

AFGC

Journée innovation – 14/06/2024

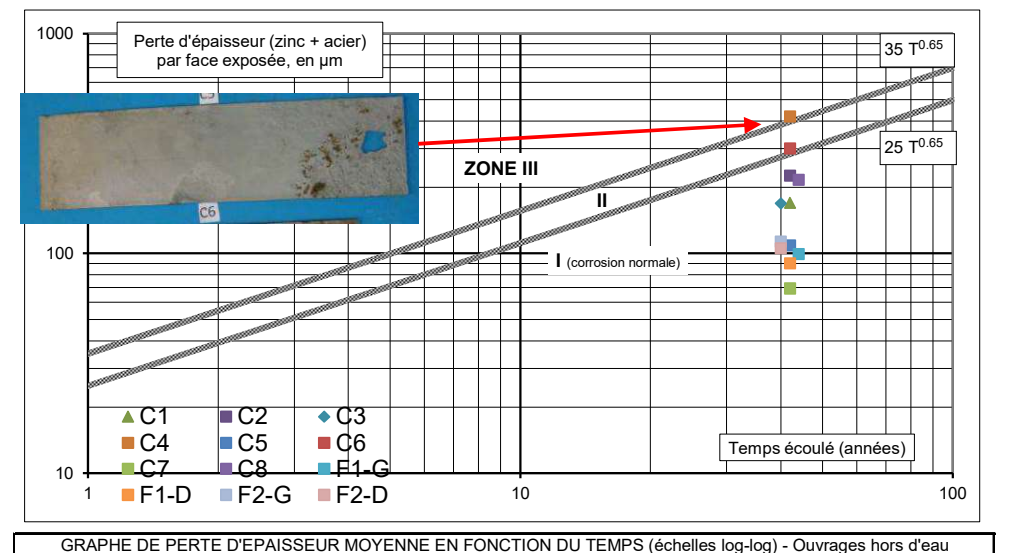
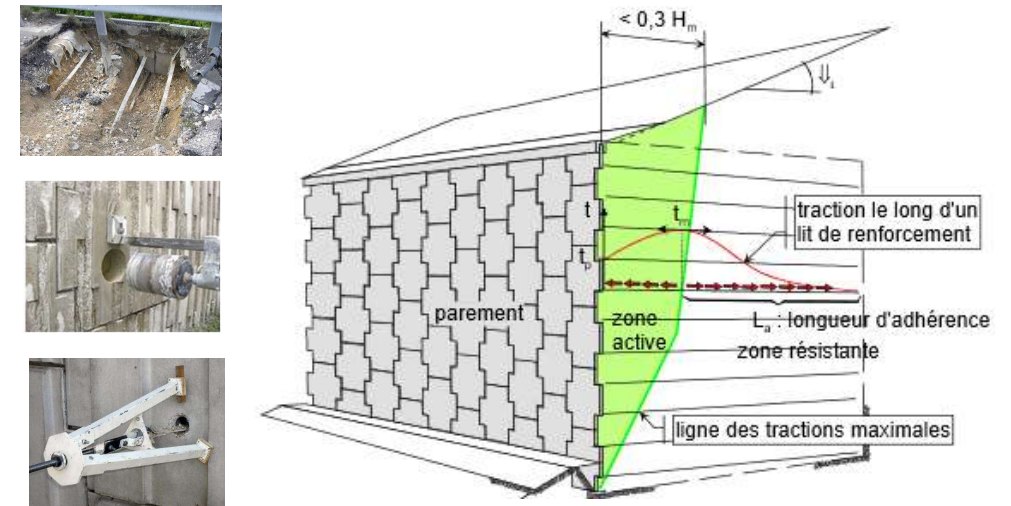
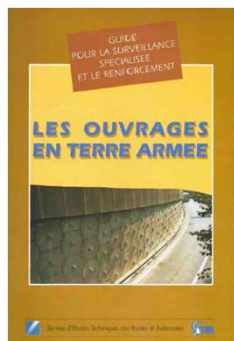
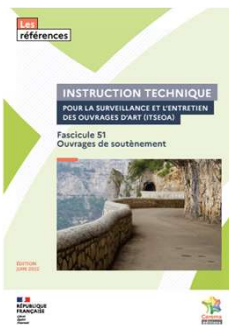
Utilisation de la géostatistique dans la réalisation de diagnostic de murs en sol renforcé par éléments métalliques

Contexte

Depuis une soixantaine d'années, le procédé Terre Armée® avec armatures métalliques est employé pour la construction d'ouvrages de soutènement et de culées (porteuses ou non).

La surveillance de ces ouvrages impose d'apprécier régulièrement l'état de corrosion des éléments de renforcement noyés dans les remblais techniques.

Sur la base de ces investigations, l'ouvrage est classé selon une notation reflétant son état au jour de l'inspection et selon les documents émis par les services de l'Etat.



Problématique

Dans le cadre du suivi des murs en sol renforcé, la question concernant la représentativité des échantillons prélevés et leur position permettant de caractériser l'état de l'ouvrage se pose systématiquement.

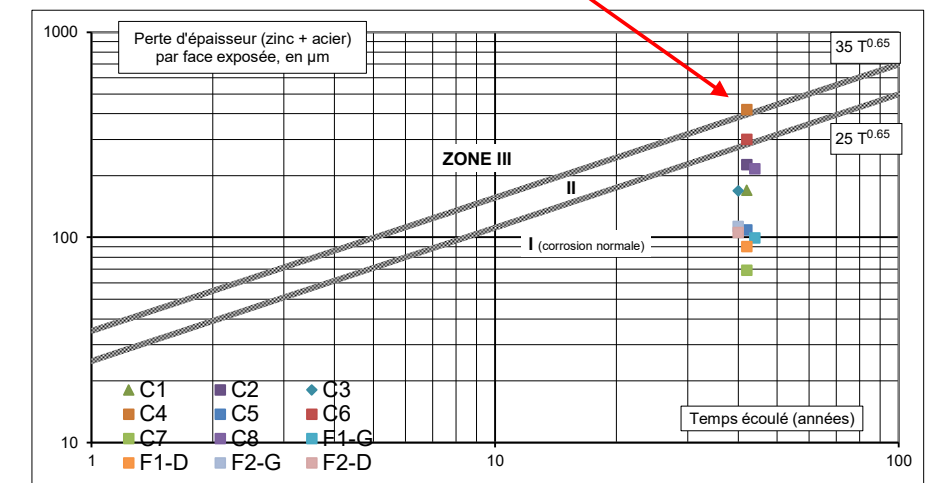
Un nombre insuffisant de prélèvements ou un mauvais positionnement de ceux-ci pourraient conduire à classer un ouvrage selon l'IQOA de manière plus optimiste que la réalité.

Exemple :

Sur 12 sondages réalisés, seuls 2 sont « problématiques ».

Ainsi, il est à craindre qu'avec moins d'échantillon, ou des échantillons « mal positionnés », le diagnostic ait été totalement faussé.

Il est à noter qu'après recalcul, il est apparu que ce mur (culée porteuse) n'était plus apte à reprendre les sollicitations réglementaires et a été conforté.



