**Thème :**

Comparaison des méthodes BME (Bayesian Maximum Entropy) et HASM(High Accuracy Surface Modeling) pour la modélisation en géostatistique.

**INTRODUCTION GENERALE**

La modélisation et l'interpolation spatiale ou spatio-temporelle sont importantes pour de nombreux domaines d'étude de la science de l'environnement tels que la géographie [Souris, M. (2019) & Dragićević, S. (1999)], la géologie [ABDENNOUR, M. A. (2021) & RATA, M. (2010)], la biologie [Li, S. (2015) & GUEROUI, Y. (2014)], la météorologie [Lebel, T., Amani, A., Cazenave, F., Lecocq, J., Taupin, J. D., Elguero, E., Robin, J. (1996) & Louvet, S., Paturel, J. E., Mahé, G., Vigaud, N., Roucou, P., Rouché, N., Koite, M. (2011) & Coman, A. (2008)], la conception de réseaux de capteurs [ Dahlström, B. (2003) & Poupry, S. (2023)] , etc.

Par exemple, en géographie, [ Souris, M. (2019)] décrit les objectifs, les principes, les méthodes et les outils de l'analyse spatiale et des systèmes d'information géographique (SIG) appliqués au domaine de la santé. Il s'agit d'une introduction pratique à l'analyse spatiale et spatio-temporelle pour l'épidémiologie et la géographie de la santé. En géologie, [ABDENNOUR, M. A. (2021)] étudie la variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols dans le périmètre irrigué du Ziban, situé dans la région de Biskra en Algérie par l’analyse de la dynamique de la salinisation des sols en utilisant des techniques de géostatistique et de télédétection.

En biologie, [GUEROUI, Y. (2014)] traite de la caractérisation hydro chimique et bactériologique des eaux souterraines de l'aquifère superficiel de la plaine de Tamlouka, située dans le nord-est de l'Algérie par l’évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines de l'aquifère superficiel, l’identification des paramètres chimiques (pH, conductivité, dureté, etc.) et bactériologiques (bactéries coliformes, streptocoques, etc.),la détermination des sources de pollution et des facteurs influençant la dégradation de la qualité des eaux, et la proposition de mesures de gestion et de protection de la ressource en eau souterraine. En météorologie, [Lebel, T., Amani, A., Cazenave, F., Lecocq, J., Taupin, J. D., Elguero, E., Robin, J.] se concentre sur l'étude de la distribution spatio-temporelle des précipitations dans la région du Sahel, en Afrique de l'Ouest, à partir des données recueillies lors de l'expérience EPSAT-Niger.

Enfin, dans le domaine de la conception de réseaux de capteurs, [Poupry, S. (2023)] propose un système de surveillance de la qualité de l’air : application à la surveillance de la qualité de l'air dans les vallées des Gaves (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).

Dans l'ensemble, ces domaines font appel à des méthodes avancées de modélisation et d'interpolation spatiale ou spatio-temporelle pour mieux comprendre et prédire les phénomènes (considérés comme des variables continues) en tout point discret de l'espace autre que ses valeurs échantillonnées (observées).

Diverses méthodes classiques sont utilisées en géostatistique pour la modélisation et l’interpolation spatiale. Il s’agit de Trend Surface Analyis (TSA) qui utilise des données pour ajuster une surface de tendance par régression aux moindres carrés sur les coordonnées spatiales , Inverse Distance Weighted (IDW) qui utilse une fonction de pondération inverse à la distance pour déterminer la valeur d'interpolation en tout point à l'intérieur de la zone calculée,Triangulated Irregular Network (TIN) qui calcule la valeur de chaque point à l'intérieur d'un triangle par une fonction linéaire en fonction de sa position, kriging (sensible à l’hypothèse de Normalité) qui minimise le résidu moyen et la variance des erreurs , Spline qui utilise les splines-bases cubiques univariées pour simuler des surfaces.

