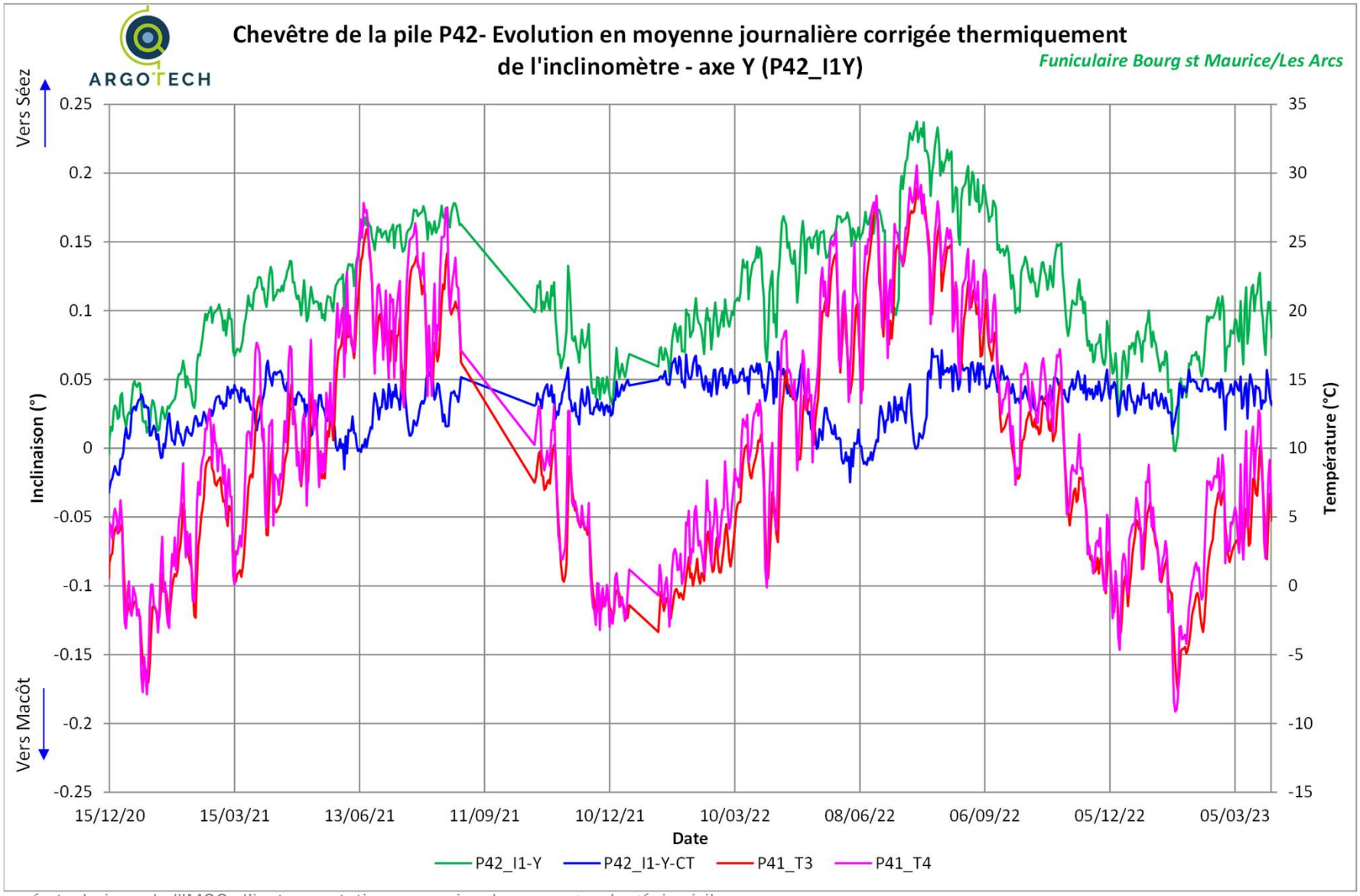
Inclinomètre	Direction	Coefficient (°/°C)	R^2	Coefficient (°/°C)	R^2
P137-I1	X	-0,0006	0,52	-0.0041	0.55
P140-I1	X	-0,0025	0,39	-0.0020	0.41
P142-I1	X	0,0081	0,37	0.0015	0.07
P137-I1	Y	-0,0161	0,15	-0.0077	0.51
P140-I1	Y	-0,0021	0,05	-0.0019	0.44
P142-I1	Y	-0,0016	0,01	-0.0085	0.83

15/12/2020 au 21/02/2021

15/12/2020 au 31/03/2021

TRAITEMENT DES DONNEES

Informations corrigées thermiquement



TRAITEMENT DES DONNEES

Cas des mauvaises corrélations thermiques

Plage temporelle de température trop faible

Point de prise de température trop éloigné du phénomène physique

Existence d'un effet de structure plus ou moins aléatoire avec la température : non linéarité sur un élément externe au suivi direct (par exemple, fondation de pile)

Pour les piles dont le coefficient de corrélation thermique est inférieur à 0,7, nous n'avons pas appliqué de corrections thermiques.

