

ING2 – 2020
Rapport de progression

Projet d'initiation à la recherche

**Analyse des déplacements de surface en
utilisant des techniques de PSinSAR dans la
région du plateau de Calern**

Jules Pierrat
Charles Laverdure

Février 2021

Ecole Nationale des Sciences Géographiques

6-8 Avenue Blaise Pascal – Cité Descartes – 77420 Champs-sur-Marne

Téléphone 01 64 15 31 00 Télécopie 01 64 15 31 07

RESUME

La région du plateau de Calern, dans le sud-est de la France, regroupe un grand nombre d'instruments d'observation astronomique appartenant à l'observatoire de la côte d'azur. Parmi ces instruments, certains appartiennent tout particulièrement au site de colocalisation de Grasse. Ce site est un regroupement d'instruments géodésique tels que des stations GNSS assurant la maintenance du réseau IRTF, des antennes DORIS et des stations de télémétrie laser (Messa-Delprat, 2019). Au milieu de tout cela, on trouve un réflecteur SAR (Synthetic Aperture RADAR) permettant de renvoyer spécifiquement des ondes RADAR vers un récepteur satellitaire. Pour ce projet de recherche, nous avons voulu utiliser cet instrument géodésique afin de mesurer les déformations terrestres dans une région de 50 par 50 km autour du plateau de Calern. Notre projet s'est particulièrement concentré sur l'interpolation spatiale des données fournies par notre commanditaire. Les données qui nous ont été fournies correspondent à un traitement sous le logiciel STAMPS permettant d'extraire des vitesses de déplacement sol issues d'images RADAR captées par le satellite SENTINEL entre octobre 2014 et mai 2019 en utilisant une technique appelée PSinSAR (Permanent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar). Notre travail consistait à mettre en pratique des éléments d'interpolation présentés dans la thèse de Thomas Fuhrmann (2016) tout particulièrement les techniques de krigeage appliquées à nos données pour valider son modèle et voir s'il était compatible avec d'autres sites d'études de déplacement par PSinSAR. Le krigeage est une technique d'interpolation spatiale qui, quand elle est appliquée comme géo traitement, permet d'obtenir une surface de données rastérisées à partir d'observation ponctuelle. Appliqué à notre projet, la surface obtenue par krigeage est une surface de l'évolution de la vitesse de déplacement sol (en mm/an). Cette étape est en fait une étape intermédiaire qui permet de requalifier un nouveau jeu de point répartis uniformément sur la zone d'étude. Avec des valeurs pour la vitesse de déplacement sol en ces points et en comparant les résultats obtenus avec des orbites ascendantes et descendantes du satellite, on peut déterminer le déplacement en 3 dimensions à chaque point étudié. Enfin, une mise en référence résultats avec des données GNSS ou de nivellement permet d'apprécier les déformations de la zone dans le référentiel terrestre.

Mots-clés : INSAR, Interférométrie, interpolation spatiale, krigeage, PS, déplacement, déformation, vitesse sol, mise en référence.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Introduction	4
 1. État des lieux des techniques d'acquisition et de traitement par PSinSAR ...	4
1.1 Présentation de l'interférométrie RADAR avec PS	4
1.1.1 L'acquisition RADAR - SAR	4
1.1.2 Passage aux vitesses de déplacement sol	5
1.2 Travaux de Thomas Fuhrmann dans le Haut-Graben Rhénan	5
1.2.1 Interpolation spatiale / géostatistiques	5
1.2.2 Reconstruction des mouvements en Est et verticaux	6
1.3 Techniques d'analyses applicables au site de colocalisation de Grasse	6
1.3.1 Problématiques issues de l'étude de l'état de l'art	6
2. Application aux données du site de Calern	8
2.1 Présentation des données	8
2.2 Analyse des corrélations spatiales	8
2.3 Interpolation spatiale / analyse géospatiale	9
Conclusion	10
Perspectives, discussion, retour d'expérience	10
Bibliographie	11
Annexes	12
A. Liste des figures	12
B. Données	17
C. Kriging vitesses	17
D. Kriging incidence	18

Introduction

L'avancement récent dans les possibilités d'imagerie RADAR mais surtout des capacités de calculs informatiques permettent d'envisager une utilisation plus large des techniques de PSinSAR pour mesurer les déformations à la surface de la terre. Par le passé, la complexité relative de l'exploitation des données post-acquisition RADAR rendaient ces techniques non-compétitives comparées aux GNSS déjà très répandues et simples d'utilisation. L'objectif de notre projet d'initiation à la recherche (PIR) était de reprendre des techniques PSinSAR utilisées par Thomas Fuhrmann (2016) afin de mesurer les déplacements au niveau du sol autour du site de colocalisation de Grasse. Les techniques d'acquisitions par inSAR sont aujourd'hui très utilisées dans les études de déformations, de détection de changement et donc désignées dans l'études des mouvements géologiques ponctuels importants (séismes, glissement de terrain, ...) (Augier, 2020). Cela dit, la zone du plateau de Calern n'est pas réputée pour sa sismologie et notre projet s'inscrit donc dans l'utilisation de ces techniques pour mesurer précisément des déplacements sub-centimétriques sur une durée de 5 ans couvrant une zone étendue comparée à d'autres travaux similaires.

Ce rapport présente tout d'abord le fonctionnement de l'acquisition par PSinSAR suivant tout particulièrement la thèse et les procédés de Thomas Fuhrmann (2016) dans la région du haut Graben entre l'Allemagne et le nord-est de la France. La seconde partie consiste en la démonstration de notre démarche scientifique ainsi que la présentation de nos résultats. Enfin, les dernières lignes de ce rapport amènent nos conclusions quant à la comparaison des études de déplacement de Fuhrmann à la nôtre. Il s'agit d'expliquer les similitudes et surtout d'argumenter les différences entre les deux approches.

1. État des lieux des techniques d'acquisition et de traitement par PSinSAR

Notre projet se concentre principalement sur l'interpolation spatiale de données vitesses ponctuelles qui nous ont été fournies et étant déjà traitées. Cependant, afin de mieux apprécier nos résultats, il faut comprendre le fonctionnement de l'acquisition par PSinSAR. Cette première partie se concentre sur cette tâche du passage d'images d'interferographie RADAR à des vitesses de déplacement sol en reprenant des travaux universitaires déjà réalisés par le passé.

1.1 Présentation de l'interférométrie RADAR avec PS

1.1.1 L'acquisition RADAR – SAR

L'acquisition par Synthetic Aperture RADAR (SAR) s'oppose à l'acquisition RAR (real aperture radar) et permet entre autres de bien meilleurs résultats dans la mesure des distances dans la ligne de visée du satellite (LOS sat.). A partir de ces acquisitions, nous pouvons utiliser les techniques d'inSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) et particulièrement de DinSAR (Differential Interferometric SAR). Cette dernière méthode permet de mesurer une distance au satellite grâce à la phase de l'onde RADAR projetée sur le sol. L'analyse de l'écho sur la surface terrestre de cette onde donne indirectement la distance satellite – sol. En effet, la phase de l'onde captée par le récepteur satellite dépend bien sûr de la distance entre le satellite et le sol mais aussi de la phase dite « propre » qui elle est dépendante des « propriétés de rétrodiffusion des réflecteurs du pixel » (Messa-Delprat, 2019).