Cependant de nouvelles méthodes comme le Bayesian Maximum Entropy (BME) et le High Accuracy Surface Modeling (HASM) révolutionne les méthodes classiques grâce à leur fiabilité, performance et précision dans l’estimation et prédiction des variables étudiées en des points discrétisés.

Beaucoup d’études ont montré la supériorité des deux méthodes modernes aux techniques classiques de modélisation suivant les métriques de comparaison. Concernant le BME , les travaux de ……ont montré…., John && Pierre ………..

Quant au HASM……………………………………………………………………………………………………………………………………

En dépit des confrontations entre les méthodes de modélisation en géostatistique, nos recherches montrent qu’aucune étude scientifique n’a été faite pour la comparaison des deux méthodes modernes (BME && HASM). Notre défi et objectif s’avère de mener une étude comparative des deux méthodes au vu de contribuer à la recherche scientifique et d’en bénéficier de ces applications.

En accord avec les hypothèses en géostatiques certains articles et journaux critiques l’impact de la robustesse du BME suivant la taille de l’échantillon, niveau d’asymétrie (skweness) et le niveau de dépendance spatiale. Citer les auteurs des articles qui ont évalué la performance de BME suivants les divers paramètres. Au vu de faire un bon travail et ne rien raté nous allons prendre en compte ces paramètres dans la comparaison des deux méthodes.

**Chapitre 1 : Cadre théorique**

**La méthode de BME (Bayesian Maximum Entropy)**

La méthode de (BME) est largement utilisée dans l’analyse de données spatiales pour l’estimation de polluants atmosphériques sources, la prévision de la qualité de l’air sources et la cartographie de l’exposition environnementale sources. C’est une méthode d’interpolation non linéaire avec une précision accrue qui combine la théorie de l’incertitude de l’entropie maximale et l’inférence bayésienne.

Sources de description de ME La partie entropie maximale de la méthode BME a pour objectif de quantifier l'incertitude maximale des données observées. Elle cherche à identifier, parmi toutes les distributions de probabilités pouvant représenter ces données, celle qui a la plus grande entropie au sens de Shannon. Cette distribution d'entropie maximale est déterminée en respectant les contraintes imposées par les caractéristiques des données, telles que leur moyenne ou leur variance et d’autre moment d’ordre supérieur, mais sans incorporer d'autres informations a priori. Il s'agit donc de la distribution la moins informative possible tout en étant compatible avec les observations. En choisissant la distribution ayant la plus forte entropie parmi celles satisfaisant aux contraintes des données, on sélectionne celle contenant la quantité d'information ajoutée de manière arbitraire la plus faible. Cette distribution d'entropie maximale, qui modélise l'incertitude inhérente au phénomène observé de manière neutre et objective, sera ensuite utilisée comme probabilité a priori dans l'étape d'inférence bayésienne.

Sources de description de l’Inférence Bayésienne La partie inférence bayésienne de la méthode BME a pour but de mettre à jour la distribution de probabilité obtenue par entropie maximale avec les nouvelles données observées. En s'appuyant sur le théorème de Bayes, elle calcule la distribution a posteriori à partir de la distribution a priori fournie par l'entropie maximale et des nouvelles observations. Cette distribution a posteriori représente la révision des probabilités des différentes hypothèses à la lumière des nouvelles données. À chaque ajout d'observations, l'inférence bayésienne affine la distribution en la recalculant, permettant d'améliorer progressivement l'estimation. Par cette mise à jour successive intégrant les nouvelles mesures, la méthode BME fournit une estimation probabiliste de plus en plus précise du processus étudié.

**ME (Maximum Entropy)**

Pour une distribution de probabilité discrète sur l’ensemble dénombrable , avec , l’entropie de est définie comme suit :

Pour une fonction de densité de probabilité continue sur un intervalle , son entropie est définie comme suit :

Au cas ou

Cette définition de l’entropie, introduite par Shannon. Dans notre contexte probabiliste, est considère comme une mesure de l’information portée par , une entropie plus élevée correspondant à moins d’information (plus d’incertitude, ou plus de manque d’information).