Tous les éléments de structures (chevêtre de piles, poutres) ne sont pas parfaitement corrélés avec la température, ce qui peut être interprété par la présence d'interactions au niveau de la structure.

SEUILS

PRE ALERTE et ALERTE



Les seuils de préalerte permettent, une fois dépassés, de passer l'ouvrage en surveillance renforcée.



Une analyse des données et éventuellement une acquisition a une fréquence plus importante est mise en place afin d'affiner l'analyse.



Les seuils d'alerte permettent, une fois dépassé, de prévenir les différentes parties d'une éventuelle situation à risque lors de l'exploitation de l'ouvrage. Les valeurs des seuils d'alerte tiennent compte d'un coefficient de sécurité.

SEUILS (PRE ALERTE)

ARGOTECH

Zones A et B

Le seuil PREAL 1 correspond au dépassement de la moyenne journalière, fixée à 0,05 (puis 0,1 en zone B) degrés ET de la vitesse, fixée à 0.02 degrés/jour, pendant 3 jours consécutifs.

Le seuil PREAL 2 correspond au dépassement de la moyenne journalière, fixée à 0,05 (puis 0,1 en zone B) degrés ET de la vitesse, fixée à 0.02 degrés/jour, 3 jours dans une semaine écoulée.

- $R_c^*(0) = 0.05\ ^\circ$ ou $0.1\ ^\circ$
- $V_c^*(0) = 0.02\ ^\circ/\text{jour}$

SEUILS (ALERTE)

ALERTE 1

- Le seuil ALER1 **pour la zone A** correspond au dépassement de la moyenne journalière, fixée à 0,05 (puis 0,1 en zone B) degrés ET au doublement de la vitesse sur 3 jours consécutifs (ce qui signifie que la valeur de vitesse du jour J dépasse 8 fois celle du jour J-3).

ALERTE 2

- Le seuil ALER2 correspond au dépassement de la moyenne journalière, fixée à 0,25 degrés.

PLANS D'ALERTE

Plan d'alerte : scénario avec passage par le stade préalerte

Surveillance

- Aucun seuil atteint
- Fonctionnement automatisé des instruments

Surveillance Renforcée

- Seuil de pré-alerte PREAL 1 ou PREAL 2 atteint
- Analyse des mesures et observations sur site pour prise de décision (observations, levé topographique, relevé des inclinomètres terrain, etc.)

Alerte

- Seuil d'alerte ALER 1 ou ALER 2 atteint
- Déclenchement de l'arrêt d'exploitation immédiat à réception du message d'alerte
- Analyse des mesures et observations pour prise de décision

PLANS D'ALERTE

Plan d'alerte sans passage par le stade de préalerte

Surveillance

- Aucun seuil atteint
- Fonctionnement automatisé des instruments

Alerte

- Seuil d'alerte ALER 1 ou ALER 2 atteint
- Déclenchement de l'arrêt d'exploitation immédiat à réception du message d'alerte
- Analyse des mesures et observations pour prise de décision