On a Θ , la valeur de la phase pour un pixel, qui se compose de la phase propre et de la phase géométrique ;

$$\Theta = \Theta_{geo} + \Theta_{propre} \quad (1.1)$$

La réalisation d'un interférogramme entre une image dite « maitresse » et des images « esclaves » obtenues lors d'autres passages du satellite au-dessus de la zone d'étude permet - d'éliminer la phase propre puisque les propriétés

de rétrodiffusion de mêmes pixels ne changent pas entre deux acquisitions. On se retrouve donc avec la phase géométrique dont l'expression est :

$$\theta_{\text{géo}} = 2 * \frac{2\pi}{\delta} R [2\pi] \quad (1.2)$$

Avec R la distance satellite-sol et δ la longueur d'onde.

On voit bien que la mesure de phase est alors uniquement liée à R et à la longueur d'onde RADAR ($\delta = 5.6$ cm pour Sentinel 1). La fig. 1.1 suivante résume cette partie visuellement.

On peut obtenir la distance réelle entre le sol et le satellite en effectuant une « phase unwrapping » qui prend tous les modulus de la phase et applique la longueur d'onde pour avoir des résultats en centimètres. On voit que dans un modèle parfait, sans besoin de correction atmosphérique, l'acquisition inSAR pourrait théoriquement fournir des résultats d'une précision très élevée, de l'ordre du mm.

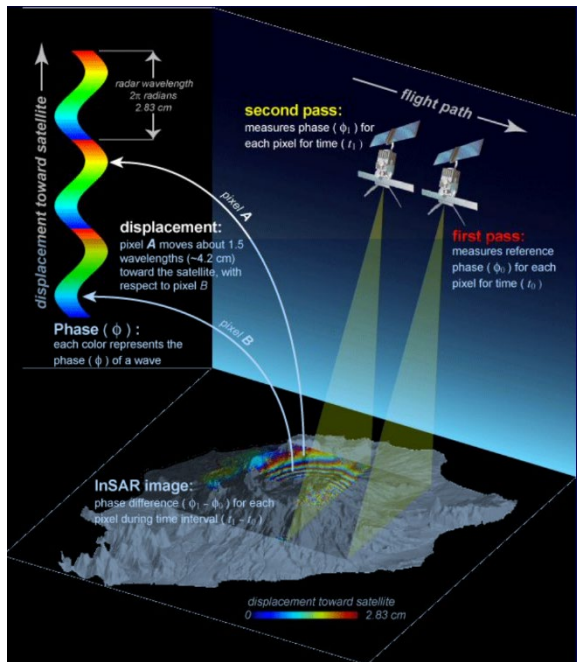


FIGURE 1.1 – Résumé acquisition InSAR PARVIZ TARIKHI 2010

1.1.2 Passage aux vitesses de déplacement sol

La multiplicité des acquisitions permet de réaliser des travaux d'interférométrie comme expliqué précédemment. Ici, nous introduisons la notion de

Persistent/ Permanent Scatterers (PS) qui sont en fait des pixels terrain avec une rétrodiffusion importante et facilement identifiable entre deux images issues de deux passages satellites successifs. Ces PS peuvent être naturels ou artificiels. Le centre de colocalisation de Grasse dispose notamment d'un réflecteur artificiel (voir fig. 1.2). La sélection des PS entre les images est automatisée en utilisant le logiciel STAMPS qui prend en entrée l'image maîtresse et les images esclaves et donne en sortie une vitesse de déplacement pour chaque PS. Ce logiciel permet aussi de prendre en compte les paramètres atmosphériques qui influent beaucoup sur la mesure de phase. Le résultat de ces calculs logiciels est une vitesse en 1D dans la direction de la ligne de visée du satellite.

Pour conclure, l'acquisition PSinSAR permet une bonne résolution spatiale (de l'ordre de 4x20m) est précise (résultats de l'ordre du millimètre ou du centimètre) et peut couvrir de grandes surfaces. Cela dit, les résultats de déplacement ne sont a priori que dans une dimension (dans la ligne de visée), et la mesure de phase peut être compliquée voire impossible dans des zones où la rétrodiffusion est mauvaise (forêts, zones de fortes pentes,...). Cette technique d'analyse géospatiale est très liée à la corrélation entre les données.

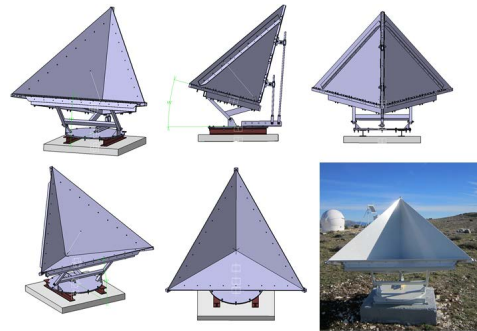


FIGURE 1.2 – Réflecteur permanent du plateau de Calern

1.2 Travaux de thomas Fuhrmann dans le Haut-Graben Rhénan

1.2.1 Interpolation spatiale/ géostatistiques

Notre commanditaire avait une idée bien précise des techniques à employer pour réaliser notre analyse. Il nous a été conseillé de suivre la thèse de Thomas Fuhrmann, 2016.

Une fois les données de vitesses obtenues pour chaque PS, nous devons étudier la corrélation des données afin d'effectuer une interpolation spatiale par krigeage. Pour se rendre de compte de la distribution et de la corrélation entre les points, on applique des modèles de covariances qui utilisent des semi-variogrammes. La valeur de la semi variance entre deux points est donnée par l'équation 1.3 suivante.

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot E \left\{ [y(x_j) - y(x_k)]^2 \right\} = \frac{1}{2} \cdot E \left\{ [y(x_j) - y(x_j + d)]^2 \right\}$$

Eq. 1.3 Semi variance entre deux points (Fuhrmann, 2016)

Un exemple de semi-variogramme réalisé par Fuhrmann est montré en figure 1.4. Une fois le semi-variogramme obtenu, il faut trouver un modèle qui « fit » au mieux nos données empiriques. Thomas Fuhrmann a pour sa part choisit un modèle sphérique et une distance maximale de 2km entre deux points considérés. Mettre une distance maximale de calcul de variance entre deux points permet de réduire les temps de calculs et de plus, plus deux points sont éloignés, moins leur corrélation est forte et donc les données sont moins intéressantes pour notre recherche.

Une fois que l'on a trouvé un modèle permettant de décrire au mieux nos données, nous pouvons entamer l'interpolation, ici par krigeage. Comme décrit par Pierre Bosser (2019) : « L'objectif est d'estimer le plus précisément possible la grandeur recherchée par une combinaison linéaire pondérée des observations.