Le concept d'entropie maximale est utilisé dans divers domaines, tels que la reconnaissance de formes, la thermodynamique, la théorie de l'information, les statistiques et les séries temporelles (Kullback, 1968; Burg, 1972; Shore and Johnson, 1980; Jaynes, 1982),

Considérons un ensemble fini .Si tandis que pour , alors . Dans ce cas, les statistiques gouvernées par produisent presque sûrement un seul résultat possible, . Nous avons une connaissance complète de ce qui va se passer. En revanche, si est la fonction de densité uniforme, ou pour tous les , alors .

L’entropie de la densité gaussienne sur avec une moyenne et une variance est :

La moyenne n’entre pas dans la formule finale, donc toutes les gaussiennes avec un commun ont la même entropie.

L’entropie de la densité exponentielle sur avec une moyenne est :

Cette entropie devient négative pour de petites valeurs de λ.

Notre défi réside plutôt dans le processus contraire, en utilisant la maximisation de l’entropie pour trouver la fonction de densité de probabilité(PDF)

Soit un champ aléatoire représentant une quantité physique distribuée spatialement, et supposons que les valeurs observées de cette quantité soient disponibles aux points dans l'espace. Soit l'estimateur de en un point , où aucune observation n'est disponible.

Soit ou les sont relatifs des données quantitatives ponctuelles et sont relatif aux données quantitatives groupées en d’intervalle.

Autrement , on peut écrire : avec c’est-à-dire nos données disponibles sont les

Donc

Désignons par la fonction de densité de probabilité conjointe des variables aléatoires associées avant l'observation des données .

Comme est la fonction de densité de probabilité , on a alors par définition:

Etant donné que est l’ensemble des variables aléatoires , donc l’intégrale est une imbrication de plusieurs intégrales suivant chaque composante de Ces intégrations imbriquées sont effectuées sur les intervalles des variables aléatoires mentionnées ci-dessus. Ces intervalles seront supposées varier de à

L’équation est la contrainte fondamentale de normalisation.

La densité de probabilité a priori doit être dérivée au moyen d'un processus d'estimation prenant en compte des contraintes physiques. Ces contraintes représentent soit les connaissances a priori que l'on possède sur la grandeur physique à estimer, soit les propriétés spécifiques que l'on souhaite intégrer dans l'estimateur .

D’après Shannon en 1948, l’information contenue dans l'ensemble peut être quantifiée par :

Selon l'équation , plus contient d'information, moins sa survenue est probable.

On considère une forte information a priori (ou de manière équivalente, une faible probabilité a priori) concernant la variabilité spatiale de la grandeur physique étudiée. Dans un contexte stochastique, cela peut être atteint en considérant la valeur attendue de la mesure d'information appropriée et en cherchant à la maximiser.

L'idée est de modéliser une bonne connaissance a priori de la répartition spatiale de la grandeur physique, ce qui se traduit mathématiquement par une faible probabilité a priori. Pour formaliser cela dans le cadre stochastique, on s'intéressera à la valeur espérée de la mesure d'information utilisée, et on cherchera à la maximiser afin de refléter un haut niveau d'information a priori.

En relation avec la mesure d'information , l'information attendue considérée sera l’espérance de l’information :

Soit

La fonction correspond à l'entropie de Shannon de la grandeur physique estimée. Elle permet de quantifier le degré d'incertitude contenu dans la densité de probabilité a priori .

En cherchant à maximiser l'information attendue par rapport à cette densité de probabilité a priori, sous des contraintes liées aux connaissances physiques du système et aux propriétés souhaitées de l'estimateur, on vise en réalité à maximiser l'entropie associée. Cela permet d'obtenir une densité de probabilité a priori reflétant au mieux le manque d'information initial sur la répartition spatiale de la grandeur physique, tout en respectant les contraintes du problème.

