



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Gestion des Données et Nouvel Environnement numérique en Géotechnique

## Application de la géostatistique dans l'analyse de risque géotechnique lié à la liquéfaction du sol



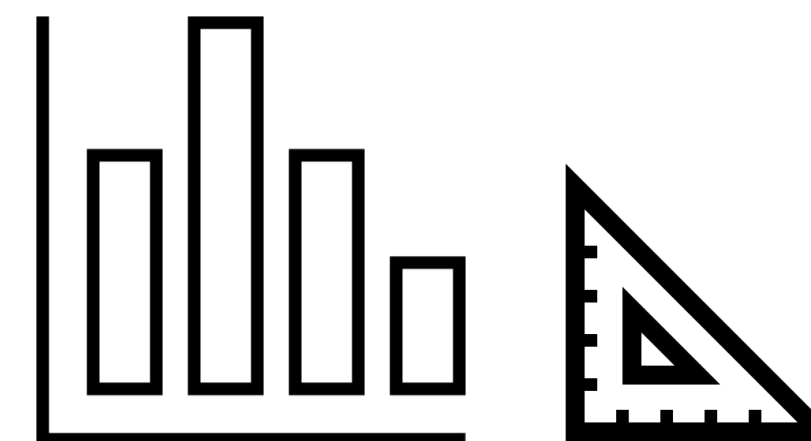
**SIMON, Cyril (EDF)**  
**PELLETIER, Baptiste (EDF)**  
**BINET, Hélène (Geovariances)**  
**MASOUDI, Pedram (Geovariances)**  
**RAMBERT, Frédéric (Geovariances)**  
**ASSY, Yvan (Geovariances)**

15 NOVEMBRE 2022



# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



## Objectifs, site et données



Geovariances

APPLICATION DE LA GÉOSTATISTIQUE DANS L'ANALYSE DE RISQUE  
GÉOTECHNIQUE LIÉ À LA LIQUÉFACTION DU SOL

15 NOVEMBRE 2022



# Les apports de la géostatistique au domaine de la géotechnique

## Le besoin

Les grands projets de construction sont pilotés par la gestion des risques.

Les risques géologiques sont liés aux incertitudes épistémiques et aléatoires sur la connaissance du sol

Deux enjeux:

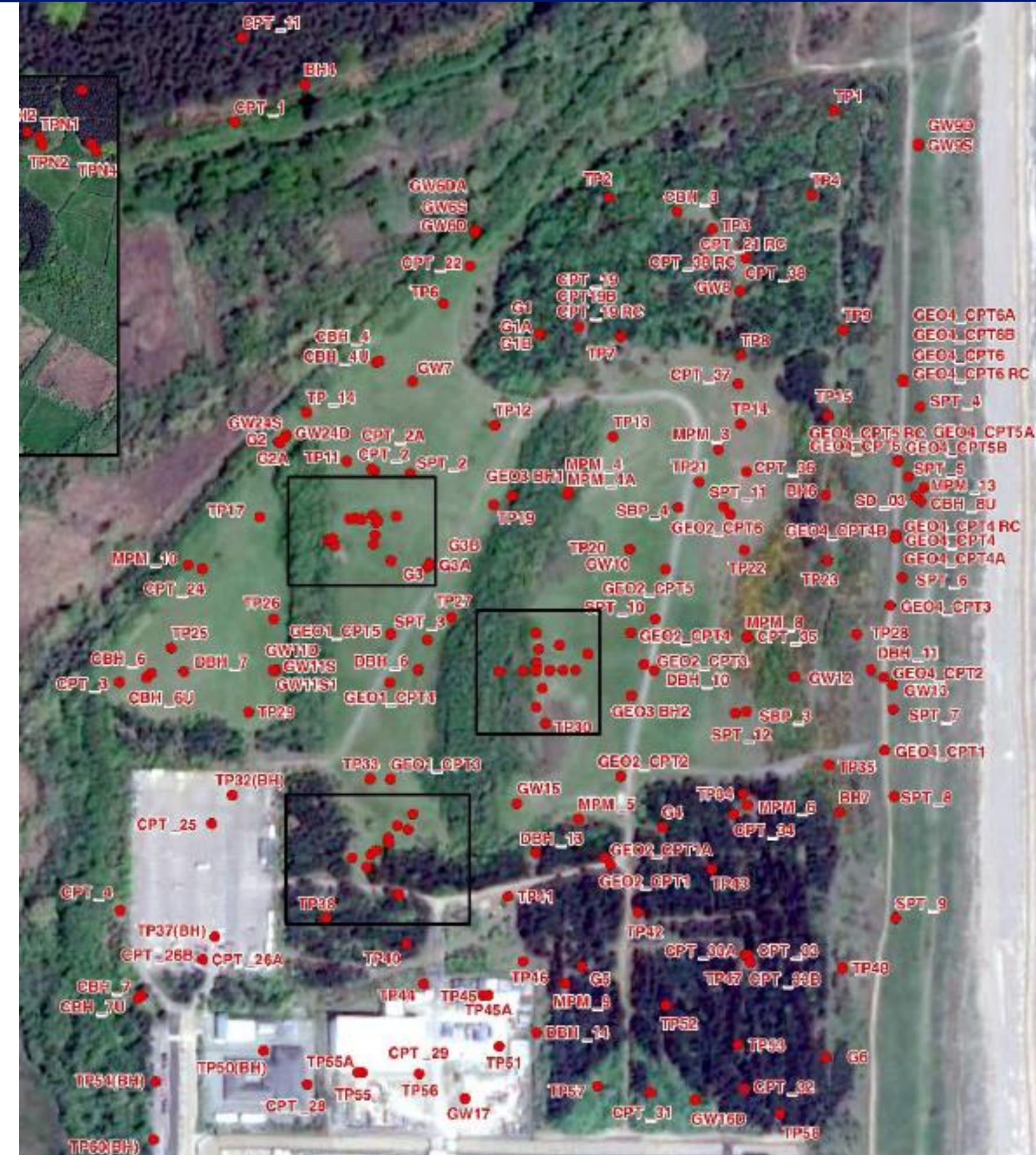
- diminuer les incertitudes dans la mesure du possible
- quantifier les incertitudes résiduelles.

## Quels apports des outils géostatistiques ?

### 1/ Diminution des incertitudes

Les reconnaissances des sites EDF sont généralement importantes et les résultats de plus en plus systématiquement organisés en base de données structurée

La pratique courante pour les synthèses géotechniques : associer des statistiques classiques sur les essais géotechniques et une compréhension « naturaliste » du modèle géologique.



Comment les outils géostatistiques peuvent-ils permettre de valoriser encore plus les essais ?



# Les apports de la géostatistique au domaine de la géotechnique

## 2/ Quantification des incertitudes résiduelles :

La pratique courante prend en compte les incertitudes issues de la variabilité par des coefficients partiels forfaitaires sur les paramètres de sol.

La géostatistique peut apporter :

- une représentation spatiale des incertitudes
- une quantification probabiliste de dépassement d'un seuil

## Cas d'application: un site avec 3850 essais SPT, et 11 implantations CH, DH ou PSSL

Dans cette présentation, les outils géostatistiques sont utilisés pour répondre à deux problématiques :

- Faire usage des mesures de l'essai SPT (mesure indirecte de la vitesse des ondes) plus densément représenté spatialement pour améliorer l'estimation de la vitesse des ondes de cisaillement (2 fois moins mesurées)
- L'analyse spatiale du risque de liquéfaction dans les couches sableuses de fondation et l'évaluation probabiliste du risque résiduel à une profondeur donnée



# Contexte et Objectifs

## ➤ Rappel du contexte:

Investigations géotechniques des sols d'un site devant accueillir un réacteur de centrale nucléaire par le Service Géologie & Géotechnique de EDF

Multiples campagnes de collecte de données SPT depuis 1975:

350 sondages carottés, 5000 essais in situ et 5000 essais laboratoires

70 km de lignes sismiques

## ➤ Objectifs primaires:

Préciser le champ des vitesses de propagations des ondes sismiques en 3D

Mettre en évidence l'apport de la géostatistique pour anticiper les risques locaux de liquéfaction

## ➤ Deux informations ponctuelles en entrée: SPT et Vs



Geovariances

# Contexte et Objectifs

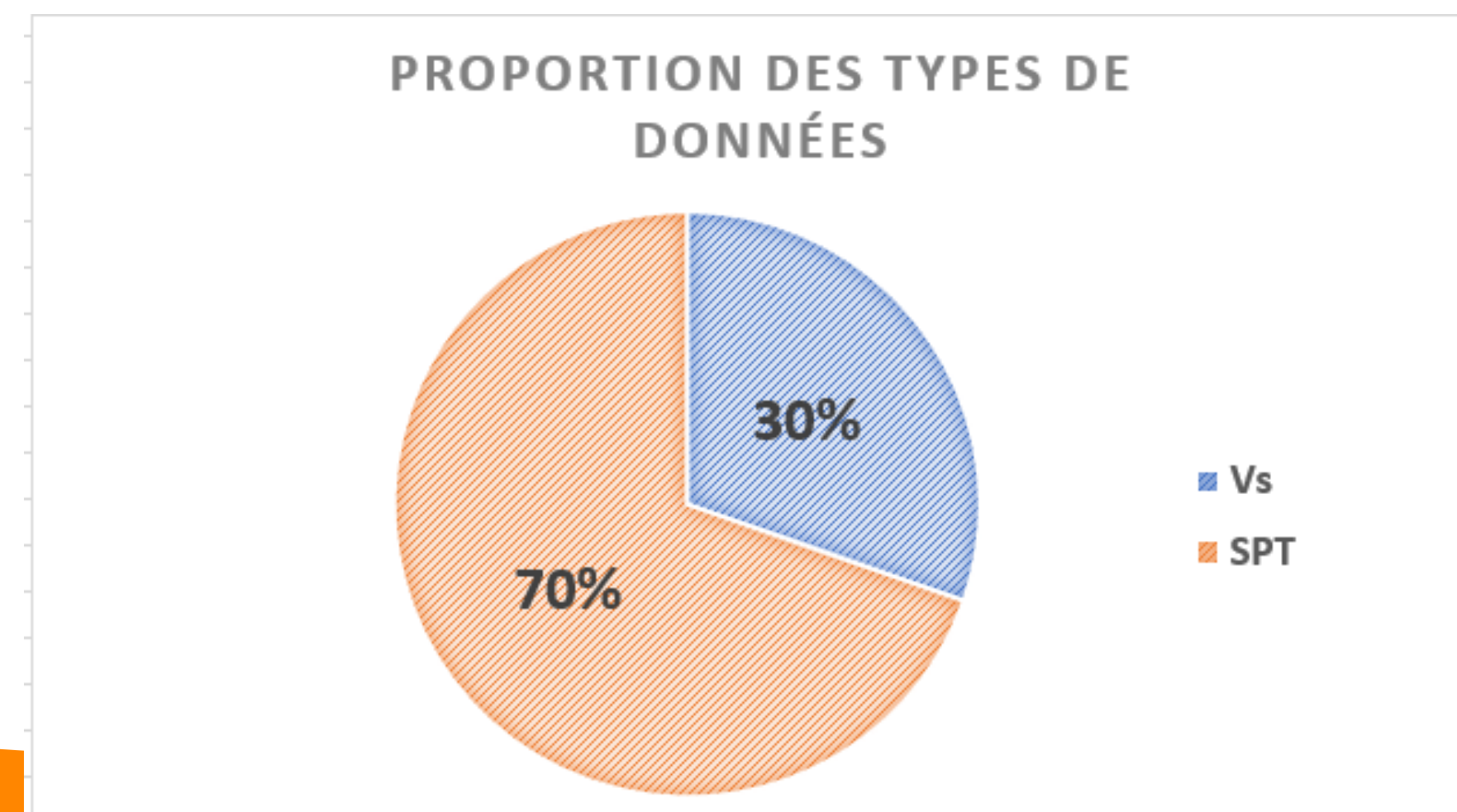
## En utilisant la théorie de la géostatistique :

