



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM

Faculté des Sciences Exactes & de l'Informatique
Département de Mathématiques et d'Informatique
Filière Informatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique
Option : Systèmes d'information géographiques

Représentation 3D des sols (Modélisation par horizons)

Présenté par :

KHERBACHE Mohamed

GAID Soufyane

Encadré par :

DELALI Amina.

Année Universitaire 2012/ 2013

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur DR.DELLALI Amina pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous remercions aussi tous les responsables et aux personnels de la faculté science exacte et informatique (ex : INES) et surtout monsieur le doyen DR.BELMEKKI

Je remercie également tout le staff pédagogique du département informatique actuelle et surtout monsieur MIDOUN qui nous a beaucoup aidés.

Dédicace

Ce modeste mémoire est dédié en premier stade à mes chers défunts

Grands- parents « hadj Ahmed & hadja Zineb » qui étaient là au moment où je suis venu dans ce monde, au moment où je grandissais à petits pas, aux moments où je commençais à fréquenter l'école et qui n'avais jamais cessé de me rappeler l'importance et l'indisponibilité du savoir et de la réussite scolaire.

À mes êtres les plus chers, mes parents aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de vos sacrifices, de l'amour et de l'affection dont vous n'avez cessé de m'entourer.

Vos encouragements constants ont toujours été pour moi des plus précieux.

À mes adorables frères et ma petite sœur, Pour tout le soutien que j'ai trouvé auprès de vous.

À ma merveilleuse princesse la lumière de mon chemin, ton soutien moral, ta gentillesse sans égal, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

À tous mes, oncles, tantes, cousins et cousines, en souvenir de toutes les joies et forces qui unissent notre chère famille.

À Tous mes ami(e)s et tous ceux qui m'aiment, pour votre sincère amitié, votre soutien permanent me remonte le moral et vos conseils m'incitent à relever les défis.

Je vous aime tous et j'espère que la vie vous préservera plein de bonheur, de réussite, de prospérité et une très bonne santé.

En conclusion, que dieu nous guidera vers le bon chemin du savoir car

Il demeure la lumière de l'espoir.

Mohamed

DEDICACES

Je dédie ce mémoire :

A mon père (que Dieu ait son âme), Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

A ma mère qui m'a éclairée mon chemin et qui m'a encouragé et soutenue toute au long de mes études, Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

A mes frères & mes sœurs, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Pour tous mes amis. Que j'admire, l'unique remerciement restera ma reconnaissance pour leur soutien, aide et encouragements quant aux précieuses connaissances, acquises durant mon passage éducatif de la première année primaire à ce jour.

Soufyane

Résumé

La modélisation de nos jours devient un outil indispensable pour comprendre les phénomènes qui nous entourent d'une part, et pour pouvoir gérer au mieux notre environnement d'autre part.

Avec l'arrivée des SIG, cette modélisation devient de plus en plus proche de la réalité, et elle fait intervenir un certain nombre de méthodes qui prennent en considération l'information spatiale.

Pour modéliser le sol, pour étudier un phénomène particulier, entre autres sa pédogénèse, beaucoup de techniques de modélisation existent déjà. Cependant ces dernières se sont avérées insuffisantes pour comprendre ces phénomènes, le plus souvent à cause de l'incapacité de modéliser en 3 dimensions des données qualitatives.

Une approche a été proposée, pour réaliser une modélisation pseudo 3D du sol en utilisant les épaisseurs des horizons de ce dernier.

Mots clés : Modélisation, représentation 2D et 3D, sol, horizons, pseudo 3D, interpolation.

Sommaire

REMECIMENT :	I
DEDICACE :	II
RESUME :	III
LISTE DES FIGURES :	IV
LISTE DES TABLEAUX:	V
INTRODUCTION:	1

Chapitre I: Eléments de modélisation dans les SIG

1. INTRODUCTION:	3
2. LES DIFFÉRENTS FORMATS DE DONNÉE	3
2.1. LES DONNÉES RASTER	3
2.2. LES DONNÉES VECTEUR :	4
3. REPRÉSENTATION DES DONNÉES	4
3.1. LES COURBES DE NIVEAUX:	4
3.2. LES TINS:	5
4. VISUALISATION 3D:	7
4.1. LA MODÉLISATION 3D:	7
4.2. TYPES DE MODÉLISATION :	8
4.2.1. Modélisation par spline	8
4.2.2. Modélisation par maillage:	8
4.2.3. Modélisation polygonale	9
4.2.4. Modélisation par courbes NURBS	9
4.2.5. Modélisation paramétrique.....	10

4.2.6. Modélisation par Subdivision de surfaces.....	10
5. CONCLUSION:	11

Chapitre II: Représentation des sols dans les SIG

1. INTRODUCTION :	13
2. SOL: PROFILE ET HORIZONS:	13
2.1. PROFILE.....	13
2.2. HORIZONS:	13
3. CARTOGRAPHIES 2D DU SOL:	14
3.1. DÉFINITION DE L'INTERPOLATION	14
3.2. CLASSIFICATION DES MÉTHODES D'INTERPOLATION:	14
3.3. TECHNIQUES D'INTERPOLATION :	16
3.3.1. Méthode voisin naturel :.....	16
3.3.2. Méthode Spline avec interruptions :.....	16
3.3.3. Méthode Topo vers raster :.....	17
3.3.4. Méthode Tendance	17
3.3.5. Méthode IDW :.....	18
3.3.6. Méthode spline :.....	18
4. MODÉLISATION DU RELIEF (MNT):	19
4.1. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT):	19
6. ETAPES DE MODÉLISATION	20
6.1. ACQUISITION DES DONNÉES : RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES ET ANALYSE DU SOL : (POINTS).....	21
6.2. GESTION ET ANALYSE DES DONNÉES :.....	21
6.3. REPRÉSENTATION DES DONNÉES	21
7. AVANTAGES DE CETTE REPRÉSENTATION:	22
8. CONCLUSION:	23

Chapitre III: Application

1. INTRODUCTION:	25
2. LA RÉGION DE L'ÉTUDE :	25
3. DONNÉE ET SIG UTILISÉ.....	26
3.1. SOURCE DE DONNÉES :	26
3.2. SIG:.....	26
3.2.1. ArcMap :	27
3.2.2. ArcToolbox :	27
3.2.3. Arcscene :	27
4. LES TRAITEMENTS AVEC ARCMAP :	27
4.1. AJOUT LES DONNÉES SUR ARCMAP	27
4.2. EXTRACTIONS DES ÉLEVATIONS :	29
4.3. CALCUL DES ÉLEVATIONS DE CHAQUE HORIZON :	31
4.4. CRÉATION LES TINS DES HORIZONS :	32
4.5. CONVERSION TIN VERS RASTER :	34
5. TRAITEMENTS AVEC ARCSCENE :	35
5.1. IMPORTER LES RASTERS DANS ARCSCENE :	35
5.2. CRÉATION DE BLOCK :	37
5.3. VISUALISATION PSEUDO 3D DES HORIZONS :	44
6. CRÉATION D'UN MODÈLE SUR ARCTOOLBOX:	44
7. CONCLUSION :	45