Ce critère de précision se traduit par une minimisation de l'erreur quadratique moyenne. ». Il existe plusieurs types de krigeage mais nous allons détailler ici celui employé par Fuhrmann dans sa thèse ; le krigeage ordinaire. Pour tous types de krigeage, les valeurs prédites y_0 aux locations x_0 sont calculés en fonction d'un poids par rapport à l'observation réelle (Fuhrmann 2016). Voici la formule :

$$y_0 = \omega^T * y \quad (1.4)$$

Avec ω le poids suivant la matrice des covariances C des observations et le vecteur D contenant les covariances aux points prédits. On a :

$$\omega = C^{-1} * D \quad (1.5)$$

Dans le cas du krigeage ordinaire, une constante inconnue moyenne μ est considérée. Cela fait que pour l'équation 1.5, une contrainte de forme $\sum_{j=0}^n \omega_j = 1$ est ajoutée. Fuhrmann présente son système de krigeage avec les matrices suivantes :

$$w_{OK} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda \end{pmatrix} \quad C_{OK} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} & 1 \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad D_{OK} = \begin{pmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

FIGURE 1.3 – Matrices nécessaires pour le krigeage ordinaire (Fuhrmann, 2016)

Ce type de krigeage à été choisi principalement pour sa rapidité de calcul comparé au krigeage universel.

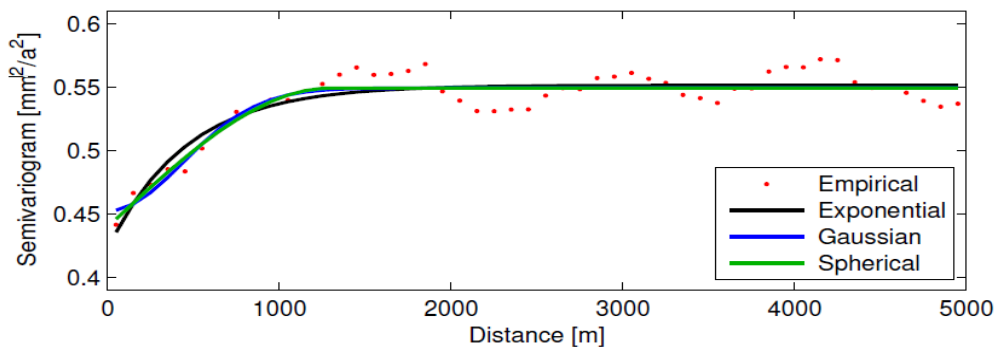


FIGURE 1.4 – Semi-variogramme réalisé dans la région du haut Graben rhénan par THOMAS FUHRMANN (2016, p.164)

1.2.2 Reconstruction des mouvements en Est et verticaux

Une fois le krigeage effectué, on se retrouve avec une surface rastérisée des vitesses en direction du satellite. On voit bien que lorsque l'on étudie les déplacement terrain, il serait préférable d'avoir des données de vitesse dans les 3 dimensions. Pour cela, on qualifie la grille de points couvrant l'ensemble de la zone d'étude avec des valeurs de vitesses dans la direction de la ligne de visée (LOS) pour une orbite ascendante et une orbite descendante du satellite. Ces points sont maintenant définis dans les deux référentiels satellitaires.

La figure 1.5 résume visuellement la situation :

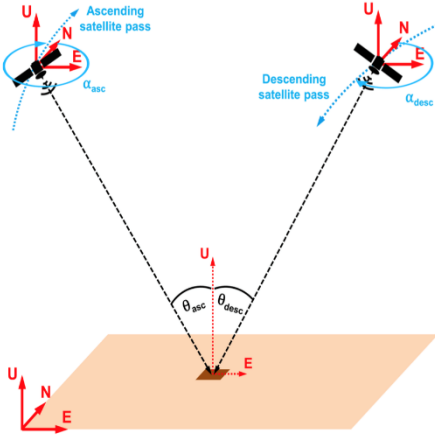


FIGURE 1.5 – Vue schématisée d'un point dans les deux référentiels satellitaires (Fuhrmann, 2019, p. 3) (Taille complète : Annexe A)

On a ici :

$$v_{LOS} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \cos \alpha & \sin \theta \sin \alpha & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Pour trouver les vitesses en 3D, on a :

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{e}$$

$$\begin{pmatrix} v_{asc1} \\ v_{asc2} \\ \vdots \\ v_{desc1} \\ v_{desc2} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_{asc1} \cos \alpha_{asc1} & \sin \theta_{asc1} \sin \alpha_{asc1} & \cos \theta_{asc1} \\ -\sin \theta_{asc2} \cos \alpha_{asc2} & \sin \theta_{asc2} \sin \alpha_{asc2} & \cos \theta_{asc2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin \theta_{desc1} \cos \alpha_{desc1} & \sin \theta_{desc1} \sin \alpha_{desc1} & \cos \theta_{desc1} \\ -\sin \theta_{desc2} \cos \alpha_{desc2} & \sin \theta_{desc2} \sin \alpha_{desc2} & \cos \theta_{desc2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{pmatrix} + \mathbf{e} \quad (1.7)$$

L'orbite du satellite suivant presque une direction sud-nord, on peut éliminer le terme en y de la matrice A. On trouve donc une équation finale pour déterminer les déplacements Est et verticaux de notre point :

$$\begin{pmatrix} v_{asc} \\ v_{desc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_{asc} \cos \alpha_{asc} & \cos \theta_{asc} \\ -\sin \theta_{desc} \cos \alpha_{desc} & \cos \theta_{desc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_E \\ v_U \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Nous n'avons pas eu le temps, durant notre projet de finir cette partie permettant de retrouver les déplacements en 3D de nos points. Cette analyse reste donc théorique et est directement reprise de la seconde thèse sur le sujet de Thomas Fuhrmann et Matthew C. Garthwaite en Janvier 2019.

1.3 Techniques d'analyses applicables au site de colocalisation de Grasse

1.3.1 Problématiques issues de l'étude de l'état de l'art

Le sujet de l'étude des déformations terrain par PSInSAR est maintenant bien présenté dans le cadre de l'étude de Fuhrmann, 2016.

A partir de ces techniques, nous allons nous demander comment les appliquer à nos données ? La marche à suivre sera donc de réaliser un semi variogramme de notre zone pour déterminer la corrélation des données. Les modèles utilisés par Fuhrmann correspondent-ils ? Quel est le modèle le plus adapté à nos données ?

On peut aussi décider de découper la zone en plusieurs parties et comparer les variogrammes obtenus pour chaque zone. La zone est-elle stationnaire ? Observe-t-on des différences de corrélation selon les sous-divisions de notre zone ?

Une fois le bon modèle d'approximation du semi-variogramme validé, on peut passer au krigeage. Ici, on peut se demander si le krigeage ordinaire est bien le mieux adapté ?

2. Application aux données du site de Calern

2.1 Présentation des données

Nous avons à dispositions deux semi de points issus de mesure Radar faite avec la constellation sentinelles. Nous disposons de deux orbites, une montante et une descendante sur une aire d'environ 1600km² dans le sud de la France. Chaque point possédait un identifiant unique, une vitesse moyenne exprimée en millimètre par an, un angle d'incidence en degrés correspondant à l'angle formé par la ligne de mesure et la ligne de zénith au niveau du point. Chaque point possède également un historique de vitesse à différentes dates.

Les points ne sont pas répartis de manière homogène sur la zone d'étude dû à la topographie locale, la nature de l'objet sur lequel l'onde radar rebondit ou les conditions atmosphériques. Cependant, étant donné que le nombre de point est très important il n'y a presque pas de zone complètement vide de mesure.

