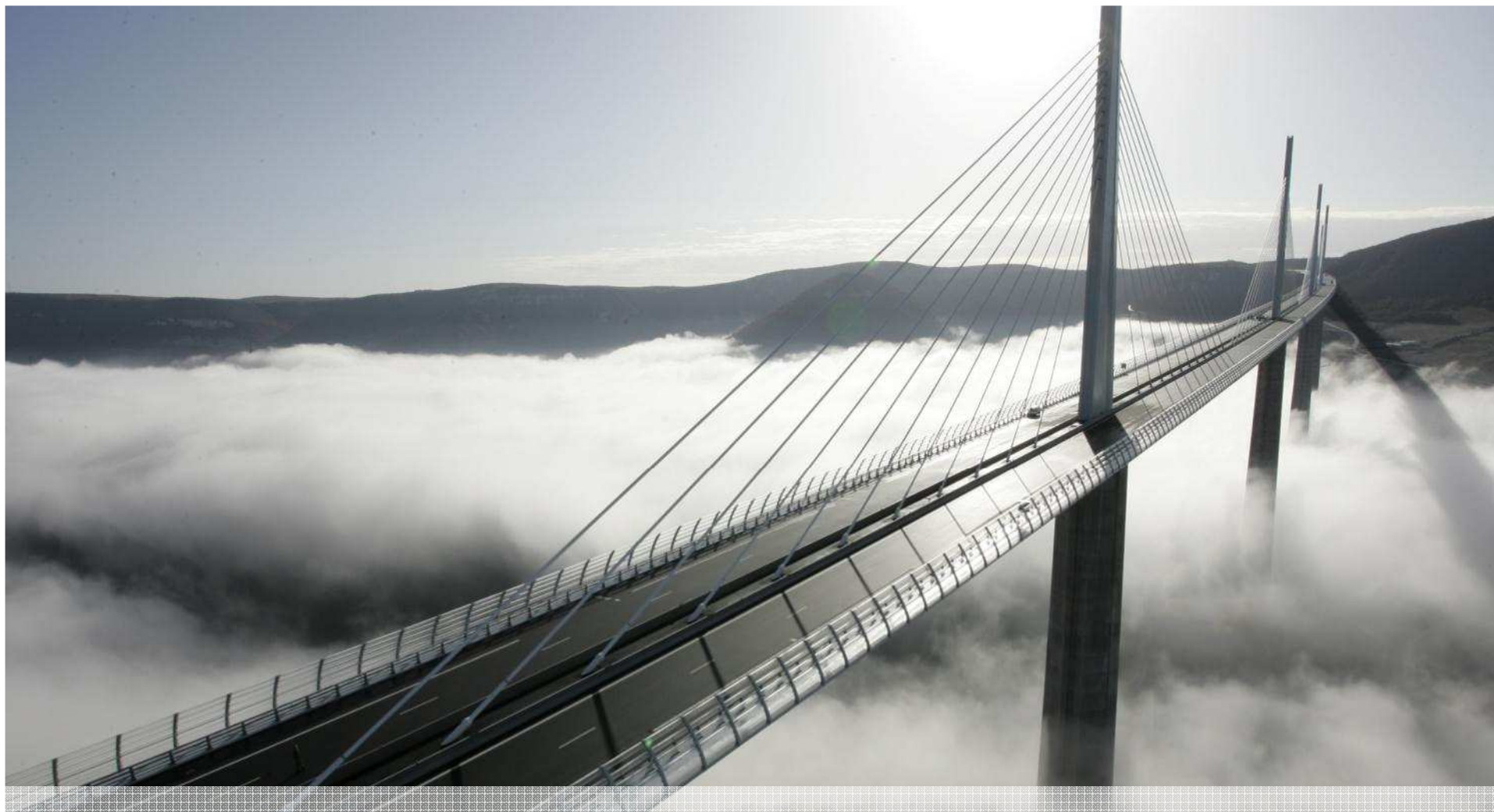




Savoir faire la différence

Savoir faire **la différence**



## **DIX ANS DE MONITORING STRUCTUREL DU VIADUC DE MILLAU**

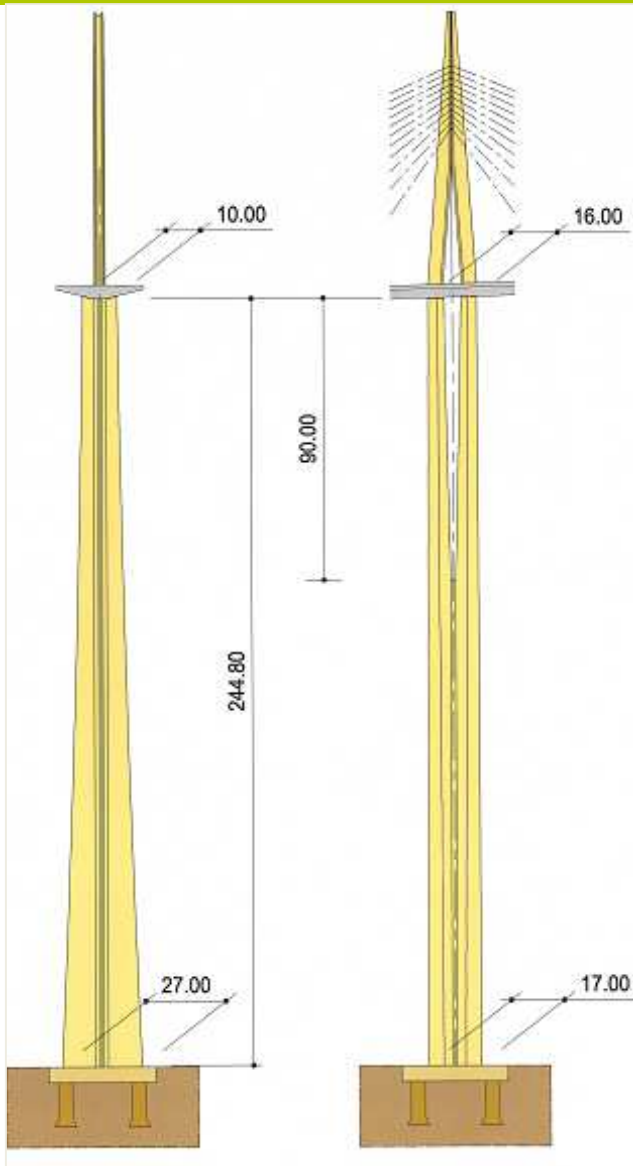
Sylvestre GALLICE  
CEVM

Hervé LANÇON  
SITES

Claude SERVANT  
EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS



## PILE P2



# LANÇAGE DU TABLIER



## OBJECTIFS DE L' INSTRUMENTATION

- L' annexe 10 du cahier des charges du contrat de concession fait apparaître le différentes étapes du suivi de l'ouvrage
  - les phases de construction
  - la réception
  - le suivi du comportement en service
- En cours de construction, il faut distinguer deux types de mesures :
  - celles nécessaires pour contrôler la construction elle-même (par ex: nivellement des appuis et suivi de leurs mouvements, contrôle du nivellement du tablier en cours de lançage).
  - celles permettant de vérifier que le comportement de l' ouvrage est conforme aux prévisions des calculs.

# Instrumentation du viaduc

| Mesure de...                                            | Au moyen de                                           | Nombre                              | Dans le but de...                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Phase de construction</b>                            |                                                       |                                     |                                                                                                                                                      |
| Déformation du béton des fondations (semelle P2)        | Extensomètre à fibres optiques                        | 8                                   | Mesurer l'impact des contraintes de cisaillement à la suite de l'exothermie et du retrait du béton des semelles                                      |
| Géométrie de la structure                               | Station totale et prismes optiques                    | 141                                 | Contrôler la position des repères                                                                                                                    |
| Position du coffrage glissant                           | GPS différentiel (DGPS)                               | 1                                   | Contrôler la position des coffrages                                                                                                                  |
| Déplacement vertical et rotation des fondations         | Nivellement optique à haute précision de 4 repères    | 4 cibles / semelle                  | Comparer le tassement et la rotation des fondations sous la charge croissante de la pile dans le temps                                               |
| Déformation thermique des piles (P2 et P6)              | Capteurs de température dans le béton                 | 103                                 | Comparer les déplacements horizontaux des piles aux résultats d'une simulation numérique                                                             |
| <b>Lançage du tablier</b>                               |                                                       |                                     |                                                                                                                                                      |
| Vitesse et orientation vent                             | Anémomètre à ultrasons                                | 1 + 1 de secours                    | Mesurer la vitesse du vent, la comparer aux seuils d'alerte et de vigilance                                                                          |
| Position du tablier                                     | Station totale et DGPS                                | 1                                   | Comparer les positions théoriques et réelles du tablier                                                                                              |
| Déformation des âmes du tablier (patch-loading)         | Capteurs de déplacement sur dispositif fixe et mobile | 36                                  | Mesurer les déplacements de l'âme entre deux diaphragmes d'un segment de tablier se déplaçant sur une pile ou palée                                  |
| Mouvements dynamiques du tablier et du pylône           | Accéléromètres                                        | 7 sur tablier, 1 sur pylône         | Contrôler les accélérations pendant le lancement                                                                                                     |
| Déplacement en temps réel et torsion des têtes de palée | Télémètres laser                                      | 5                                   | Contrôler les déplacements des palées provisoires                                                                                                    |
| Déplacement en temps réel des têtes de pile             | Dispositif d'alignement au laser                      | 1 par pile                          | Contrôler les déplacements des têtes de pile pendant le lancement (avec seuil d'alerte)                                                              |
| Efforts dans les haubans                                | Cellule de force                                      | 4                                   | Contrôler les variations d'efforts dans les haubans pendant le lancement                                                                             |
| <b>Phase d'exploitation</b>                             |                                                       |                                     |                                                                                                                                                      |
| Température                                             |                                                       | 27                                  | Mesurer la température des tôles en acier pour déterminer son impact sur le tablier. Calculer les corrections thermiques à appliquer aux simulations |
| Vitesse, direction et turbulence du vent                | Anémomètres à coupelles et à ultrasons                | Ultrasons 1<br>A coupelles 2        | Mesurer la vitesse et la direction du vent pour déterminer son impact sur pylônes, haubans, tablier et piles                                         |
| Rotations                                               | Inclinomètres                                         | Pylônes 2<br>Piles 2                | Mesurer les rotations de la structure                                                                                                                |
| Déformation                                             | Extensomètres                                         | 52                                  | Mesurer la déformation du béton des piles, essentiellement pour déterminer le fluage du béton (P2, P7)                                               |
| Vibrations                                              | Accéléromètres                                        | Tablier 6<br>Pylônes 3<br>Haubans 3 | Mesurer l'amplitude et la fréquence des oscillations et vibrations (effets du vent)                                                                  |