Listes de figures

Figure 1: Les éléments de base de la structure d'une donnée raster	4
Figure 2: Représentation des courbes de niveau	5
Figure 3: Représentation d'un TIN	5
Figure 4: Triangulation Delaunay	6
Figure 5: Les lignes de ruptures	6
Figure 6: Quelques horizons d'un profile pédologique	14
Figure 7: MNT	20
Figure 8: Etapes de la modélisation proposée	22
Figure 9:L'état d'Indiana des états unis d'Amérique	25
Figure 10: Comté d'Orange	26
Figure 11: Ajout des élévations.....	28
Figure 12: Ajout du nuage de point.....	28
Figure 13: Données attributaires correspondantes	29
Figure 14: Extraction des élévations	29
Figure 15: Les élévations extraites.....	30
Figure 16: La colonne Elev	30
Figure 17: Calcul des valeurs d'élévations	31
Figure 18: Elévations calculées.....	31
Figure 19: Calcul de l'épaisseur totale des horizons	32
Figure 20: Création des TIN épaisseur.....	32
Figure 21: Création des TIN élévation.....	33
Figure 22: Aperçu d'un des TIN créés.....	33
Figure 23: Conversion des TIN en raster	34
Figure 24: Rasters créés	34
Figure 25: Détermination de la symbolgie	35
Figure 26: Détermination des élévations de base.....	35
Figure 27: Exagération de la valeur verticale.....	36
Figure 28: Une des couches épaisseur résultantes	36
Figure 29: Block dessiné avec ArcMap	37
Figure 30: Conversion du polygone en points	37

Figure 31: Conversion en ligne	38
Figure 32: La zone du block délimitée	38
Figure 33: Conversion des entités en 3D	39
Figure 34: Ajout de l'élévation Z	39
Figure 35: La valeur de Z ajouté.	40
Figure 36: Jointure	40
Figure 37: Résultat des jointures	41
Figure 38: Le block qui sera utilisé dans ArcScene	41
Figure 39: Copie du block	42
Figure 40: Définition de la hauteur d'un block	42
Figure 41: Définition de l'extrusion du block	43
Figure 42: Le block crée	43
Figure 43: Visualisation pseudo 3D du sol par horizons	44
Figure 44: Création du modèle	45
Figure 45: Exécution du modèle	45

Listes de Tableau

Tableau 1: Méthodes d'interpolation	15
---	----

Introduction

Le sol est avant tout un capital mince et fragile. Il est aujourd'hui, par la société, considéré comme une ressource consommable, quoiqu'essentielle et très lentement renouvelable.

Pour pouvoir gérer aux mieux cette ressource, il faut pouvoir la représenter et la modéliser dans différentes dimensions. Cependant, les informations qui lui sont liées sont de différentes natures. Si les techniques de modélisation existantes prennent en considération les données quantitatives, les informations qualitatives sont le plus souvent négligées. La raison principale à cet état de fait, et que la modélisation et le plus souvent réalisée par l'utilisation de techniques d'interpolations qui ne prennent en considération que les données quantitatives.

L'approche proposée, va permettre une modélisation des horizons du sol en exploitant toute les fonctionnalités nécessaires disponibles dans les SIG (Systèmes d'Information Géographique) telles l'interpolation, la gestion des données spatiales, la cartographie et la visualisation 3D.

Dans le premier chapitre nous allons introduire certains éléments liés à la représentation des données spatiales des les SIG, et qui vont par la suite servir à modéliser le sol.

Dans le chapitre suivant, nous introduirons les techniques d'interpolation existantes qui vont servir à réaliser des modélisations du sol.

En dernier, nous appliquerons l'approche de modélisation du sol par horizons, en décrivant les étapes suivies ainsi que les avantages qu'elle présente.

Chapitre I

Eléments de modélisation dans les SIG

1. Introduction:

Chaque Système d'Information Géographique permet de créer, visualiser, rechercher et analyser des données spatiales. Ces données ont plusieurs formats de représentations ainsi que différentes dimensions. Elles vont par la suite permettre de réaliser des modélisations d'un certain nombre de phénomènes. De ce fait il est important de connaître les différents types de représentation de ces données dans les différentes dimensions.

2. Les différents formats de donnée

Nous pouvons classer les formats de données SIG en deux grandes catégories: les données raster et les données vecteur.

2.1. Les données raster

Une donnée de type raster représente les informations géographiques sous forme d'une grille régulière. Chaque cellule, plus communément appelée pixel, de cette grille a exactement la même taille et est référencée dans l'espace géographique. En effet, en connaissant uniquement les coordonnées géographiques x/y du pixel en bas à gauche ainsi que la taille des pixels (résolution de la donnée), la position dans l'espace de tous les autres pixels est connue. Chacun de ces pixels contient une unique valeur qui sera alors, soit directement exploitée par un SIG (comme dans le cas de valeurs de luminances ou d'altitudes), soit interprétée par l'intermédiaire d'une table de correspondance (comme dans le cas de données sur l'occupation du sol où la valeur de chaque pixel est associée à un nom de classe stocké dans une table) [**BENOIT LE BOCEY, 2010**].