Les estimateurs sont définis statistiquement en termes d'espérances basées sur le champ aléatoire spatial . Il est donc judicieux de définir des contraintes physiques a priori compatibles avec cette formulation, sous la forme d'expressions mathématiques similaires impliquant des espérances de fonctions de .

En supposant que nous avons contraintes

où sont des fonctions appropriées de

Si on a :

, de sorte que définisse la contrainte de normalisation .

**Inférence Bayésiennes**

Jusqu'à présent, on a considéré la probabilité a priori qui inclut un modèle a priori sur la relation entre et les . Ce modèle se rapporte à nos connaissances sur la variabilité spatiale avant de prendre en compte des mesures spécifiques de la grandeur physique.

Comme avec , la probabilité a posteriori

(probabilité conditionnelle) fait référence à nos connaissances une fois que ces mesures ont été incorporées dans le processus d'estimation.

En effet, l'inférence bayésienne est une approche probabiliste pour réviser nos connaissances à la lumière de nouvelles données. Elle repose sur le principe fondamental du théorème de Bayes ([Thomas Bayes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thomas_Bayes) , 1761), qui permet de mettre à jour nos croyances de manière cohérente en combinant une probabilité a priori avec une vraisemblance des données. Concrètement, l'inférence bayésienne commence par modéliser les connaissances initiales sur la quantité qui nous intéresse sous la forme d'une probabilité a priori. Cette probabilité reflète ce que l'on sait du phénomène avant d'analyser de nouvelles observions. En appliquant le théorème de Bayes, il est alors possible de mettre à jour la probabilité a priori initiale en une probabilité a posteriori, qui tient compte à la fois des connaissances préalables et des nouvelles observations. Cette probabilité a posteriori correspond donc à la distribution de probabilité révisée de la quantité étudiée, compte tenu de l'ensemble des informations désormais disponibles.

En considérant les points suivants :

* et  sont deux évènements ;
* 𝑃(𝐴) et  sont la probabilité des deux évènements ;
* est la probabilité que les deux évènements se réalisé.
* est la probabilité conditionnelle que l'évènement  se réalise étant donné que l'évènement  s'est réalisé.

En vertu de théorème de Bayes, on a :

De manière analogue à notre variable physique d’étude, on a :

Soit la fonction de Bayes associée à

La probabilité a posteriori , ou de manière équivalente la fonction de Bayes , doit être maximisée par rapport à . Notons que dans ce cas, est considéré comme un paramètre de la probabilité a posteriori ou de la fonction de Bayes du champ aléatoire spatial sous-jacent.

**Estimation de fonction densité de probabilité (PDF)**

Formulons le problème d'estimation comme suit : Soit un champ aléatoire spatial. Nous cherchons à trouver des estimateurs de en des points à partir des données, , de telle sorte que :

La fonction de Bayes est maximisée par rapport à . Cette valeur maximale sera la valeur attendue pour l’estimateur en le point .

L'entropie du modèle a priori de l’équation est maximisée par rapport à, sous la contrainte de normalisation et les contraintes physiques de l’équation .Ainsi on définit le Lagrangien de la formule de l’entropie maximale sous les contraintes. La maximisation de ce Lagrangien permet de trouver la distribution de probabilité correspondante :

**Preuve 1**

Soit le Lagrangien associé à l’entropie

Maximiser reviens à minimiser sous les contraintes alors on peut exprimer le Lagrangien associé à l’entropie

, sont les multiplicateurs de Lagrange associés au contrainte de normalisation et des autres contraintes

L’entropie atteint son maximum lorsque la dérivée fonctionnelle s’annule :

Etant donné que est l’imbrication de plusieurs intégrales sur alors on ajoute une constante

En posant

Par conséquence :