ALERTES RECUES AVANT LES TRAVAUX

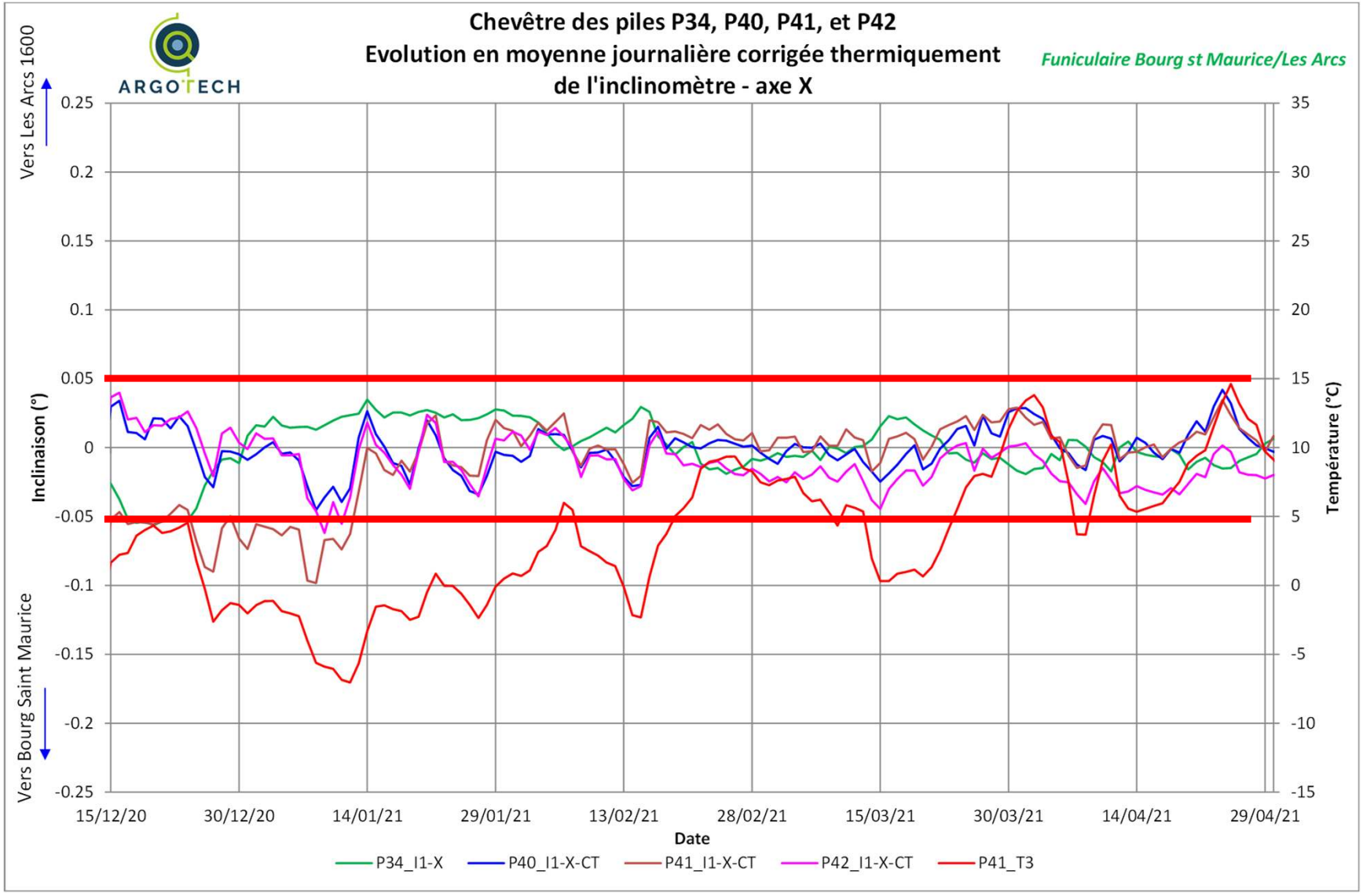
Piles

- En zone A,
  - ✓ P42-X a dépassé ponctuellement le seuil
  - ✓ Certaines piles ont dépassé le seuil mais sans augmentation de 0.02° durant 3 jours
- En Zone B
  - ✓ P137 et P142 ont dépassé le seuil et ont été en alerte.