GRAPHE DE PERTE D'ÉPAISSEUR MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS (échelles log-log) - Ouvrages hors d'eau

Apport de la Géostatistique dans le suivi des Ouvrages en sol renforcé par éléments métalliques

Etude réalisée par PROFRACTAL avec l'appui de l'Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels et l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

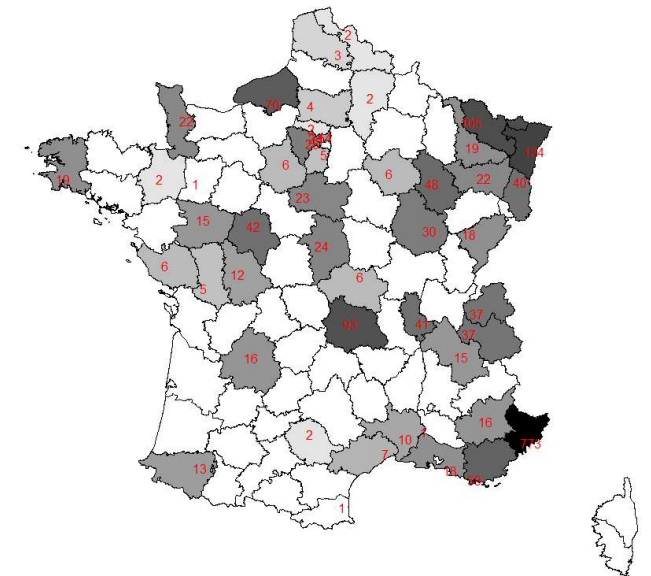
Le but de la géostatistique est de :

1. Décrire, modéliser le comportement d'une variable qui se déploie dans l'espace (ou le temps).
2. Comprendre et prévoir les effets dus au « support » de la variable.
3. Estimer, cartographier la variable

L'idée développée par le biais de la méthode géostatistique est que le comportement des armatures galvanisées dans le sol, utilisées pour les murs en sol renforcé n'est pas totalement imprévisible et que l'on peut trouver un caractère commun à leur évolution.

Le principe de cette méthode a été mis en œuvre par la société PROFRACTAL qui s'appuie sur une base de données regroupant plus de 2000 échantillons.

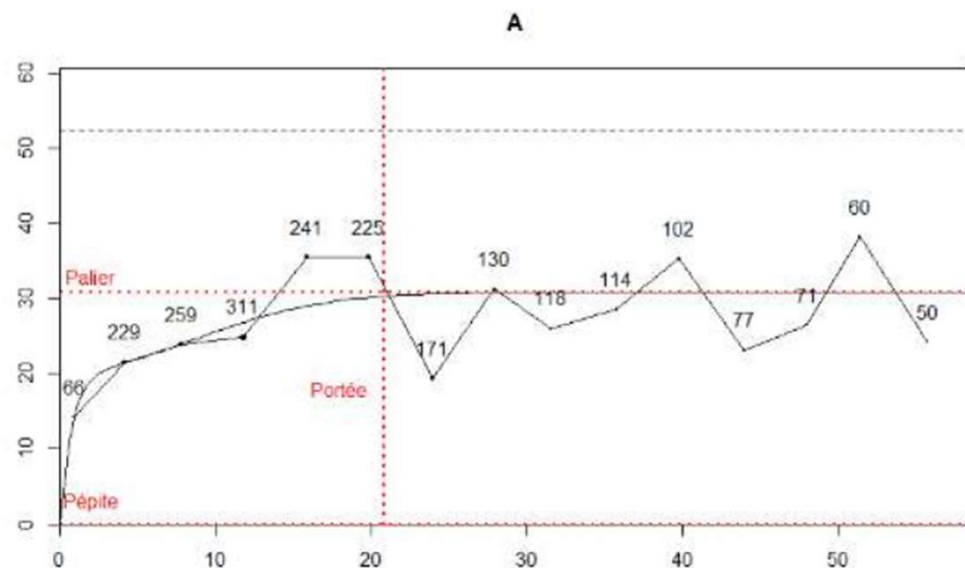
Nombre de prélèvements par département - Total : 1917 + 100 non localisés



Méthode retenue

La méthode consiste à dresser un outil mathématique décrivant la corrosion des armatures selon leurs positions relatives (« variogramme ») et indépendamment de leur âge par le biais de la variable $A=P/T^{0,65}$.

Une manière simple de comprendre cet outil est de le considérer comme l'incertitude entourant la valeur prise par un phénomène en un lieu donné. Elle est intuitivement croissante selon la distance et, à l'inverse, minimale entre deux positions très proches.



- Le comportement à l'origine, appelé effet pépite, traduit le niveau de régularité du phénomène,
- La distance sur laquelle la variance croît (appelée portée) est un indicateur de la distance caractéristique structurant le phénomène,
- Au-delà de cette portée, le variogramme atteint une valeur à peu près constante appelée palier et le processus n'est plus autocorrélé.

Méthode retenue

A partir de ce variogramme, une méthode de « krigeage » produit une estimation de la corrosion en tout point du mur à partir des échantillons existants en minimisant l'erreur.

La démarche permet ainsi de :

- Cartographier l'estimation de la corrosion en tout point du mur
- S'assurer que le nombre de prélèvements existants est suffisant
- Proposer une estimation tant en nombre qu'en position des futurs prélèvements pour établir un diagnostic fiable de l'état des murs
- Vérifier après nouveaux prélèvements que l'on a une vision exhaustive de l'état du mur
- Pronostiquer à partir de cartographies consolidées le risque de rupture à diverses échéances.

Application à certains ouvrages du patrimoine SANEF

Afin de limiter les investigations qui restent quoi qu'il en soit destructives, dans un contexte d'exploitation parfois tendu et dans un souci de connaissance davantage fiabilisée de son patrimoine, le groupe Sanef / Sapn a souhaité utiliser cette méthode innovante. en supplément d'un suivi habituel de leurs ouvrages (Contrôle Annuel, visites IQOA sans prélèvement et IDP).

PROFRACTAL a donc accompagné la Direction du Patrimoine pour appliquer la géostatistique sur 16 murs à ce jour.



Exemple d'un mur

Date de construction : 1976

Longueur : 117 m

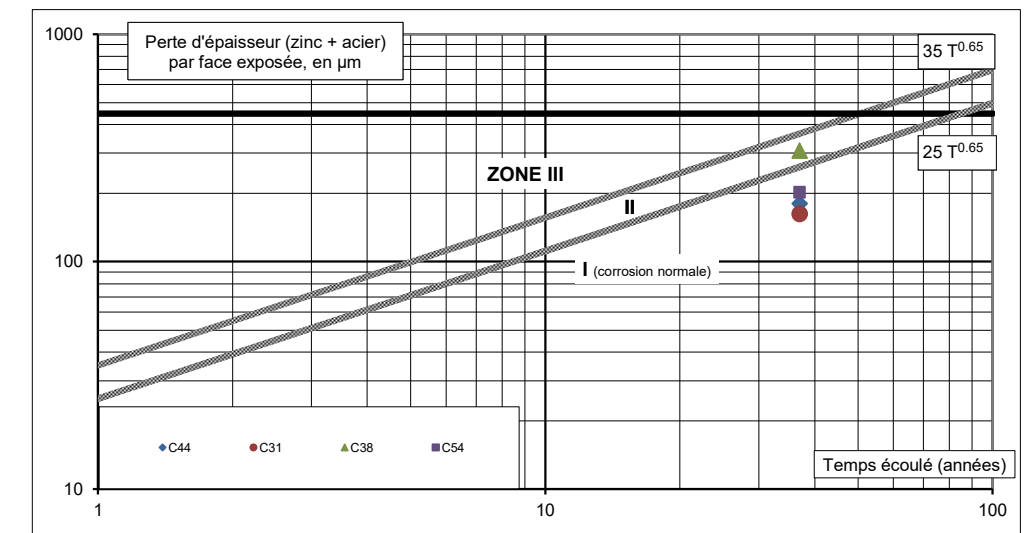
Hauteur maximale : 7,00 m

Surface de l'ordre de 620 m²

Précédente expertise : 4 prélèvements d'armatures à 37 ans

Estimation de perte de résistance à 10 ans de 36% au-delà des dimensionnements règlementaires dans un sol non agressif

Echantillon	Abscisse	Ordonnée	H mur	P (µm)	T (ans)	$A = P/T^{0,65}$
C31	47	-2,5	-5	162	37	15,49
C38	57	-4,75	-5	308	37	29,46
C44	66	-1,75	-5	180	37	17,22
C54	81	-4,75	-5	202	37	19,32