D’après la contrainte de normalisation (équation 5) on a :

Donc

La densité de probabilité est généralement non gaussienne. donc en multipliant maintenant l'équation par , on obtient :

Par conséquent :

Cela exprime en fonction des autres multiplicateurs de Lagrange . Puisque est maintenant considéré comme une fonction de

Soit

Différentions l'équation par rapport à un quelconque multiplicateurs de Lagrange

et multiplier par :

D’après l’équation on a :

Et en remplaçant la fonction de densité de probabilité de l’équation dans l’équation

D’où

Le système d'équations et peut être résolu par rapport aux inconnues .Les solutions seront insérées dans la fonction de densité de probabilité pour obtenir la forme requise du modèle a priori

Pour estimer nous allons maximiser la fonction de Bayes par rapport ,autrement dire :

D’après l’équation , si :

est la valeur de l'estimateur en le point . En utilisant la densité de probabilité finale trouver avec ses paramètres et en maximisant l’équation on obtient l’équation :

L’équation est résolue par rapport à l'estimateur

De la même manière comme démontré précédemment dans l’équation , on peut écrire :

Dans le cas la fonction de densité de probabilité à priori est connu, l’équation est utilisée pour estimer la variable physique

L’équation du maximum de vraisemblance est ainsi :

**HASM**

**Introduction au HASM**

L'approche de modélisation de surfaces par équations aux dérivées partielles (EDP) suscite un intérêt croissant depuis ses débuts dans les années 1970. Comme l'ont montré Thompson et al. (1974), cette technique consiste à représenter les surfaces comme solutions d'EDP. Elle présente l'avantage de pouvoir faire varier la forme de la surface modélisée en changeant les conditions aux limites et paramètres de l'équation (Bloor and Wilson, 1989, 1990; Protopopescu et al., 1989).

Depuis, de nombreuses études se sont penchées sur le potentiel de cette approche EDP. Pasadas et Rodríguez (2009) ont notamment souligné ses atouts pour le mélange de surfaces, la modélisation de formes libres ou les spécifications fonctionnelles. Grâce à sa flexibilité géométrique supérieure aux méthodes d'interpolation, elle s'est révélée utile dans divers domaines de recherche.

Parmi ces méthodes basées sur les EDP, la technique de modélisation de surfaces à haute précision (High Accuracy Surface Modeling) a démontré sa capacité à représenter des surfaces complexes avec une grande fidélité géométrique source (Thian Ziang Yue). En s'appuyant sur une résolution numérique avancée des EDP, elle offre une alternative prometteuse pour la modélisation de formes de haute qualité.

La méthode High Accuracy Surface Modeling (HASM) est basée sur le théorème fondamental des surfaces et a été développée pour résoudre les problèmes liés à la modélisation de surface. L’objectif de la modélisation de surfaces est de décrire la variation spatiale d’une variable donnée. Dans la plupart des procédures numériques pour résoudre des équations aux dérivées partielles, le problème est d’abord discrétisé en choisissant des équations algébriques sur un espace d’approximation `a dimension finie. Ensuite, une méthode numérique est conçue pour résoudre ce système d’équations discrètes. De nombreuses études ont été menées pour montrer que la méthode HASM est plus précise que les méthodes classiques. Il a été montré que la précision de la simulation de HASM est plus élevée que celle des méthodes d’interpolation classiques (krigeage, méthodes d’interpolation de distance inverse, Splines, etc)

**Formulation des EDP basique de HASM**

Selon le théorème fondamental des surfaces, une surface est entièrement définie par ses coefficients fondamentaux du premier et du second ordre (Henderson, 1998). Les coefficients du premier ordre décrivent comment la surface hérite des propriétés géométriques intrinsèques de la surface telles que les longueurs de courbes, les angles entre vecteurs tangents ou les aires de régions (Toponogov, 2006). Les coefficients du second ordre reflètent quant à eux les déformations locales de la surface par rapport à son plan tangent en chaque point (Liseikin, 2004). Bien que la pente, l'aspect ou la courbure soient importants pour décrire localement une surface (Evans, 1980), selon la géométrie différentielle ces éléments ne déterminent que les lignes de hachures et non la surface elle-même. Celle-ci ne peut être entièrement définie que par ses formes fondamentales du premier et du second ordre (Toponogov, 2006).