Poutres : Il n'y a pas d'alerte fixé au niveau des poutres

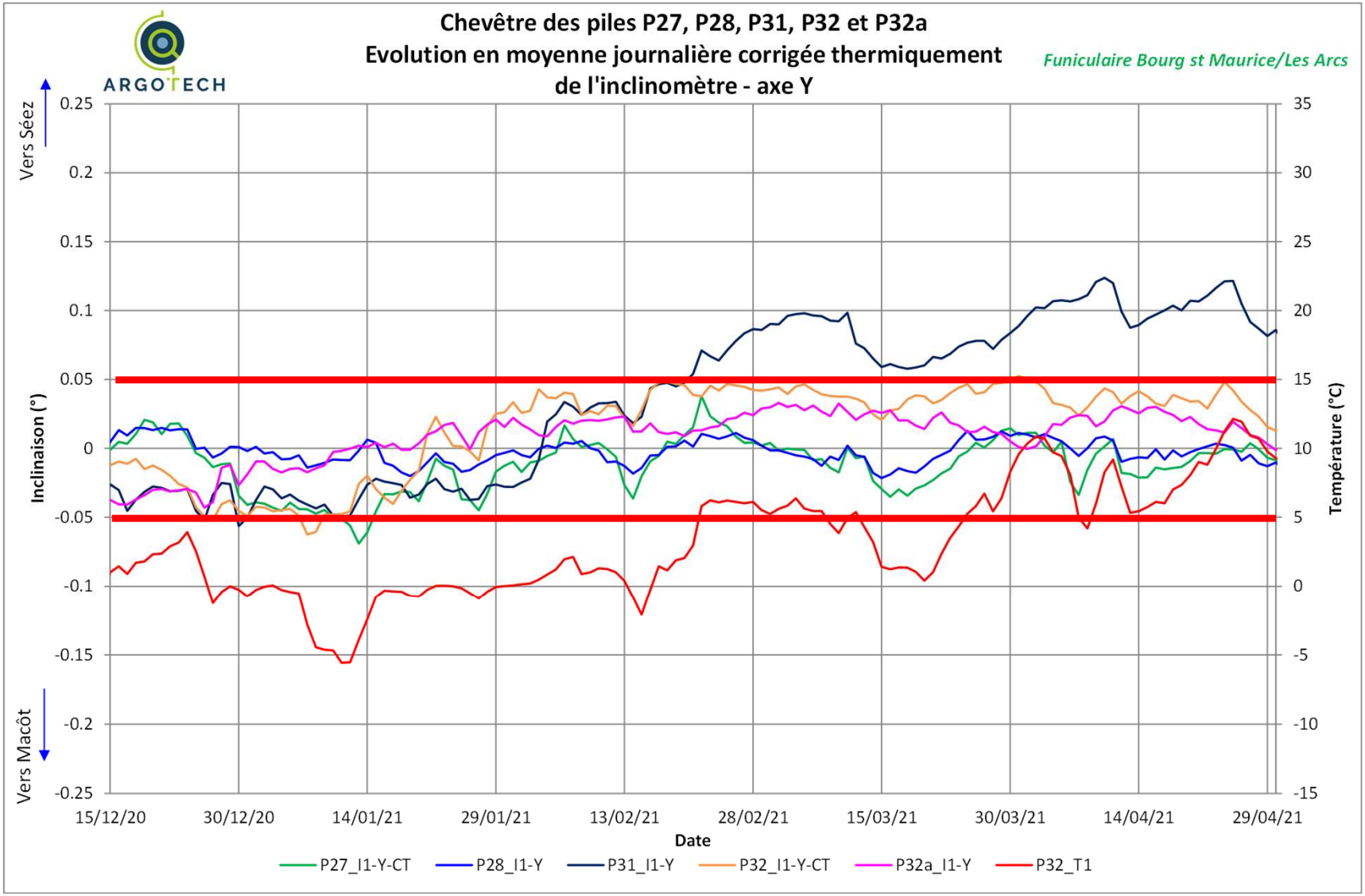
PRESENTATION DE RESULTATS AVANT TRAVAUX

Rotation X (Zone A – Groupe 1)



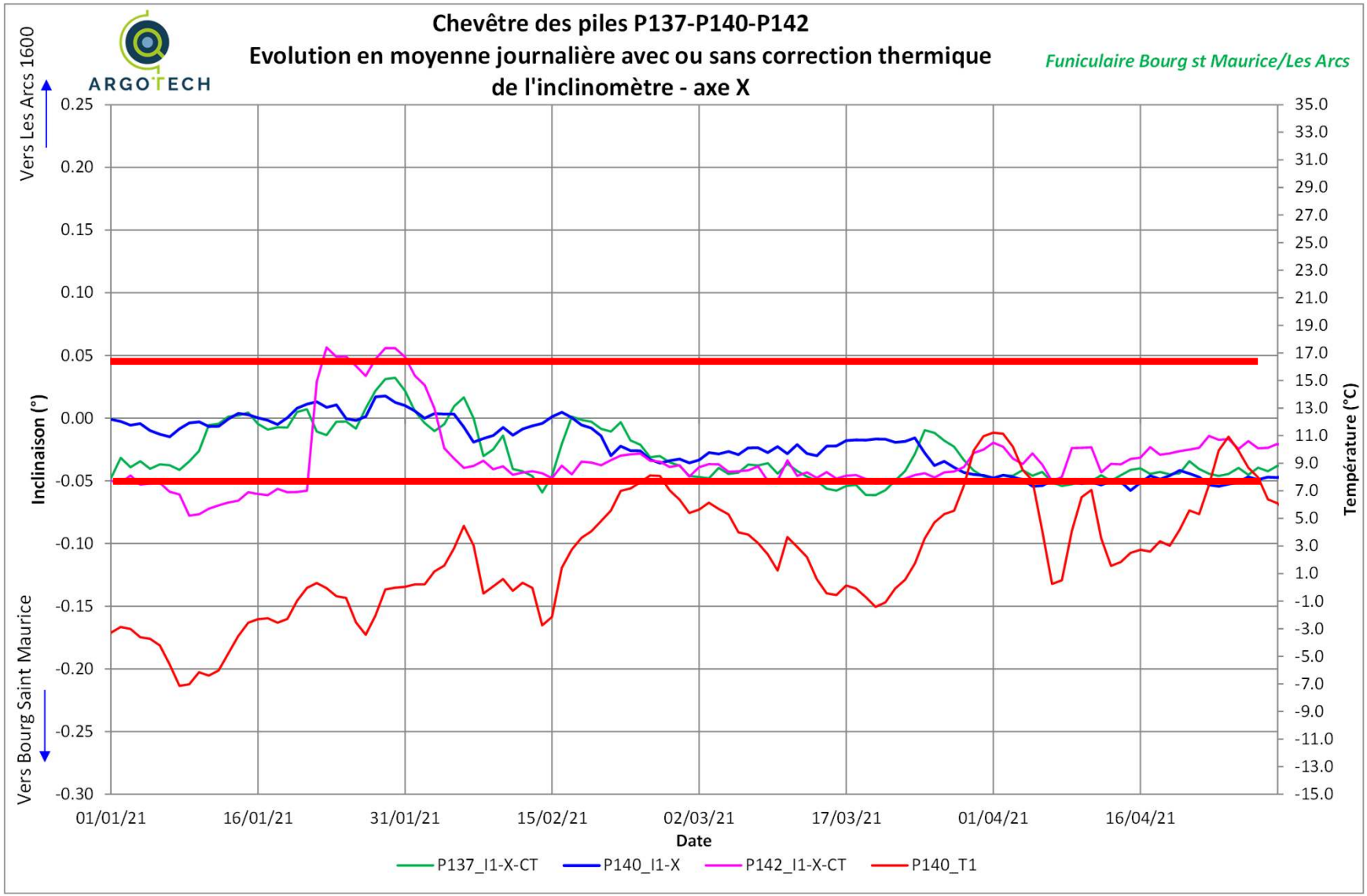
PRESENTATION DE RESULTATS AVANT TRAVAUX

Rotation Y (Zone A – Groupe 1)