### ➤ Configuration de l'échantillonnage:

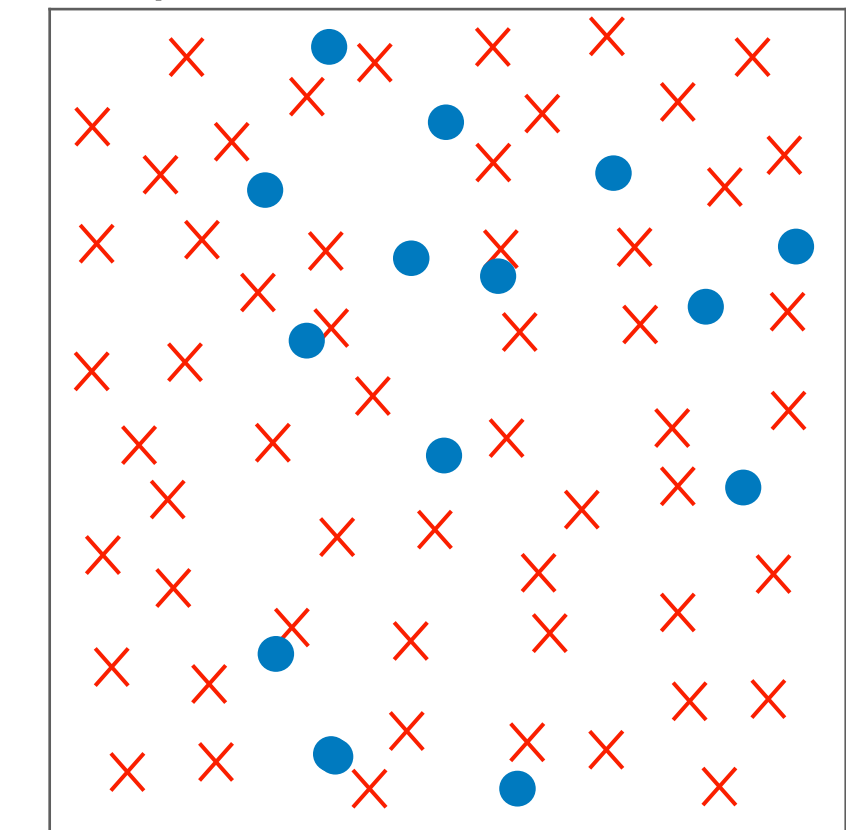
Les mesures de Vs et SPT sont complètement non colocalisées (Vs et SPT ne sont jamais mesurées au même point XYZ)

Mesures SPT mieux réparties et plus nombreuses que les mesures Vs

### Corrélation spatiale supposée entre SPT et Vs



### Configuration schématique de la répartition des données



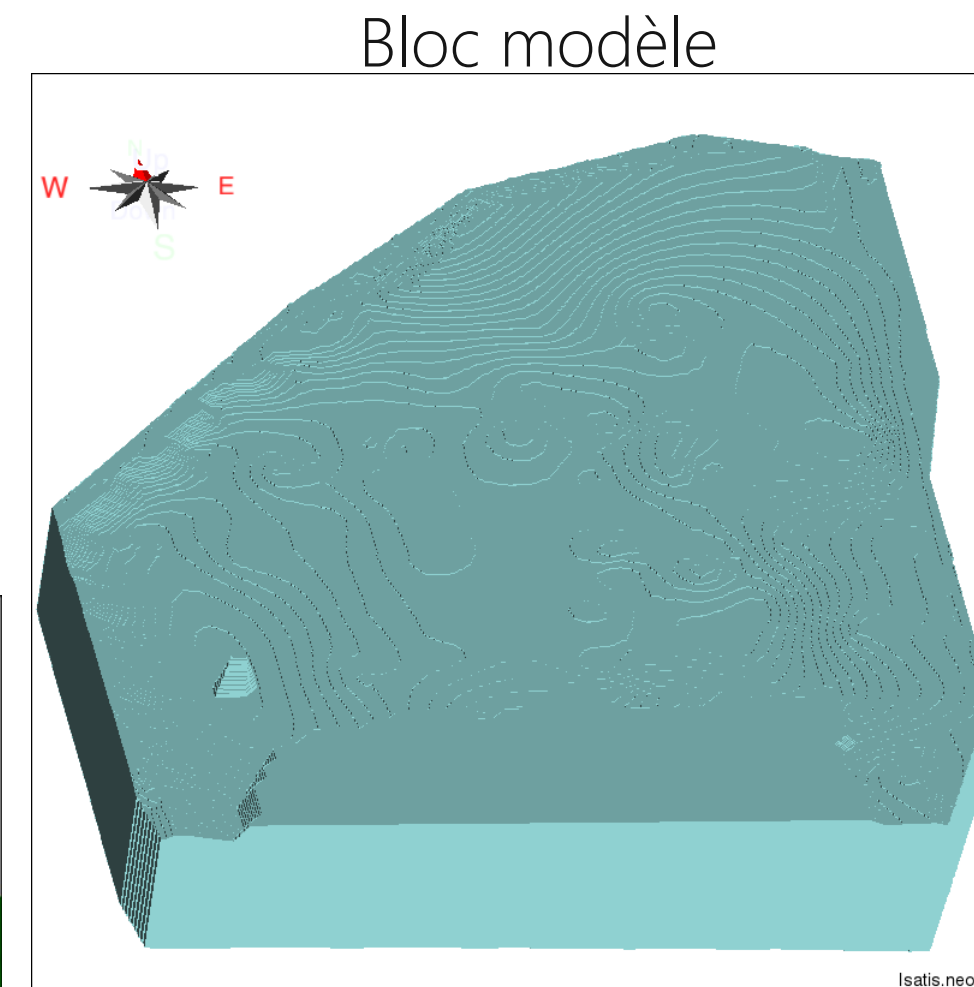
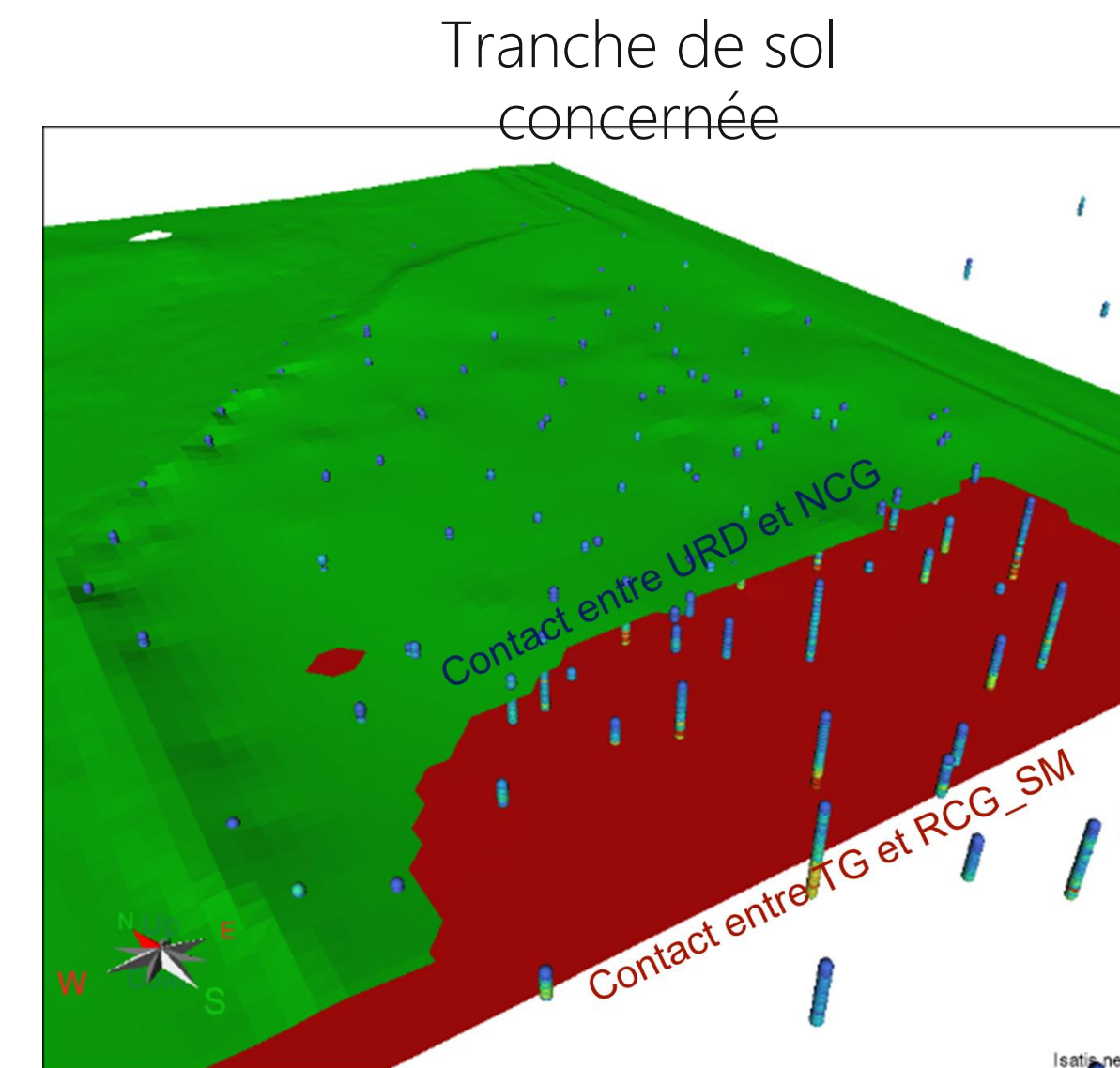
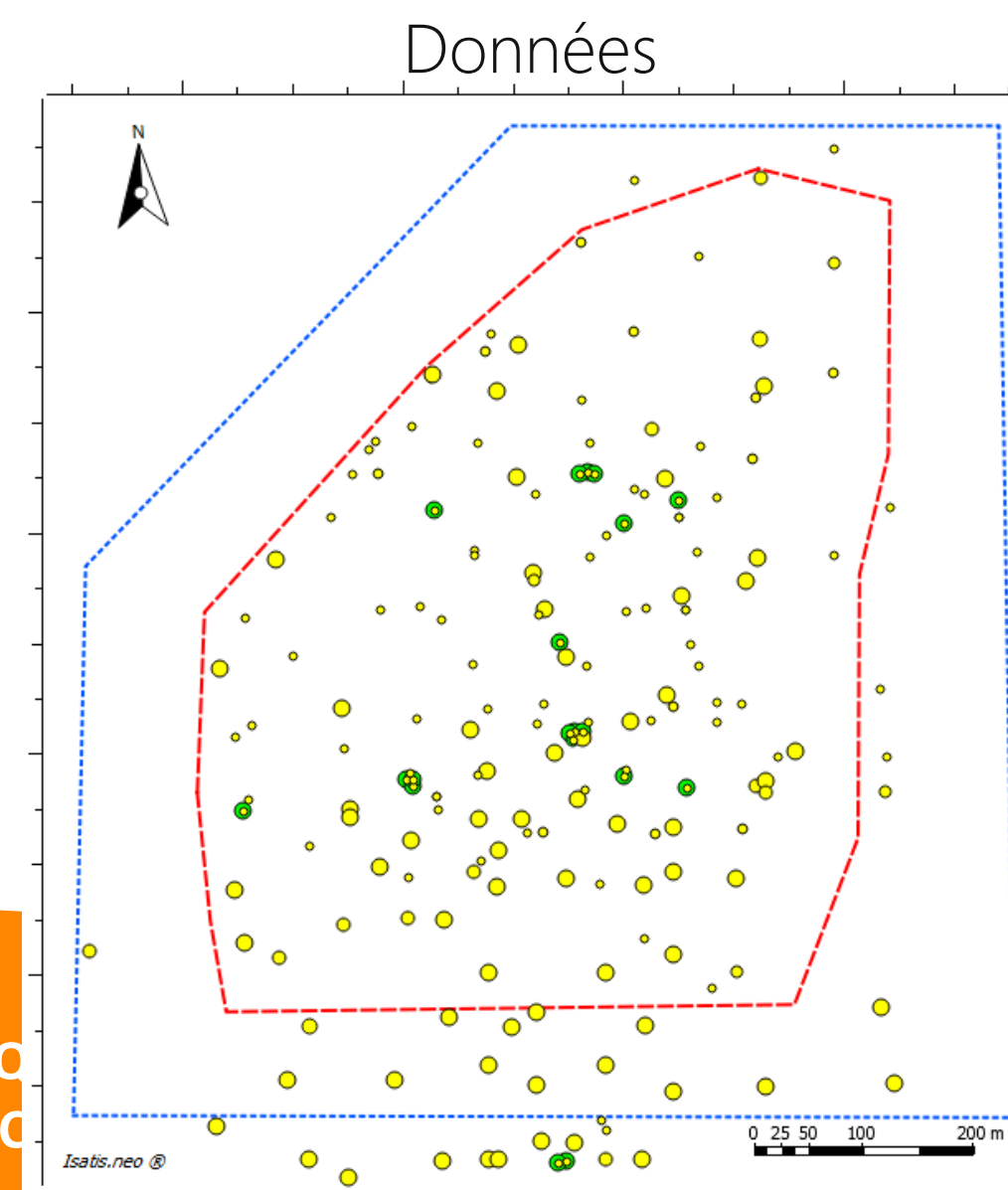
× Donnée A  
● Donnée B