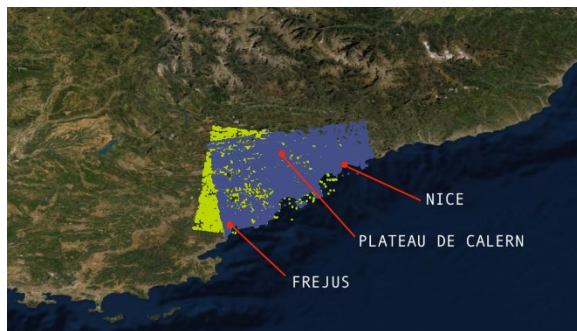


FIGURE 2.1 – Représentation des points sous les deux orbites 88 et 66. (Taille complète : Annexe A)

2.2 Analyse des corrélations spatiales

Notre objectif est de créer une grille recouvrant notre zone d'étude en lui appliquant des valeurs interpolées grâce aux points mesurés. Pour cela nous allons utiliser la méthode du krigeage.

Il nous faut bien évidemment s'assurer de l'existence d'une corrélation spatiale entre les vitesses de nos points mesurés. Pour cela nous allons utiliser un variogramme qui nous permet d'obtenir une représentation de l'écart de vitesse en fonction de la distance.

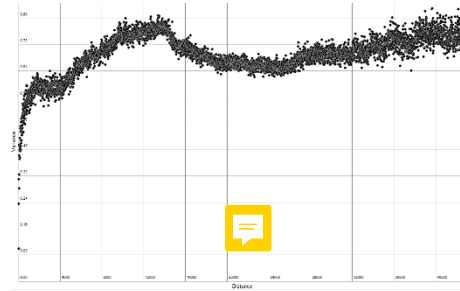


FIGURE 2.2 – Semi-variogramme pour le jeu de données T3 (Taille complète : Annexe A)

Cependant, nous n'avons aucune preuve que ce variogramme est stable selon la zone étudiée. Pour vérifier cela, une solution est de découper la zone d'étude en plusieurs zones et de comparer les différents variogrammes.

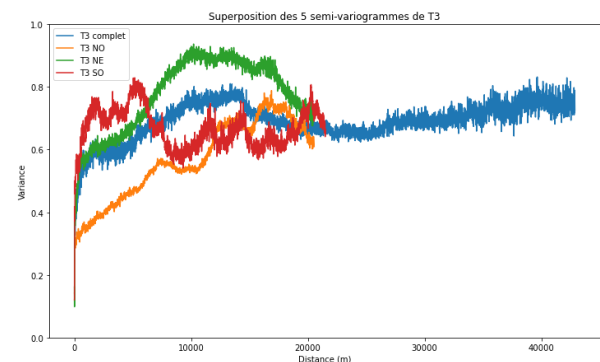


FIGURE 2.3 – Variogrammes 4 zones plus toute zone. (Taille complète : Annexe A)

En observant la figure ci-dessus, on remarque tous de suite que les variogrammes ne sont pas identiques. La zone étudiée influence donc grandement les variogrammes.

Notre objectif est de trouver un modèle de variogramme, une fonction qui représente aux mieux le nuage de points ci-dessus. Cependant, notre variogramme n'est pas stable selon la zone d'étude ce qui risque de remettre en cause nos résultats.

L'étape suivante est donc de trouver un modèle de ce nuage de point. Pour cela, nous avons hésité entre modèles proposés par Fuhrmann. Le modèle exponentiel, le modèle sphérique et le modèle polygonal. (voir fig. 2.4)

- Sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), & \text{si } 0 \leq h \leq a \\ C, & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

- Exponentiel :

$$\gamma(h) = C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right)$$

- Polygonal :

$$\gamma(h) = \sum_{i=0}^n a_i h^i$$

FIGURE 2.4 – Formule types de modèles étudiés
(Taille complète : Annexe A)

Après un simple algorithme de régression sur les distances inférieure à 4000m (pour des raisons de temps de calcul), on obtient ce résultat :

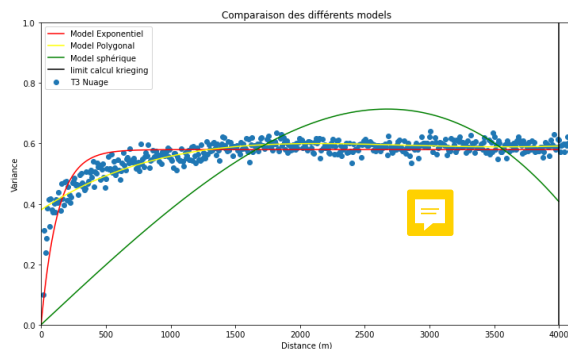


FIGURE 2.5 – Comparaison des modèles (Taille complète : Annexe A)

Nous avons décidé de limiter notre interpolation aux distances inférieures à 4000m pour limiter les temps de calcul mais également car au-delà de cette limite les variations du variogramme semblent aléatoires et les différentes zones divergent très vite. Les modèles exponentiel et polygonal semblent intéressants à étudier. Leur variance au nuage est respectivement 0.035 et 0.022. En effet, ils sont très proches du nuage de point et montrent une différence importante : leur valeur en 0. Le modèle polygonal n'est pas nul en zéro alors que le modèle exponentiel oui. Nous allons donc décider

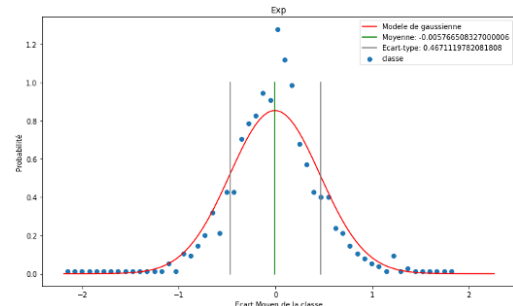
lequel de ces deux modèles est le plus approprié pour la suite de nos recherches.

2.3 Interpolation spatiale / analyse géospatiale

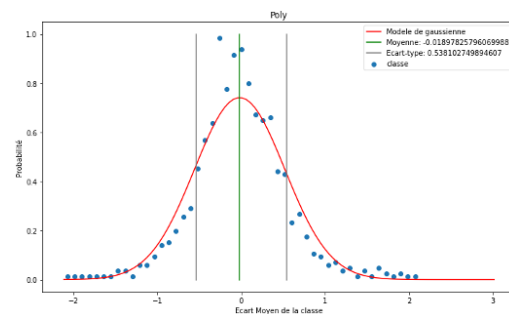
Afin de comparer les deux modèles retenus, nous avons réalisé une validation croisée sur 1000 points choisis au hasard. On obtient alors deux listes de 1000 écarts entre valeurs vraies et valeurs interpolées. On peut alors connaître la moyenne et l'écart-type sur ces données :

	Moyenne (mm/an)	Ecart-Type
Modèle exponentiel	-0.006	0.467
Modèle polynomial	-0.019	0.538

FIGURE 2.6 – Table moyenne/écart-type en fonction des modèles



modèle exponentiel



modèle polynomial

FIGURE 2.7 – Modèles de Gaussiennes sur les écarts de la validation croisée (Taille complète : Annexe A)

La moyenne des deux échantillons est très proche de zéro ce qui est très rassurant. En effet, cela signifie que nos écarts sont répartis autour de cette valeur moyenne. En calculant l'écart-type on peut représenter le modèle gaussien sur notre figure d'écart (ci-dessus). Le modèle est fidèle ce qui est un indice d'une répartition aléatoire de nos écarts autour de la moyenne. C'est l'écart-type des échantillons qui nous permet de départager les deux modèles. Ils sont tous les deux très proches mais nous retiendront pour la suite le modèle exponentiel.