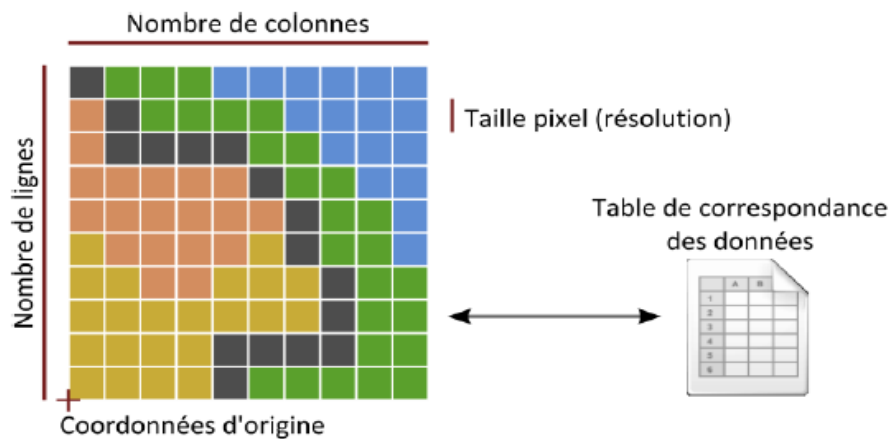


Figure 1: Les éléments de base de la structure d'une donnée raster

2.2. Les données vecteur :

L'espace est représenté par des entités de type points (coordonnées X, Y), des lignes constituées de segments liant des points (X,Y) et des polygones constitués de lignes délimitant un espace. Les coordonnées (X,Y) peuvent correspondre aux latitudes et longitudes (sans projection) ou à des coordonnées cartésiennes [SOUDANI KAMEL , 2006]

A ces données est associé des informations non spatiales : ce sont les données attributaires. Elles peuvent contenir n'importe quel information. Donc, une donnée de type vecteur peut avoir une ou plusieurs données attributaires.

3. Représentation des données

Les données citées précédemment seront utilisées pour réaliser des représentations différentes de l'information géographique suivant la thématique traitée. Parmi ces représentations nous trouvons:

3.1. Les courbes de niveaux:

Les courbes de niveau sont en cartographie les courbes reliant les points de la carte ayant la même altitude : un chemin qui suit les courbes de niveau est à plat (il ne monte ni ne descend), s'il est transverse aux courbes de niveau, il

monte ou il descend, passant d'un niveau à un autre niveau donnant une information sur la topographie du terrain. Elles représentent le lieu géométrique des points du terrain ayant la même altitude. [FRANCINE ET MARC DIENER, 2008]

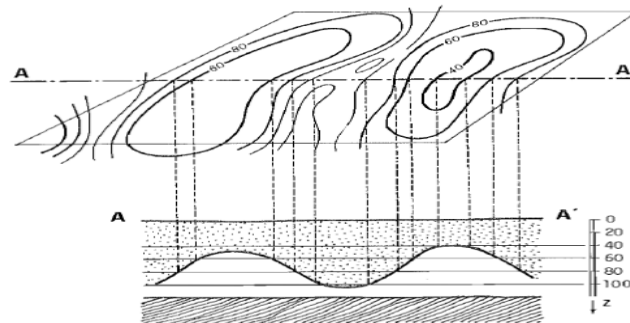


Figure 2: Représentation des courbes de niveau

3.2. Les TINs:

Modèle de représentation d'un terrain en 2,5D, consistant en surfaces triangulaire reliant des points d'altitudes différentes. Une interpolation linéaire par morceaux de x , y , z points pour créer des éléments triangulaires de dimensions variables en fonction de certains critères [ENRIQUE R. VIVONI ET AL, 2002].

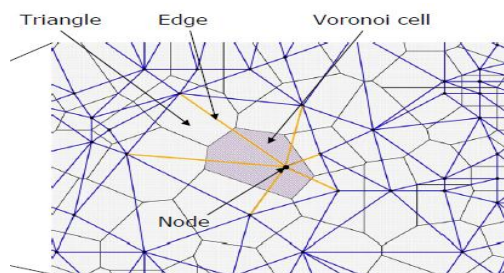


Figure 3: Représentation d'un TIN

La triangulation la plus utilisée est celle de Delauny, elle consiste en un ensemble de segments possédant la propriété du "cercle vide" : pour chaque segment on peut trouver un cercle qui contient les nœuds des segments mais ne contenant aucun autre point (Figure 4).

Souvent, et par souci de fidélité aux caractéristique du terrain dans le monde réel, on ajoute ce qu'on appelle des lignes de rupture : « *Break line* »

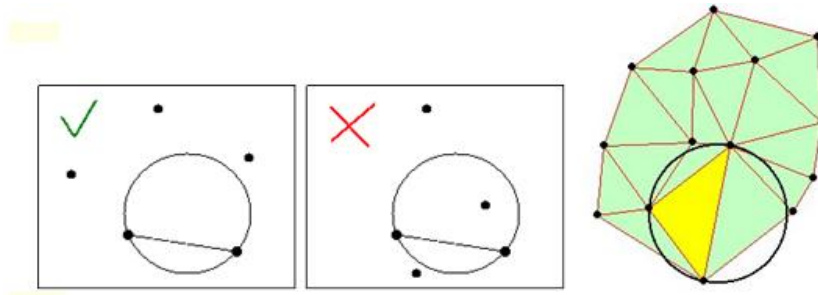


Figure 4: Triangulation Delaunay

Ce sont des éléments linéaires qui définissent et contrôlent le comportement de surface en termes de fluidité et de continuité. Ils existent en deux types [SPATIAL TECHNIQUES,SD] :

- *Lignes de rupture souples (Soft break lines)* : sont utilisées pour s'assurer que les éléments linéaires et les segments des polygones sont maintenues dans le modèle de surface de TIN, et ceci par l'ajout de la ligne de rupture en tant que segment. Cependant, elles ne définissent pas d'interruptions dans le lissé de surface - des lignes de rupture sans valeur Z (Figure 5).
- *Lignes de rupture dures (Hard break lines)* : définissent des interruptions dans le lissé de surface - des lignes de rupture avec la valeur Z (Figure 5)

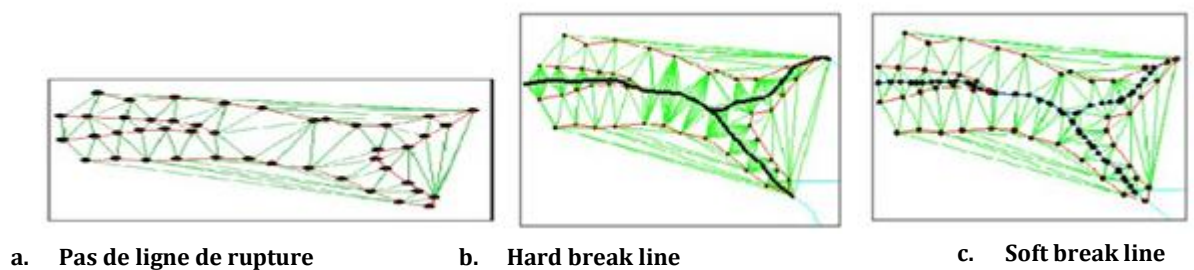


Figure 5: Les lignes de ruptures

4. Visualisation 3D:

4.1. La modélisation 3D:

Regroupe l'ensemble des techniques permettant de représenter un objet plongé dans un espace tridimensionnel, reflet de la réalité ou de notre imaginaire, de le visualiser à l'aide d'algorithmes de rendu plus ou moins réaliste et de le manipuler (ex. : animation, déformation). L'intérêt majeur de la modélisation 3D est évident dans différents domaines comme les sciences (ex. : médecine, géologie), les films d'animation ou les jeux vidéo [BENOIT POUPEAU, 2008].