# Zone d'intérêt

## Limites verticales basées sur les contacts entre les couches géologiques

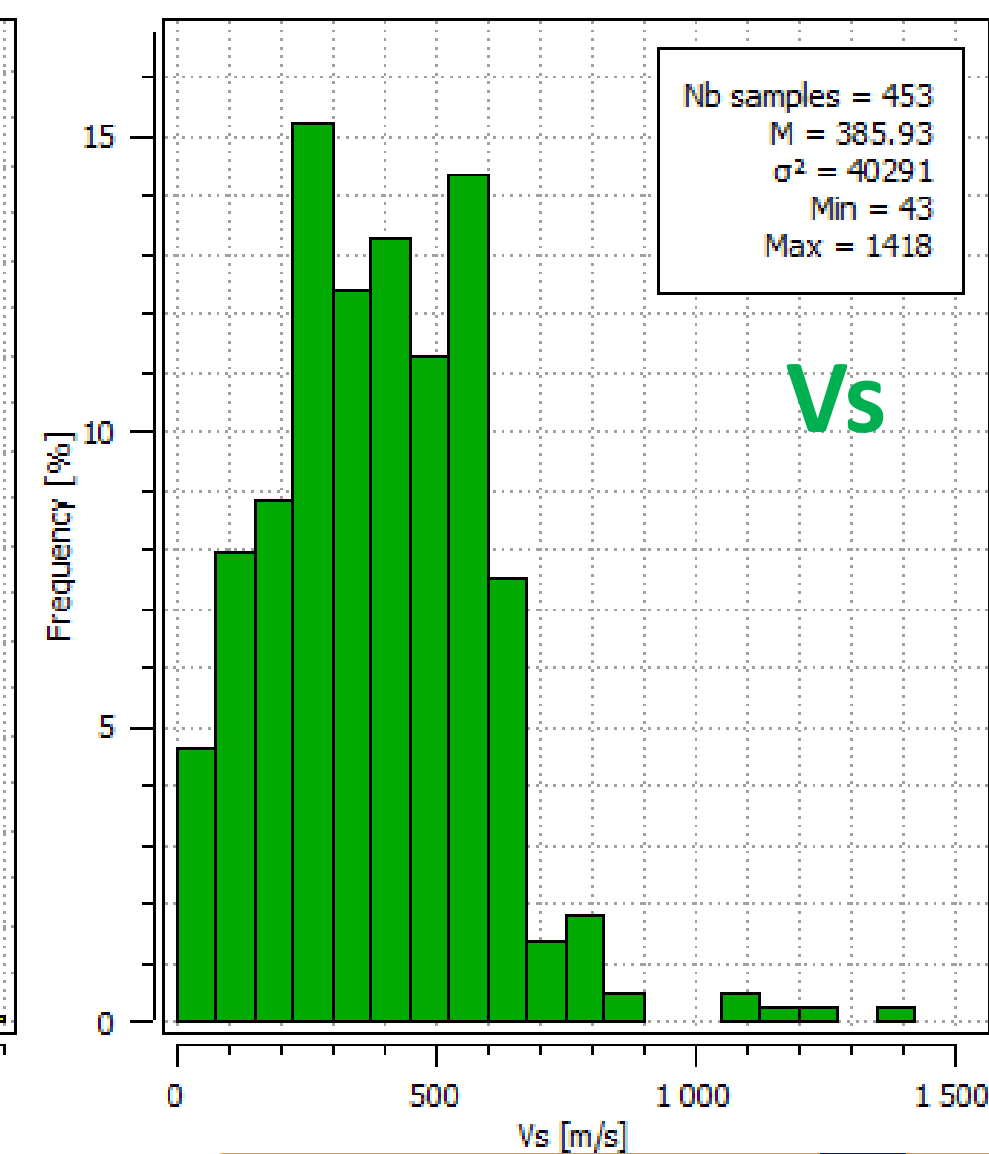
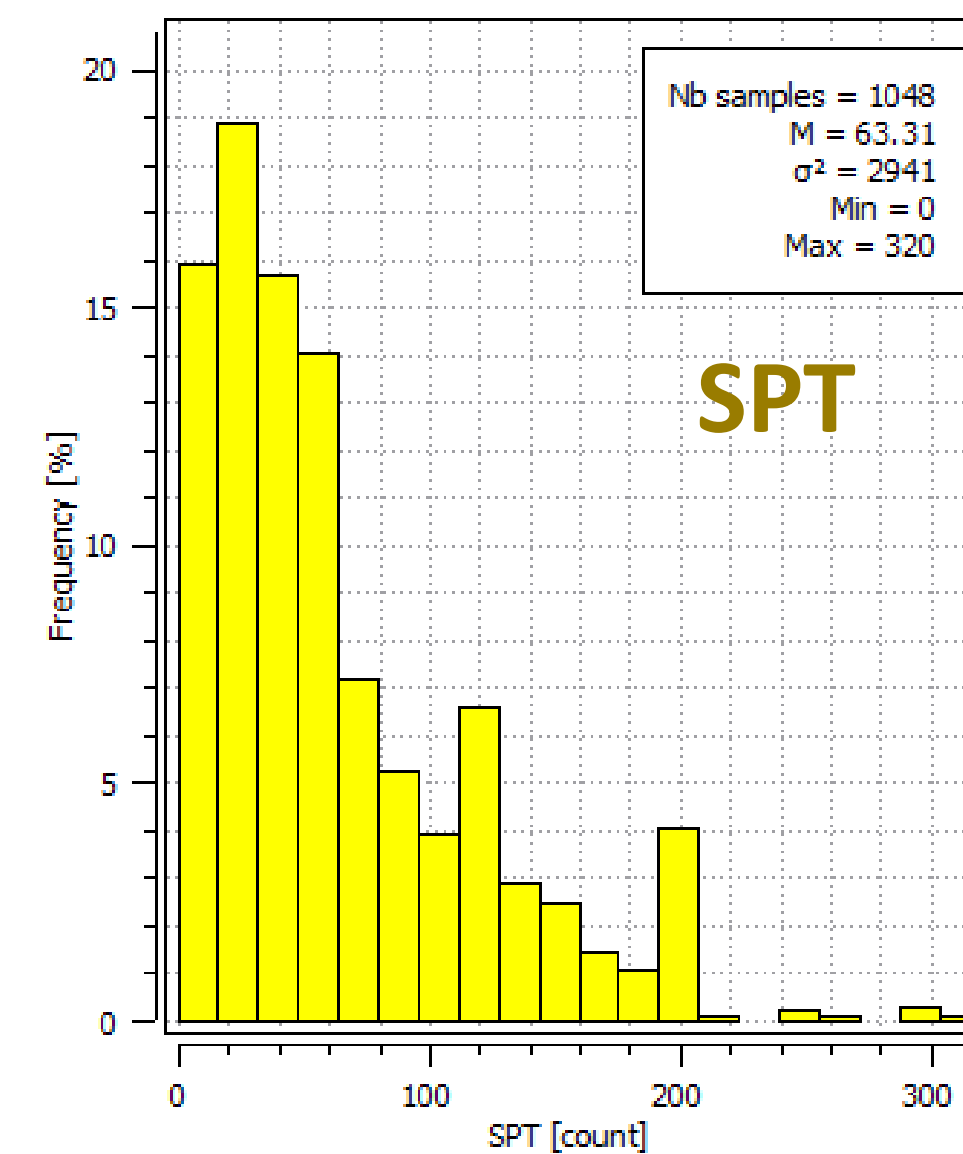
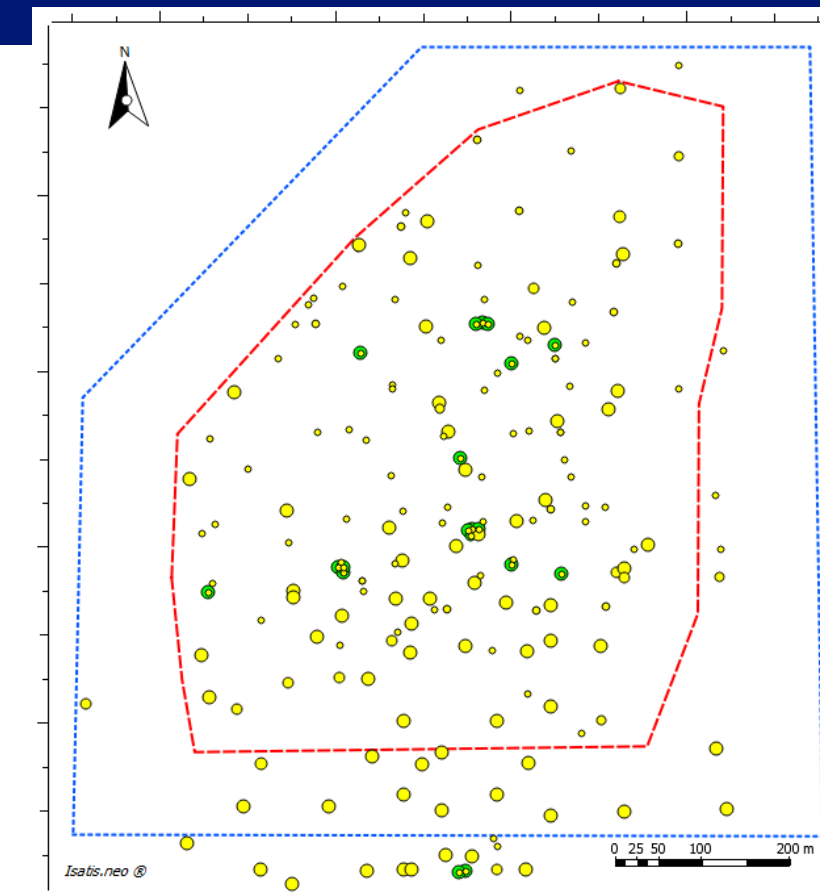
- Tranche de terrain concernée par l'étude: **Contact entre URD et NCG** - **Contact entre TG et RCG\_SM**
- Zone d'intérêt** pour interpolation : 373'396 m<sup>2</sup>
- Limite géographique** pour sélectionner les sondages
- Modèle de blocs:
  - Taille des blocs : 100 cm x 100 cm x 50 cm
  - Nombre des blocs : 31'637'420
  - Volume d'intérêt : 15'818'710 m<sup>3</sup>