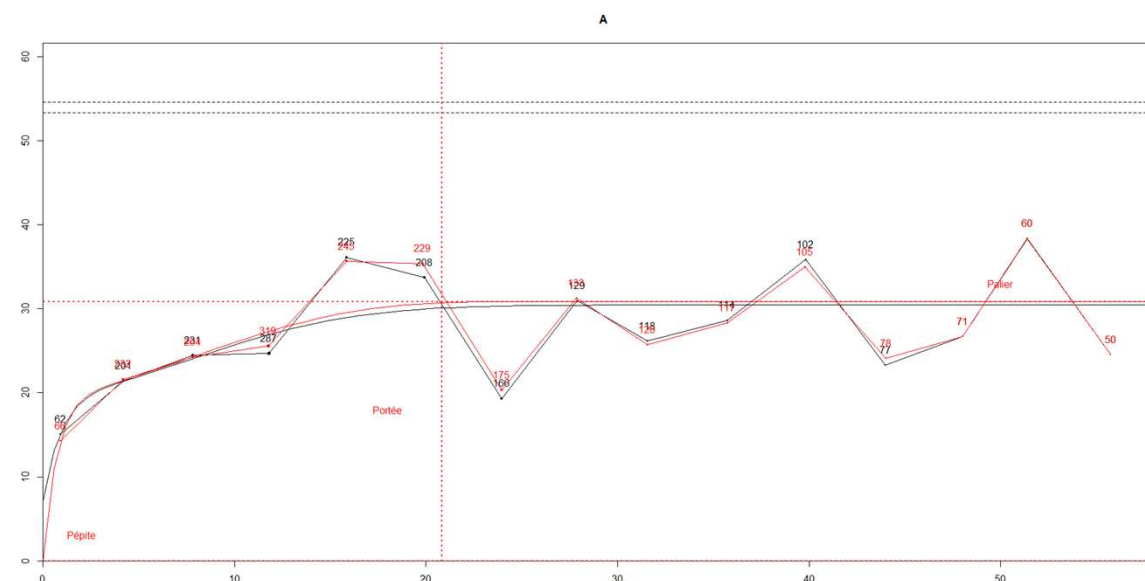
GRAPHE DE PERTE D'ÉPAISSEUR MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS (échelles log-log) - Ouvrages hors d'eau

Exemple d'un mur

Etape préliminaire : **Applicabilité de la méthode**

La théorie développée présuppose que le comportement des armatures d'un ouvrage donné correspond à celui des murs similaires ayant conduit à la définition du variogramme d'étude qui reste par définition stable malgré l'ajout de nouveaux résultats de prélèvements ; il est ainsi nécessaire de s'assurer que l'intégration des échantillons du mur étudié ne remet pas en cause cette donnée principale.

-> C'est bien le cas ici



A l'origine

Effet pépité : 7,04
Portée 22,69
Pallier 30,45

Après ajout d'échantillon

Effet pépité : 0
Portée 26,69
Pallier 30,876

Les modifications sont marginales : la variance maximale est modifiée de moins de 2% (donc l'écart type de moins de 1,5%).

La méthode s'applique

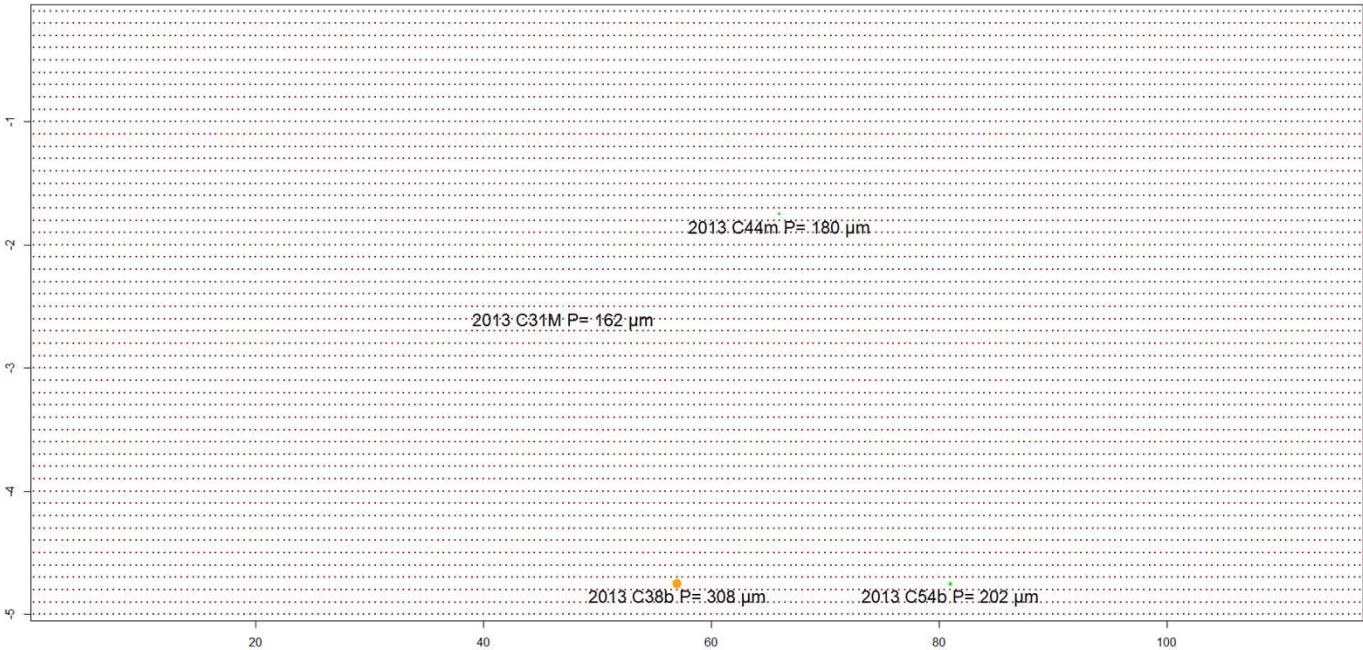
Exemple d'un mur

Etape 0 :

Recueil des données existantes :

- Position des prélèvements
- Perte à un âge donné

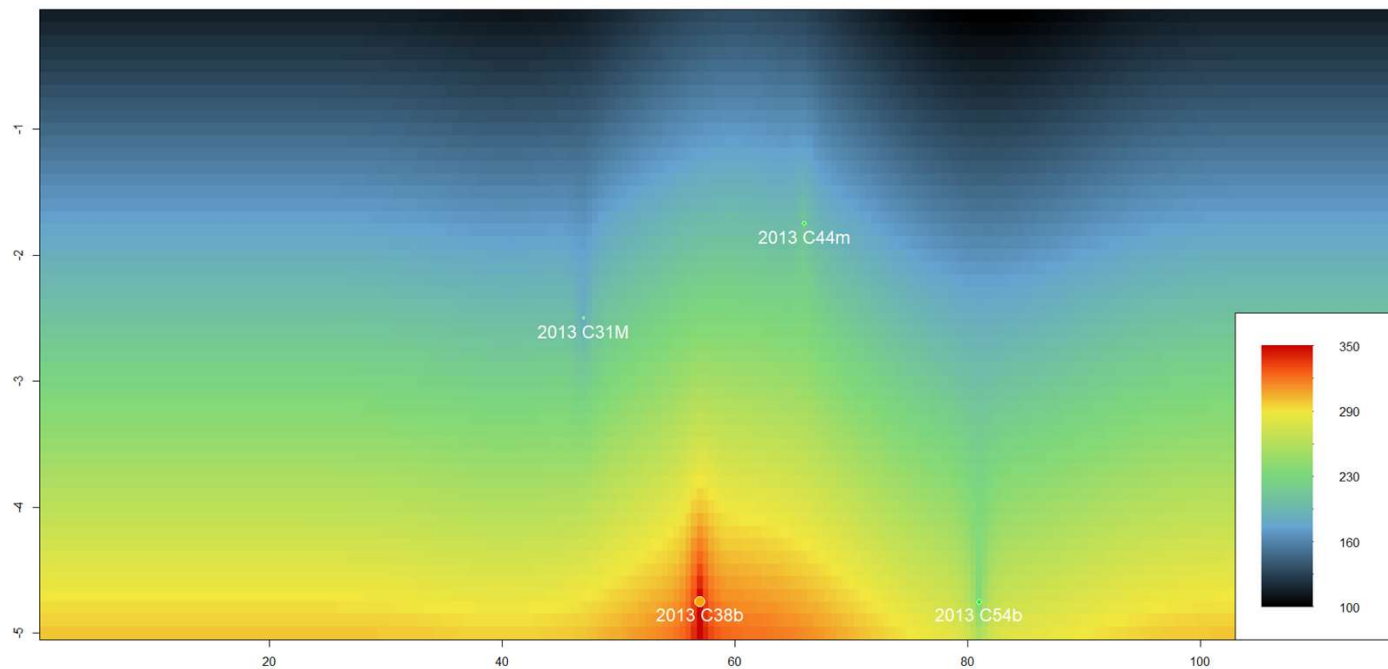
Echantillon	Abscisse	Ordonnée	H mur	P (µm)	T (ans)	A = P/T ^{0,65}
C31	47	-2,5	-5	162	37	15,49
C38	57	-4,75	-5	308	37	29,46
C44	66	-1,75	-5	180	37	17,22
C54	81	-4,75	-5	202	37	19,32