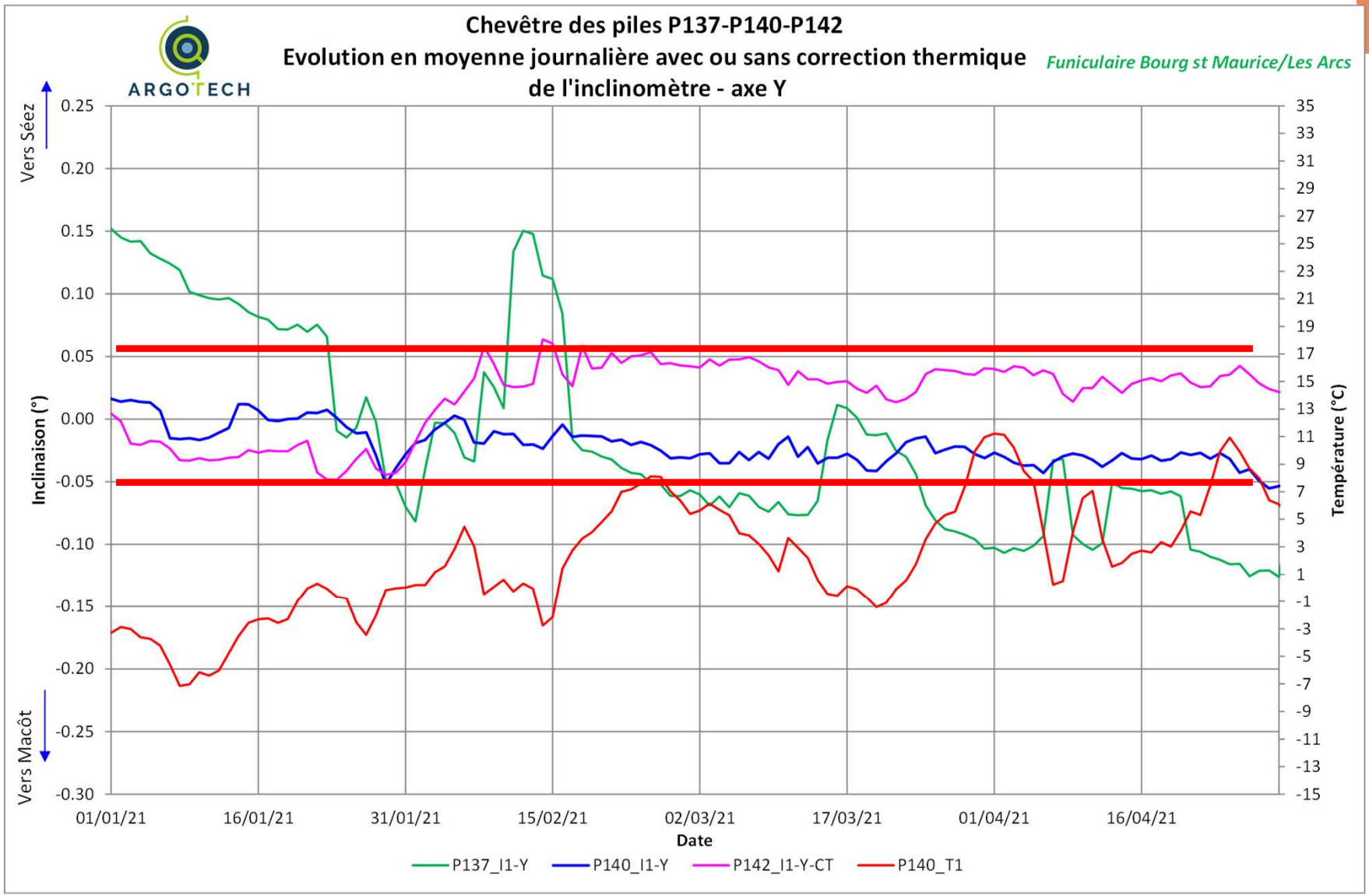
PRESENTATION DE RESULTATS AVANT TRAVAUX

Rotation X (Zone B)



PRESENTATION DE RESULTATS AVANT TRAVAUX

Rotation Y (Zone B)