# Sondages sur un site nucléaire

## Mesures SPT vs Vs dans les sondages

- 1048 mesures SPT vs 453 mesures Vs
- Mesures non colocalisées mais possibilité de calculer un nuage de corrélation à l'aide d'une opération de migration
- Corrélation avérée entre Vs et SPT
- Distributions statistiques asymétriques

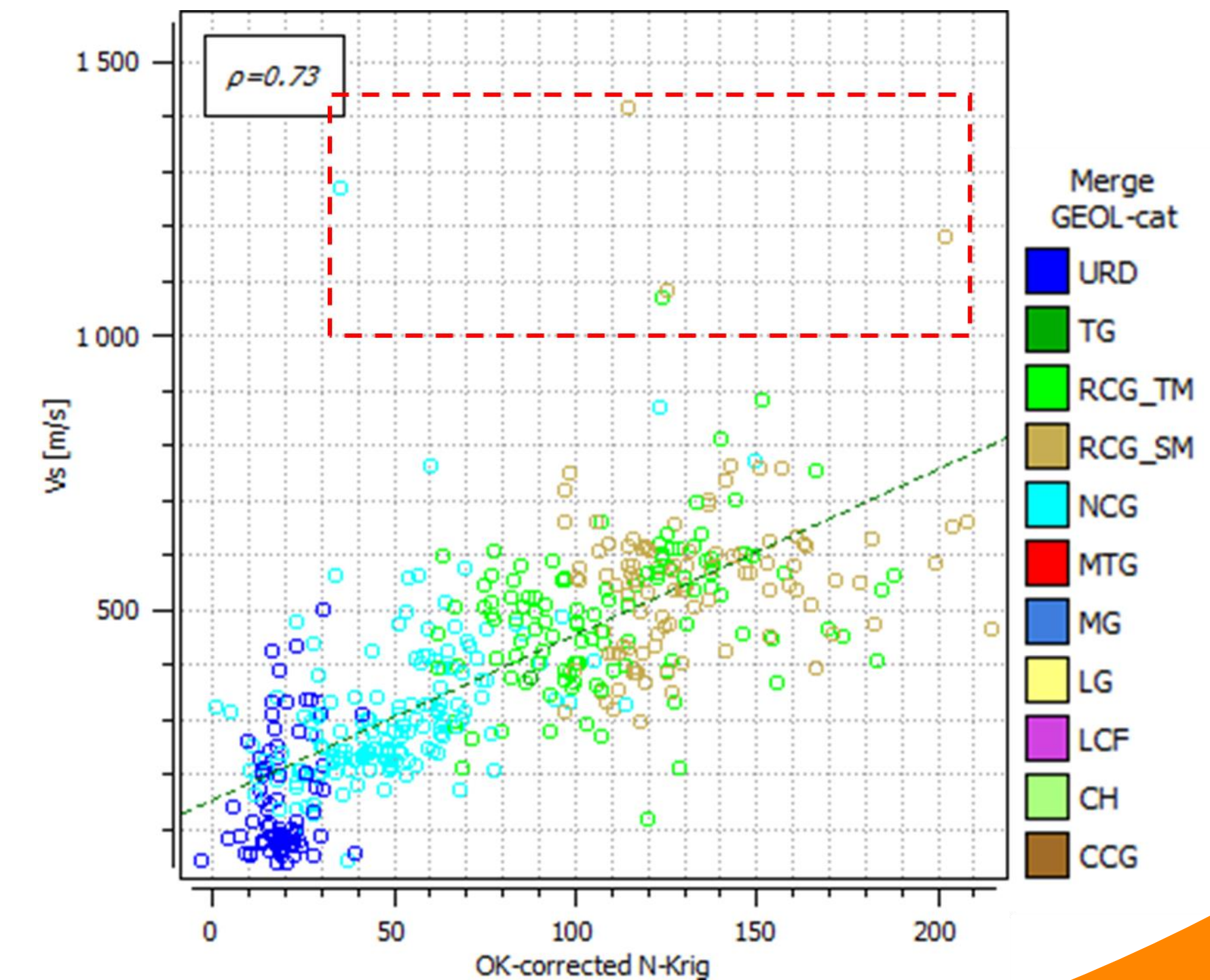




# Sondages sur un site nucléaire

## Mesures SPT vs Vs dans les sondages

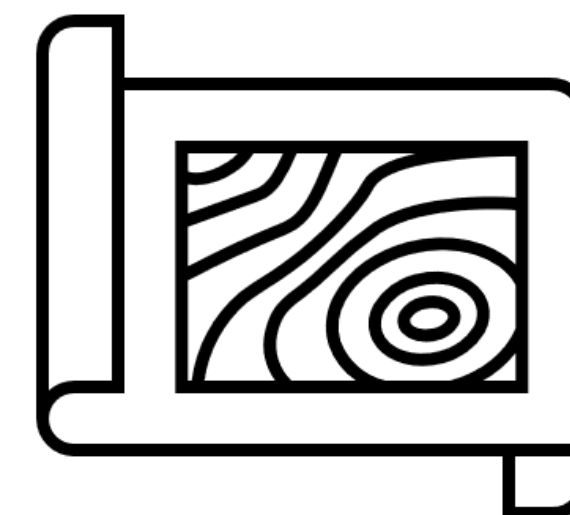
- 1553 mesures SPT vs 916 mesures Vs
- Corrélation avérée entre Vs et SPT
- Distributions statistiques asymétriques
- Dans une analyse multivariable de type cokrigage, la présence de corrélation entre deux variables est un prérequis
- Le coefficient de corrélation ( $\rho=0,73$ ) justifie l'usage du cokrigage pour interpoler la variable Vs en considérant la variable auxiliaire SPT
- Les valeurs Vs supérieures à 1000m/s sont considérées comme des outliers donc ignorées lors de l'interpolation
- Ainsi en écartant les 5 outliers, la corrélation linéaire est améliorée et passe à 0,78.





# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



isatis.neo  
GEOSTATISTICS MADE ACCESSIBLE

# Analyse spatiale



Geovariances

APPLICATION DE LA GÉOSTATISTIQUE DANS L'ANALYSE DE RISQUE  
GÉOTECHNIQUE LIÉ À LA LIQUÉFACTION DU SOL

15 NOVEMBRE 2022

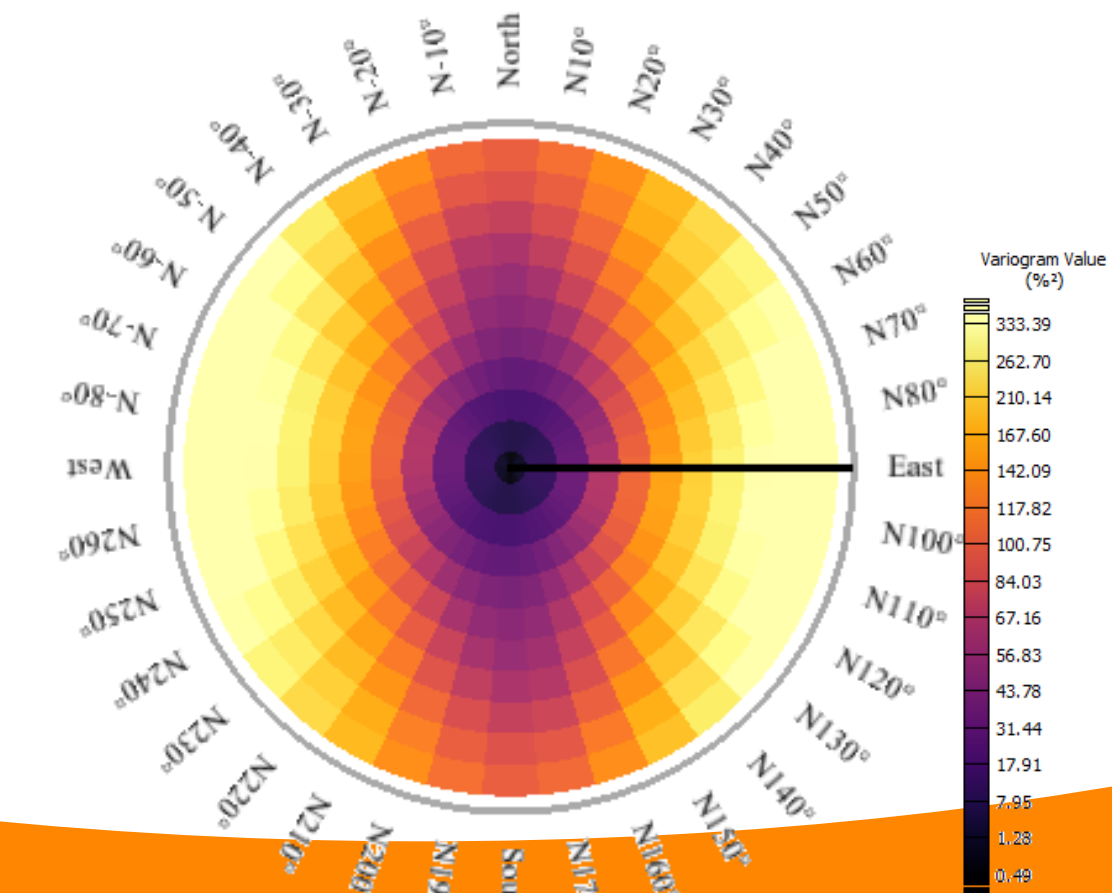
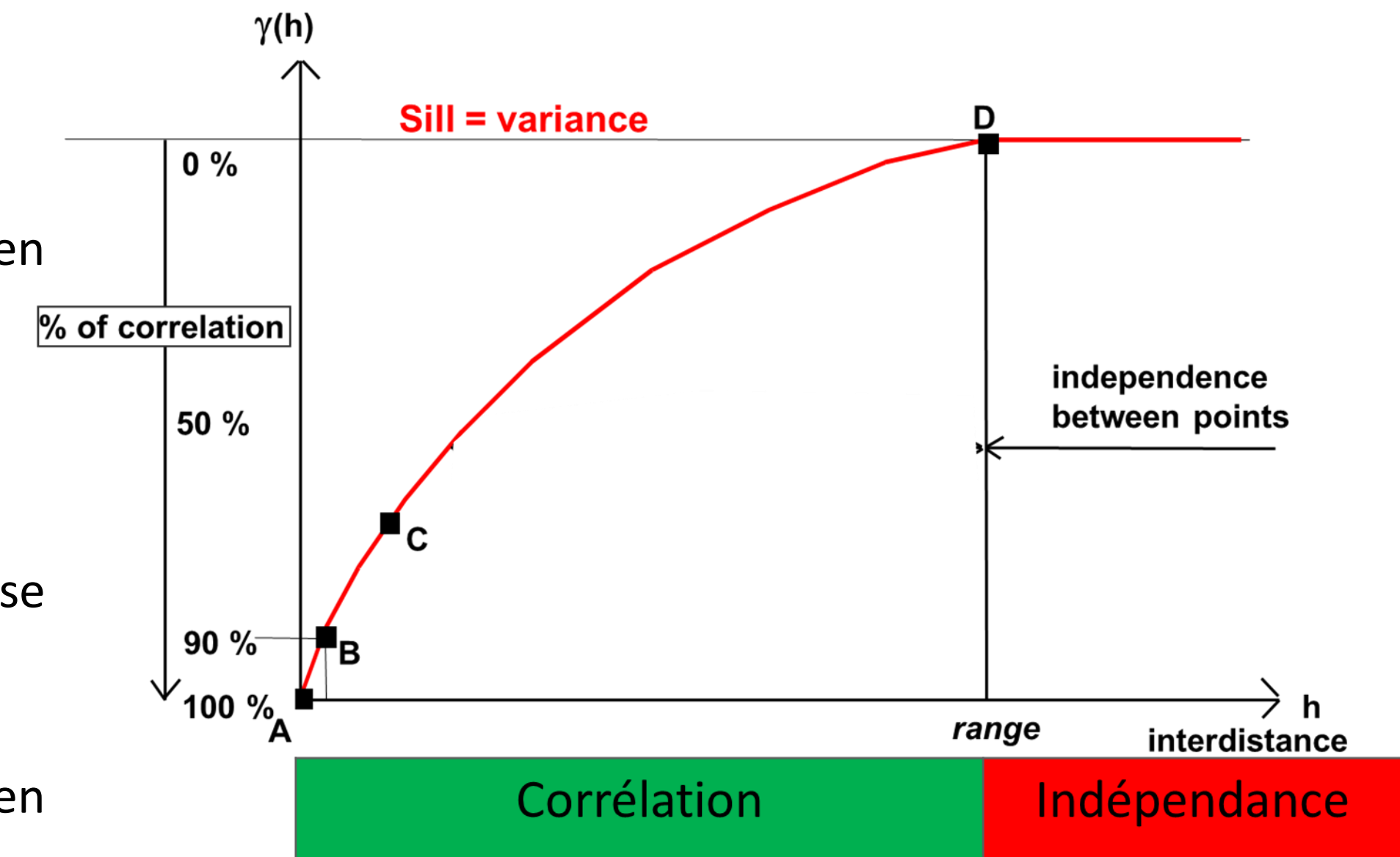
# Analyse variographique monovariante