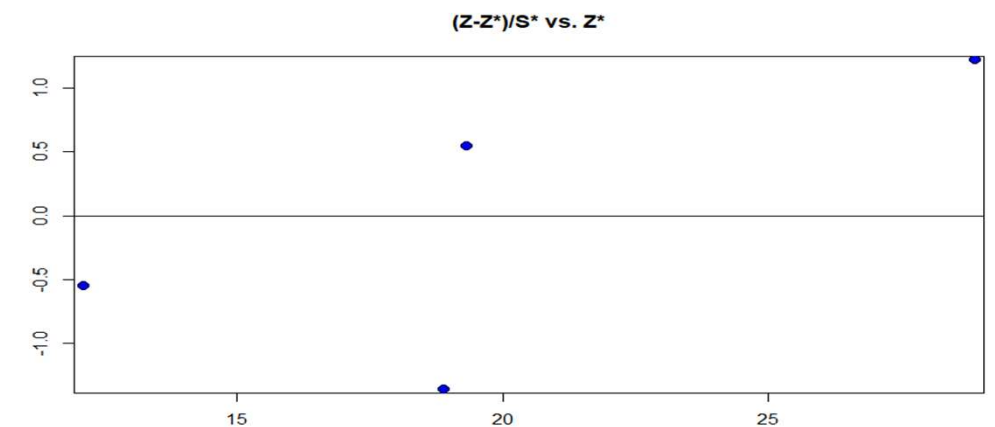
Exemple d'un mur

Etape 1 :

Obtention de l'estimation de la corrosion en tout point par krigeage en fonction du variogramme et à la date souhaitée



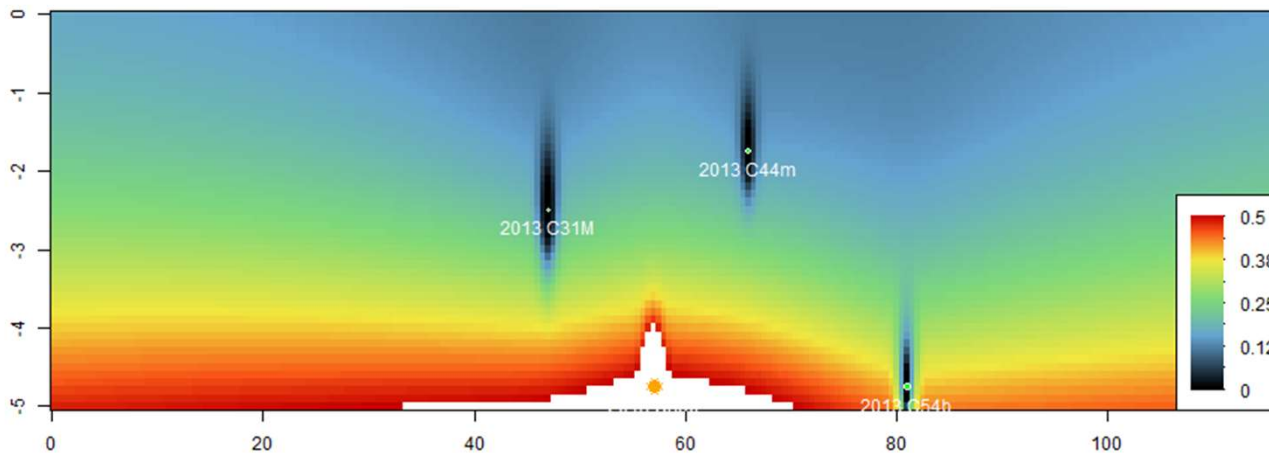
Un premier contrôle est effectué par validation croisée qui consiste à effectuer l'estimation en supprimant un échantillon puis à vérifier l'erreur standard sur cet échantillon. Le test est concluant si l'erreur standard est de +/- 2,5% par rapport à l'estimation.



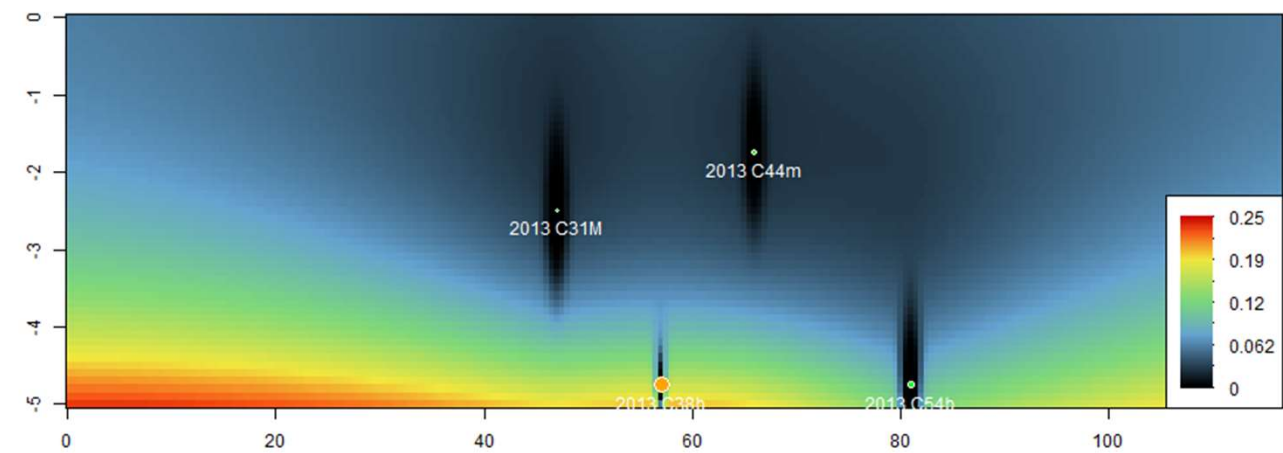
Exemple d'un mur

Etape 2 :

Cartographie de l'incertitude sur l'estimation produite. On « cible » les zones où l'on a un doute maximal