## PHASES DE RECEPTION ET D'EXPLOITATION

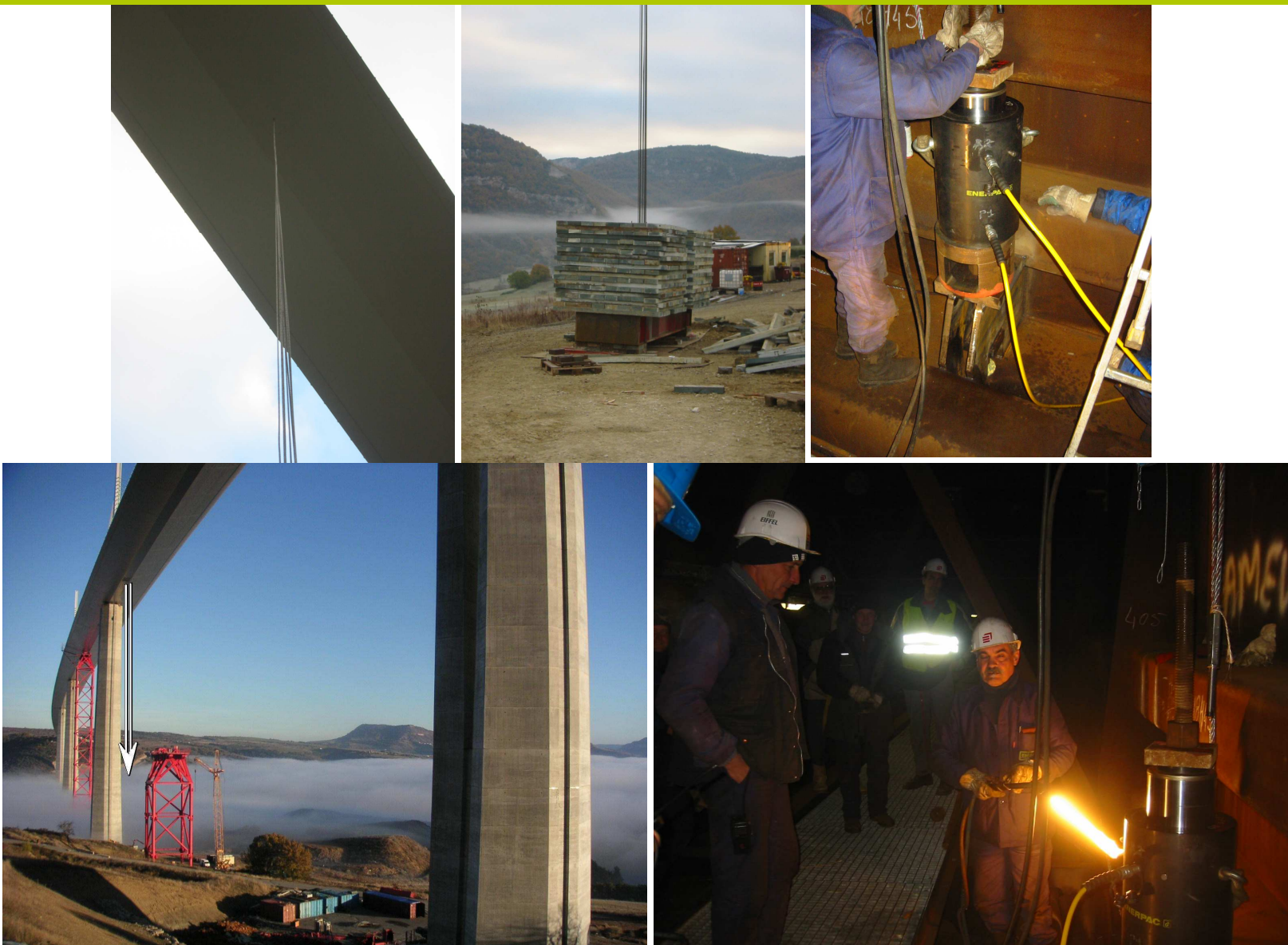
- La réception de l'ouvrage permet de faire les « points zéro » et ainsi d'établir un dossier de référence qui sera la base du suivi ultérieur (détermination des périodes propres de l'ouvrage et des caractéristiques d'amortissement).
- Le suivi de l'ouvrage en service doit distinguer trois objectifs fondamentalement différents :
  - contrôle en permanence des conditions d'exploitation de l'ouvrage pour assurer la sécurité du trafic et des usagers
  - contrôle du vieillissement de l'ouvrage
  - contrôle du comportement de l'ouvrage en service afin de s'assurer qu'il est conforme aux prévisions (actions de durée limitée – cf. pont de Normandie)

## Phase de Réception

### ➤ *Les essais de chargements statiques*



## Dispositif de mesure de l'excitation impulsionnelle du tablier



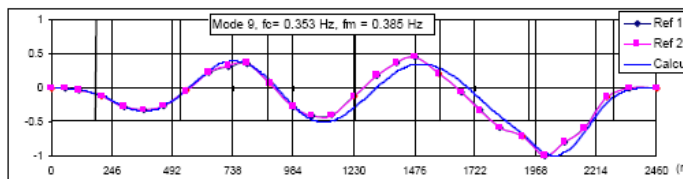
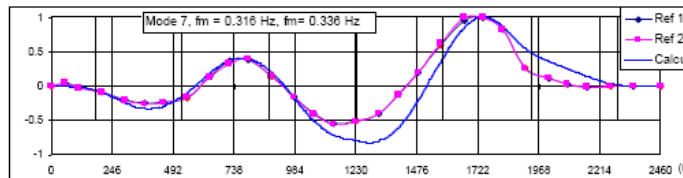
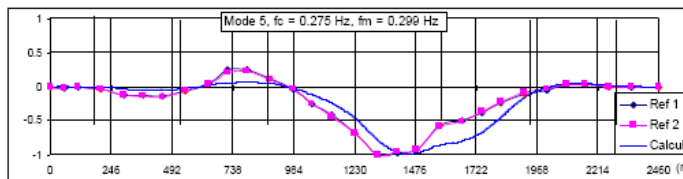
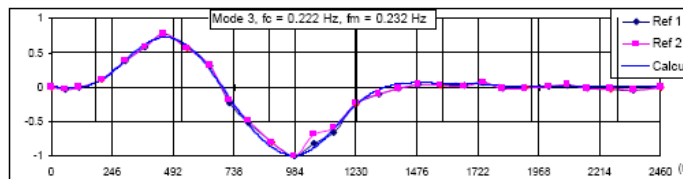
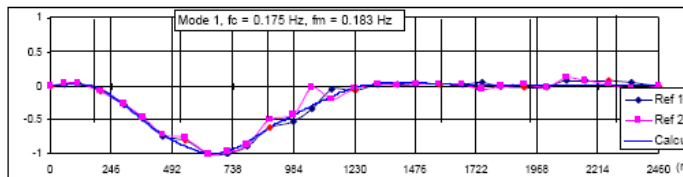
## Phase de Réception

- **Comparaison des fréquences mesurées et calculées pour les 14 premiers modes verticaux du tablier**

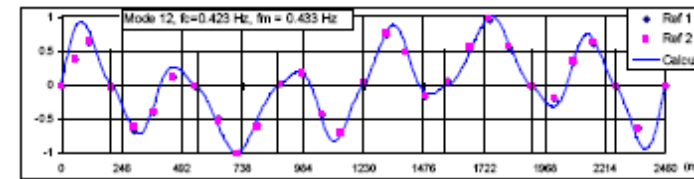
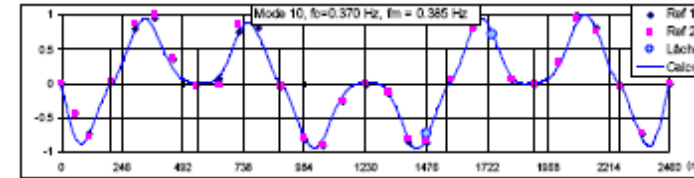
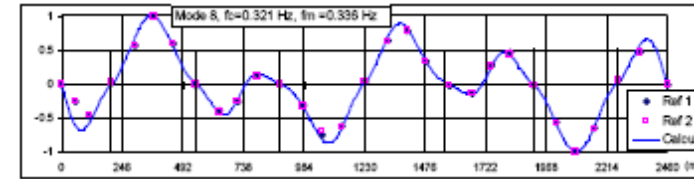
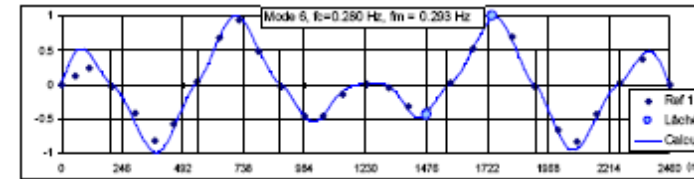
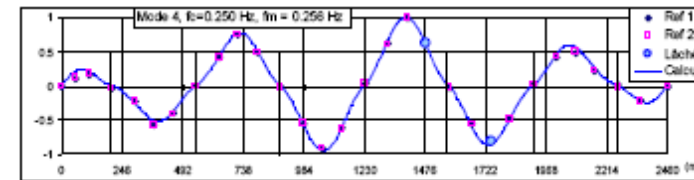
| Modes propres verticaux | Fréquence calculée<br>$F_c$ [Hz] | Fréquence mesurée<br>$F_m$ [Hz] |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 4                       | 0,250                            | 0,256                           |
| 6                       | 0,280                            | 0,293                           |
| 8                       | 0,321                            | 0,336                           |
| 10                      | 0,370                            | 0,385                           |
| 12                      | 0,423                            | 0,433                           |
| 15                      | 0,474                            | 0,494                           |
| 17                      | 0,532                            | 0,549                           |
| 21                      | 0,589                            | 0,604                           |
| 26                      | 0,639                            | 0,653                           |
| 28                      | 0,685                            | 0,702                           |
| 29                      | 0,725                            | 0,748                           |
| 32                      | 0,766                            | 0,762                           |
| 34                      | 0,797                            | 0,815                           |
| 36                      | 0,818                            | 0,833                           |

# Phase de Réception

## ➤ Déformées modales des premiers modes du tablier



Modes transversaux

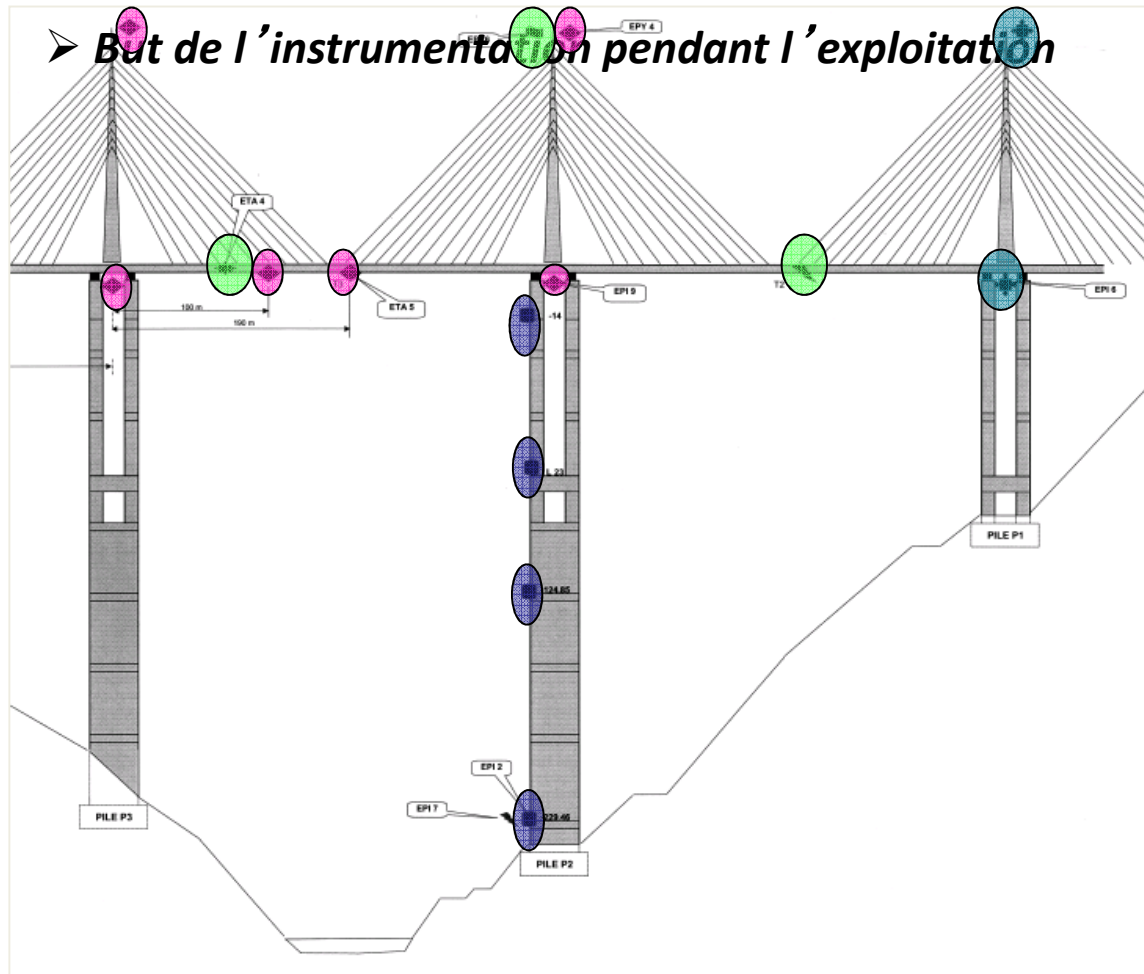


Modes verticaux

# Phase d'exploitation

## ➤ Monitoring

### ➤ But de l'instrumentation pendant l'exploitation



- **Température du tablier**

oitation:

- **Effets du vent**

- **Mesures d'exploitation liées à la météorologie**

- **Déshumidification du tablier**

- **Enregistrement du trafic**

- **Vitesse et direction du vent**  
(comptage, pesée des essieux)
- **Visibilité**

porte

- **Température et hygrométrie de**

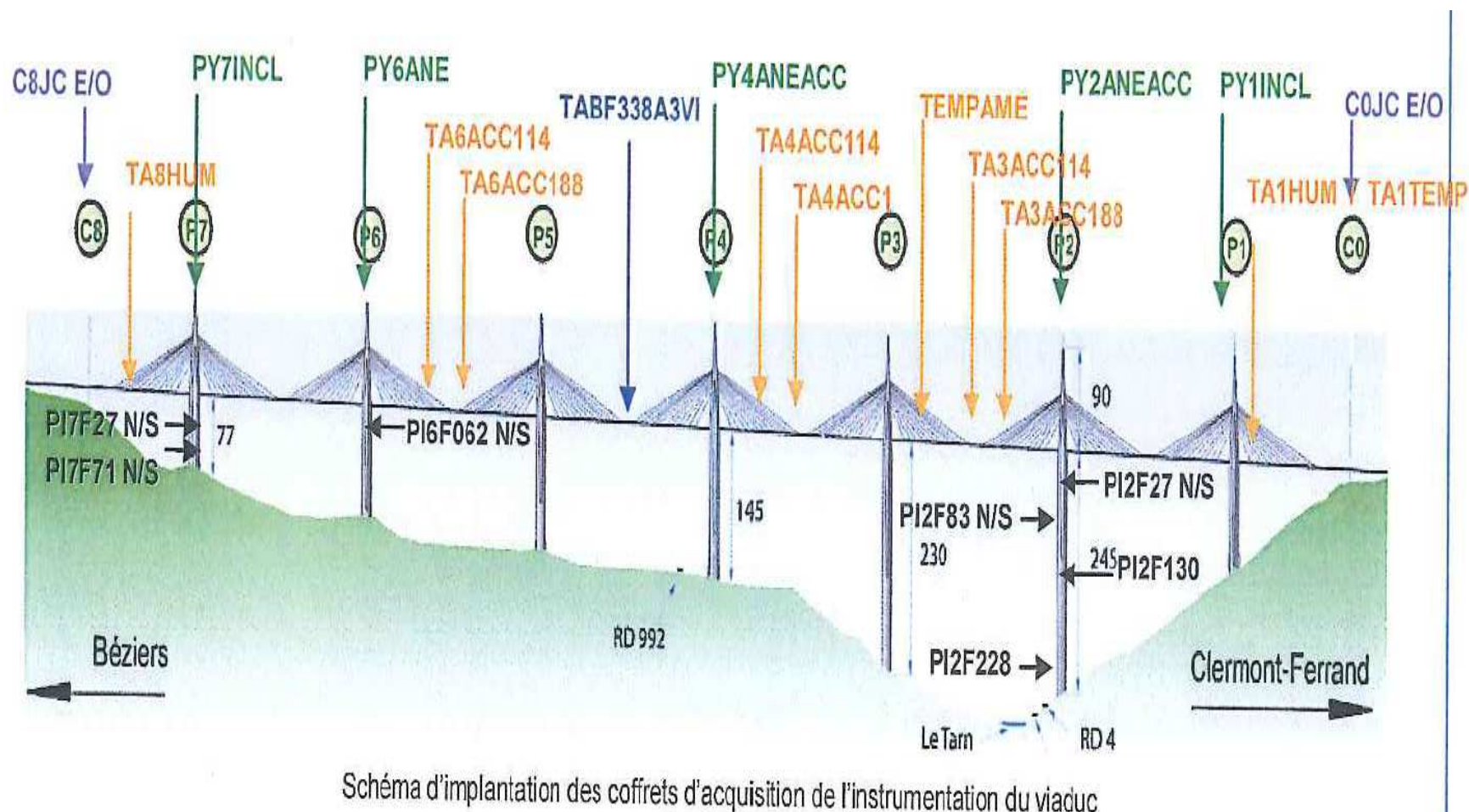
- **l'air ambiant** extensomètres,

- **Précipitations (pluie, neige)**

- **Détection du verglas**

**Température de surface et état de la  
chaussée Surveillance du trafic  
(système vidéo et caméras)**

## Schéma d'implantation des coffrets d'acquisition de l'instrumentation du viaduc

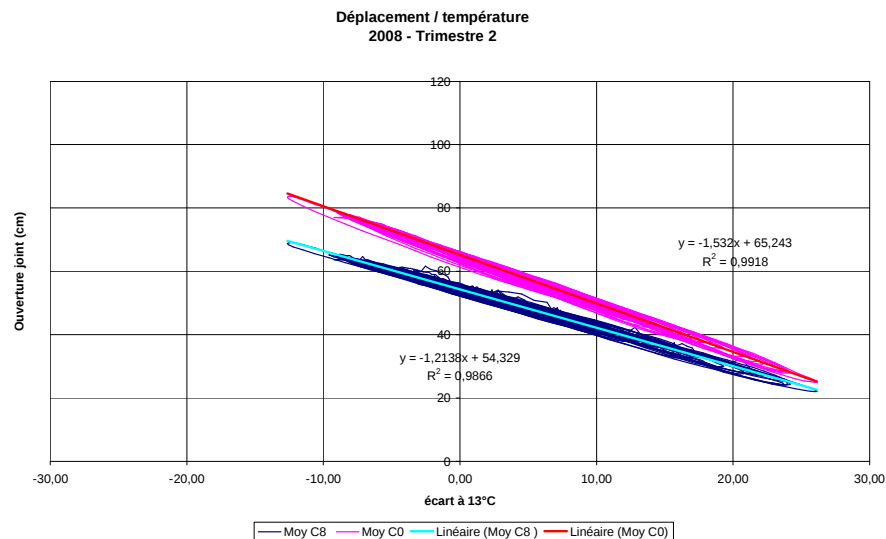




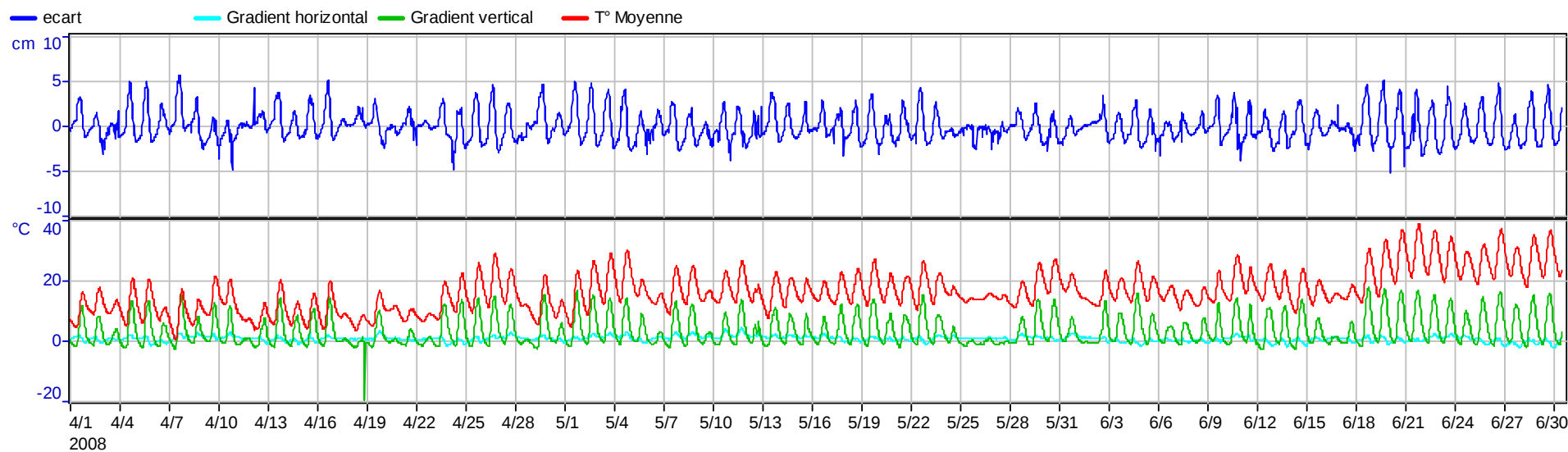
## PC d'exploitation



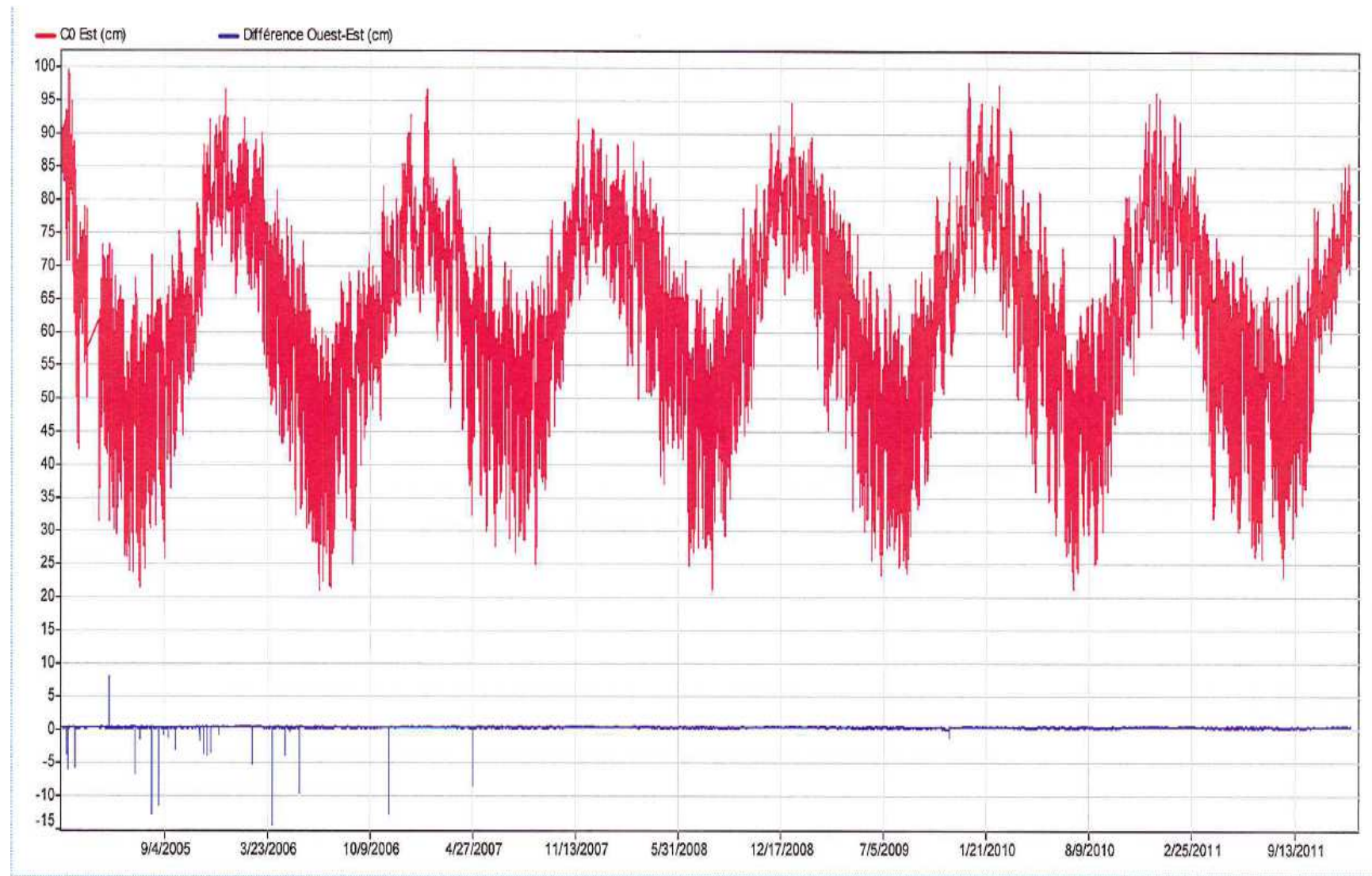
# Joint de chaussée : déplacement / température sur 1 trimestre