Plus proche de notre thématique, la visualisation de scènes virtuelles 3D, comme un réseau de failles ou une zone urbaine, plonge l'utilisateur dans un univers approchant la réalité. La 3D permet alors d'appréhender une quantité d'informations comme la morphologie des objets et leurs interactions et constitue un outil d'aide à la décision.

Les modèles topologiques, associés aux représentations géométriques, sont utiles dans la plupart des applications. Ils rendent la visualisation d'objets plus réaliste. En explicitant les relations de voisinage entre les primitives géométriques constitutives de chaque objet, ils garantissent une cohérence géométrique, qui est parfois altérée lors de l'acquisition des données ou la modification géométrique des objets, et évitent des reconstructions non valides. La description, par ces modèles topologiques, des relations entre primitives topologiques montre que l'avantage de la 3D, loin d'être mineur, ne se cantonne pas dans l'unique application que constitue la visualisation.

Parmi les SIG qui permettent de modéliser en 3D on a : Quantum et Grass Gis et Arcgis

Les étapes de la modélisation dans ces derniers sont :

- **Grass gis :**
 - Rappels sur l'organisation des données dans GRASS ;
 - Import de données vecteur/raster ;
 - Création des données indispensables à la 3D : création d'un DEM en utilisant les modules *v.to.rast* et *r.surf.contour* .
 - Visualisation des données 3D
 - utilisation du module *nviz*.

- **Quantum GIS :**
 - Rappels l'utilisation des données GRASS dans QGIS ;
 - Affichage des données précédentes à partir de QGIS ;
 - Création d'un objet 3D (antenne / éolienne) et visualisation dans nviz ;
 - Analyses « terrain » : visibilité de l'objet, ombrage [CENTRE DE FORMATION TOULOUSE, SD]

4.2. Types de modélisation :

Nous pouvons regrouper les différentes méthodes de modélisation dans ce qui suit :

4.2.1. Modélisation par spline

- Créer des objets 3D à partir des lignes droites ou courbes appelés Splines;
- Ces lignes sont définies par des sommets
- Elles peuvent être utilisées en tant que trajectoire pour des objets
- Appropriée pour la création d'objets ayant un profil ou une forme pouvant être extrudée : une banane, une bouteille, un verre

4.2.2. Modélisation par maillage:

- Crée des objets 3D avec des polygones à 3 ou 4 cotés joints ensemble pour former un objet plus complexe
- Employée pour des objets planaires et pas particulièrement organiques exemple: immeubles, carrefour routier
- Le polyèdre est décrit par la liste des sommets et des arêtes. Si les polygones sont orientés, on pourra différencier l'extérieur et l'intérieur du modèle. Si l'on veut lever l'ambiguïté apportée par des polygones non plans, on utilisera uniquement des triangles : cette triangulation peut être forcée par le modelleur.
- Sans effet de lissage, l'objet apparaîtra anguleux si la définition en facettes est faible. En général, le lissage de Gouraud, réalisé par la carte graphique 3D, est suffisant pour donner un aspect plus lisse au modèle.

4.2.3. Modélisation polygonale

- La modélisation polygonale se sert d'outils de base identiques sur tous les logiciels 3D, ainsi que certains outils spécifiques aux logiciels génériques, aux logiciels spécialisés et aux plug-ins et scripts. Parmi ces outils, les plus répandus sont l'extrusion, la coupe, la soudure/rétractation et la révolution
- L'extrusion consiste à surélever des faces (adjacentes ou non) ou un profil 2D le long d'une trajectoire et de créer les faces venant combler le vide occasionné par le déplacement de l'élément de départ.
- La coupe consiste à créer des arêtes sur un maillage, ainsi que les points correspondants aux intersections des arêtes déjà existantes et celles nouvellement créées. On peut ainsi affiner un modèle, en ajoutant des détails sur certaine région
- La soudure/rétractation consiste à souder les sommets (vertices) entre eux, pour simplifier un maillage, boucher des trous ou faire converger des arêtes.
- La révolution consiste à faire tourner un profil 2D autour d'un axe 3D : on obtient ainsi un volume de révolution.

4.2.4. Modélisation par courbes NURBS

La modélisation par NURBS (**N**on **U**niform **R**ational **B**asic **S**pline/**S**pline **B**asique **R**ationnelle **N**on **U**niforme) consiste en un réseau de courbes créé grâce à des points de contrôles.

L'interpolation des courbes entre ces points peut se faire automatiquement selon un algorithme NURBS, par la manipulation de tangentes de courbe de Bézier, ou encore par modification des paramètres d'interpolation.

La modélisation par courbe se base sur un maillage adaptatif, conçu pour adapter ses subdivisions à la complexité des courbes dans une région donnée. Une surface parfaitement

Plane aura un nombre de subdivision très faible ou nul. C'est la technique de modélisation la plus précise. C'est la raison pour laquelle elle est massivement utilisée en architecture et en CAO industrielle, lorsque le souci de précision prime (notamment lorsque les modèles 3D servent de référence pour les machines-outils).

4.2.5. Modélisation paramétrique

- Implique que les objets aient des attributs prédéfinis comme leur hauteur et largeur ou qu'ils aient reçu des modificateurs.
- Un objet est dit paramétrique si on peut revenir à une étape de construction et changer ses attributs
- Offre un contrôle précis sur les objets

4.2.6. Modélisation par Subdivision de surfaces

Cette méthode regroupe un peu des deux méthodes classiques (polygonale et NURBS). Elle consiste à accélérer le processus grâce à la subdivision automatique d'une partie de la surface. Ceci permet d'ajouter des détails à certains endroits uniquement, sans se soucier du nombre de faces comprises sur la globalité de l'objet. Elle se rapproche de la modélisation polygonale par les techniques employées lors de la création de la forme, et de la modélisation par NURBS en ce qui concerne le rendu de la surface, c'est-à-dire son arrondi.