On réalise donc notre interpolation avec un algorithme de kriging : Ordinary Kriging avec le modèle obtenu précédemment. On obtient alors deux grilles pour chacune des deux orbites (Annexe C)

Conclusion

Au terme de ce projet d'initiation à la recherche, nous avons pu répondre à certaine problématique exposée au début de ce rapport. Certaines d'entre elles restent non-répondus et entrent donc dans une phase de perspective pour une continuation des travaux. Nous n'avons pas eu le temps de mettre en référence nos résultats ni de finaliser l'obtention de déplacement hors LOS mais avons obtenus des résultats probants en analyse géostatistique de nos données. Notre période d'étude de l'état de l'art s'est révélé précieuse et nous avons pu analyser de manière exhaustive les techniques d'études de variance, de corrélation et de krigeage à l'ordre du jour au moment de la rédaction de ce rapport et pouvant être appliquées à notre cas d'étude. Cependant, nous avons mis en lumière le problème de stabilité spatiale du variogramme. En effet le choix d'un modèle c'est avéré très changeant en fonction de la zone d'étude et le nombre de point à utiliser. Les écarts obtenus après validation croisée sont très importants également et semble aujourd'hui trop grand pour obtenir des résultats pertinents.

Perspectives, discussion, retour d'expérience

La continuité majeure de notre travail sera d'obtenir des vitesses de déplacement verticales et en Est. Une fois ces déplacements calculés, les vitesses seront toujours relatives à un point de la grille. Nous avons entamé cette étape et le krigeage des angles d'incidence pour les deux orbites est à retrouver en ANNEXE D. Ce krigeage permet comme pour la vitesse, d'avoir une valeur sûre d'incidence sur les points de la grille à forme.

Une mise en référence grâce à des techniques de GNSS et de nivellement permettra d'apprécier les déplacements du sol dans le référentiel terrestre.

Au cours de nos travaux, nous nous sommes tout particulièrement penchés sur l'interpolation et le poids des données de nivellement de notre zone. Nous avons au début de l'étude essayé de recaler nos points de vitesse sur un MNT de la zone mais aurions dû attendre que les données soient harmonisées sur une seule grille.

Pour de futurs projets utilisant les techniques PSInSAR, les temps de calculs seront à mettre beaucoup plus en avant. Nous avons essayé durant ce projet d'initiation à la recherche d'obtenir des résultats en maximisant la qualité et la précision de nos processus parfois au détriment du temps de calcul ce qui nous a retardé dans la complétion du projet. Dans d'autres circonstances, l'utilisation d'un supercalculateur est recommandable comme précisé par Fuhrmann, 2016 ou encore Ferretti, 2007. Cela dit, l'amélioration constante des puissances de calcul désigne la mesure de déformation par PSInSAR comme une technique fiable et précise pour le futur, pouvant même sous peu, si ce n'est pas concurrencer les mesures par GNSS, au moins les compléter efficacement.

Bibliographie

- Thomas Fuhrmann, Surface Displacements from Fusion of Geodetic Measurement Techniques Applied to the Upper Rhine Graben Area, (12/04/2016)
- Isabelle MESSA-DELPAT, Cartographie des déformations sur le site de colocalisation de Grasse par méthode INSAR, (Septembre 2019)
- Aurélien Augier, Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol, (29/01/2020)
- Alessandro Ferretti, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca, Didier Massonnet, InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation Dipartimento di Elettronica ed Informazione, Politecnico di Milano, Italy, CNES, Toulouse, France, (February 2007)
- Thomas Fuhrmann, Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data (Février 2015)
- Pierre Bosser, Introduction à l'interpolation spatiale et aux géostatistiques, (2019)
- Thomas Fuhrmann & Matthew C. Garthwaite, Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion (Janvier 2019)

ANNEXES

ANNEXE A : Liste des figures

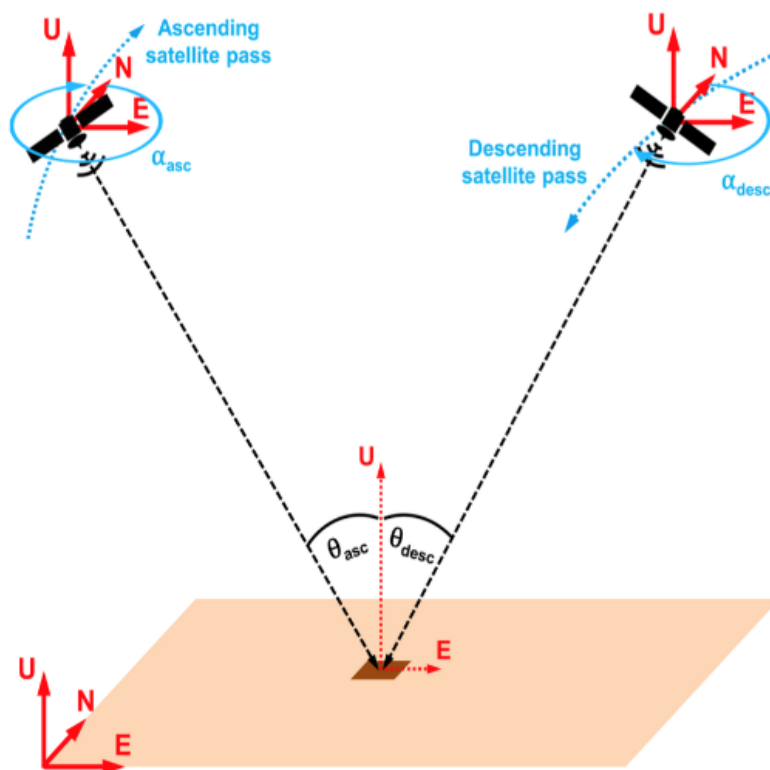
Figure 1.1 : Résumé acquisition InSAR PARVIZ TARIKHI 2010

Figure 1.2 : Réflecteur permanent du plateau de Calern

Figure 1.3 : Matrices nécessaires pour le krigeage ordinaire FUHRMANN 2016

Figure 1.4 : Semi-variogramme réalisé dans la région du haut Graben rhénan par THOMAS FUHRMANN 2016

Figure 1.5 : Vue schématisé d'un point dans les deux référentiels satellitaires FUHRMANN 2019