## Variabilité spatiale - Géostatistique

Le variogramme est l'outil expérimental qui mesure la force de corrélation d'une variable en fonction de la distance entre les points de mesure.

Calculé suivant plusieurs directions, le variogramme permet d'identifier des anisotropies:

- La bonne couverture **horizontale** des échantillons **SPT**, permet d'effectuer une analyse variographique multidirectionnelle
- La couverture **horizontale** des échantillons Vs étant plus faible, il est plus difficile de bien caractériser la variabilité de façon multidirectionnelle.

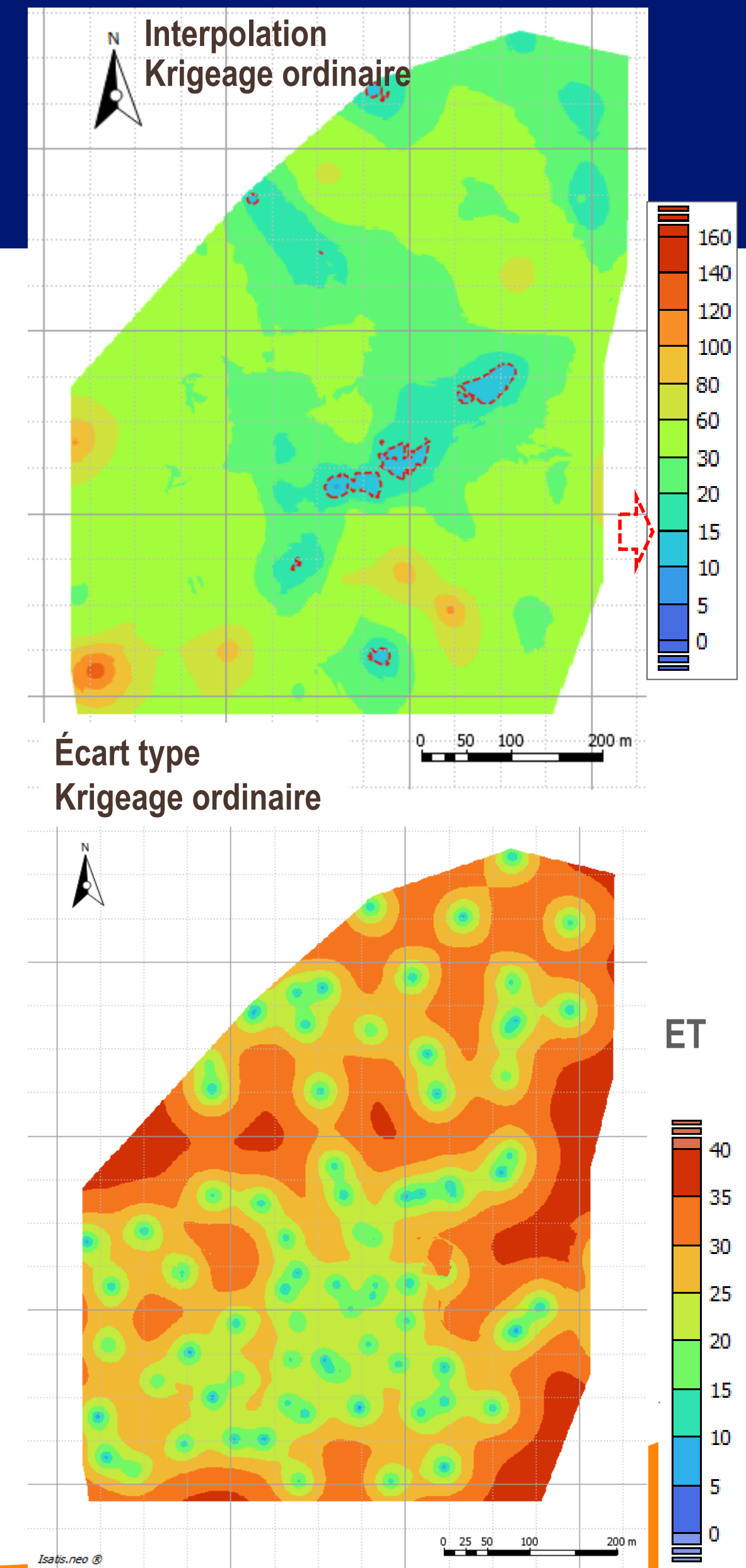




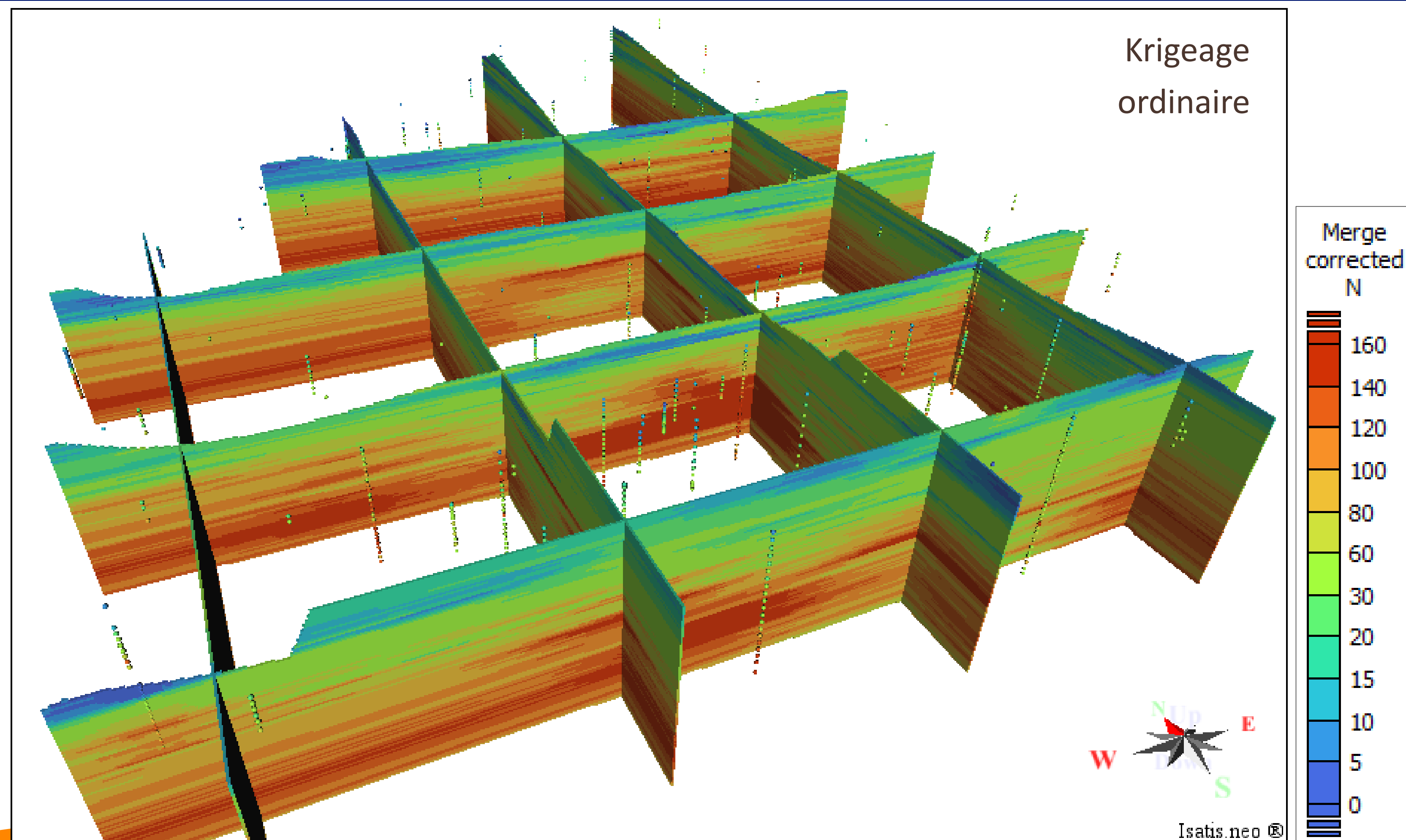
# Cartographie SPT

## Krigeage ordinaire de SPT

- L'interpolation par krigeage est bien conditionnée aux données et tient compte de la structure spatiale de SPT.
- Résultats principaux de l'estimation par krigeage:
  - L'estimation par krigeage donne en tout point la **valeur moyenne la plus probable tout en minimisant l'erreur d'estimation**
  - Le krigeage fournit en plus de la cartographie du paramètre SPT, une carte d'erreur (écart-type de krigeage) qui traduit l'**incertitude sur les résultats d'estimation**
- La carte d'écart-type de krigeage montre les zones les moins bien estimées et donc met en évidence les zones présentant un besoin d'investigation lors d'une campagne de reconnaissance complémentaire.