Elle est présente dans de nombreux logiciels professionnels (Maya, 3dsMax, Lightwave, Softimage, Modo...). [MOHAMED ALI HADHRI, 2010]

5. Conclusion:

Parmi les éléments que nous venons de voir, il y a les TIN. Ces derniers, vont par la suite être utilisés pour réaliser des interpolations qui servent à réaliser des modélisations en 2 et 3 dimensions. La plupart des logiciels SIG offrent des procédures pour manipuler les TIN, et qui offrent aussi la possibilité de visualiser les données sous différents angles.

Chapitre II

Représentation des sols dans les SIG

1. Introduction :

Afin de comprendre les phénomènes liés au sol, il est impératif de pouvoir le modéliser. Les SIG, permettant de manipuler la données spatiales, deviennent un outil idéal pour réaliser ces modélisations d'une part et d'analyser ces phénomènes d'autres part.

2. Sol: profile et horizons:

2.1. Profile

Dans l'approche pédologique abordée à l'échelle régionale, dans un paysage ou sur une toposéquence, chaque profil de sol est défini d'une manière globale par une superposition de couches (ou horizons).

La construction de ce volume est généralement faite en prenant en compte les caractéristiques d'une ou plusieurs couches (horizon diagnostic, etc.). Ce type de construction par extrapolations successives aboutit ainsi au rassemblement d'une famille de sols constituée par des individus tous différents dans le détail, mais possédant au moins un facteur commun.

En fait, à l'intérieur de ces unités de sols dites « homogènes », comme entre deux unités, il existe toujours une variation progressive entre les structures de chaque horizon constitutif d'un sol.

2.2. Horizons:

On distingue généralement cinq types d'horizons :

- L'horizon A: est un horizon de surface, constitué surtout de matières organiques et soumis à un fort lessivage qui l'appauvrit en éléments fins et en fer.
- L'horizon B: est un horizon enrichi par illuvion en éléments fins et amorphes : argiles, oxydes de fer et d'aluminium, humus. Cet horizon est souvent appelé horizon structural ou horizon d'altération. Il diffère de l'horizon A par sa structure et de la roche-mère par son plus fort degré d'altération (présence de Fe_2O_3 libre).

- L'horizon C: est un horizon correspondant au matériau originel à partir duquel se forment les horizons A et B supérieurs. Il est peu différent de l'horizon RM désignant la roche-mère non altérée.
- L'horizon G: est un horizon de couleur gris verdâtre, caractéristique des sols hydromorphes, riche en fer ferreux, avec des taches de couleur rouille (fer ferrique) se formant au contact de l'oxygène encore présent dans la zone de battance de la nappe phréatique.

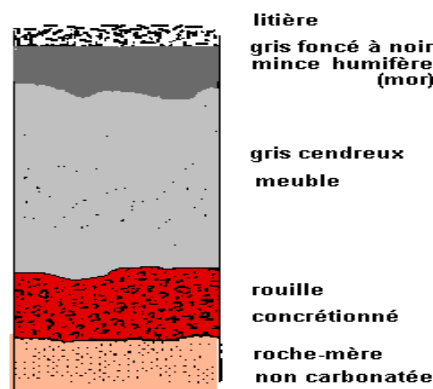


Figure 6: Quelques horizons d'un profil pédologique

3. Cartographies 2D du sol:

3.1. Définition de l'interpolation

L'interpolation est une méthode ou une fonction mathématique qui permet d'estimer des valeurs à des positions où aucune des valeurs mesurées n'est disponible. L'interpolation spatiale suppose que les données d'attribut sont continues sur l'espace. Cela permet l'estimation de l'attribut à n'importe quel endroit à l'intérieur la limite des données. Une autre hypothèse est l'attribut est spatialement dépendant, en indiquant que les valeurs rapprochées sont plus susceptibles d'être similaires qu'aux valeurs plus éloignées. Ces hypothèses permettent la formulation des méthodes d'interpolation spatiale. L'objectif de interpolation spatiale est de créer une surface qui est destinée à mieux représenter la réalité empirique ainsi la méthode choisie doit être évaluée pour son exactitude [ANDERSON, S, 2001].

3.2. Classification des méthodes d'interpolation:

Les méthodes d'interpolation peuvent être [SEVERINE MORTIER,2007] :

- Globale : toutes les observations disponibles sont utilisées par l'interpolation.
- Locale : les valeurs inconnues sont estimées à partir d'un voisinage de points échantillonnés.
- Exacte : les valeurs d'échantillonnages originales sont préservées.
- Approximative : les valeurs d'échantillonnages originales ne sont pas préservées.

Cependant, on pourrait regrouper les méthodes d'interpolation qui existent en [JIN LI ET ANDREW D. HEAP, 2008] :

- Interpolation non-géostatistique
- Interpolation géostatistique : univariées et multivariées
- Combinaison des deux catégories précédentes.

Dans le tableau suivant (Tableau 1) , on trouve la plupart des méthodes d'interpolation qui existent, et classées selon les catégories citées précédemment :

Non-géostatistique	Géostatistique		Méthodes combinées
	Univariée	Multivariée	
- Nearest neighbours - Triangular irregular network related interpolation - Natural neighbours - Inverse distance weighting - Regression models - Trend surface analysis - Splines and local trend surfaces - Thin plate splines - Classification - Regression tree - Fourier series - Lapse rate	- Simple kriging - Ordinary kriging - Block kriging - Factorial kriging - Dual kriging - Indicator kriging - Disjunctive kriging - Model-based kriging - Simulation	- Universal kriging - SK with varying local means - Kriging with an external drift - Simple cokriging - Ordinary cokriging - Standardised OCK - Principal component kriging - Colocated cokriging - Kriging within strata - Multivariate factorial kriging - Indicator kriging - Indicator cokriging - Probability kriging - Simulation	- Classification combined other interpolation methods - Trend surface analysis combined with kriging - Lapse rate combined with kriging - Linear mixed model - Regression trees combined with kriging - Residual maximum likelihood-empirical best linear unbiased predictor - Regression kriging - Gradient plus inverse distance squared

Tableau 1: Méthodes d'interpolation

3.3. Techniques d'interpolation :

Les techniques d'interpolation qui sont disponibles sur Arcgis sont : [SOUDANI KAMEL , 2006]

3.3.1. Méthode voisin naturel :

Recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler une valeur (Sibson, 1981). Cette méthode est également connue sous le nom d'interpolation de Sibson. Ses propriétés de base sont son caractère local (utilisation d'un seul sous-ensemble d'échantillons entourant un point désigné) et la garantie que les hauteurs interpolées se situent dans la plage des échantillons utilisés. Il ne déduit aucune tendance et ne produit pas de sommets, dépressions, crêtes ou vallées autres que ceux déjà représentés par les échantillons en entrée. La surface passe par les échantillons en entrée ; elle est lisse partout, sauf aux emplacements correspondant à ces échantillons.