ANNEXE A : Liste des figures

Figure 2.1 : Représentation des points sous les deux orbites 88 et 66

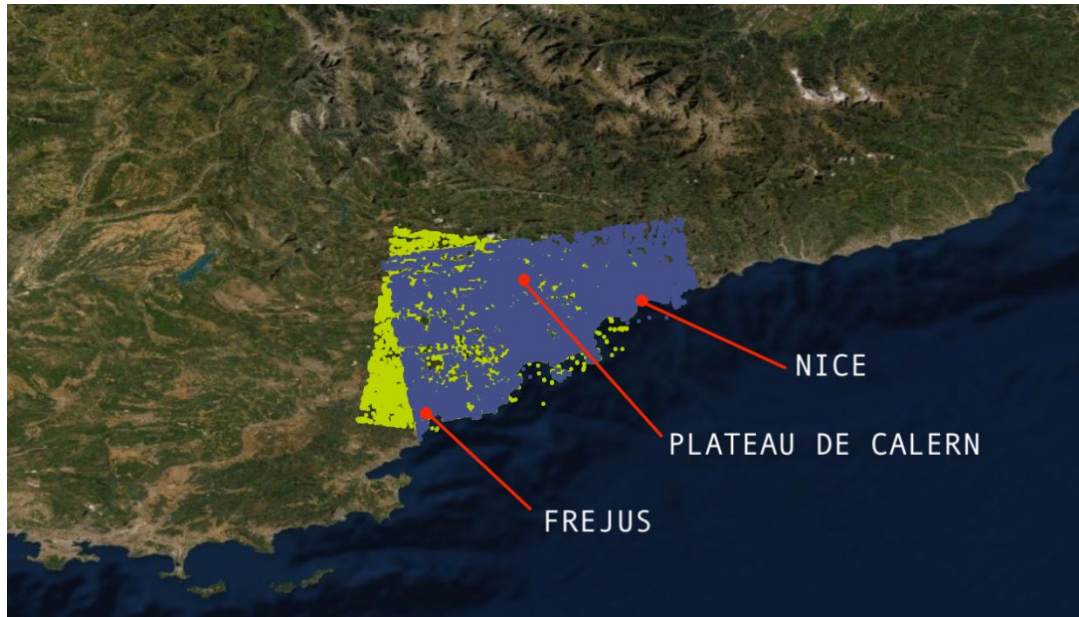
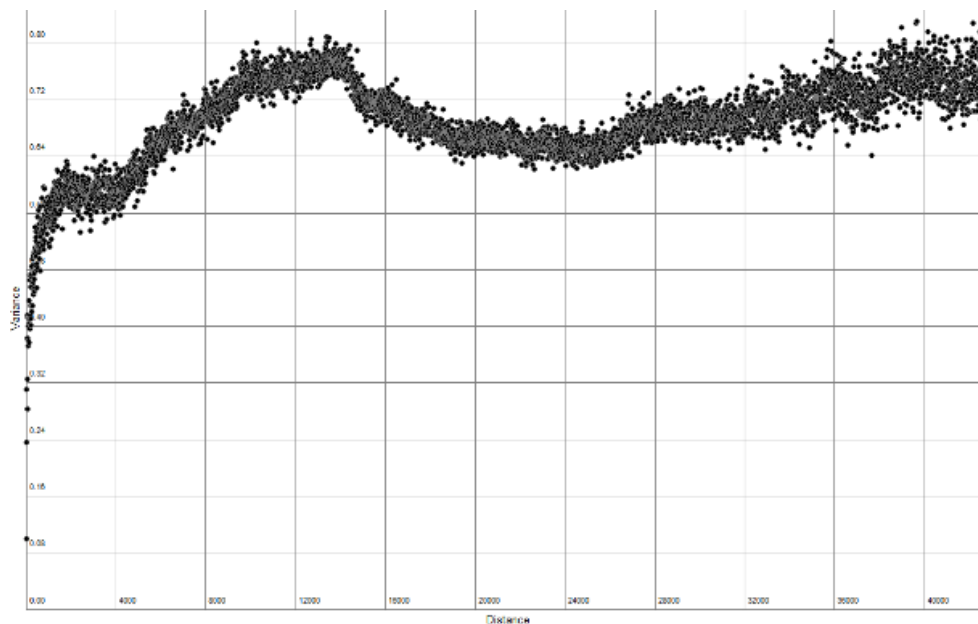


Figure 2.2 : Semi-variogramme pour le jeu de donnée T3



ANNEXE A : Liste des figures

Figure 2.3 : Variogrammes 4 zones plus général.

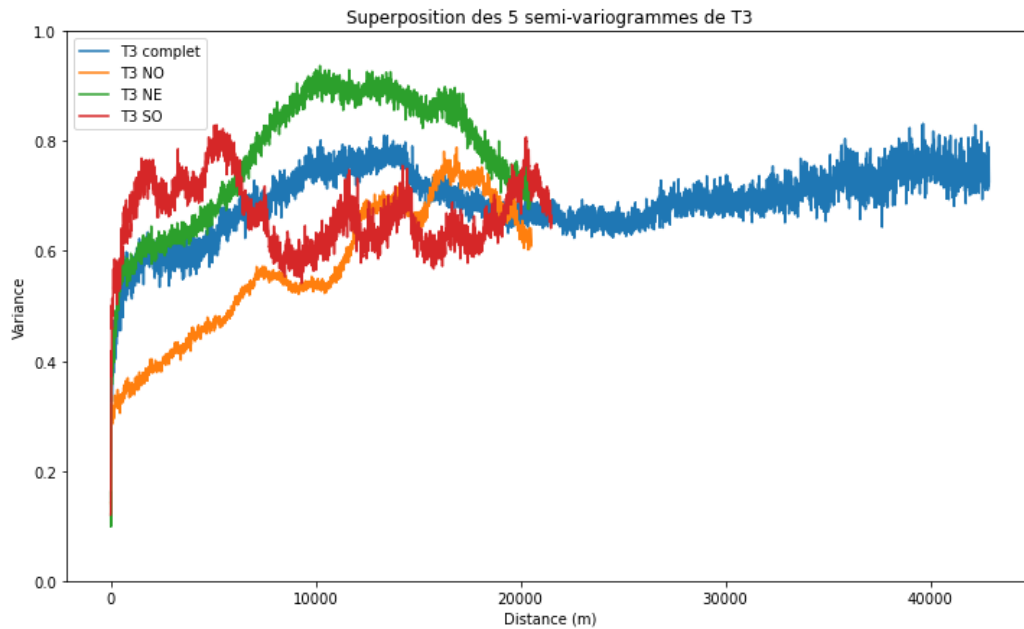


Figure 2.4 : Formule types de modèles étudiés

- Sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), & \text{si } 0 \leq h \leq a \\ C, & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

- Exponentiel :

$$\gamma(h) = C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right)$$

- Polygonal :