50% de probabilité de dépasser la zone I de corrosion normale en pied d'ouvrage



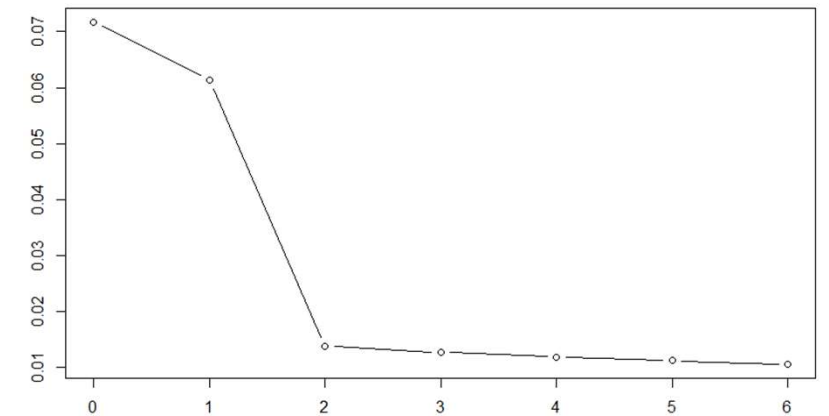
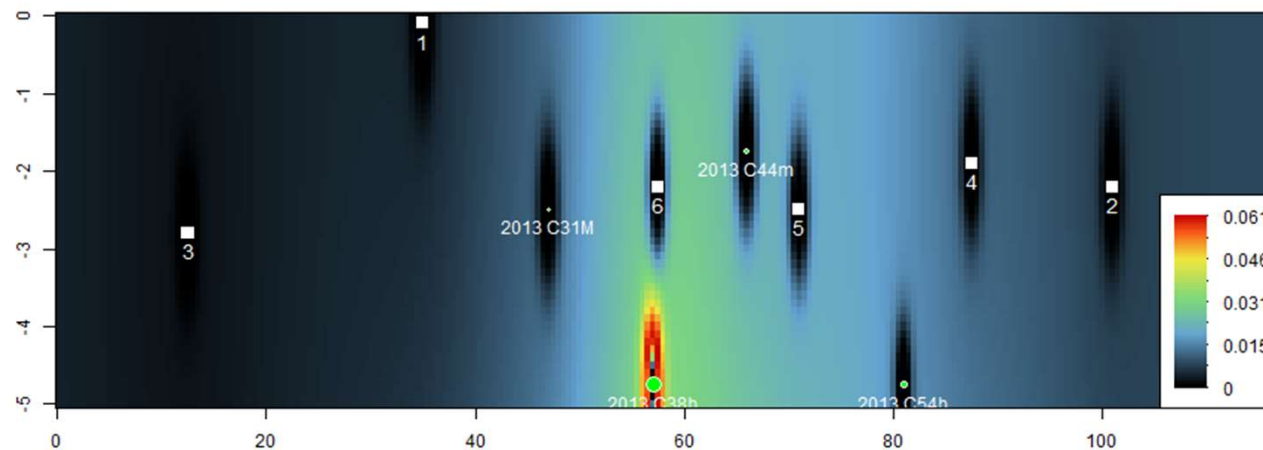
25% de probabilité de dépasser la zone III de corrosion anormalement élevée sur des zones étendues

De manière « logique » autour des prélèvements pas de doute...

Exemple d'un mur

Etape 3 :

Optimisation de la position et du nombre de futurs prélèvements pour établir un diagnostic fiable



Une note en chaque point traduisant la probabilité d'être au-dessus d'un seuil donné ($A=35$) avec un risque défini ($p=5\%$) permet de définir une note globale propre à chaque mur (somme sur l'ensemble du mur).

Afin de déterminer la position d'un nouvel échantillon, chaque point de la grille est testé en lui attribuant la valeur estimée à l'étape précédente puis la note globale est recalculée.

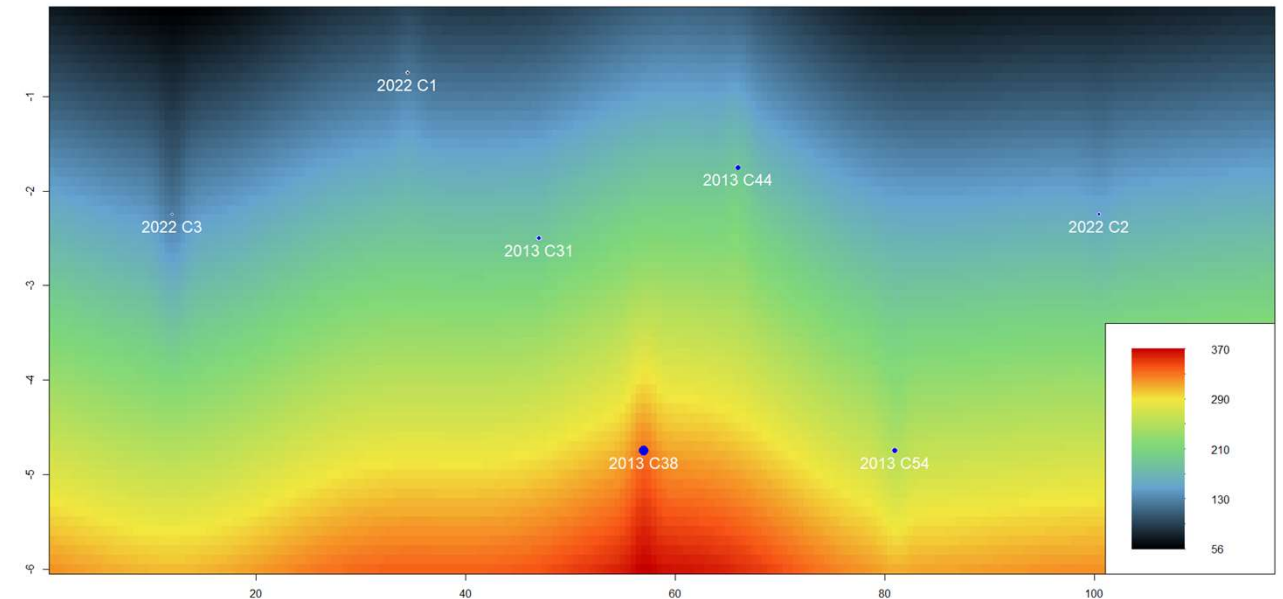
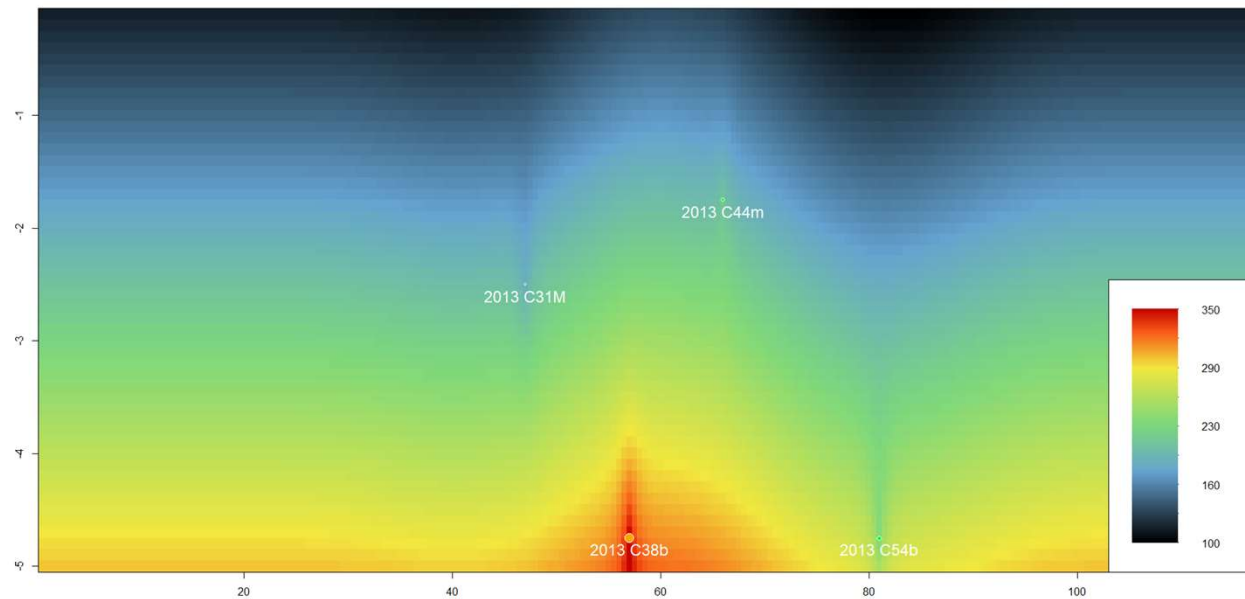
La position optimale du nouvel échantillon est celle qui minimise la note globale.