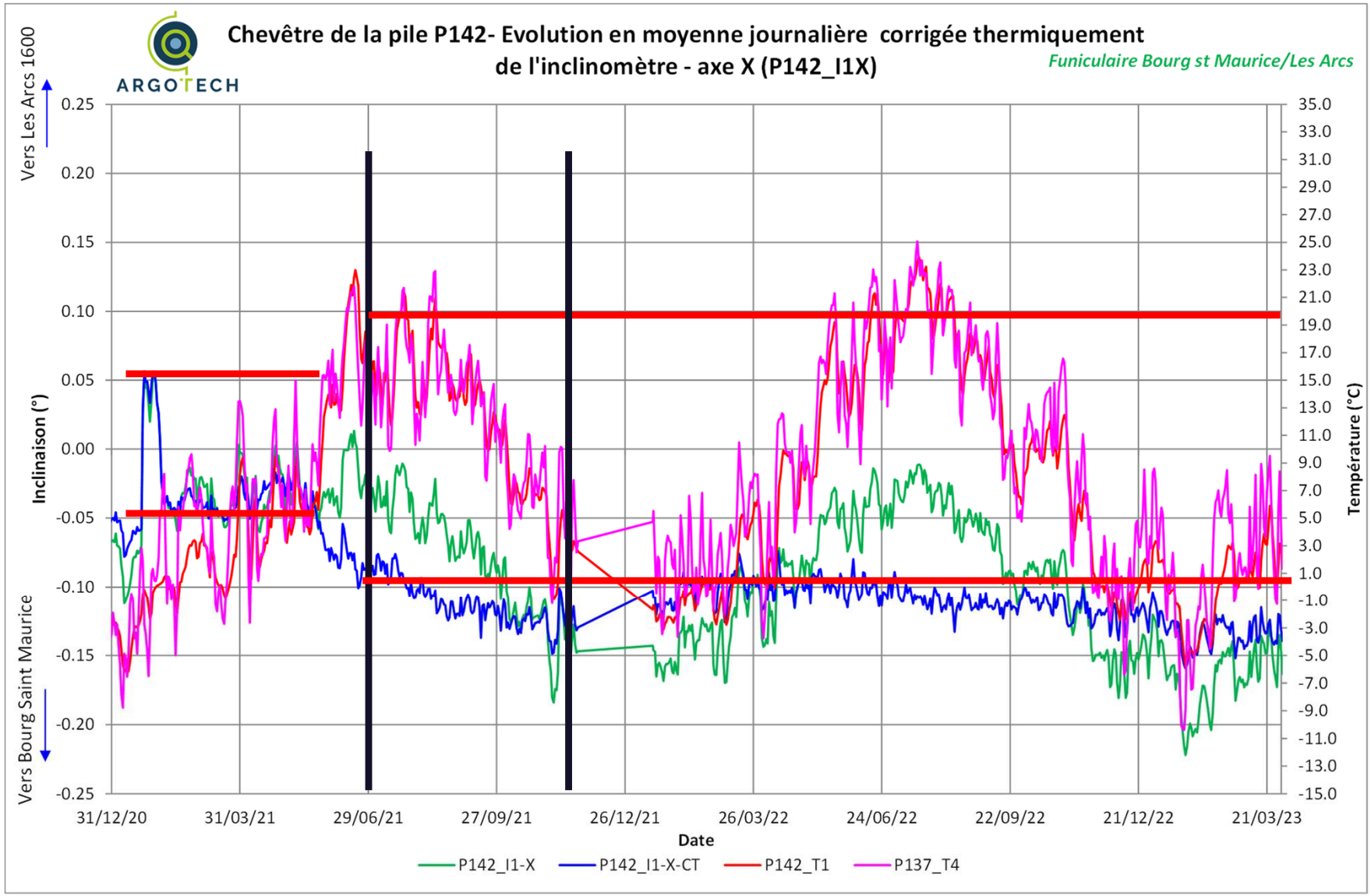
PRESENTATION DE RESULTATS AVANT TRAVAUX

CONCLUSION

- Système de surveillance opérationnel
- Quelques pré-alertes et zone A et alertes en zone B
- Vérification des piles zone B 137 et 142
  - Valeur de $R_c^*(0) = 0.05$ ° très faible
  - Pas de nouveaux désordres en évidence
- Réouverture du funiculaire autorisée pour la saison d'été 2021 car surveillance jugée opérationnelle avec analyse hebdomadaire des mesures pendant les travaux