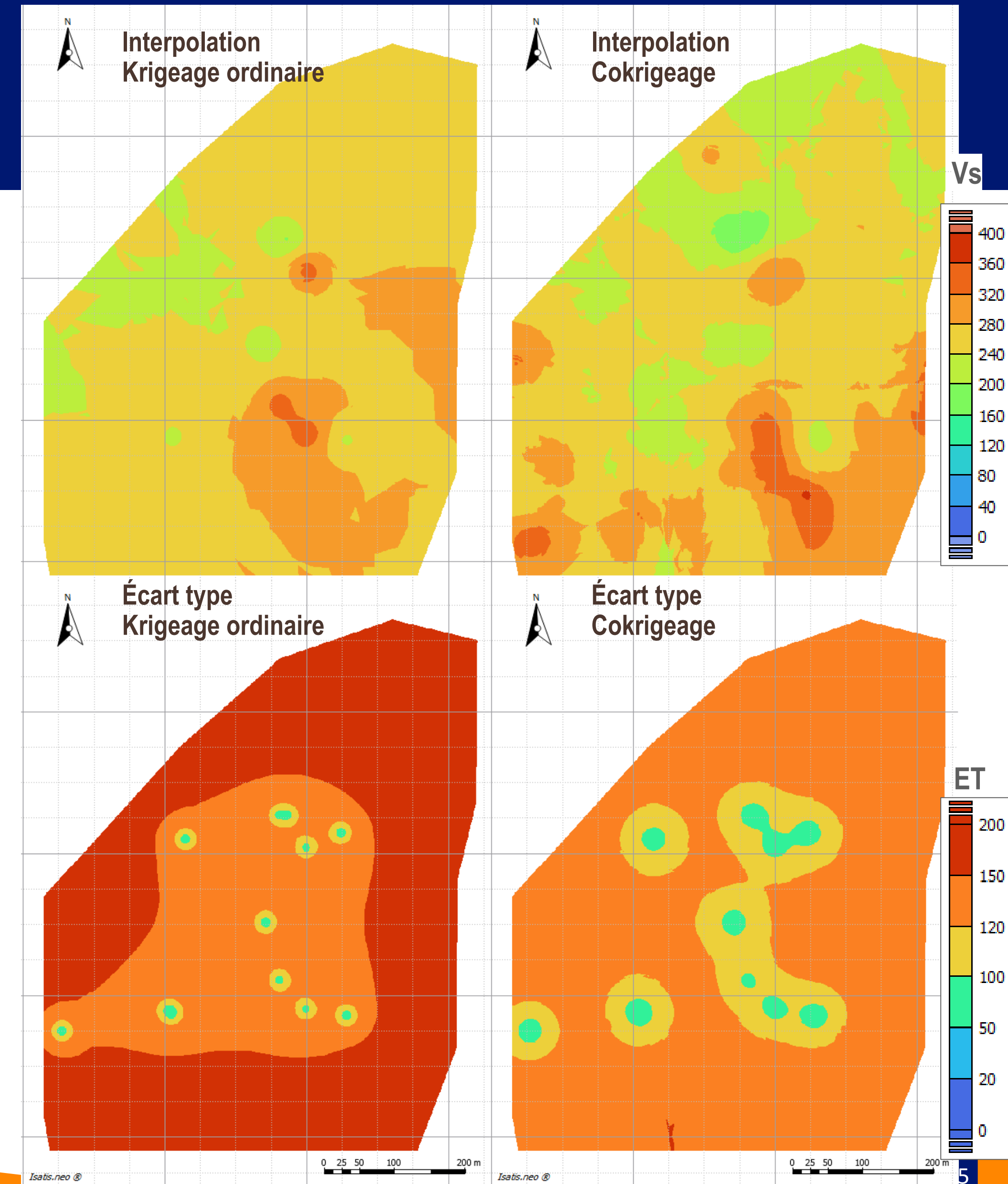
# Modèle 3D (z-scale=2) SPT - Interpolations



# Cartographie Vs

## Krigeage vs cokrigeage

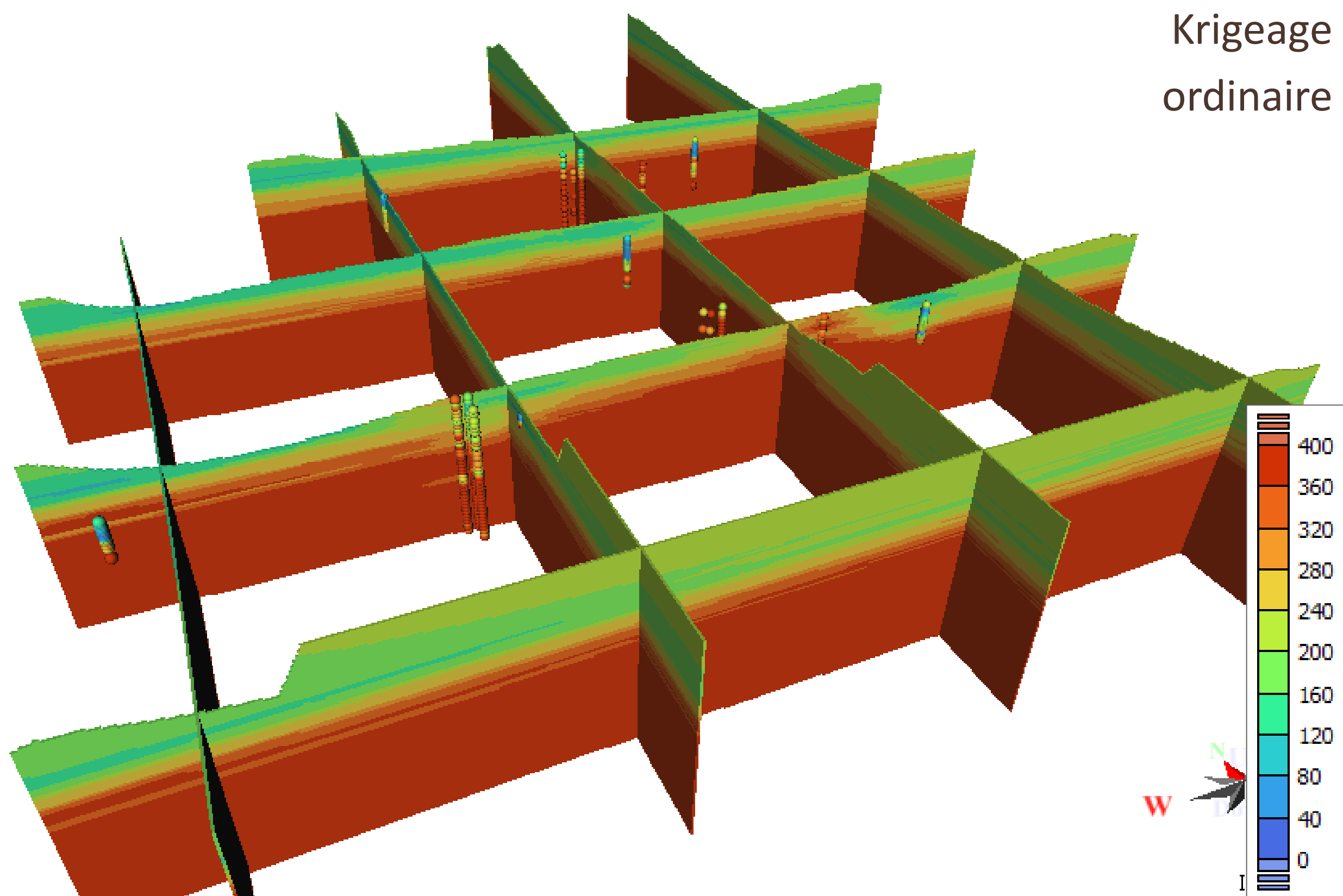
- Le krigeage dans sa forme multivariable est appelé **cokrigeage**. Il possède les mêmes propriétés que le krigeage
- Le cokrigeage a **l'avantage de réduire l'incertitude (l'erreur d'estimation)** sur la variable d'intérêt Vs moins bien mesurée que la variable auxiliaire SPT qui est mesurée plus densément sur le site
- La carte de co-krigeage apporte **plus de détails** que ce que donne le krigeage
- Le **gain du co-krigeage est nettement visible sur l'écart-type de krigeage (incertitude sur l'estimation) qui a baissé localement et en moyenne de ~21%**. Cela est entièrement dû à l'intégration des données SPT pour l'estimation des Vs.