Après avoir fixé un premier échantillon, on recommence la même opération pour un second, un troisième, etc. La convergence de la note globale vers une valeur minimale indique le nombre minimum d'échantillons nécessaires pour fiabiliser l'estimation et leur position.

Exemple d'un mur

Etape 4 :

En fonction des nouveaux échantillons prélevés (dont la position et le nombre ont été optimisés), l'état de l'ouvrage peut être fiabilisé.



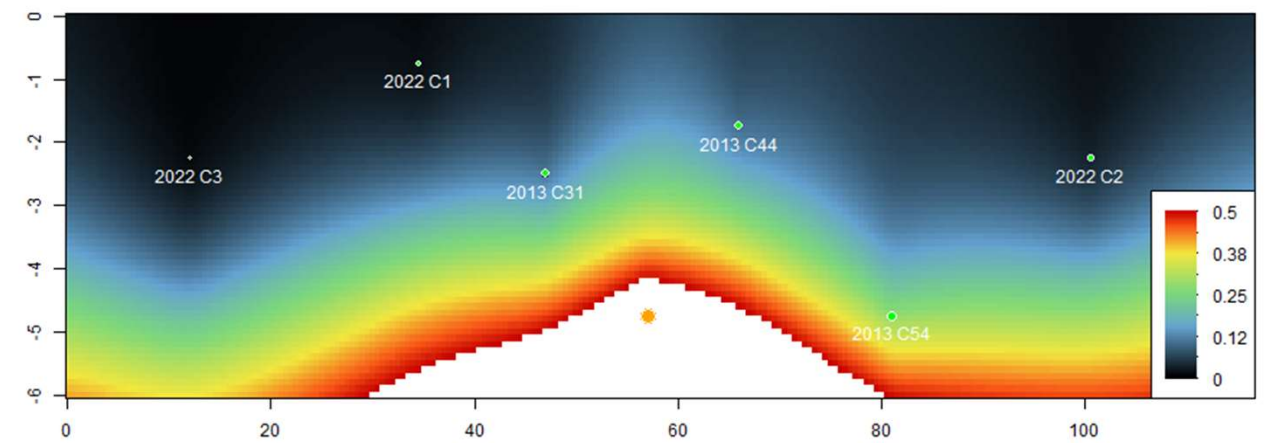
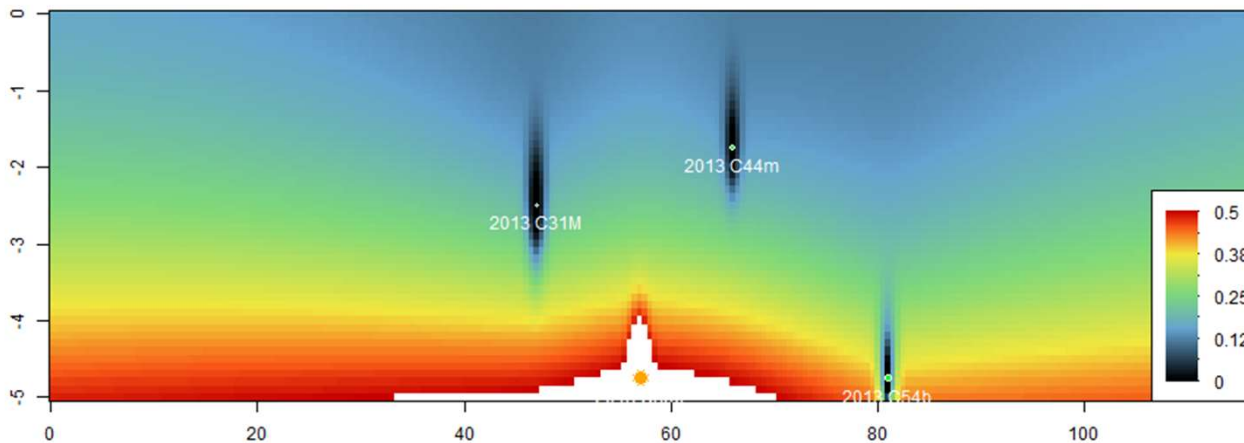
Nouvelle estimation de la corrosion – Avant – Après

A noter que le « doute » de l'étape 2 est davantage confirmé.

Exemple d'un mur

Etape 4 :

En fonction des nouveaux échantillons prélevés (dont la position et le nombre ont été optimisés), l'état de l'ouvrage peut être fiabilisé.



Nouvelle estimation de la probabilité d'avoir des prélèvements au-delà de la zone I de corrosion normale

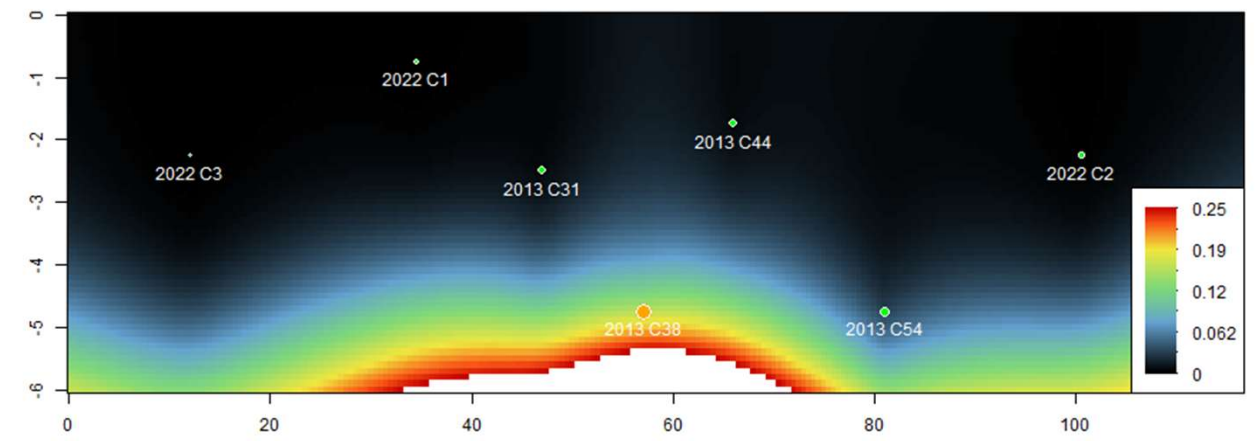
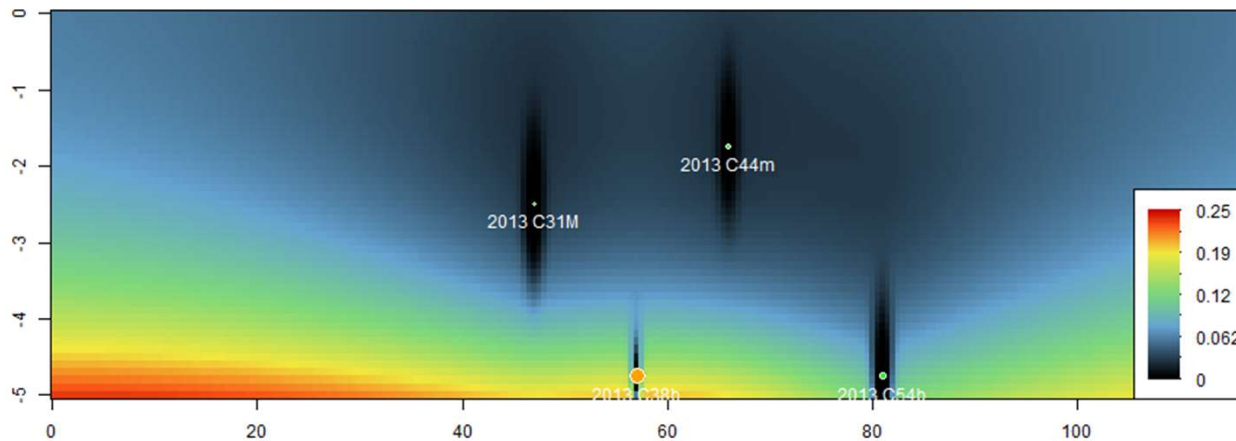
Avant – Après

A noter que le « doute » de l'étape 2 est davantage confirmé

Exemple d'un mur

Etape 4 :

En fonction des nouveaux échantillons prélevés (dont la position et le nombre ont été optimisés), l'état de l'ouvrage peut être fiabilisé.