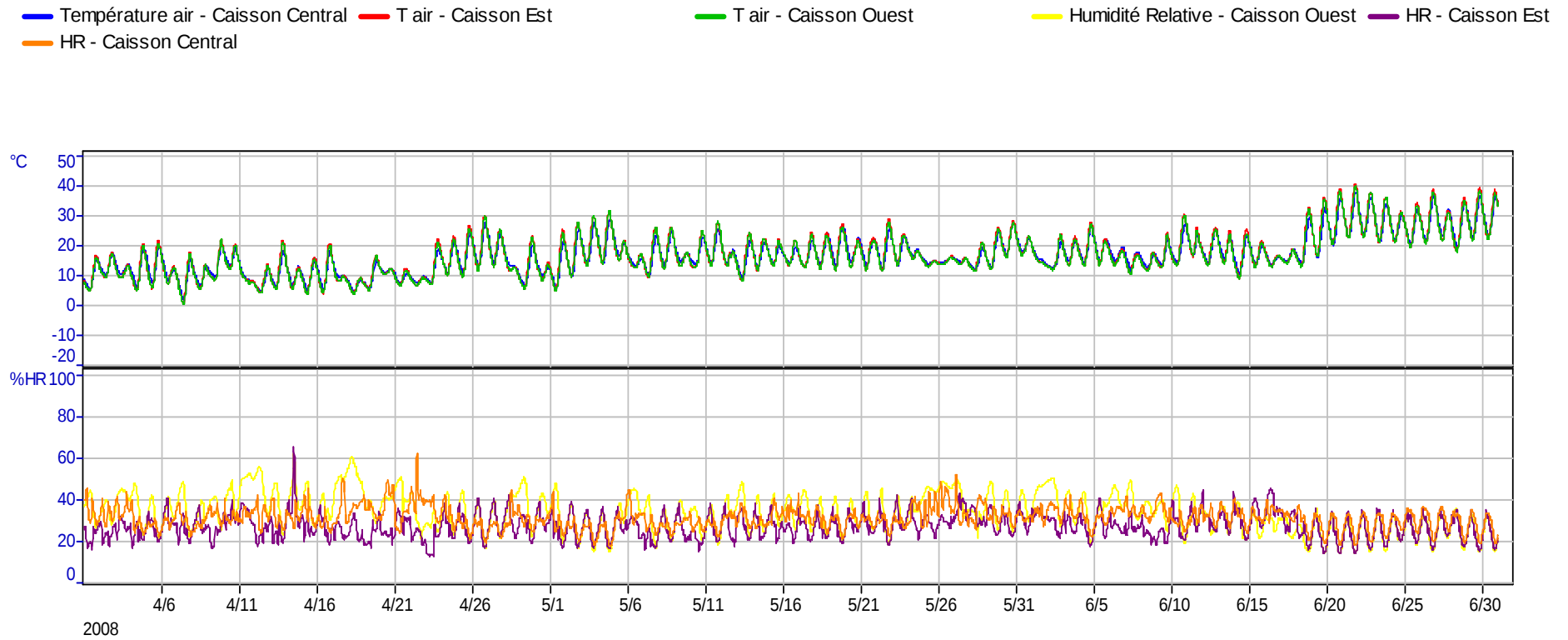
| TRIMESTRE 2 - 2008           |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Pour Long fixe entre Causses | 2464 m          |
| Longueur tablier à 13°C      | 2462,80 m       |
| Coef dilatation équivalent : | 1,11E-05 m/m/°C |
| Ouverture joint C0 à 13°C    | 65,2 cm         |
| Ouverture joint C8 à 13°C    | 54,3 cm         |
| Position PF / C0             | 1374,12 m       |



## Evolution du souffle du joint de chaussée sur culée C0



# Température et humidité relative du tablier



## PHASE D'EXPLOITATION

- *Le suivi des ouvrages géotechniques*
- *Le suivi des effets de température*
- *Le suivi des effets du vent*
- *Le suivi géométrique de l'ouvrage*

## LE SUIVI DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

- 1) Examens visuels au cours de 2 visites annuelles depuis 2007
- 2) Mesures des mouvements des grands remblais de P1 et P3
- 3) Mesures mouvements des murs en sol cloué de P3 et P7
- 4) Mesures sur les inclinomètres profonds (stabilités des versants)
- 5) Mesures des tassements des semelles des piles par nivellement

# LE SUIVI DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES



# Mur de soutènement de la plateforme P7

## Résultats des premières mesures de corrosion et conclusion

Programme d'extraction de barres : 2 barres tous les 2 ans les 4 premières années, puis 2 barres tous les 4 ans, soit en 2010, 2012, 2016, 2020, 2024 ,2028.

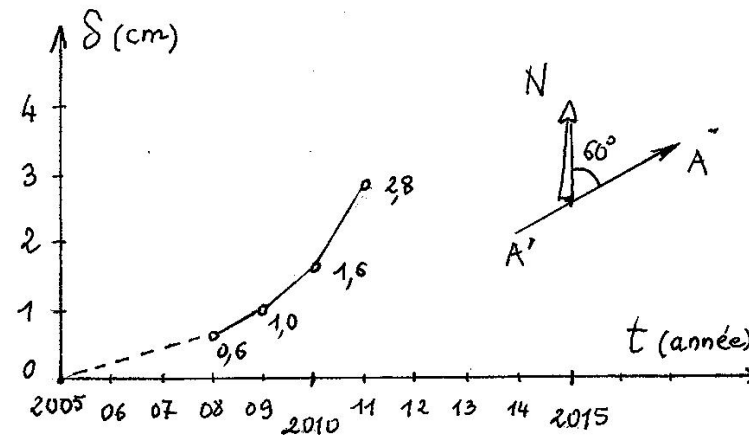
Barres déjà extraites : n° 1 et 9 (2010), n° 3 et 12 (2012).

Résultats :les mesures de 2010 et 2012 ont montré des épaisseurs corrodées très faibles et en-dessous de la limite de validité des mesures.

### Conclusion.

**Compte tenu de la très faible corrosion obtenue en 4 ans, on peut penser qu'au bout de 15 ans de vie du mur en sol cloué, la réduction du diamètre des armatures des clous de 4 mm, soit en moyenne 0,17 mm de corrosion par an, ne sera pas encore obtenue et qu'elle n'interviendra plutôt qu'au bout de 30 ans de la vie du mur.**

# Inclinomètre I7P7 et conclusion générale



*Evolution défavorable de l'inclinomètre I7P7 entre 2008 et 2011*

## Conclusion générale

La quasi-totalité des mesures inclinométriques ne montre pas d'évolution défavorable. Sauf un très faible mouvement à -26 m de profondeur sur I2P1 et une accélération sensible du déplacement observé depuis 2008 sur I7P7 à 3 ou 4 m de profondeur. Ce dernier est à surveiller de près : il pourrait être l'indice de la reprise de l'ancien glissement de versant en 2002.

# Tassements des piles et des culées

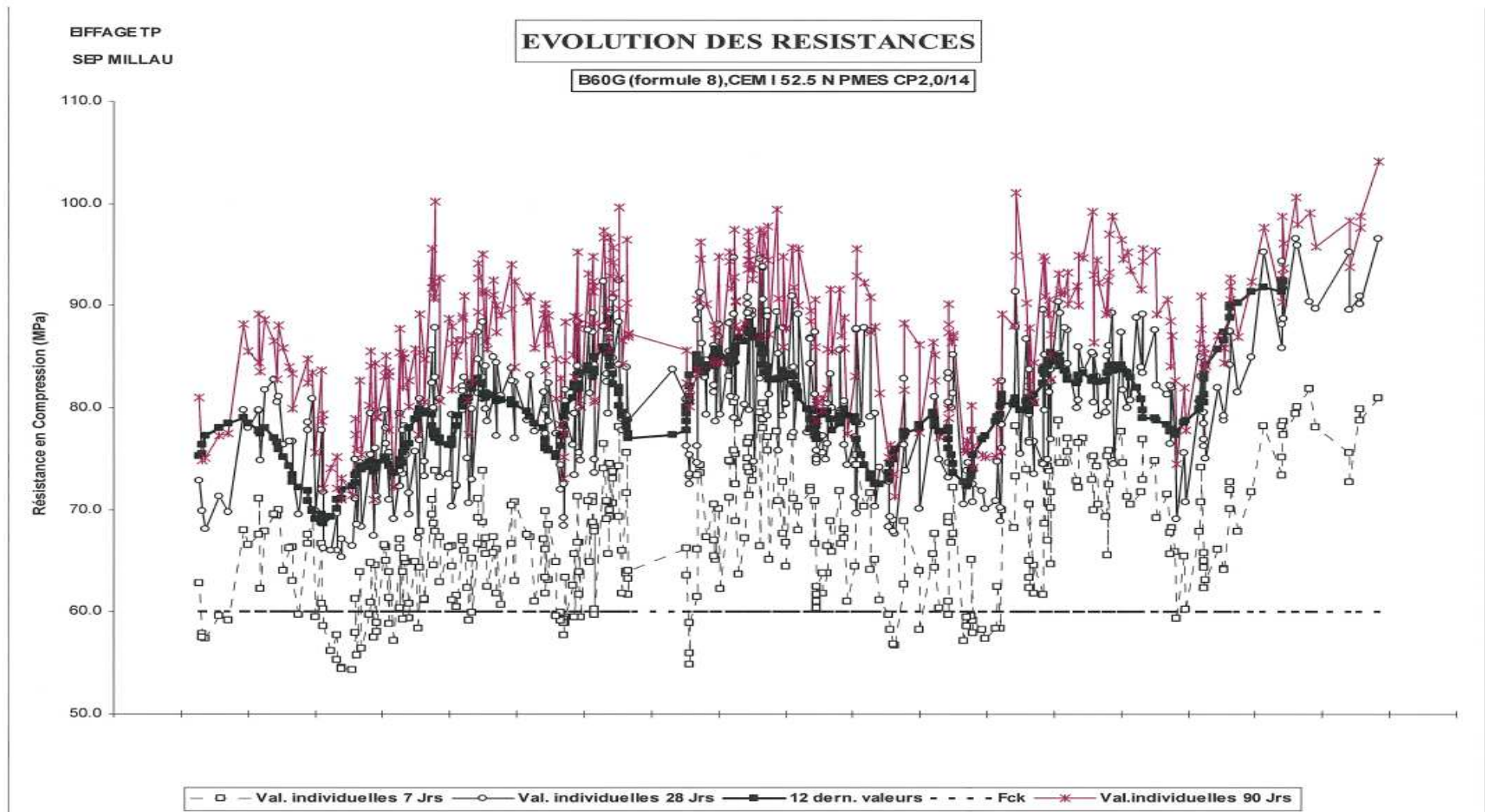
|                                                                               | déc.2006 Origine* | Nov. 2007 | Déc. 2008 | Janv. 2010 | Oct. 2010 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| C0                                                                            | s = 0 mm          | + 0,4     | + 1,0     | + 1,4      | + 2,2     |
| P1                                                                            | s = 0 mm          | - 1,3 *   | + 0,1     | + 0,5      | - 0,4     |
| P2                                                                            | s = 0 mm          | - 0,2     | - 0,4     | + 0,7      | + 0,6     |
| P3                                                                            | s = 0 mm          | - 1,5     | - 1,2     | - 1,0      | - 0,8     |
| P4                                                                            | s = 0 mm          | + 0,7     | + 0,5     | + 1,2      | + 1,4     |
| P5                                                                            | s = 0 mm          | + 0,2     | - 0,2     | + 1,0      | + 1,2     |
| P6                                                                            | s = 0 mm          | - 0,9 **  | - 2,0     | - 0,8      | - 0,4     |
| P7                                                                            | s = 0 mm          | - 1,2 **  | - 1,4     | + 1,2      | + 1,7     |
| C8                                                                            | s = 0 mm          | -0,1      | -0,3      | + 0,0      | + 0,1     |
| * Origine en 2007 avec les 4 repères<br>** Origine en 2008 avec les 4 repères |                   |           |           |            |           |

*Pratiquement pas de tassement depuis 2006*

## LES PARTIES D'OUVRAGE EN BETON



# Résistance du béton des piles



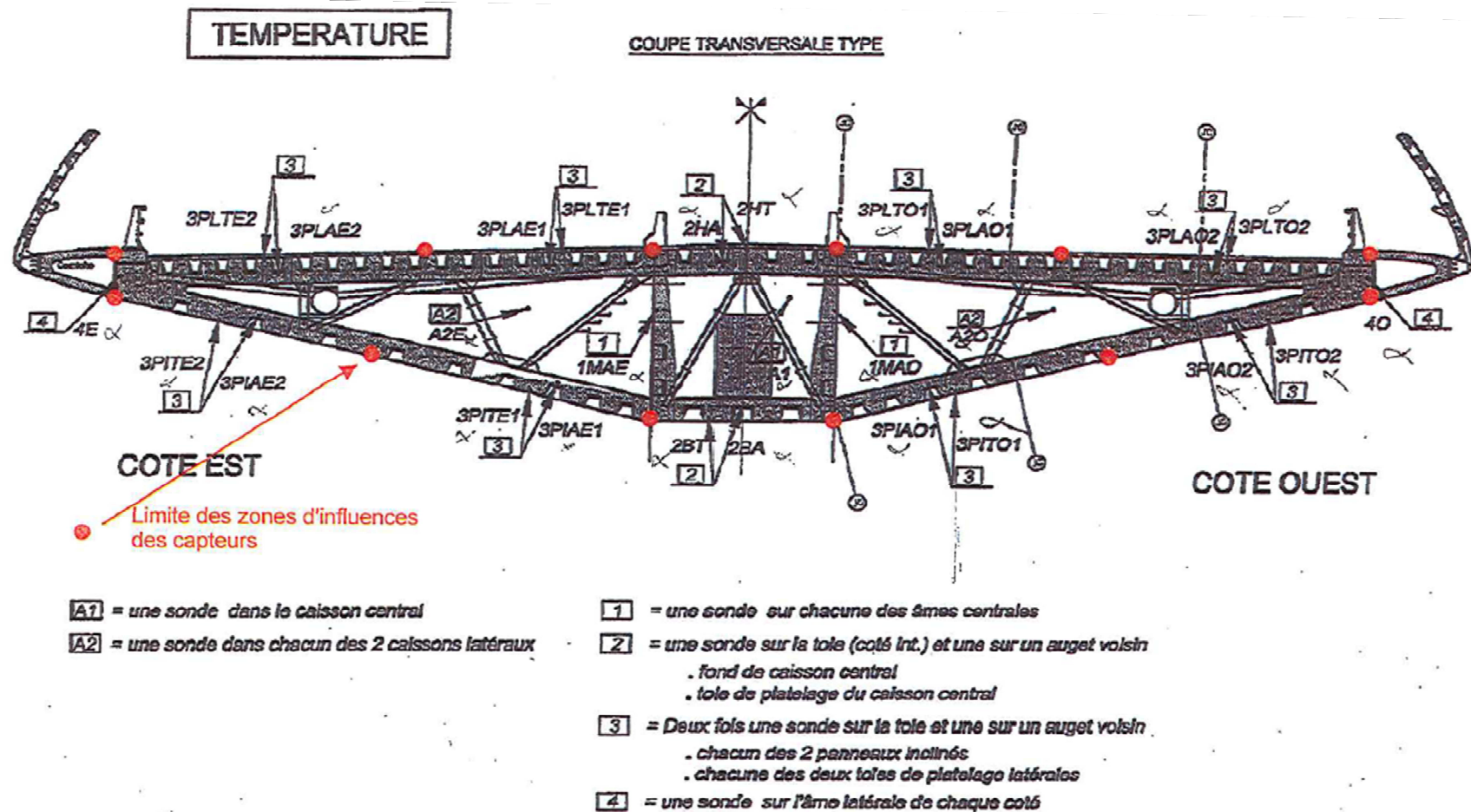
## Indicateurs de durabilité



- Perméabilité à l'oxygène :  
(mode opératoire AFPC-AFREM)  
 $10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$
- Diffusion des ions  $\text{Cl}^-$  :  
(essai TANG-LUPING en transitoire)  
 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  à 90 jours
- Porosité totale accessible à l'eau:  
Inférieure à 11 %
- Profondeur de carbonatation
- Mesures décennales sur carottes