3.3.2. Méthode Spline avec interruptions :

Applique une méthode de courbure minimale, implémentée par l'intermédiaire d'une technique monodirectionnelle à plusieurs grilles qui passe d'une grille grossière initiale, initialisée dans ce cas avec la moyenne des données en entrée, par une série de grilles plus fines jusqu'à ce qu'une approximation d'une surface de courbure minimale soit produite à l'écartement de ligne et de colonne souhaité.

A chaque niveau d'affinage de la grille, le modèle de surface basé sur grille courant est traité comme une membrane élastique et un opérateur de déformation itératif linéaire convergent est appliqué à plusieurs reprises à chaque nœud pour atteindre une approximation à une surface de courbure minimale, qui respecte à la fois les données de point en entrée et les discontinuités codées dans les interruptions. La

déformation appliquée à chaque cellule est calculée sur la base d'une addition moléculaire qui compare l'addition pondérée de 12 cellules voisines avec la valeur courante d'une cellule cible centrale afin de calculer une nouvelle valeur pour la cellule cible.

3.3.3. Méthode Topo vers raster :

Est une méthode d'interpolation spécialement destinée à la création de modèles numériques de terrain (MNT) hydrologiquement corrects. Il repose sur le programme ANUDEM développé par Michael Hutchinson (1988, 1989). Reportez-vous aux travaux d'Hutchinson et Dowling (1991) pour consulter un exemple d'application d'ANUDEM et pour obtenir des informations supplémentaires à ce sujet. Une brève présentation d'ANUDEM et des applications est donnée dans les travaux d'Hutchinson (1993). La version 4.6.3 d'ANUDEM est actuellement utilisée dans ArcGIS.

Topo vers raster interpole les valeurs d'altitude d'un raster en imposant des contraintes pour garantir :

- une structure de drainage qui soit connectée,
- la représentation correcte des crêtes et des cours d'eau à partir des données d'isolignes en entrée.

Ainsi, il s'agit de l'unique interpolateur d'ArcGIS conçu particulièrement pour s'appliquer intelligemment à des entrées d'isolignes.

3.3.4. Méthode Tendance :

Utilise une interpolation polynomiale globale qui ajuste une surface lisse définie par une fonction mathématique (un polynôme) aux points d'échantillonnage en entrée. La surface de tendance évolue graduellement et capture des structures à échelle grossière dans les données.

Il existe deux principaux types d'interpolation de tendance : linéaire et logistique.

- Tendance linéaire : L'interpolateur de surface de tendance LINEAIRE crée un raster à virgule flottante. Il utilise une régression polynomiale pour ajuster une surface par moindres carrés aux points en entrée.
- Tendance logistique : L'option LOGISTIQUE de génération d'une surface de tendance est appropriée à la prévision de la présence ou de l'absence de certains phénomènes (dans le formulaire de probabilité) pour un ensemble donné d'emplacements (x, y) dans l'espace. La valeur z est une variable aléatoire catégorisée avec uniquement deux résultats possibles. Par exemple, l'existence d'une espèce en danger ou le manque d'existence de cette espèce.

3.3.5. Méthode IDW :

Détermine les valeurs de cellule via la combinaison pondérée de manière linéaire d'un ensemble de points d'échantillonnage. La pondération est une fonction d'inverse de la distance. La surface qui est interpolée doit être celle d'une variable dépendante de l'emplacement.

Cette méthode suppose que l'influence de la variable tracée décroît avec la distance par rapport à l'emplacement échantillonné. Par exemple, lors de l'interpolation de la surface du pouvoir d'achat des consommateurs pour l'analyse d'un site de détaillants, le pouvoir d'achat d'un emplacement plus lointain aura moins d'influence car les gens ont tendance à effectuer leurs achats à côté de chez eux.

3.3.6. Méthode spline :

Utilise une méthode d'interpolation selon laquelle les valeurs sont déterminées à l'aide d'une fonction mathématique qui réduit la courbure globale des surfaces et restitue une surface lisse passant exactement par les points en entrée.

Le spline courbe une feuille caoutchoutée qui passe par les points en entrée tout en réduisant la courbure totale de la surface. Elle applique une fonction mathématique à un nombre donné de points en entrée les plus proches tout en passant par les points d'échantillonnage.

Il existe deux méthodes de spline : régularisé et Tension. La méthode Régularisé crée une surface lisse à évolution progressive, avec des valeurs pouvant se trouver hors de plage de données d'échantillonnage. La méthode Tension définit la tension de la surface en fonction du caractère du phénomène modélisé. Elle crée une surface lisse dont les valeurs sont plus étroitement restreintes par la plage de données d'échantillonnage.

3.3.8. Méthode Krigeage :

C'est une procédure géostatistique avancée qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs z . Contrairement à d'autres méthodes du jeu d'outils Interpolation, utiliser l'outil ***Krigeage*** efficacement implique d'analyser de manière interactive le comportement spatial du phénomène représenté par les valeurs z avant de sélectionner la meilleure méthode d'estimation pour la génération de la surface en sortie.

4. Modélisation du relief (MNT):

4.1. Le modele numerique de terrain (mnt):

Les SIG intègrent de plus en plus la troisième dimension sous forme d'un MNT, bien que les coûts liés à l'acquisition de l'information d'altitude soient relativement élevés. Un MNT est une représentation de la topographie d'une zone terrestre. En cartographie, les altitudes sont habituellement représentées par des courbes de niveaux et des points cotés. Suivant la taille de la zone couverte, la plupart des MNT utilisent pour les petites zones, un maillage régulier carré ou pour les grandes zones, un maillage pseudo carré dont les côtés sont des méridiens et des parallèles [ANES MISSOUMI, 2010].

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- maillage carré/rectangulaire ;
- maillage hexagonal ;
- maillage triangulaire régulier ;
- maillage triangulaire quelconque.

En fonction du type de maillage, la représentation informatique du MNT varie. Dans le cas de maillages rectangulaires, on peut utiliser des tableaux, mais dans les autres cas, les structures de données sont plus complexes.

Au final, un MNT permet d'utiliser les SIG pour des applications comme le calcul d'implantation d'infrastructures de transport (conduites souterraines, voies terrestres, lignes électriques aériennes, antennes GSM...). Dans ce cas, et en fonction de la résolution du MNT, on y intègre les informations liées à la couverture du terrain par des bâtiments ou des végétaux, pour additionner leur hauteur à l'altitude du terrain sur lequel ils sont situés.