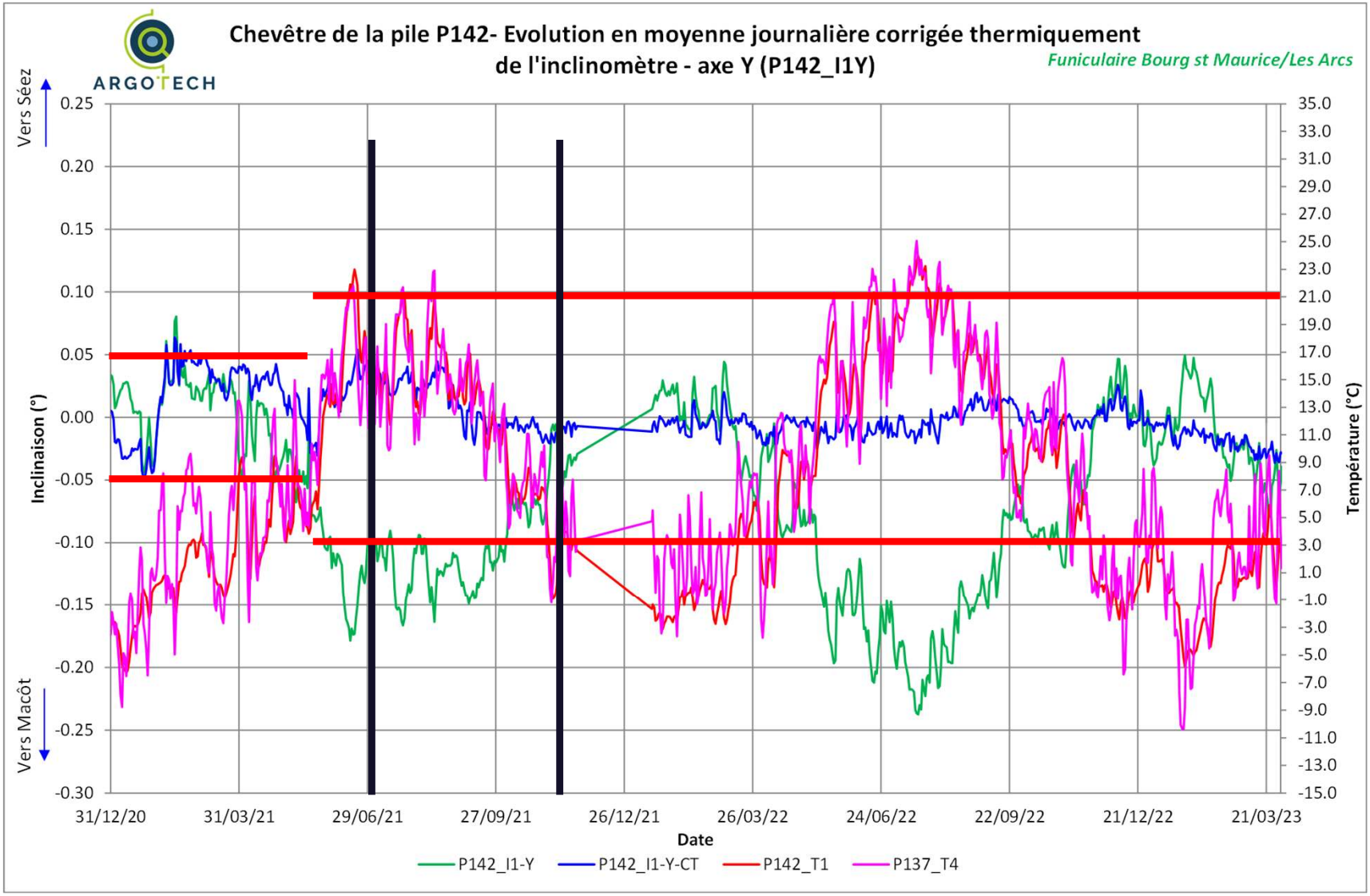
PRESENTATION DE RESULTATS APRES TRAVAUX MICROPIEUX

Cas Pile 142 – Rotation en X



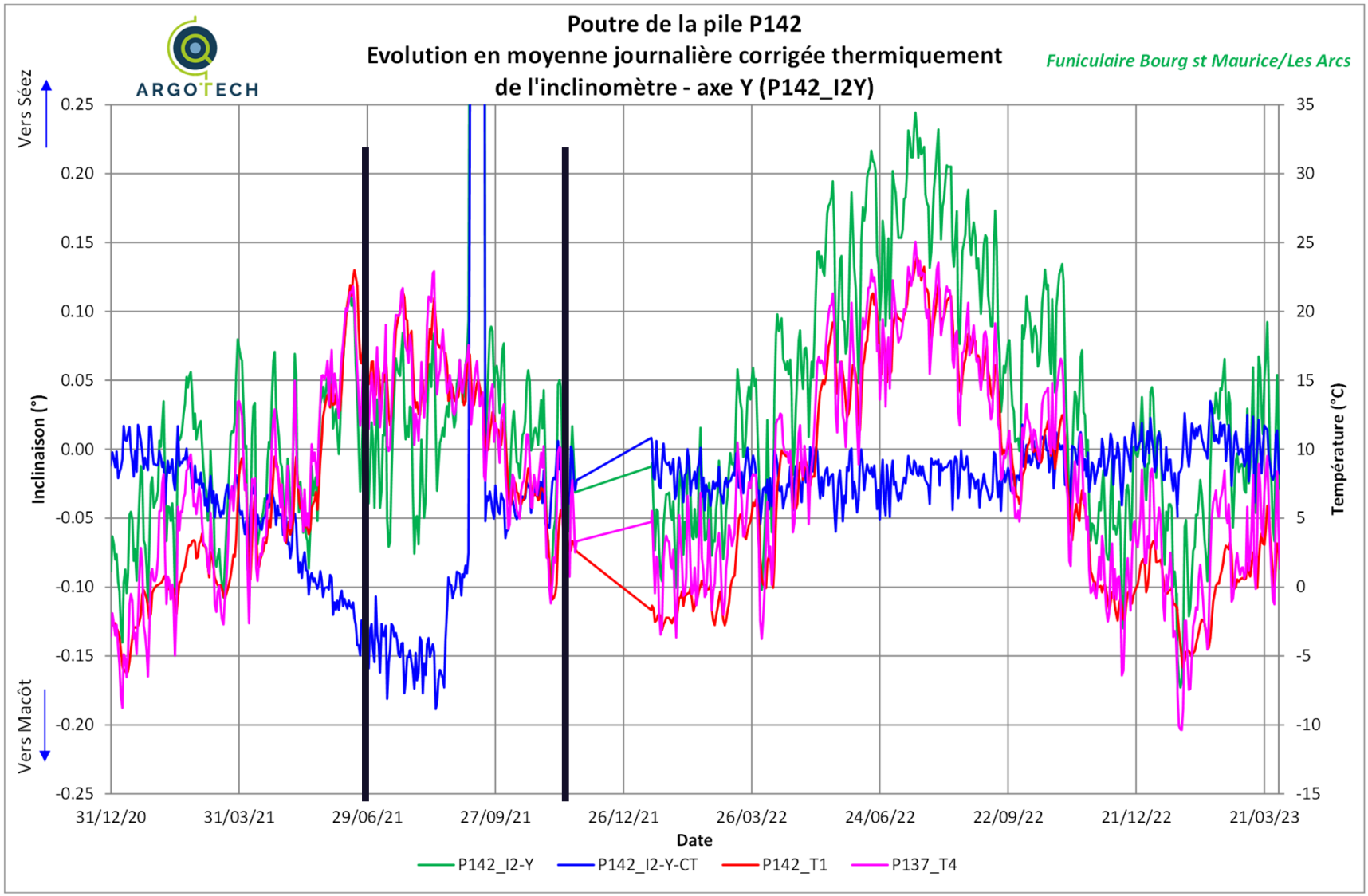
PRESENTATION DE RESULTATS APRES TRAVAUX

Cas Pile 142 – Rotation en Y



PRESENTATION DE RESULTATS APRES TRAVAUX

Cas Pile 142 Poutre – Rotation en Y



SYNTHESE

Quelques mois après les travaux

(utilisation des corrections thermiques avant travaux)

- Zone A : 9 piles instrumentées
  - 7 piles ont un signal stable,
  - 2 piles montrent encore des évolutions
- Zone B : 3 piles instrumentées
  - 1 pile montre encore des évolutions
- Alertes:
  - Plus d'alerte quelques mois après les travaux et le recalage des mesures
- Etudier à plus long terme le bilan des piles concernées par les travaux d'injection

PERSEPTIVES ET TRAVAUX EN COURS

Nécessité de recalculer les coefficients de correction thermiques après travaux notamment pour les éléments dont les coefficients étaient mauvais

- **Méthode retenue: Inversion totale pour essayer d'avoir un modèle le plus prédictif possible.**

- Le modèle:
- Température : β x (T –Tref)
- Déformation rémanente (fluage visqueux) : C x (temps) $-C_0$