# TEMPERATURE

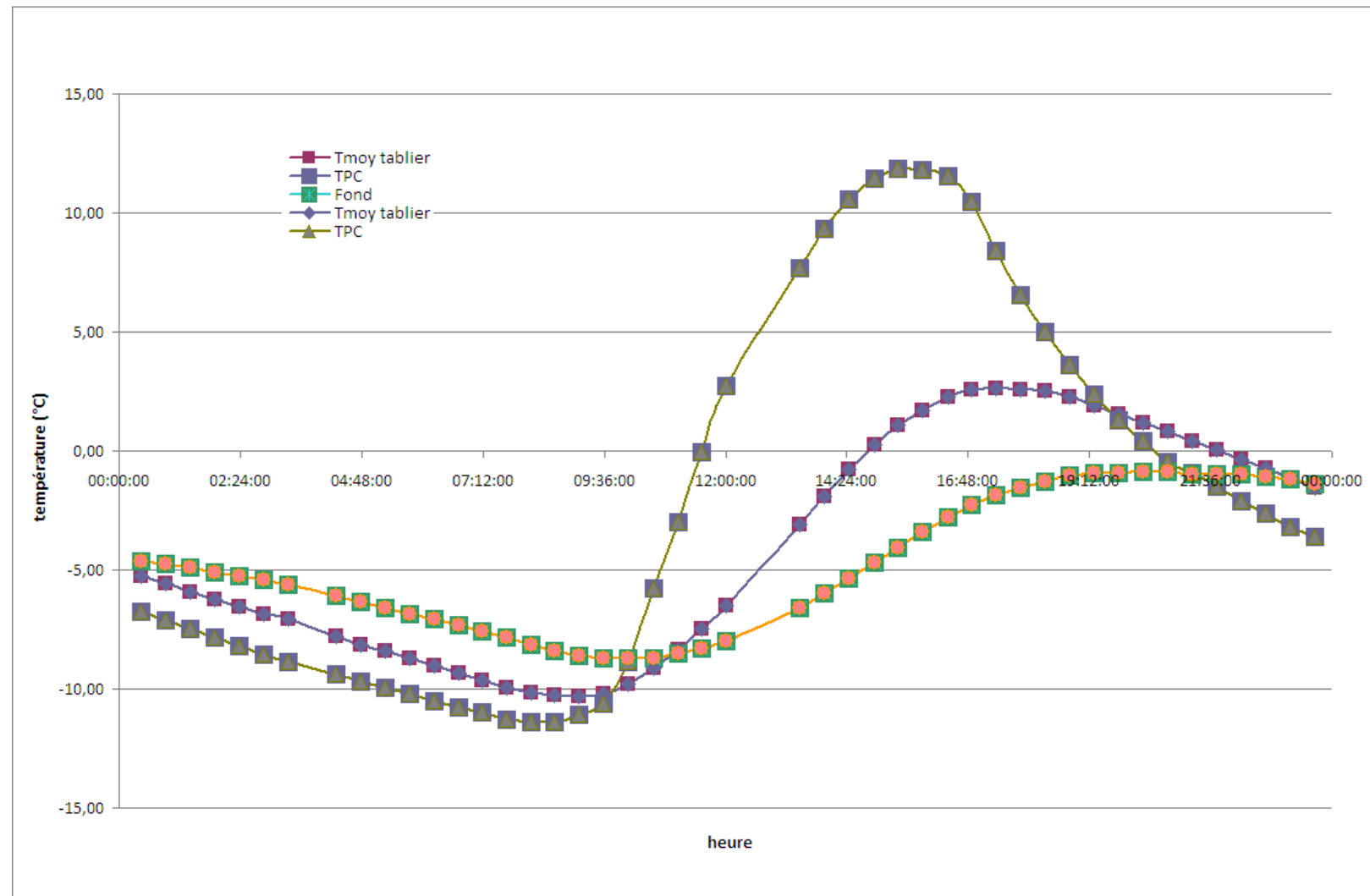
## Localisation des capteurs dans le caisson