Grâce au MNT, il est possible de reconstituer une vue en images de synthèse et d'avoir une manipulation quantitative du terrain étudié

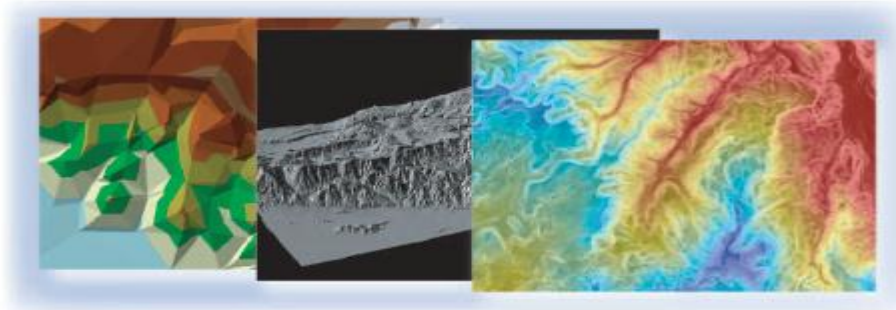


Figure 7: MNT

6. Etapes de modélisation

Il s'agit d'une proposition de méthode assez particulière, qui consiste à récupérer les épaisseurs des horizons liées aux différentes coordonnées x , y , z de points relevés.

Pour notre modélisation, nous nous sommes inspirés du modèle proposé par [DELARUE ET AL, 2009]. Nous pouvons diviser les étapes de cette modélisation en trois grandes étapes, décrites dans ce qui suit :

6.1. Acquisition des données : relevés topographiques et analyse du sol : (points)

Il s’agit de relever et de sauvegarder les différentes informations suivantes :

- Cordonnées x, y et z des points
- Epaisseurs des horizons
- Nature des horizons
- Autres horizons caractéristiques

6.2. Gestion et analyse des données :

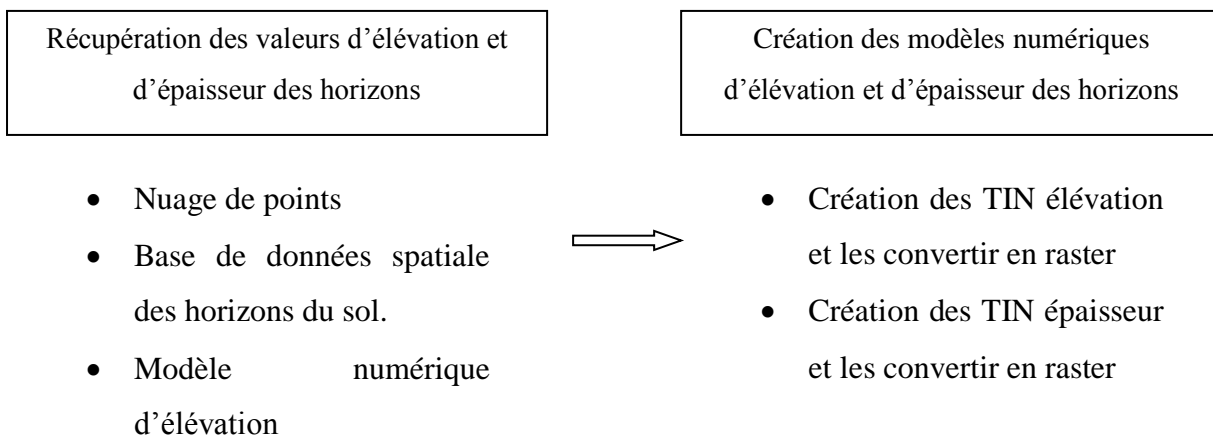
Il s’agit de deux types de conversion :

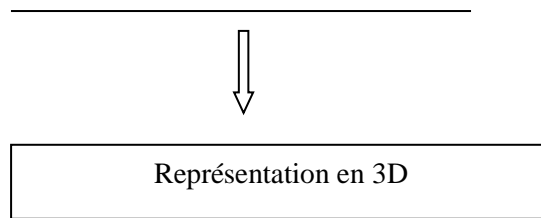
- ✓ Conversion des données recueillies en TIN
- ✓ Les TIN sont convertis en cellules raster (interpolation 2D) : les 3 cartes raster représentent : l’élévation de la surface du sol, l’épaisseur des horizons, le reste des caractéristiques de chaque horizon.

6.3. Représentation des données

- ✓ Les cartes raster sont combinées et converties en type vecteur (un polygone pour chaque pixel) pour obtenir les élévations des limites supérieures des horizons
- ✓ Ces dernières sont utilisées pour réaliser une représentation pseudo 3D des caractéristiques du sol.

Le modèle que nous proposons est décrit dans le schéma qui suit :





- Combiner les rasters élévation et épaisseur pour chaque couche d'horizon
- Délimitation de la zone à représenter par des points.
- Réaliser des extrusions en utilisant ces points et raster combinés.

Figure 8: Etapes de la modélisation proposée

7. Avantages de cette représentation:

Étant donné que c'est une modélisation 3D, elle a des avantages liés à cette particularité. Car, l'avantage de la modélisation 3D est de visualiser le modèle sous toutes les perspectives, générer automatiquement des vues 2D exactes et fiables, créer des coupes et des dessins 2D, masquer les lignes masquées et appliquer des effets d'ombrage réalistes, vérifier les interférences et réaliser des analyses d'ingénierie, ajouter des sources lumineuses et créer des rendus réalistes, naviguer dans le modèle, utiliser le modèle pour créer une animation et extraire des données nécessaires à la fabrication et à l'usinage.

En plus, cette approche pseudo 3D apporte de nouveaux éléments pour comprendre la répartition spatiale et la formation des Planosols [DELARUE ET AL, 2009].

Cette approche cartographique permet aussi le calcul des volumes horizons. Ces calculs pourraient être utiles aux explications pédogénétiques (intensité des inondations provenant d'un dépôt alluvial donné), les propriétés du sol (capacité de stockage de l'eau ou des polluants). ou pour planifier la gestion du paysage [M.L. MENDONC SANTOS ET AL, 2000].

8. Conclusion:

Cette étude est une première tentative de modélisation 3D du sol. En l'absence d'outils d'interpolation 3D pour les données qualitatives du sol, cette approche pseudo-3D représente un compromis efficace, rapide et simple, qui met en évidence les processus qui ont été manqués par des approches 2D traditionnelles. Dans ce qui suit, nous appliquerons la méthode proposée sur une région donnée.