Nouvelle estimation de la probabilité d'avoir des prélèvements au-delà de la zone III de corrosion anormalement élevée

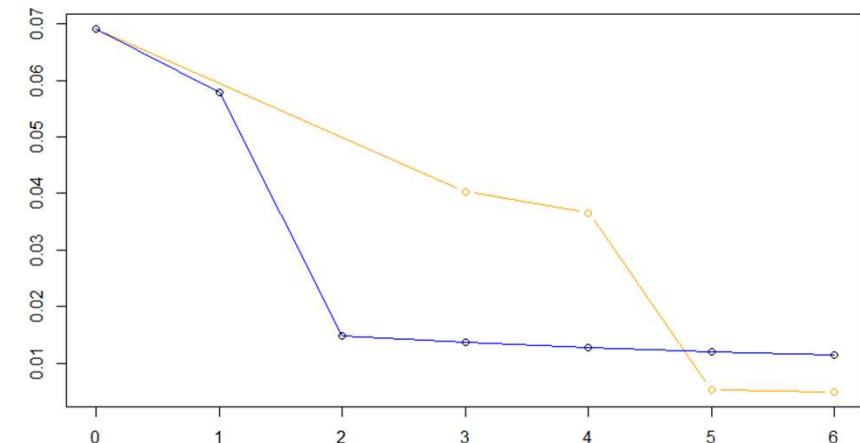
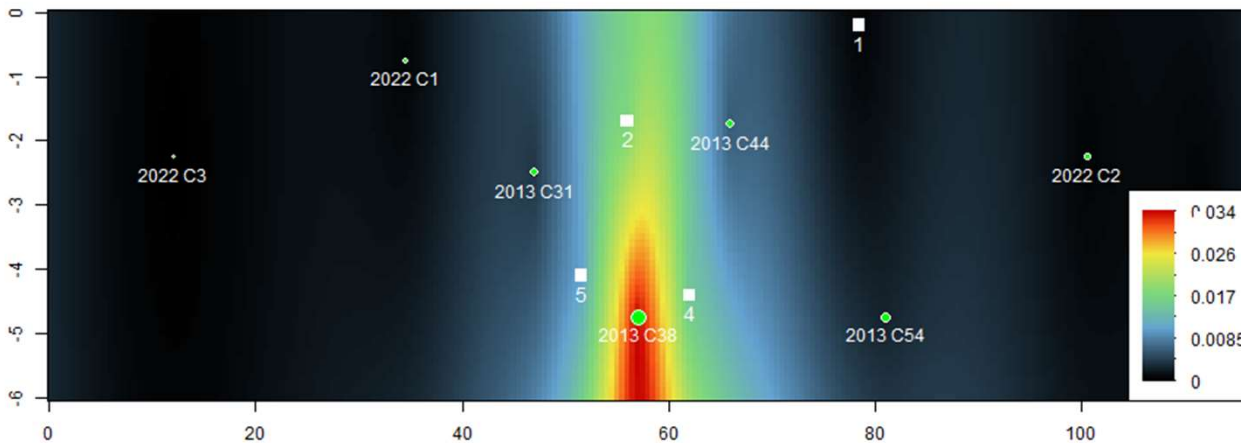
Avant – Après

A noter que le « doute » de l'étape 2 est davantage confirmé

Exemple d'un mur

Etape 4 :

En fonction des nouveaux échantillons prélevés (dont la position et le nombre ont été optimisés), un nouveau « risque » sur l'état de l'ouvrage peut être déterminé.



Nouvelle estimation du risque de Faux Négatifs

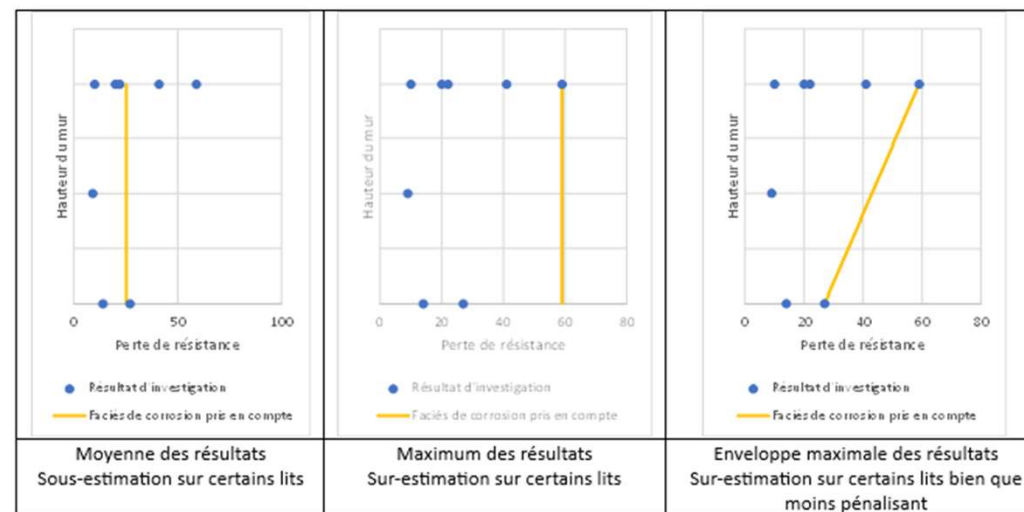
L'ajout de nouveaux échantillons ne donne plus d'informations complémentaires hormis localement

Exemple d'un mur

Etape 5 :

Sur la base d'un état statistiquement connu et fiabilisé de l'ouvrage, un pronostic de vie résiduel peut être engagé

En l'état actuel, le pronostic se fait en « intuitant » un faciès de corrosion sur une section donnée : moyenne générale sur l'ensemble des prélèvements sans s'attacher aux points particuliers ? Prise en compte des résultats les plus pénalisants ? Gradient de corrosion déterminé par le bureau d'étude missionné ?