27 capteurs de température sur une section du tablier

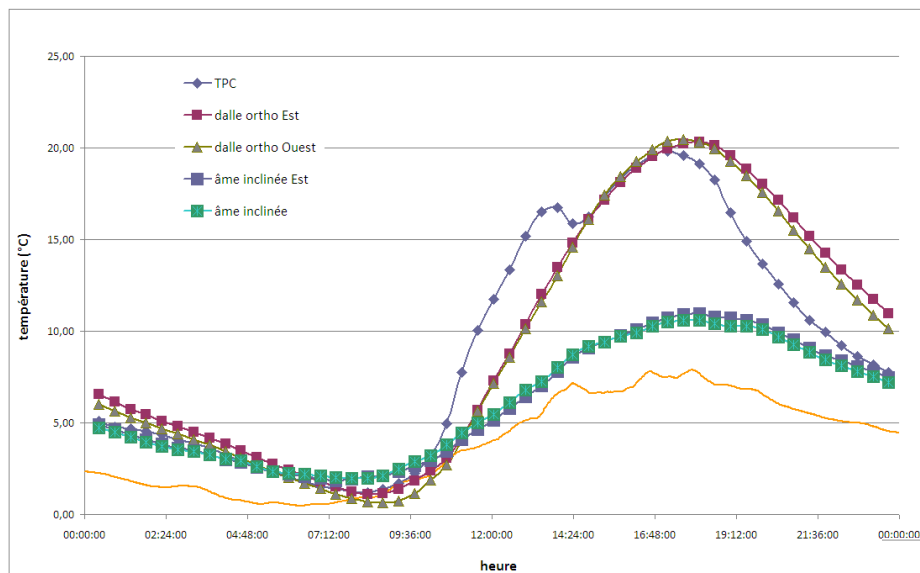
# TEMPERATURE

## Températures du caisson central en journée froide le 01 mars 2005



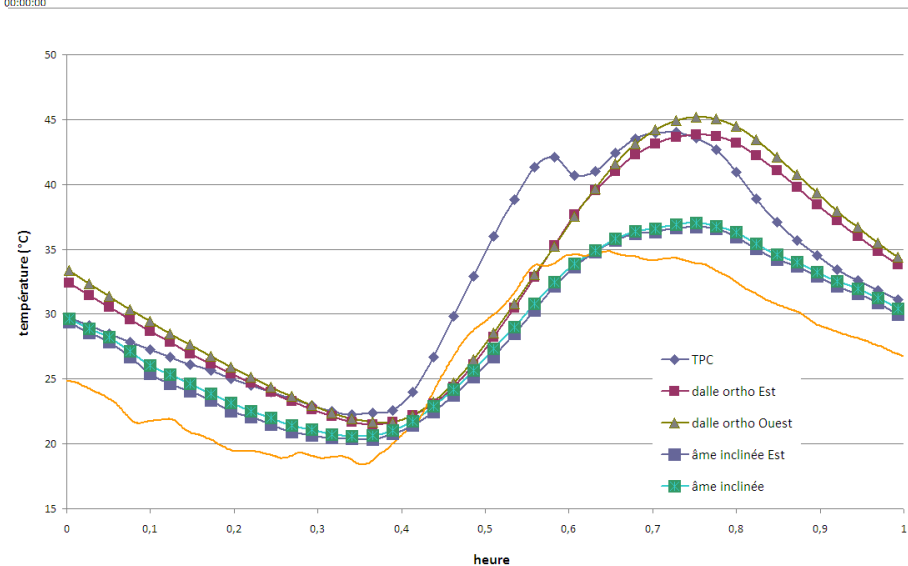
# TEMPERATURE

## Températures des tôles de surface

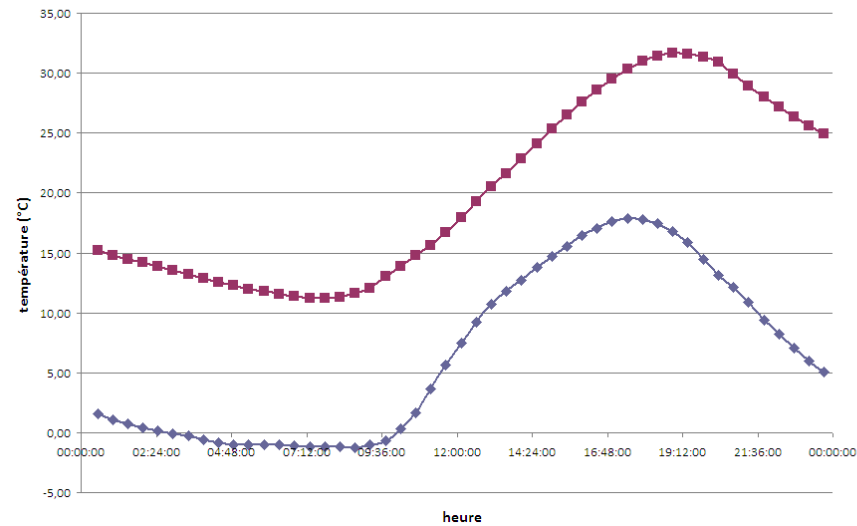


En journée froide le 11  
avril 2011

En journée chaude le  
20 août 2011

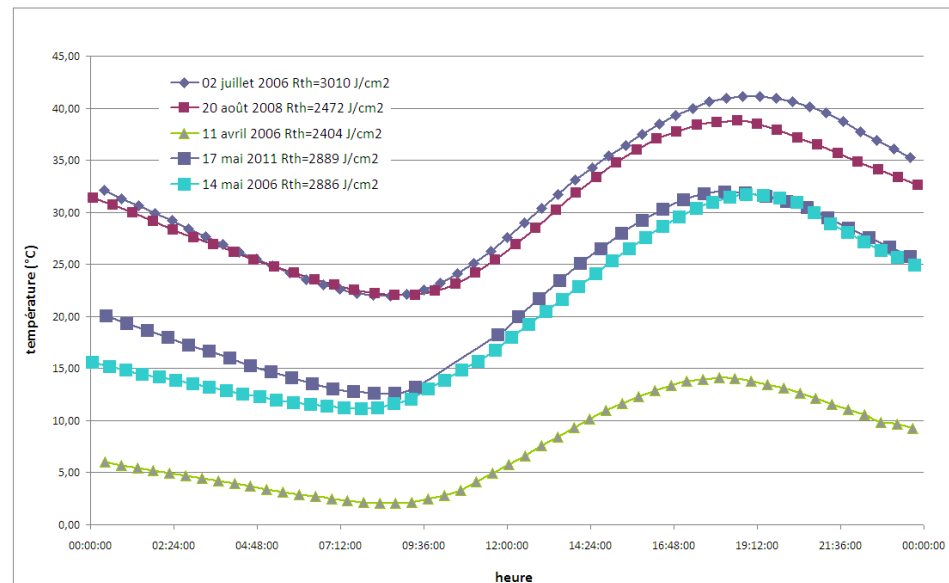


# TEMPERATURE

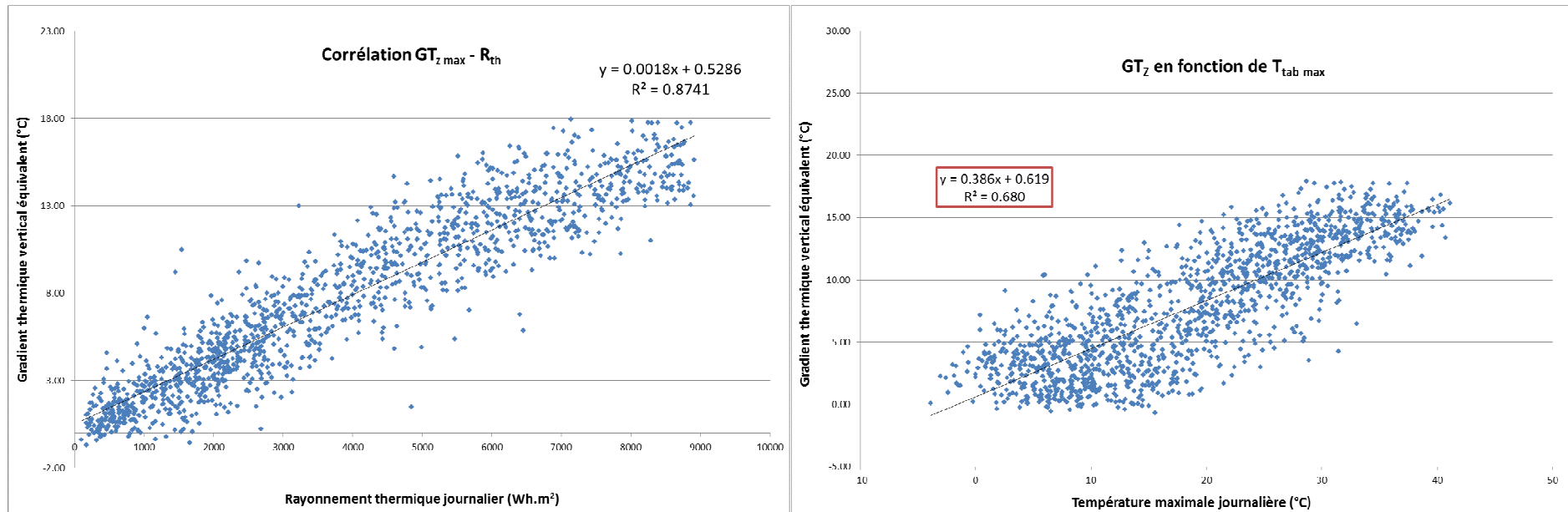


Evolution du gradient thermique vertical équivalent en fonction de la température moyenne du caisson

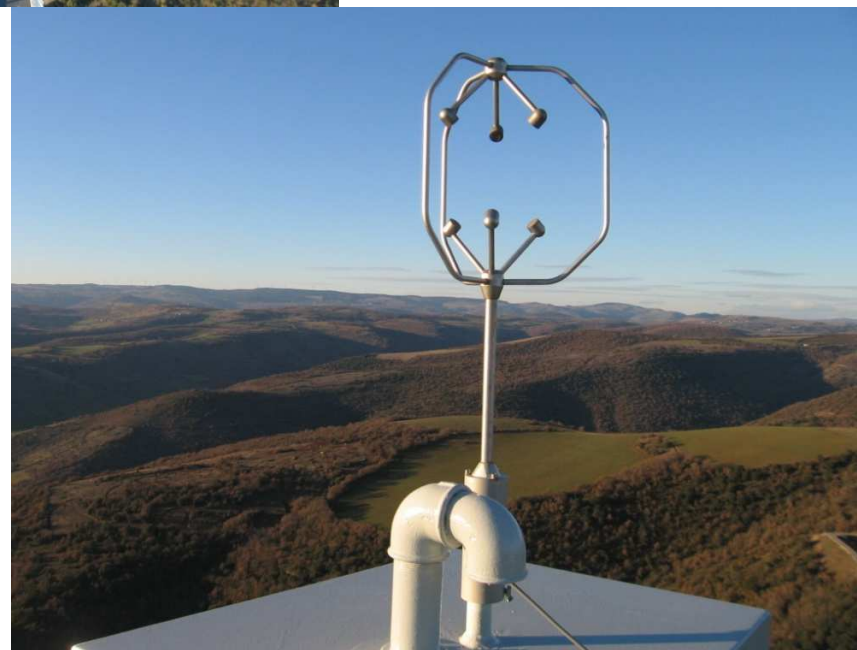
Evolution de la température moyenne du caisson sous fort rayonnement thermique



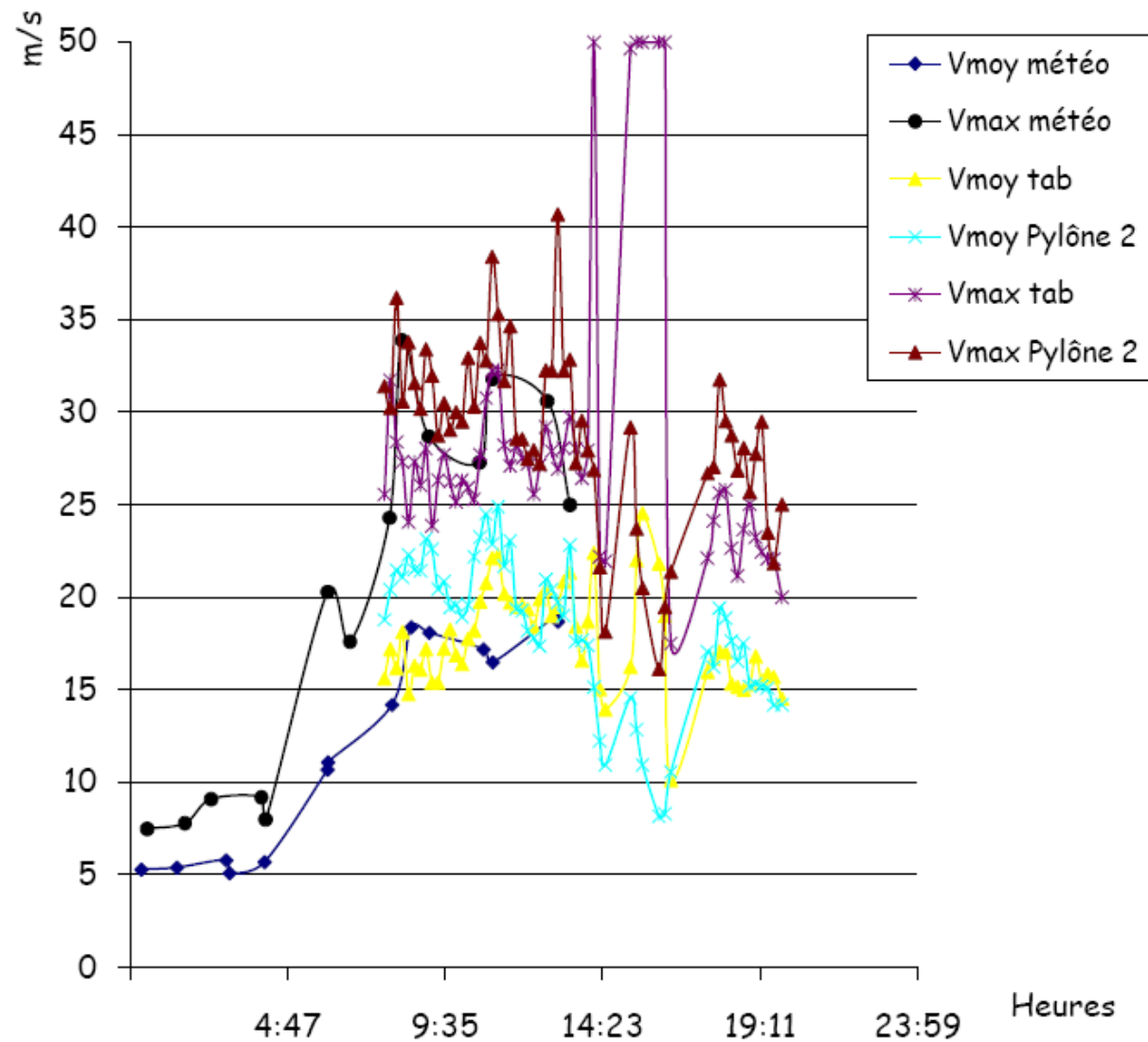
# TEMPERATURE



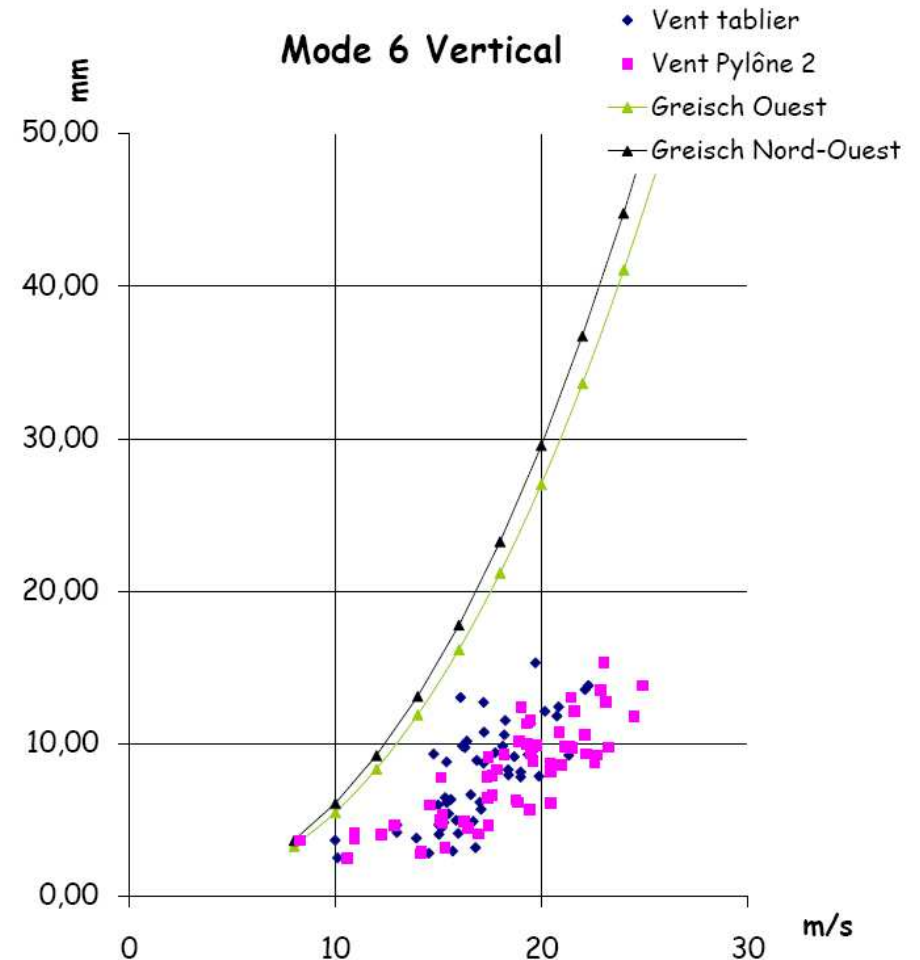
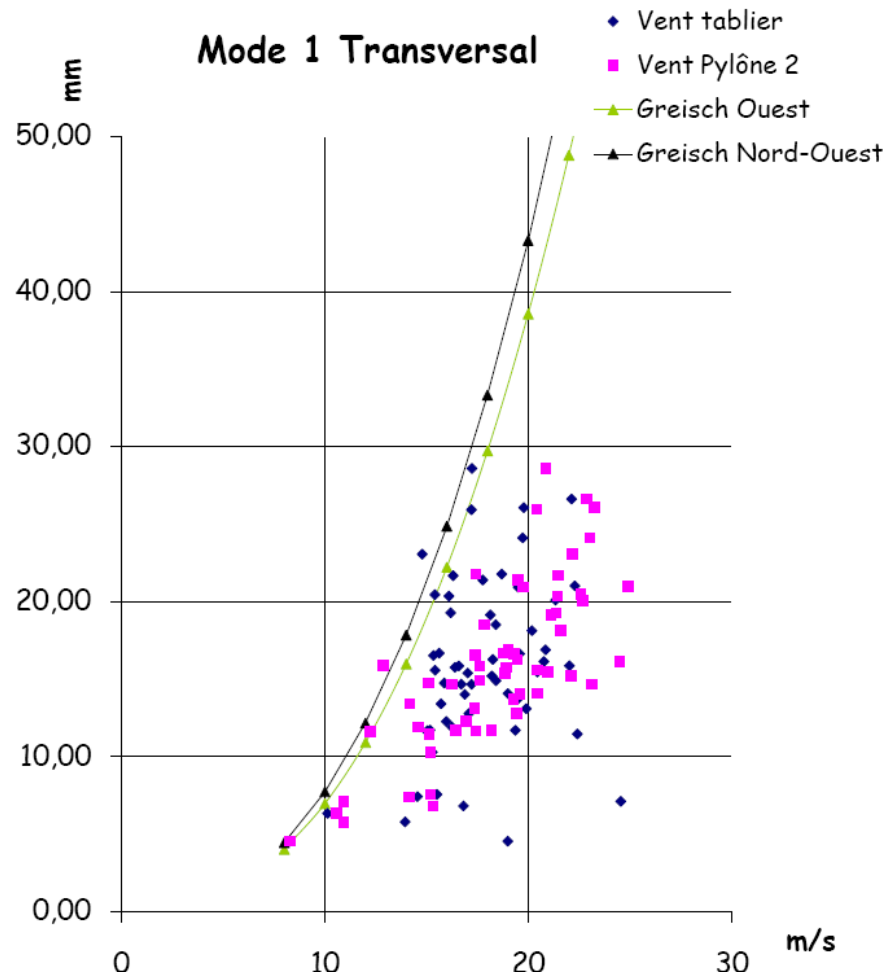
## ETUDE D'UNE SEQUENCE DE VENT FORT