- 2 paramètres : β et C

PERSEPTIVES ET TRAVAUX EN COURS:

Exemple : Maitrise de l'évolution des déformations avec le temps

- On calcule les courbes corrigées thermiquement en utilisant les coefficients thermiques déterminés par inversion totale.

Inversion totale du modèle			
THERMIQUE		Rémanence	
Coefficient °/°C	R^2	Taux	10^{-6}/an
10,63	0,93	5,1	

PERSEPTIVES ET TRAVAUX EN COURS:

Exemple : Maitrise de l'évolution des déformations avec le temps

- A partir des courbes corrigées thermiquement on détermine les taux annuels de déformation rémanente par régression linéaire.

Capteur		Modèle 10^{-6}/an	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3
			10^{-6}/an	10^{-6}/an	10^{-6}/an
P41	X	16,8	-20,9	8,5	16,8

PERSEPTIVES ET TRAVAUX EN COURS:

Exemple : Maitrise de l'évolution des déformations avec le temps

- On évalue les déformations rémanentes et on les compare au modèle

			Semestre 1			Semestre 2			Semestre 3		
Pile	Sens	Valeur Initiale	Mod	Réel	E(A)	Mod	Réel	E(A)	Mod	Réel	E(A)
P41	X	44	52	6	-27	61	20	-19	69	48	-8

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

ARGOTECH

Delphine RAFFARD

delphine.raffard@argotech.fr

04.90.84.12.60