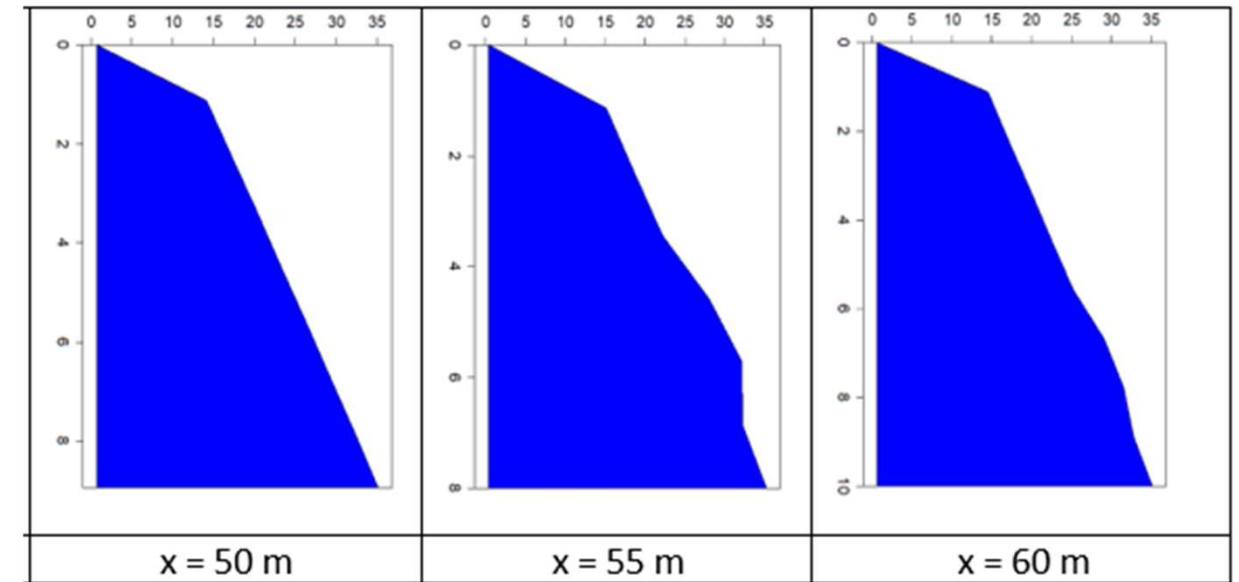
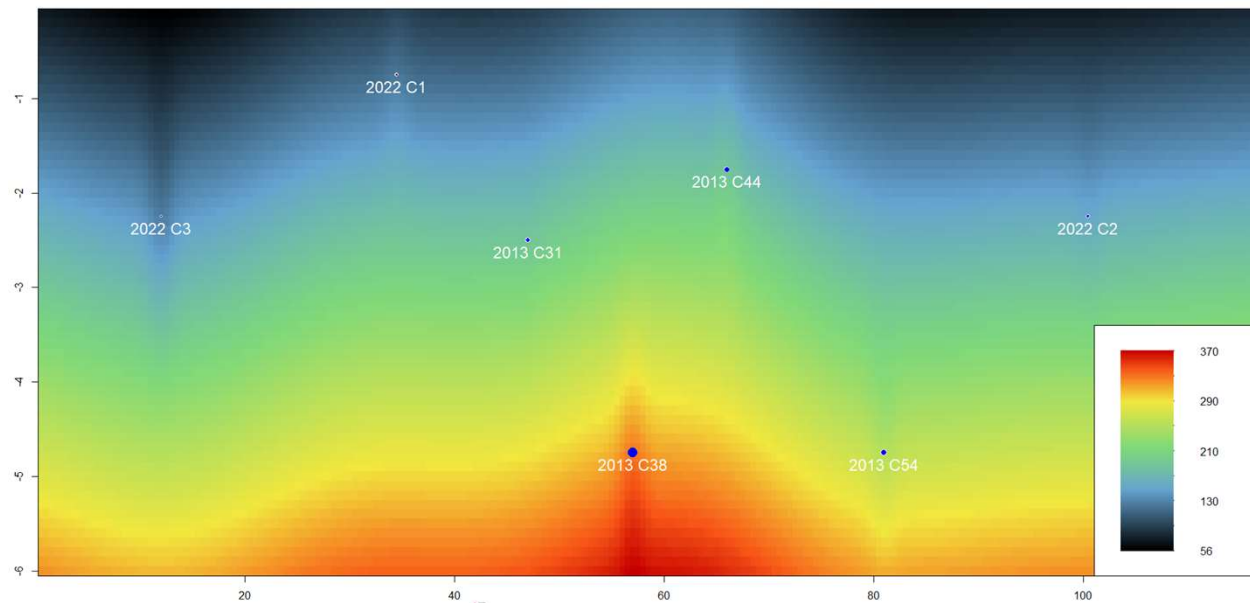
Différentes hypothèses pour un mur donné

Exemple d'un mur

Etape 5 :

Sur la base d'un état statistiquement connu et fiabilisé de l'ouvrage, un pronostic de vie résiduel peut être engagé

Par le biais de la méthodologie géostatistique, ce pronostic permet de s'appuyer sur une vision globale de la corrosion d'un mur donné : les fouilles locales préconisées sont statistiquement déterminées sur chacune des sections du mur, ce qui permet de déterminer un faciès de corrosion, lit par lit, et sur n'importe quelle section.



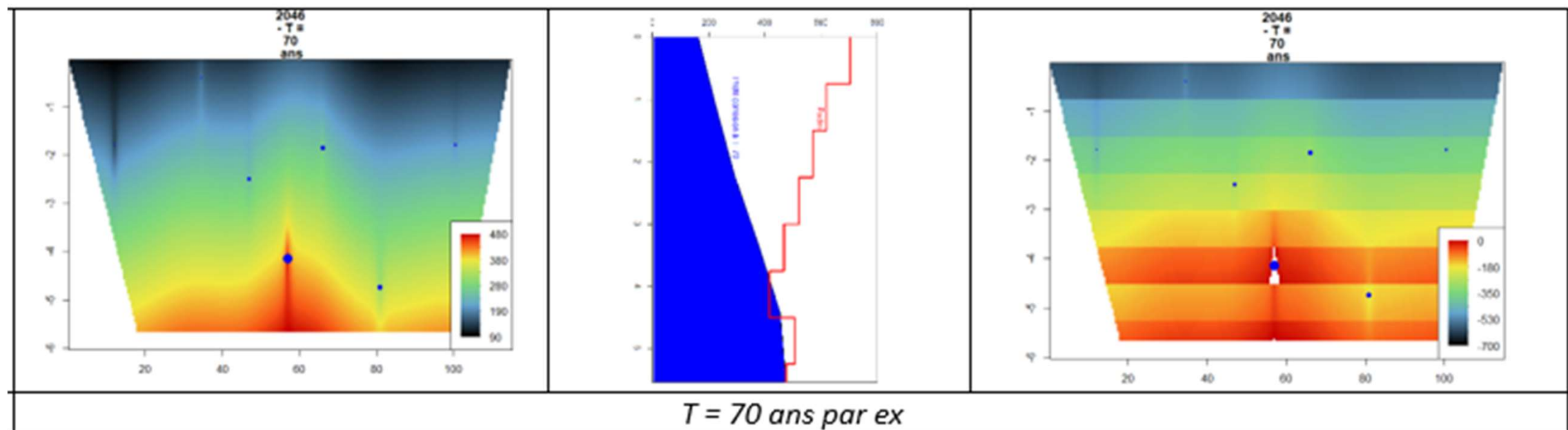
Exemple d'un mur

Etape 5 :

Sur la base d'un état statistiquement connu et fiabilisé de l'ouvrage, un pronostic de vie résiduel peut être engagé.

La capacité des différents renforcements se fait par un calcul classique type Terre Armée – La géostatistique permet de déterminer les sections impactées.

Sur des murs conséquents, cela permet de limiter les surveillances et les éventuels travaux.



Conclusions

La méthodologie présentée permet, dans le cadre de suivi de murs en sols renforcé par éléments métalliques :

- de bénéficier d'une base de données importante : la modélisation du comportement variographique de l'ensemble des massifs est applicable pour un massif indépendant.
- d'estimer à partir des prélèvements existants la corrosion en tout point de l'ouvrage et donc d'affiner le diagnostic des sections les plus critiques,
- de s'assurer que le nombre de prélèvements effectués est suffisant pour donner un avis sur l'état du massif (probabilité de dépassement de seuil et Risque de Faux Négatif),
- d'optimiser la position des échantillons futurs afin de limiter le Risque de Faux Négatif et de fiabiliser la classification de l'ouvrage,
- de limiter les prélèvements nécessaires, qui restent des actes agressifs et coûteux, pour fiabiliser les diagnostics futurs,
- d'affiner les pronostics de durée de vie résiduel en modélisant statistiquement des fouilles toute hauteur.

AFGC

Journée innovation – 14/06/2024

Utilisation de la géostatistique dans la réalisation de diagnostic de murs en sol renforcé par éléments métalliques

MERCI POUR VOTRE ATTENTION