$$\gamma(h) = \sum_{i=0}^n a_i h^i$$

ANNEXE A : Liste des figures

Figure 2.5 : Comparaison des modèles

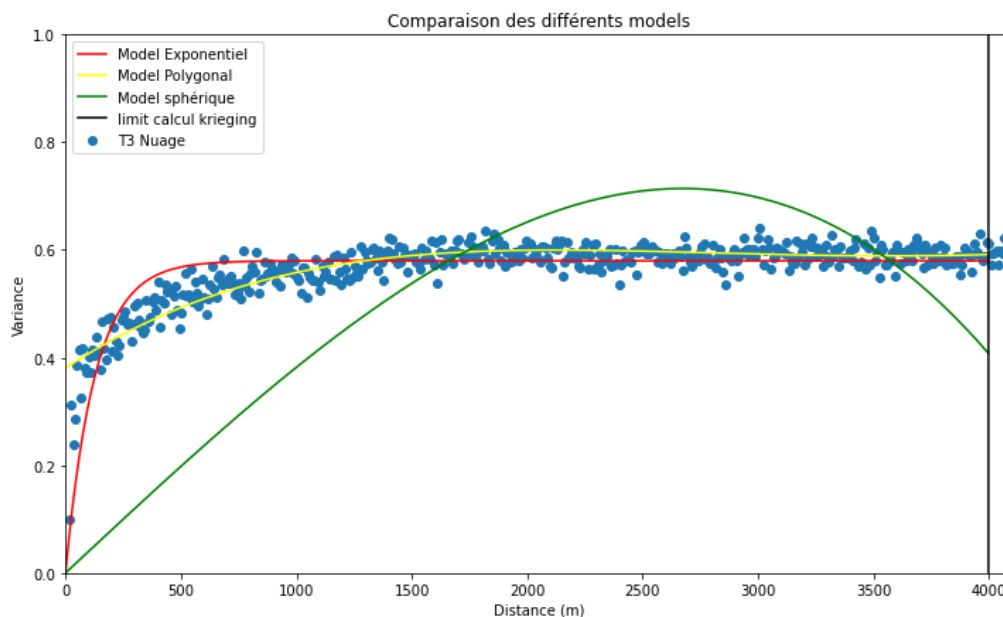
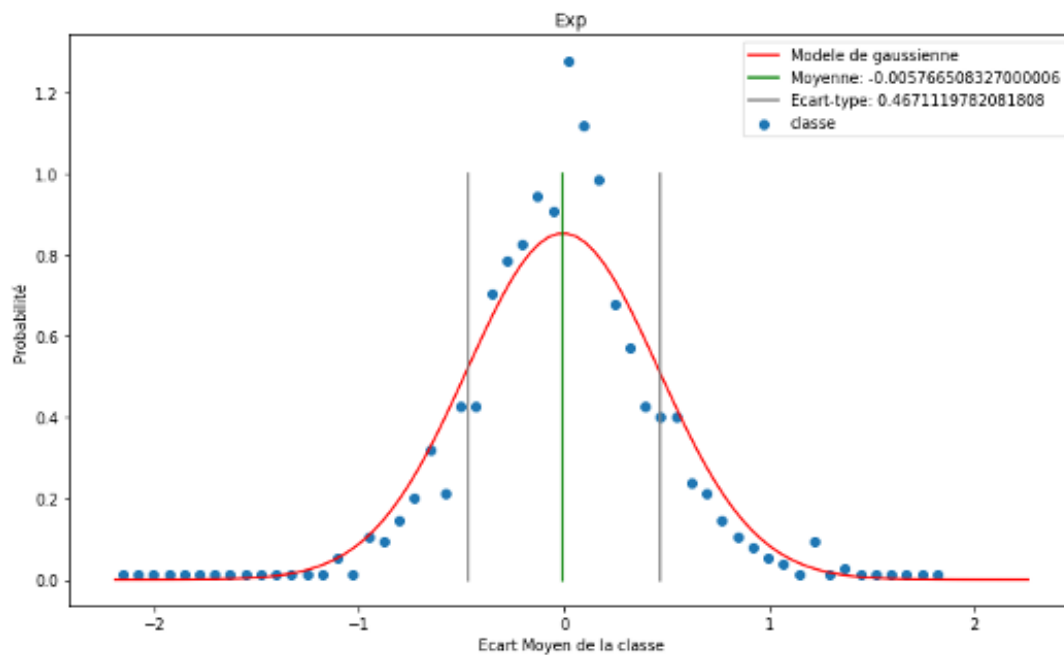


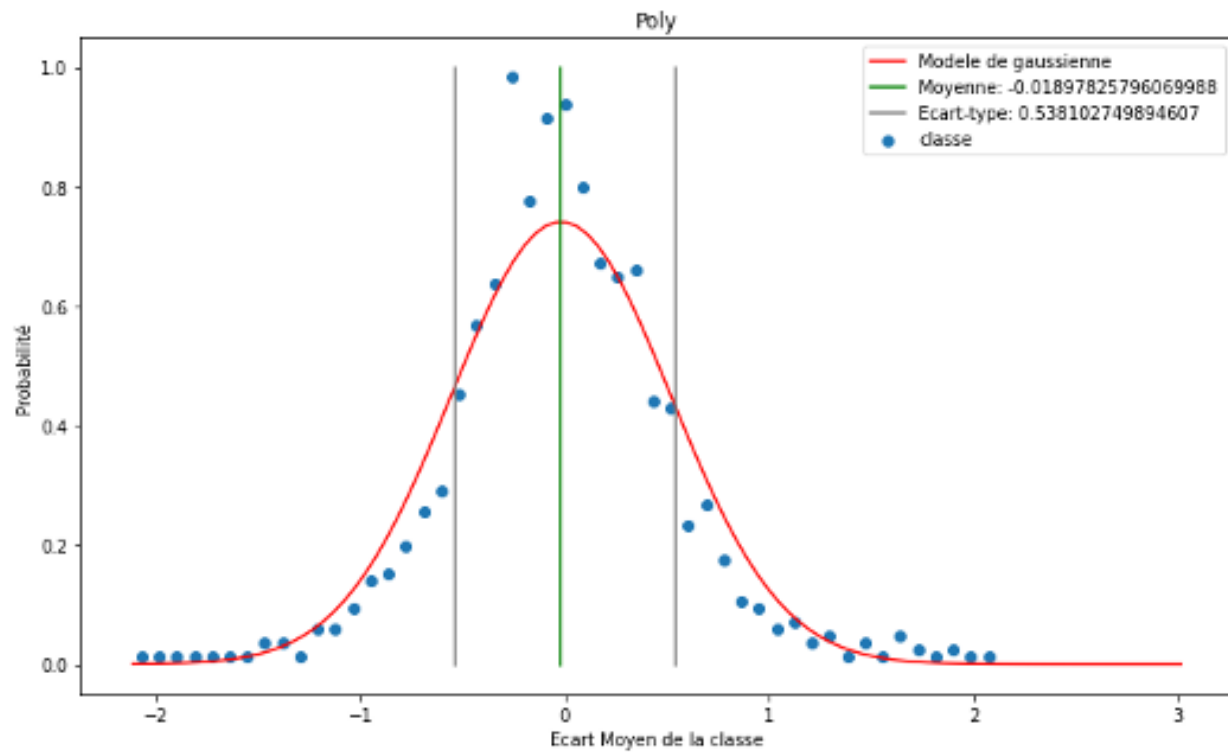
Figure 2.6 : Table moyenne/écart-type en fonction des modèles

Figure 2.7 : Modèles de Gaussiennes sur les écarts de la validation croisée ____ Modèle exponentiel



ANNEXE A : Liste des figures

Figure 2.7 : Modèles de Gaussiennes sur les écarts de la validation croisée ____ Modèle polynomial



ANNEXE B : Données

Exemple du début des tables T3 et T4 respectivement l'orbite ascendante et descendante :

T3_calern_v-dso_def

id	long_deg	lat_deg	incidence_deg	vel	v_stdev	D20141023
1	6.65955	43.79436	33.64944	-1.58682	1.791168	4.135736
2	6.659606	43.79437	33.64968	-1.11135	1.87916	2.844828
3	6.659663	43.79438	33.64993	-1.27345	1.816623	5.523316
4	6.65972	43.79439	33.65017	-0.73793	1.854401	1.354356
5	6.722997	43.80302	33.92762	-0.57949	1.867681	3.014348