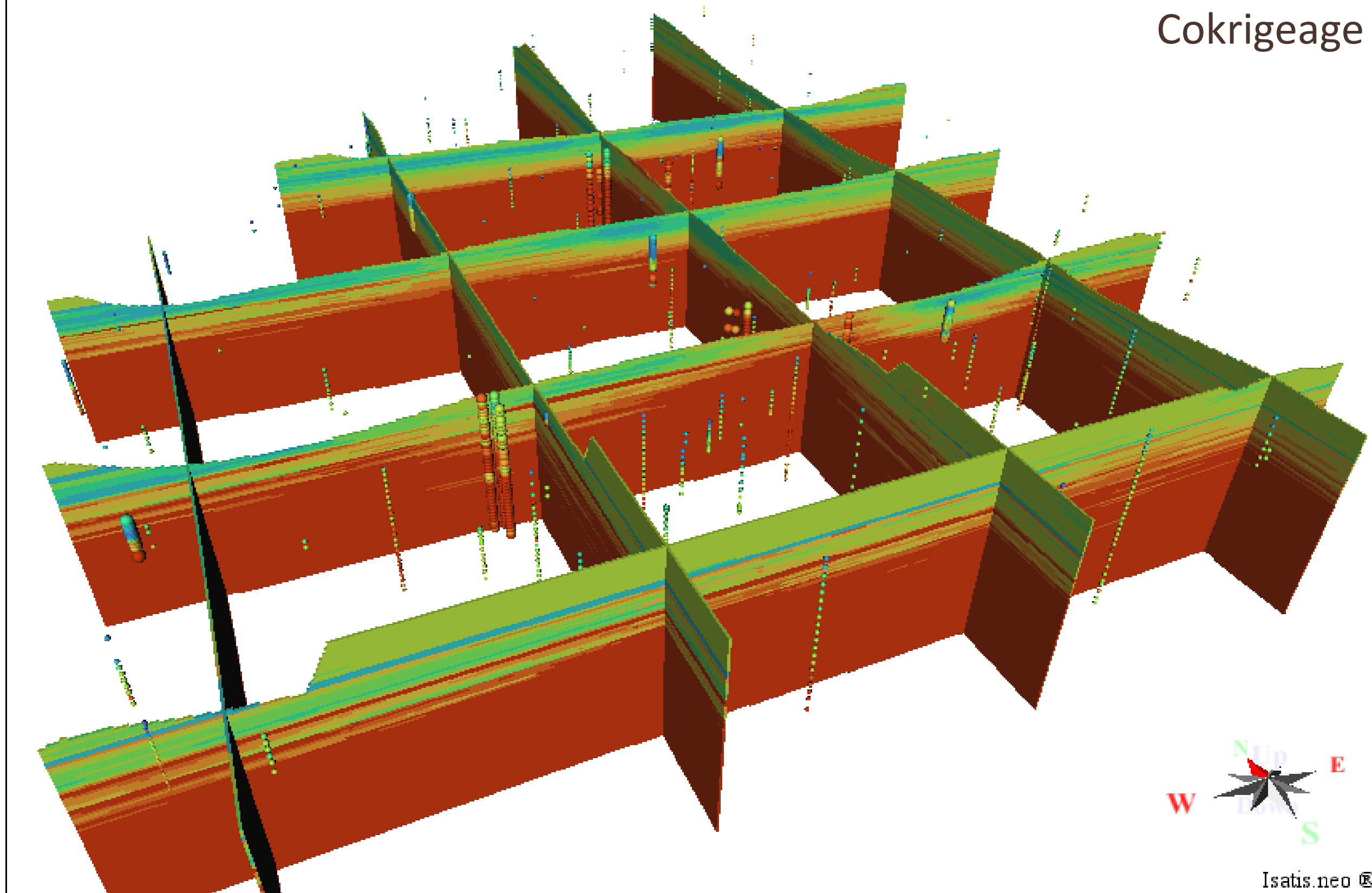


# Modèle 3D (z-scale=2) Vs - Interpolations

Krigeage  
ordinaire



Cokrigeage





# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



# Analyse de risque de liquéfaction



Geovariances

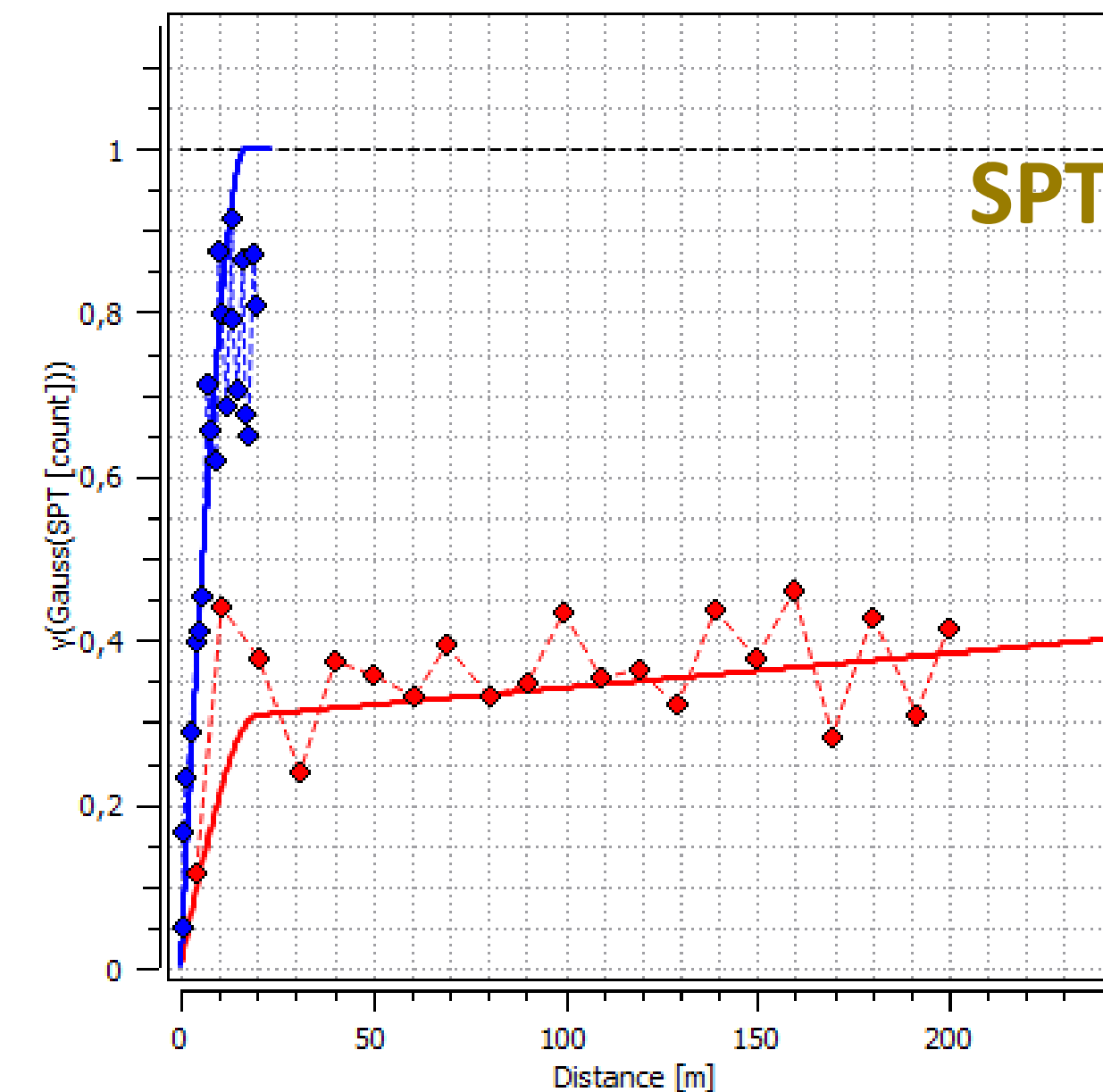
APPLICATION DE LA GÉOSTATISTIQUE DANS L'ANALYSE DE RISQUE  
GÉOTECHNIQUE LIÉ À LA LIQUÉFACTION DU SOL

15 NOVEMBRE 2022

# Analyse du risque de liquéfaction

## Analyse du Risque en Géostatistique

- La gestion de la maîtrise de risque en géosciences peut renvoyer à deux notions clés que sont:
  - L'**anticipation sur l'occurrence d'incident** → Dans notre cas la liquéfaction des terrains sous jacents
  - La **mesure locale de la probabilité de franchir un seuil** physique critique
- Les simulations géostatistiques permettent de répondre à ces questions.
- Elles nécessitent un formalisme particulier mais assure une **quantification plus précise et cohérente de l'incertitude** sur la variable d'intérêt.
- Les simulations réalisées sur le site d'intérêt **tiennent compte des données de SPT** et aussi de leur **structure spatiale** au travers du variogramme. (Simulations conditionnelles)

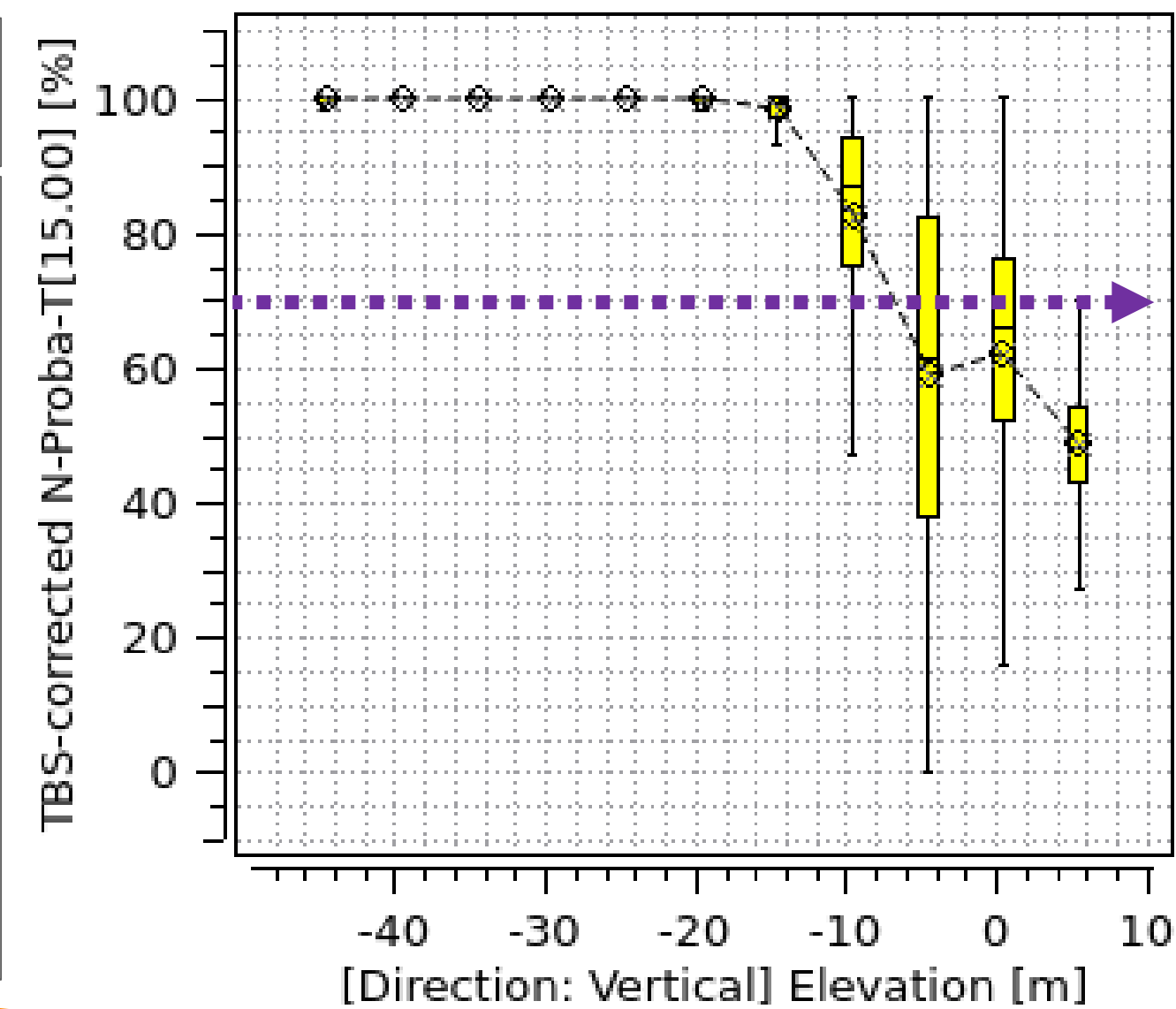
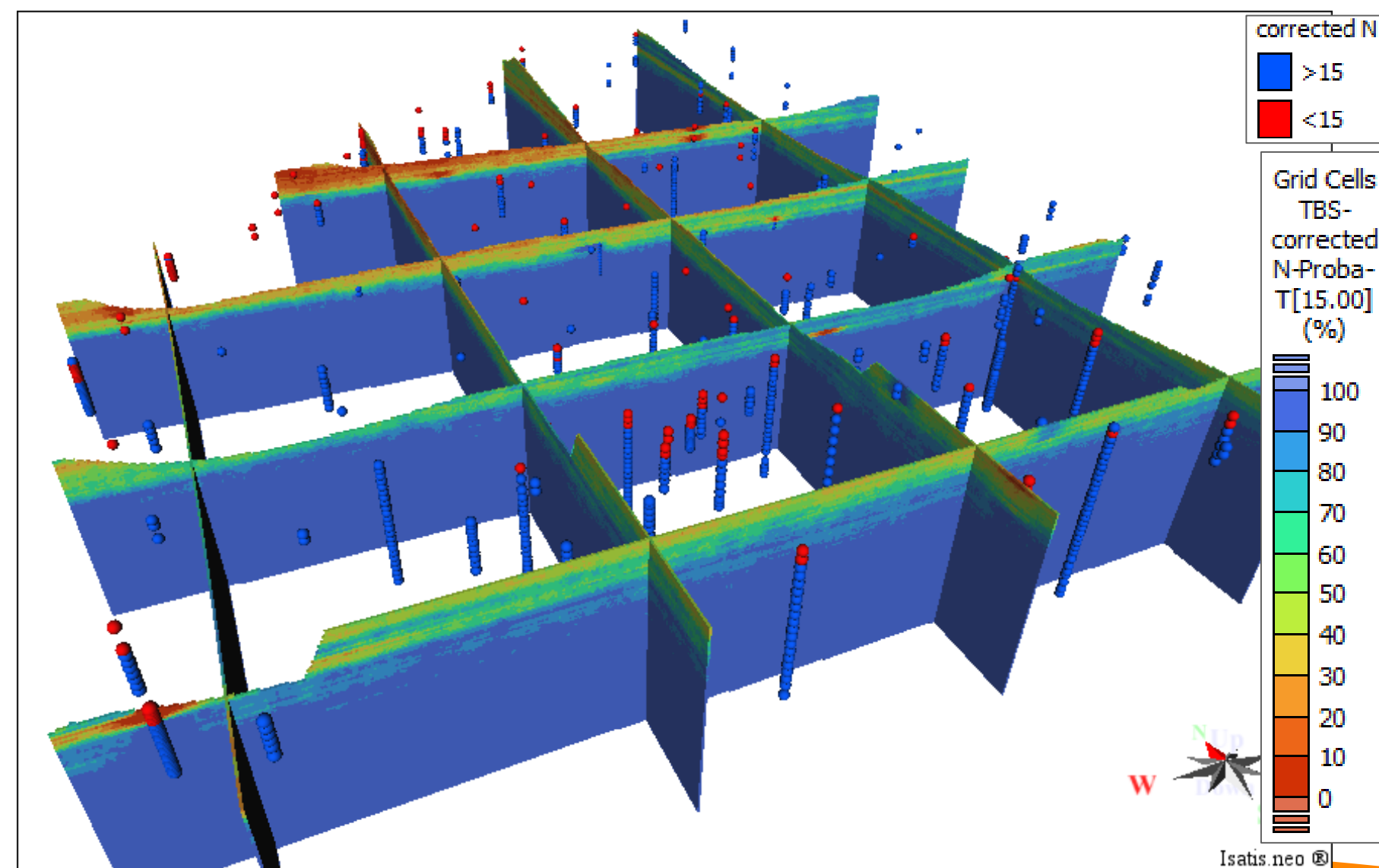