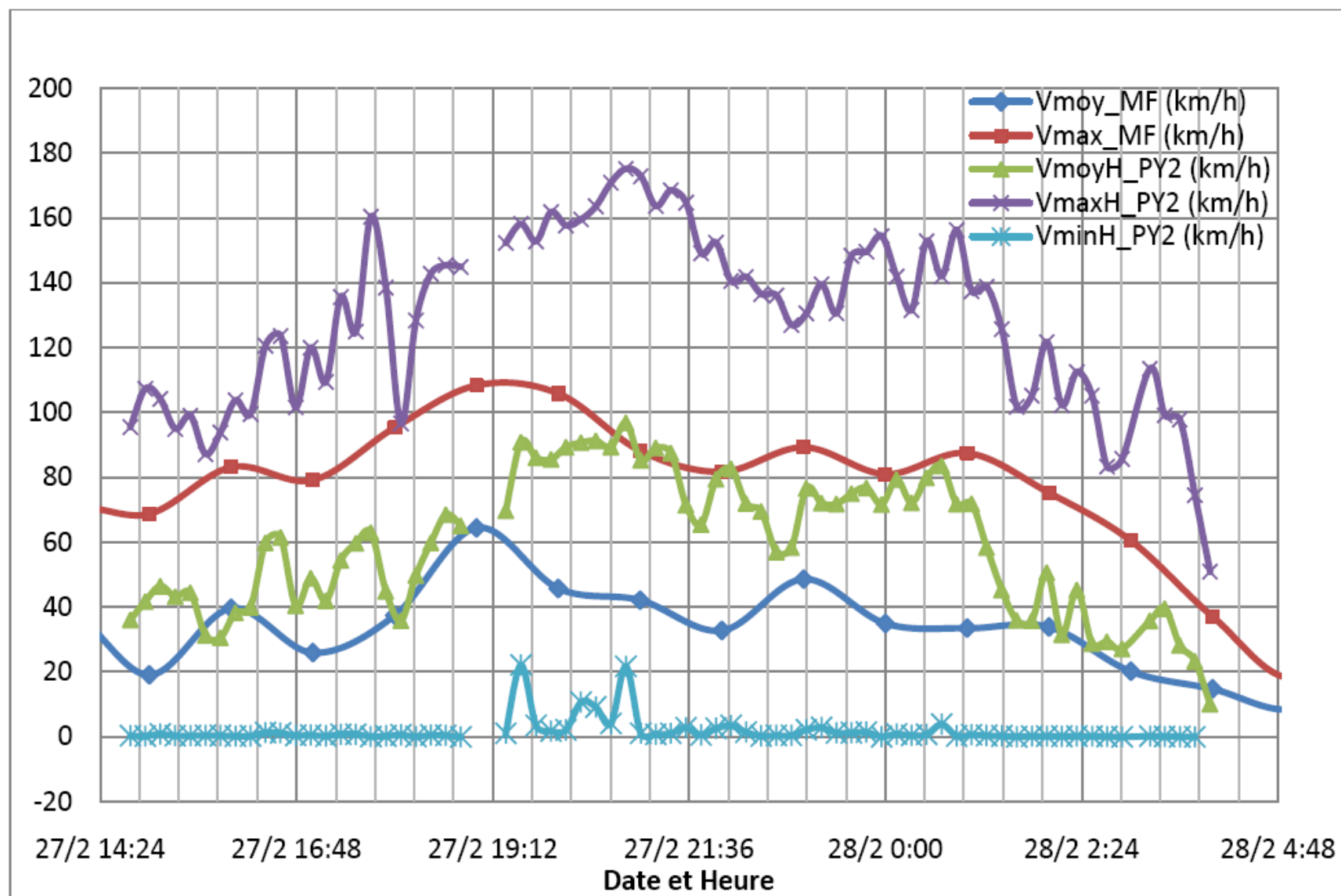
## Tempête Klaus du 24 janvier 2009, enregistrement des vitesses de vent



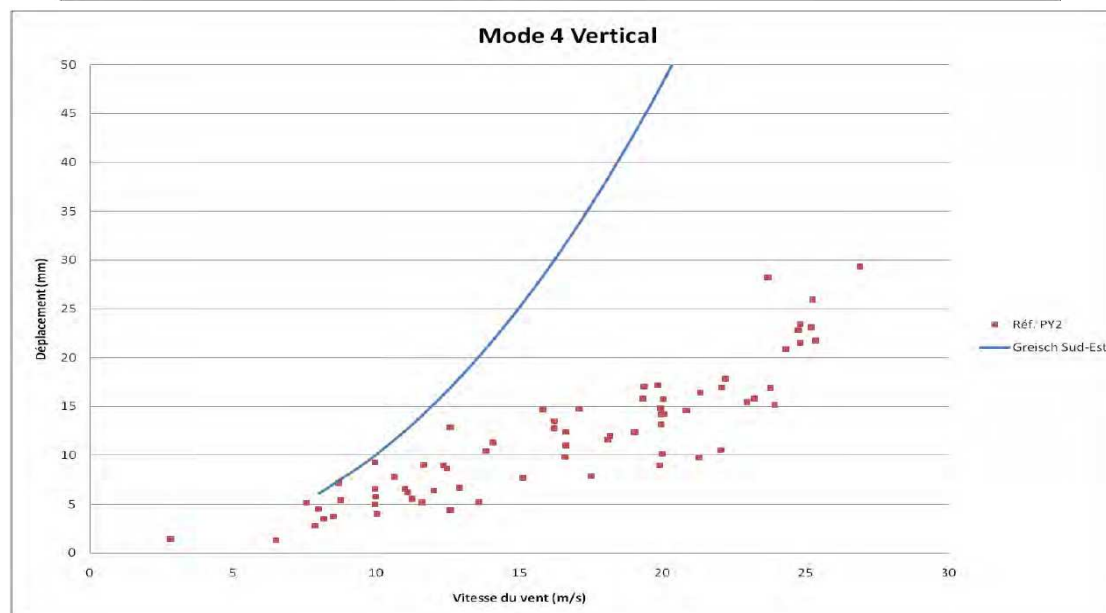
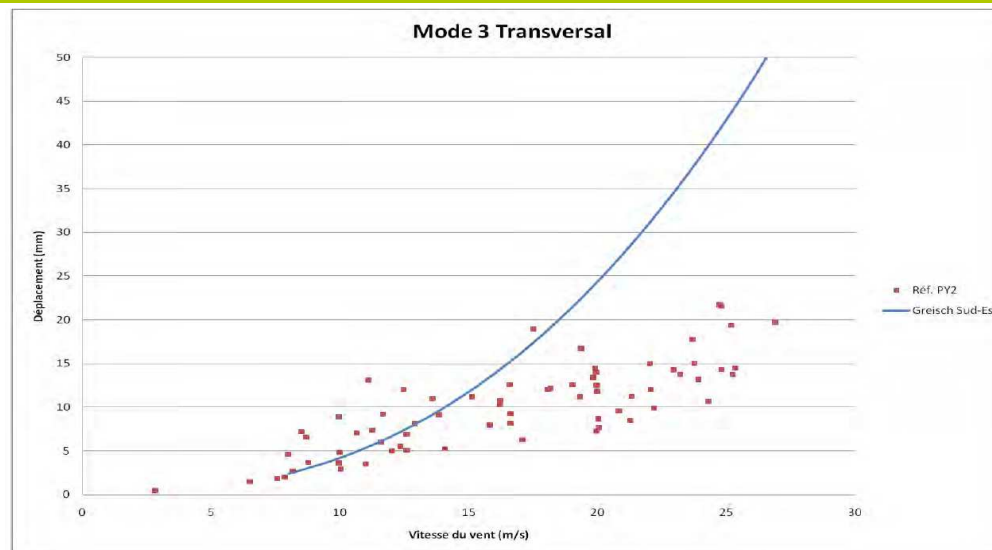
# Tempête KLAUS – Résultats pour les modes



## Tempête XYNTHIA du 27 février 2010 – enregistrement des vitesses de vent



# Tempête XYNTHIA – Résultats pour les modes



## MESURE DE L'AMORTISSEMENT DES HAUBANS



Excitateur à amplitude continûment variable en opération sur le viaduc



Mise en place des accéléromètres sur les haubans

## MESURE DE L'AMORTISSEMENT DES HAUBANS



Collier pour l'excitation  
(photo de gauche) et  
excitation manuelle des  
premiers modes  
(photo de droite)

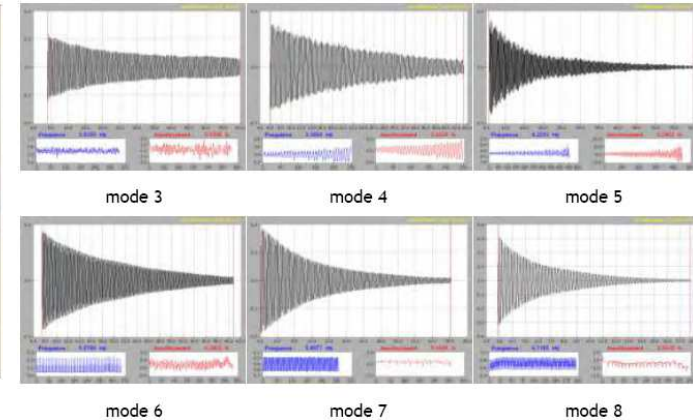


Mât anémométrique  
pour la mesure de la  
vitesse de vent en  
cours d'essais

# MESURE DE L'AMORTISSEMENT DES HAUBANS



Véhicule laboratoire: ordinateur et carte de numérisation pour l'enregistrement des données, alimentation des capteurs, filtrage analogique et analyseur de spectre temps réel



Décroissance de l'excitation du hauban P3S08: signaux temporels mesurés pour l'excitation de différents modes propres