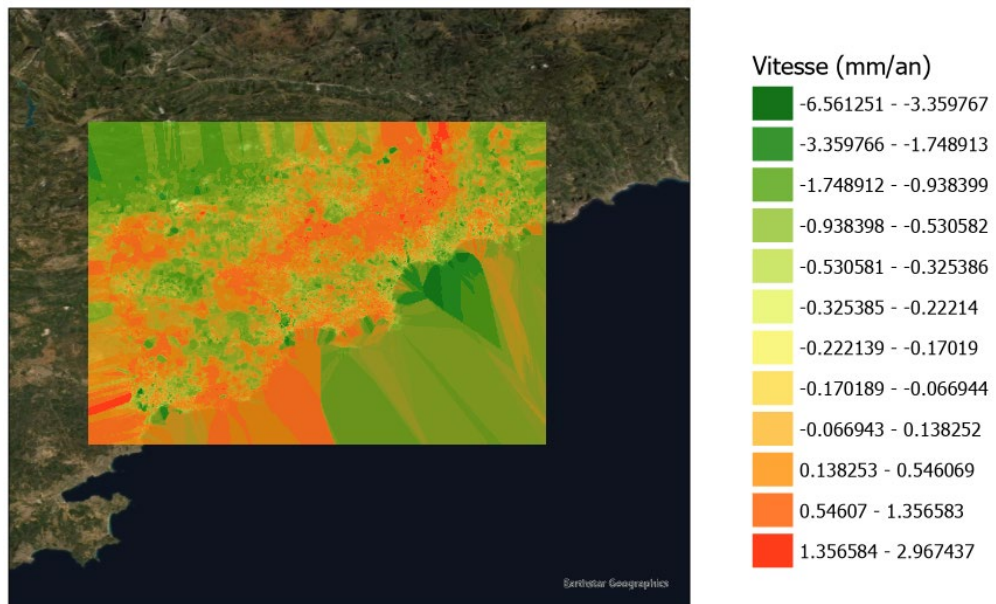
T4_calern_v-dso_def

id	long_deg	lat_deg	incidence_deg	vel	v_stdev	D20141010
1	6.595175	43.39926	44.45592	-1.34701	1.646851	0.454887
2	6.616407	43.39678	44.37607	-0.56143	1.600115	-0.2912
3	6.634832	43.39462	44.3087	-1.49147	1.565165	-2.86778
4	6.676698	43.38971	44.16542	-0.03584	1.538908	-2.40206
5	6.67661	43.38972	44.16572	0.65757	1.544603	-1.53703

ANNEXE C : Krigeage vitesses

Pour T3, orbite
ascendante :

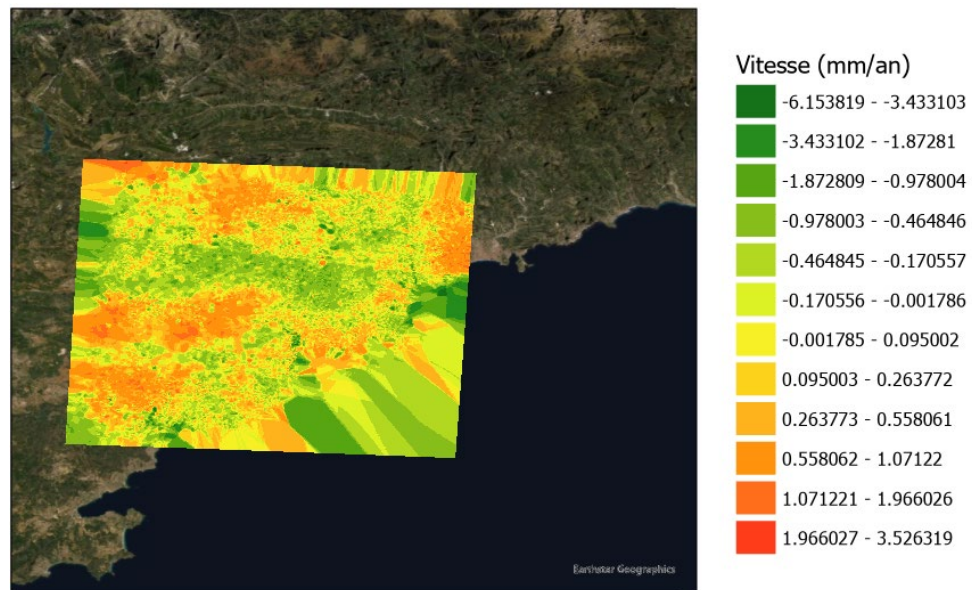
Ordinary
kriging



ANNEXE C : Krigeage vitesses

Pour T4, orbite
descendante :

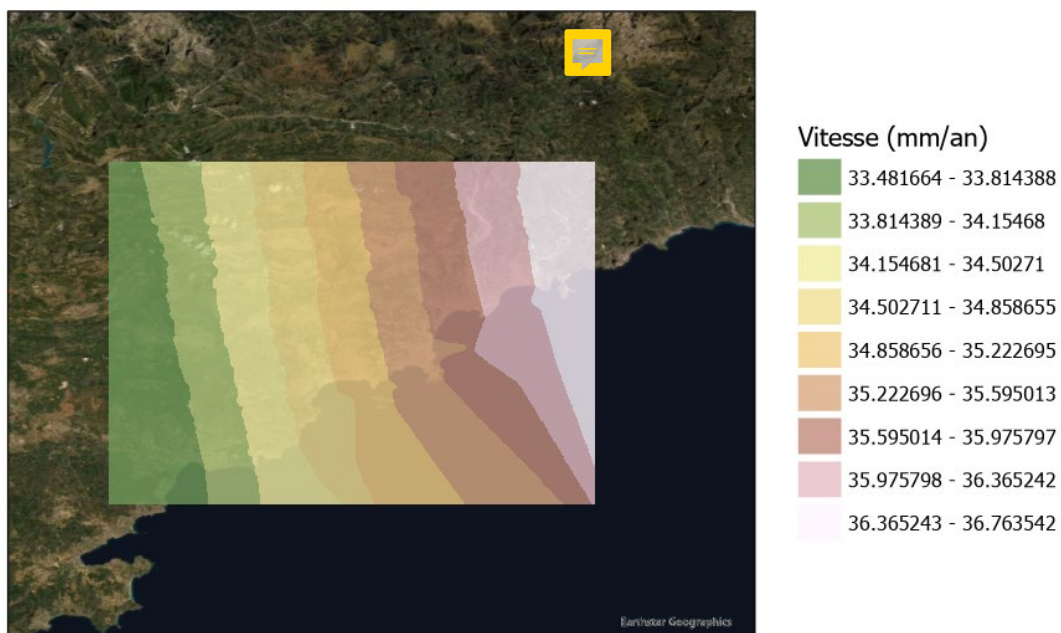
Ordinary
kriging



ANNEXE D : Krigeage incidence

Pour T3, orbite
ascendante :

Ordinary
kriging



ANNEXE D : Krigeage incidence

Pour T4, orbite
descendante :

Ordinary
kriging