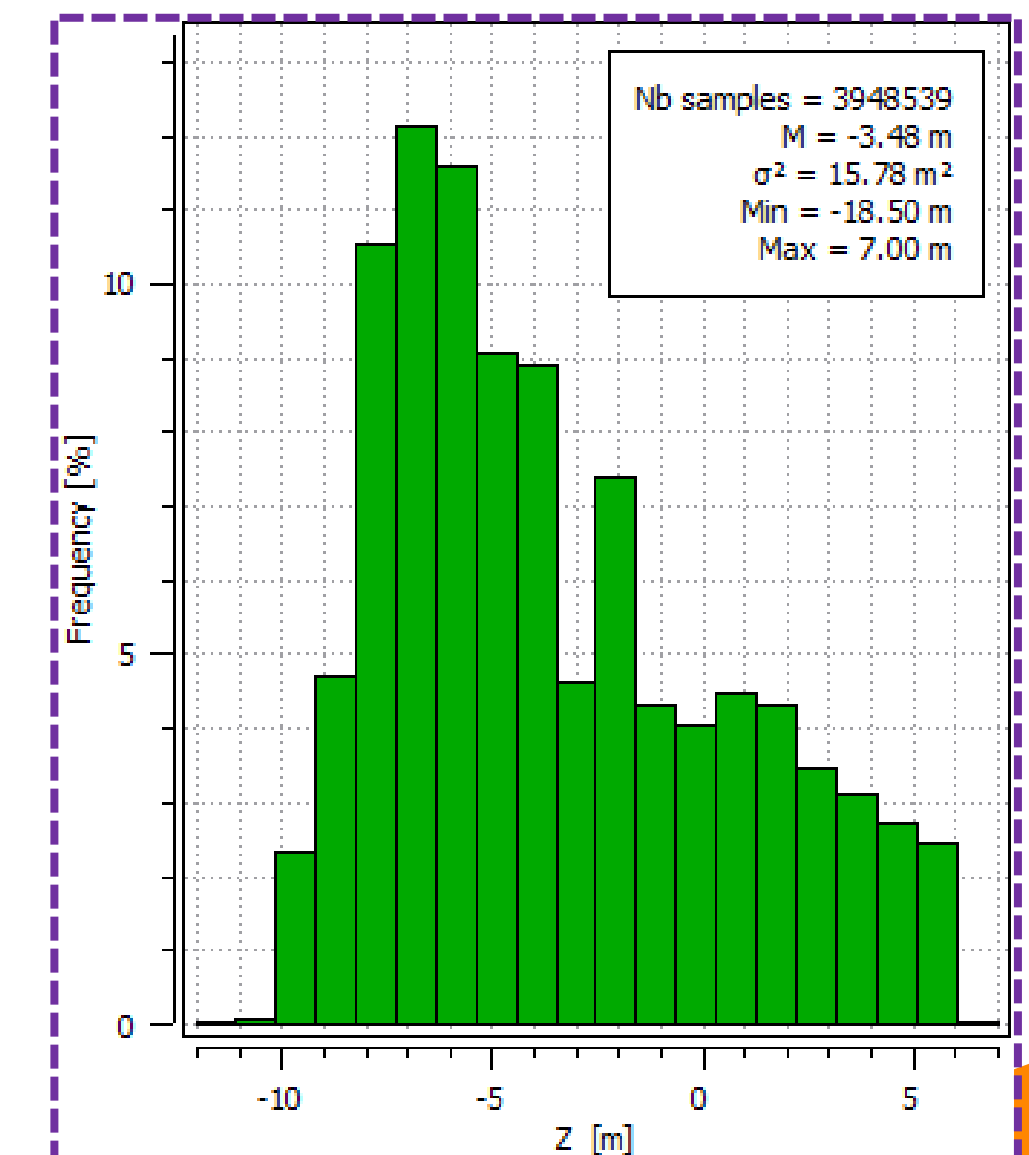
# Cartographie du risque de liquéfaction

## Simulations conditionnelles

- Risque de **liquéfaction** est étudié et basé sur le **critère SPT<15**
- **Simulation géostatistique** utilisée afin de générer 100 réalisations
- Probabilité de dépassement du seuil de SPT=15 est calculée et cartographiée



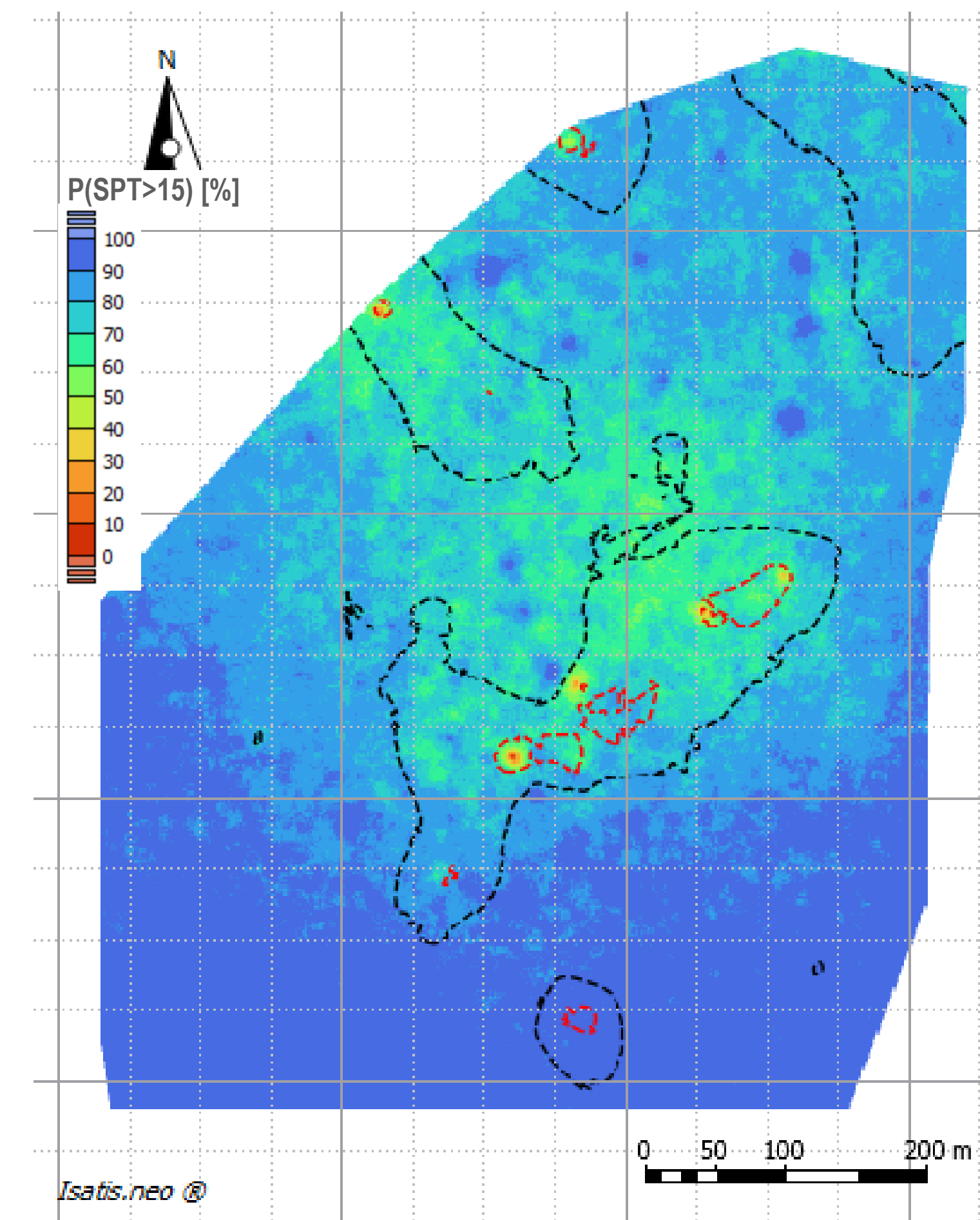
Histogramme  
d'élévation où  
 $P(\text{SPT}>15) \leq 70\%$



# Interprétation

## Carte de probabilité (couleurs) vs krigeage ordinaire (contours)

- Les simulations géostatistiques ont permis de générer **100 réalisations (réalités équiprobables) de la structure spatiale de SPT**
- L'interpolation par krigeage est superposée à la carte de probabilité de dépassement du seuil SPT à 15. Il s'agit des isovaleurs en rouge 15. Voir carte ci contre.
- Le post-traitement des simulations indique les zones où le risque de ne pas respecter le critère SPT>15 est significatif (pixels vert) ainsi que les endroits sans risque (ou un risque moindre) de liquéfaction (bleu)



# Conclusion

## Valeur ajoutée de l'analyse géostatistique dans l'étude de liquéfaction du sol

- *Cartographie objective de la valeur interpolée conditionnée aux mesures*
- *Utilisation d'une structure spatiale (variogramme)*
- *Production d'une carte d'erreur d'interpolation associée aux valeurs interpolées*
- *Analyse du risque basée à partir des simulations géostatistiques permettant l'optimisation du volume du sol à excaver/renforcer*



Geovariances