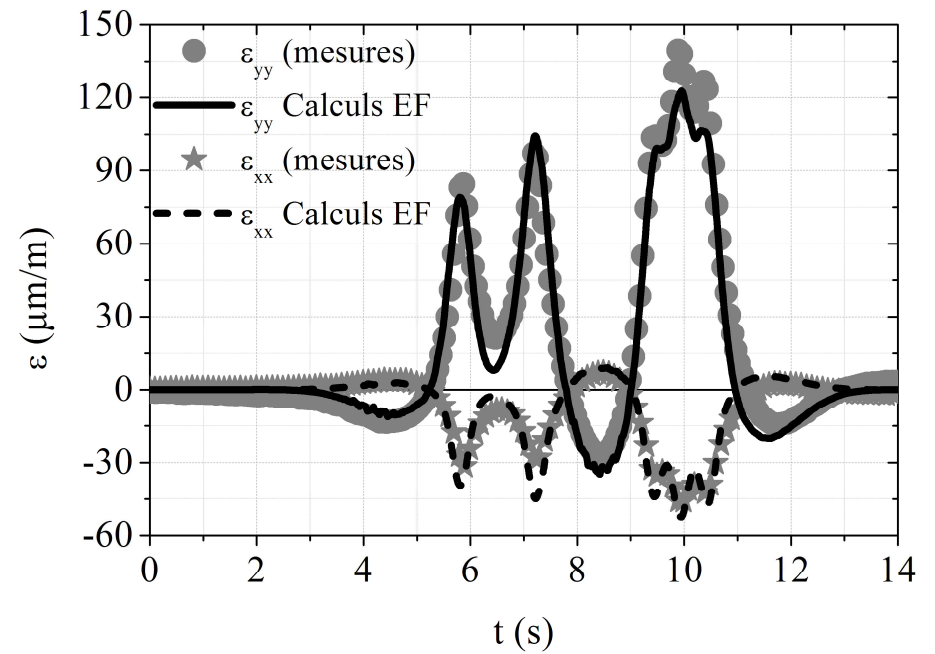
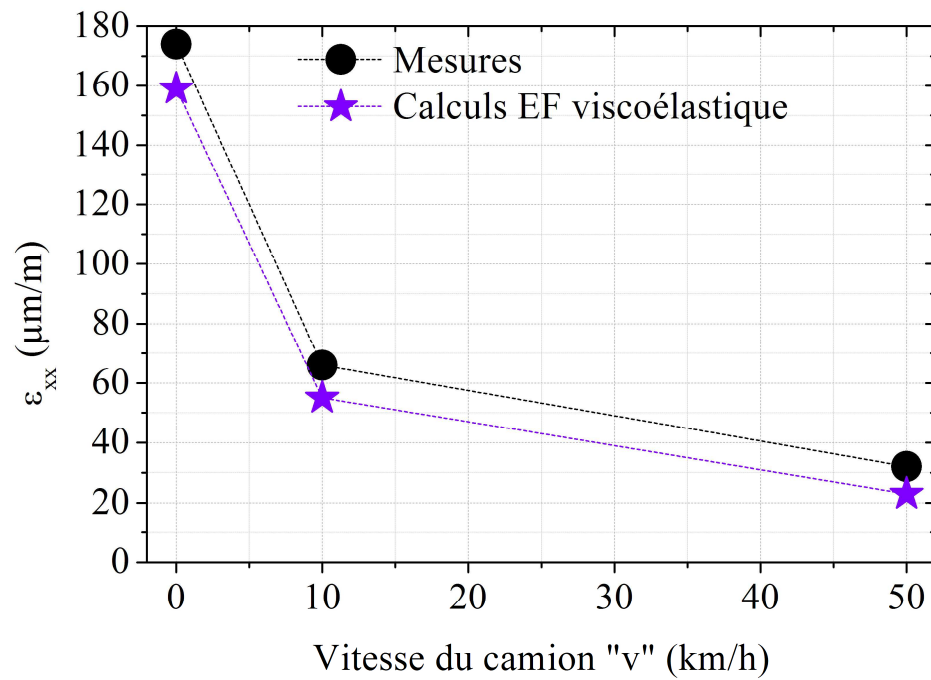
| hauban S08 |       |      |             |        |             |        |             |        | valeurs retenues |       |
|------------|-------|------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|------------------|-------|
| date       | heure | mode | freq 1 (Hz) | X1 (%) | freq 2 (Hz) | X2 (%) | freq 3 (Hz) | X3 (%) | freq (Hz)        | X (%) |
| 04-avr     | 17:46 | 1    | 0.8563      | 0.43   | 0.8534      | 0.43   | 0.8546      | 0.32   | 0.85             | 0.39  |
| 04-avr     | 18:04 | 2    | 1.6969      | 0.26   | 1.6843      | 0.28   | 1.6932      | 0.36   | 1.69             | 0.30  |
| 04-avr     | 18:15 | 3    | 2.5544      | 0.16   | 2.5521      | 0.13   | 2.5399      | 0.15   | 2.55             | 0.15  |
| 04-avr     | 18:26 | 4    | 3.3905      | 0.21   | 3.3864      | 0.22   | 3.386       | 0.24   | 3.39             | 0.22  |
| 04-avr     | 18:32 | 5    | 4.2269      | 0.33   | 4.2238      | 0.36   | 4.2293      | 0.24   | 4.23             | 0.31  |
| 04-avr     | 18:42 | 6    | 5.0705      | 0.27   | 5.0645      | 0.14   | 5.07        | 0.25   | 5.07             | 0.22  |
| 04-avr     | 18:51 | 7    | 5.8977      | 0.37   | 5.9009      | 0.39   | 5.898       | 0.45   | 5.90             | 0.40  |
| 04-avr     | 18:57 | 8    | 6.7378      | 0.64   | 6.7176      | 0.55   | 6.7185      | 0.56   | 6.72             | 0.58  |
| 04-avr     | 19:02 | 9    | 7.5623      | 1.09   | 7.6192      | 1.18   | 7.5901      | 1.1    | 7.59             | 1.12  |
| 04-avr     | 19:10 | 10   | 8.3907      | 0.58   | 8.3586      | 0.63   | 8.3918      | 0.53   | 8.38             | 0.58  |

Résultat des mesures d'amortissement pour le haubans S08

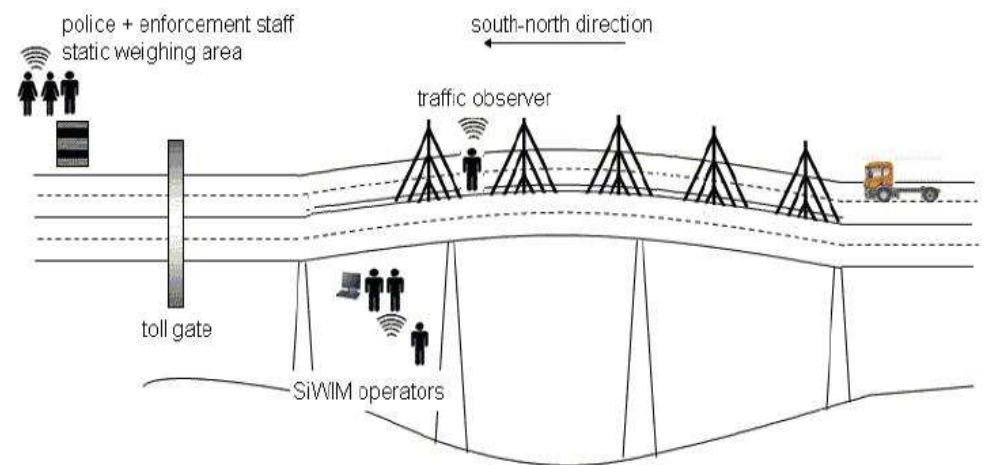
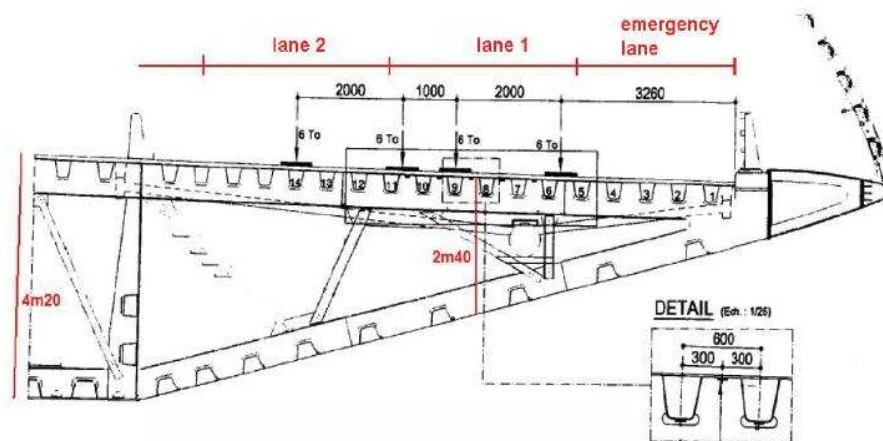
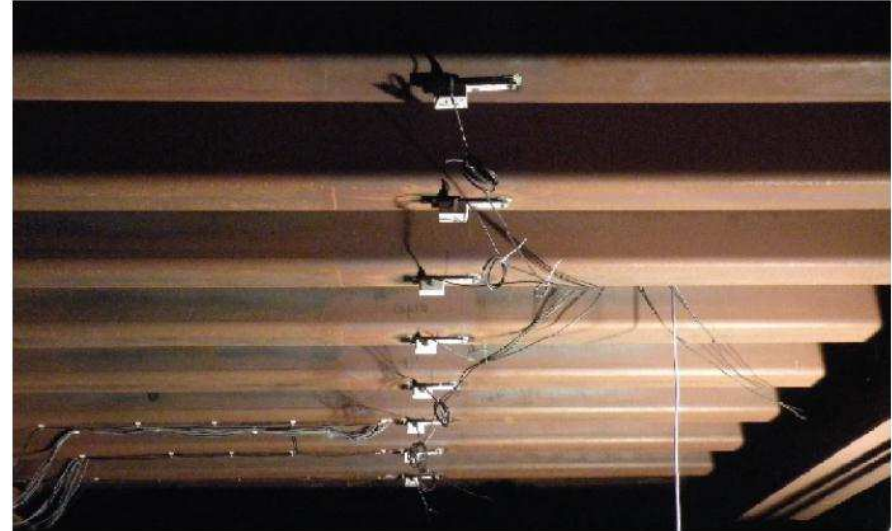
# PROGRAMME DE RECHERCHE ORTHOPLUS



# PROGRAMME DE RECHERCHE ORTHOPLUS



# PROJET IFSTTAR : PESAGE EN MARCHÉ PAR PONT INSTRUMENTÉ



## VISITES PERIODIQUES



## VISITES PERIODIQUES



26-27/03/2013



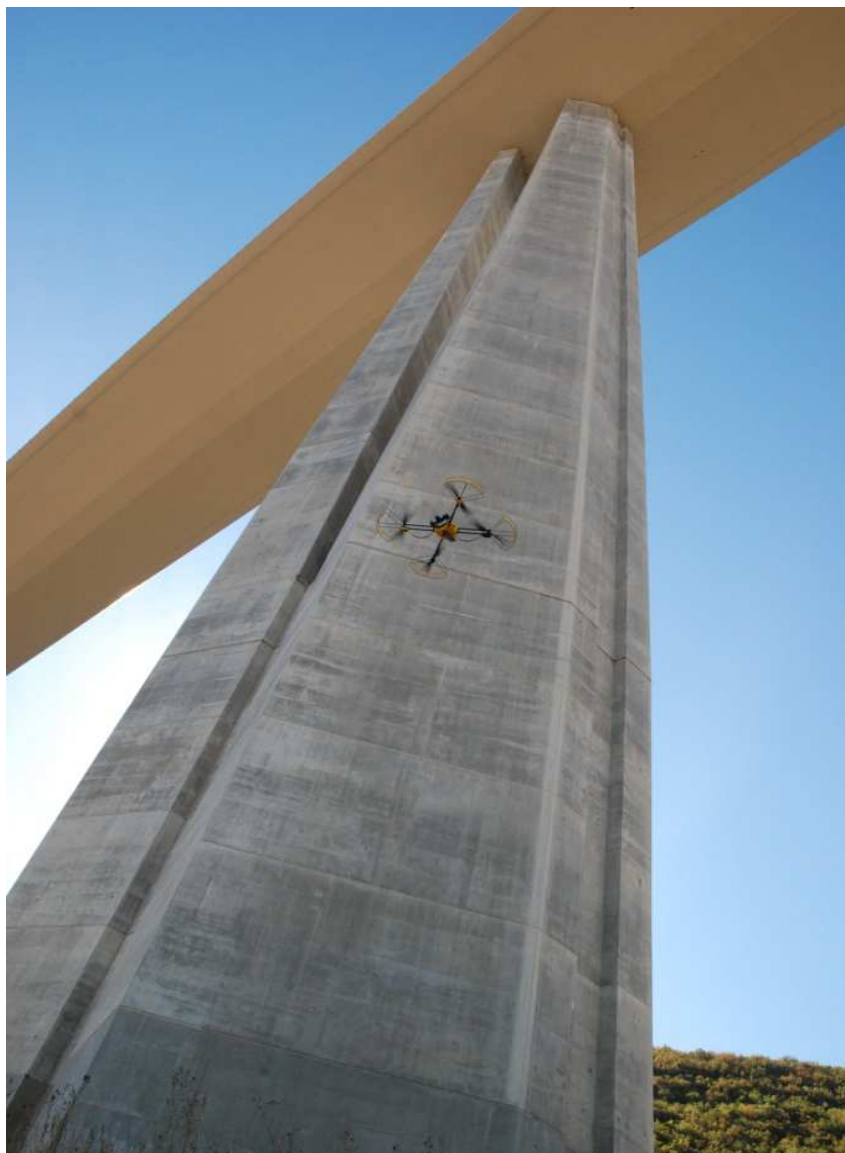
GC' 2013I

47

## VISITES PERIODIQUES



## VISITES PERIODIQUES



- 
- La quantité des mesures prévues à toutes les étapes de la construction et du suivi de l'exploitation de l'ouvrage est très important
  - Il faut être certain de l'utilité de chaque point de mesures
  - Chaque mesure prise doit
    - répondre à un but précis
    - pouvoir être analysée par les personnes compétentes dans le temps prévu (souvent court) et pour le but défini.
  - Les conclusions de chaque mesure doivent être formulées en fonction de critères prédéfinis (comparaison avec les valeurs théoriques, écarts admissible, tolérances, etc...) pour apporter les informations nécessaires.
  - SI TEL N'EST PAS LE CAS, LA MESURE EST INUTILE

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**