Ainsi, les deux groupes de coefficients fondamentaux permettent de caractériser complètement la géométrie d'une surface de manière intrinsèque, indépendamment de sa configuration dans l'espace. Cette approche différentielle est à la base de la modélisation géométrique des surfaces.

Na Zhao, TianXiang Yue - High Accuracy Surface Modeling Method\_ The Robustness-Springer (2021)

Nous donne les deux formes fondamentales d’une surface

**La première forme fondamentale d'une surface**

Considérons une surface définie par les paramètres : et deux points adjacents de .

Leur distance intrinsèque s'exprime en fonction des variations infinitésimales et des paramètres :

Lorsque est infiniment proche de, les termes d'ordre supérieur à 2 en et peuvent être omis, et . Dans ce cas, , la partie principale de la norme du vecteur , est définie comme la distance entre les deux points infiniment adjacents sur la surface S.

En posant :

L'équation correspond à la première forme fondamentale d'une surface S. Les coefficients E, F et G sont appelés coefficients fondamentaux de première espèce. La quantité étant une forme quadratique définie positive, cela implique

Les coefficients de la première forme fondamentale sont des quantités qui définissent les propriétés géométriques intrinsèques de la surface (la longueur d'une courbe, l'angle entre deux courbes, l'aire d'une région ou la courbure d'une géodésique), indépendantes de sa place dans l’espace.

**La deuxième forme fondamentale d'une surface**

Pour étudier le degré de courbure en un point de la surface, on calcule la distance verticale entre le point et le plan tangent en .

Les termes d'ordre supérieur à 3 de et sont omis, alors :

est le vecteur normal à

En posons on a :

Quand , la partie significative de

Cette équation est qui est considéré comme la seconde forme fondamentale d'une surface, où L, M, N sont les coefficients de la seconde forme fondamentale et sont également appelés les coefficients fondamentaux de second ordre.

Puisque les dérivées par rapport à sont prises des deux côtés

Donc

La deuxième forme fondamentale peut être écrire sous la forme :

La seconde forme fondamentale décrit la forme de la surface et reflète la variation locale de courbure de la surface.

**Théorème fondamental des surfaces**

D'après le théorème principal de la théorie des surfaces (Su et Hu 1979), si les coefficients fondamentaux de première et seconde espèce de la surface sont symétriques, si sont définis positifs (satisfont au système d'équations de Gauss-Codazzi) , alors on considère la surface comme le graphe d'une fonction soumis à la condition initiale .

D’après (Applied ecology and environmental management) Tian-Xiang Yue - Surface modeling \_ high accuracy and high speed methods-CRC Press (2011)

Les coefficients fondamentaux de première espèce E, F et G peuvent être formulés comme :

Les coefficients fondamentaux de première espèce L, M et N peuvent être formulés comme :

L’équation de Gauss peut être reformulée comme suit :

Où

Les symboles de Christoffel du second type dépendent uniquement des coefficients fondamentaux de première espèce et de leurs dérivées.

Pour le calcul, on prend le cas d'un maillage d’un domaine orthogonal avec

le pas de discrétisation ,sont les nombres de points respectifs suivant la direction de et la direction représente l’ensemble des points sur les mailles

Tout cela permet d'exprimer les dérivées partielles de en fonction des valeurs aux nœuds du maillage, en vue d'une discrétisation des équations aux dérivées partielles régissant la surface.

Nous allons procéder aux différences finies centrées pour approximer les dérivées partielles d’ordre 1, d’ordre 2 , et la dérivée croisée de

peuvent être formulés par un développement de Taylor en série autour de tel que:

En faisant la soustraction de l’équation par l’équation on a :

Donc :

Pour un suffisamment petit, l'approximation aux différences finies de peut s'exprimer comme:

De la même manière, on a :

Cette fois-ci, faisons la somme des équations

Donc :

Pour un suffisamment petit, l'approximation aux différences finies de peut s'exprimer comme:

De la même manière, on aura :

**Forme discrétisée de l’équation de Gauss**

D’après les études de (Applied ecology and environmental management) Tian-Xiang Yue - Surface modeling \_ high accuracy and high speed methods-CRC Press (2011) (1) La troisième équation de ce système produit une estimation biaisée des résultats Cette équation a été mise à l’écart du système pour l’efficacité de la méthode

Donc nous allons tenir compte seulement des deux premières équations du système :

La formulation itérative de l'équation (2.14) peut s'exprimer comme :

Avec

Certains documents utilisent les méthodes itératives comme celle de Gauss Seidel, Gauss Seidel modifié et bien d’autre pour résoudre le système constitué des inconnus en des points discrétisés d’un domaine choisi

Nous allons exploiter ici la forme discrétisée du système pour la transformer en une matrice générale constituée d’un premier et second membre

Considérons le vecteur des inconnus ,

Les conditions initiales tout au long des bords (les quatre côtés) du domaine doivent être fournir pour la prédiction au d’autres points du domaine

Toujours à l’intérieur du domaine des points échantillonnés doivent être donnée pour effectuer la prédiction basée sur les points d'échantillonnage.

Alors, la première équation du système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante:

Avec :

est le vecteur de second membre et est matrice des coefficients de la première équation du système

Pour

La matrice A est défini par :

Les représentent des matrices nulles

est la matrice unité

La deuxième équation du système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante:

Avec :

est le vecteur de second membre et est matrice des coefficients de la deuxième équation du système

Les représentent des matrices nulles

**Référence**

1. Souris, M. (2019). *Épidémiologie et géographie: Principes, méthodes et outils de l’analyse spatiale*. ISTE Group.
2. Dragićević, S. (1999). Application de la logique floue dans l'interpolation spatio-temporelle à l'aide d'un système d'information géographique.
3. ABDENNOUR, M. A. (2021). *Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra)–Apport de la géostatistique et de la télédétection* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider de Biskra).
4. RATA, M. (2010). *Variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols dans la plaine du Bas Chélif-Etablissement d’une Banque de Données* (Doctoral dissertation, DOUAOUI A).
5. Li, S. (2015). *Modélisation spatio-temporelle pour l'esca de la vigne à l'échelle de la parcelle* (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
6. GUEROUI, Y. (2014). *Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de L’aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien)* (Doctoral dissertation).
7. Lebel, T., Amani, A., Cazenave, F., Lecocq, J., Taupin, J. D., Elguero, E., ... & Robin, J. (1996). La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel: apports de l'expérience EPSAT-Niger. *IAHS PUBLICATION*, 77-98.
8. Louvet, S., Paturel, J. E., Mahé, G., Vigaud, N., Roucou, P., Rouché, N., & Koite, M. (2011). Variabilité spatio-temporelle passée et future de la pluie sur le basin du Bani en Afrique de l’Ouest. *Hydro-climatology: variability and change*, *344*, 125-130.
9. Coman, A. (2008). *Modélisation spatio-temporelle de la pollution atmosphérique urbaine à partir d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
10. Dahlström, B. (2003). La conception d'un réseau d'observation climatologique-Un point de vue européen. *La Météorologie*, *2003*(40), 59-63.
11. Poupry, S. (2023). *Contribution à la conception et à la mise en oeuvre d'un système de surveillance de la qualité de l'air: application à la surveillance de la qualité de l'air dans les vallées des Gaves* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).