Chapitre III

Application

1. Introduction:

Dans ce chapitre nous allons décrire notre application du modèle décrit précédemment sur une région donnée. Tout au long du processus, nous citerons les outils utilisés ainsi que les résultats obtenus.

2. La région de l'étude :

Notre application a été réalisée sur une région de l'état de l'Indiana des Etats-Unis d'Amérique, plus précisément, le comté d'Orangee s'étend de -86.308 est à -86.683 ouest. Et de 38.689 nord à 38.394 sud suivant la projection NAD83 / UTM zone 16N.



Figure 9:L'état d'Indiana des états unis d'Amérique

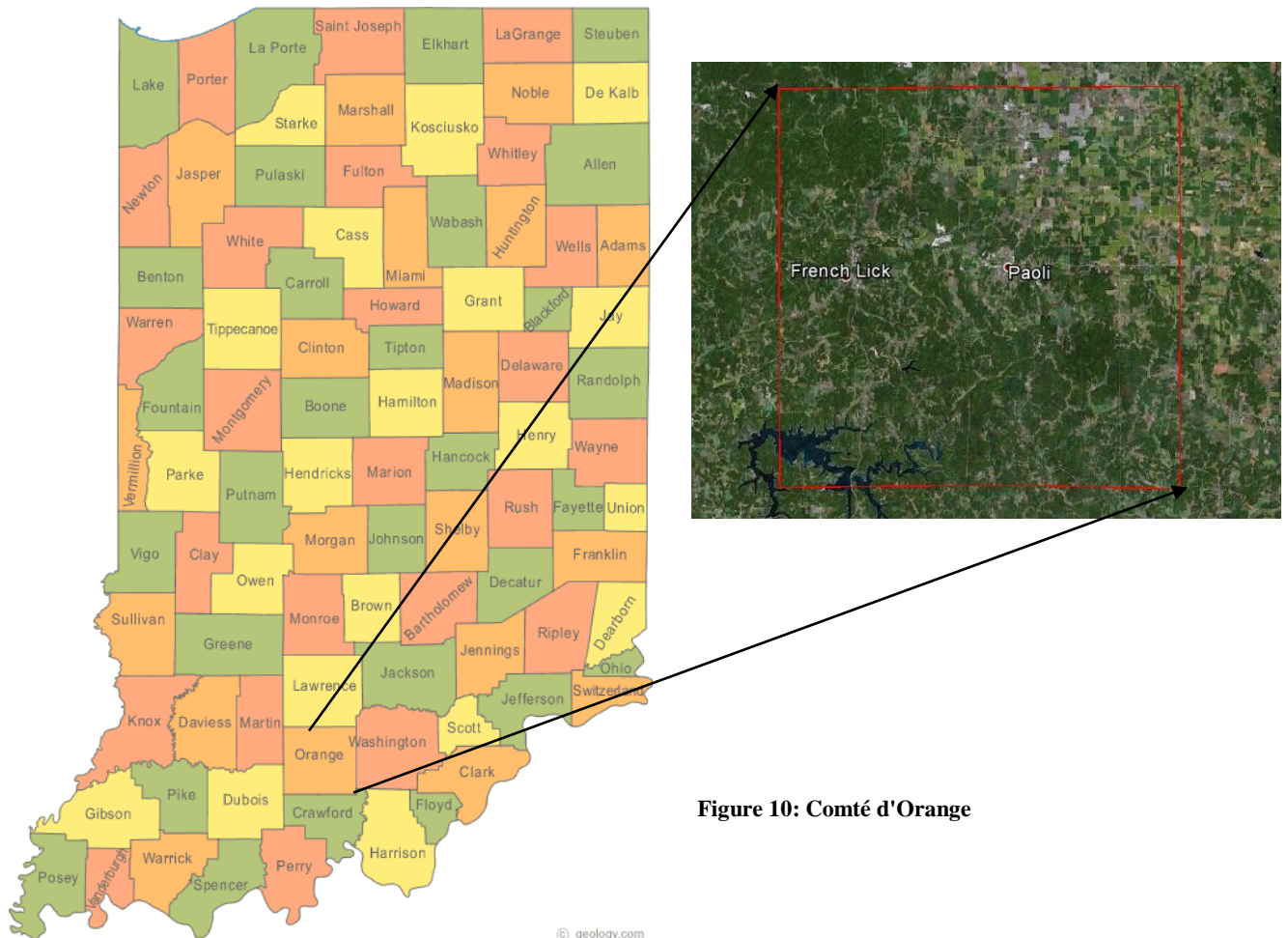


Figure 10: Comté d'Orange

3. Donnée et SIG utilisé

3.1. Source de données :

Les données utilisées sont celles de « Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Orange County, Indiana », publiées par « U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service » le 19/03/2012 .

3.2. SIG:

L'outil SIG utilisé est ArcGIS 10 est un système d'information géographique d'ESRI (Institut de recherche sur l'environnement du système). Il existe trois niveaux de

licence offerts pour ArcGIS, chacun avec des capacités croissantes: ArcView, ArcEditor et ArcInfo, ArcMap.

Les autres composants d'ArcGIS sont ArcCatalog, ArcScene et ArcGlobe.

Est une suite intégrée d'applications SIG professionnelles. La plupart des utilisateurs la connaissent sous la forme de trois produits : ArcView, ArcEditor et ArcInfo.

Elle inclut les applications ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox et ModelBuilder.

[VOLKER MELL, 2011]

3.2.1. ArcMap :

Ce composant vous permet d'afficher, d'analyser et de modifier des données spatiales et des tables de données. C'est le plus souvent utilisé pour faire des cartes. ArcMap est l'élément principale que nous allons travailler avec ArcToolbox et ModelBuilder sont accessibles par des fenêtres que l'on peut ouvrir depuis ArcMap.

3.2.2. ArcToolbox :

Regroupe un ensemble d'outils de conversion de données, de gestion des projections, de géotraitement, etc.

3.2.3. Arcscene :

Il permet de créer des séquences 3D issues de la navigation et de l'exploration interactive de vos données. Vous pourrez aussi draper sur des reliefs ou des surfaces toutes sortes de documents (raster et vecteur) et extruder des géométries vecteur afin de créer des lignes, des murs et des volumes. Vous pourrez également exploiter ArcGIS 3D Analyst pour créer et analyser des surfaces[WWW.ESRIFRANCE.FR].

4. Les traitements avec ArcMap :

4.1. Ajout les données sur ArcMap

Les données disponibles sont sous format compatible ArcGIS, donc pas besoin d'importation. Il suffit juste de les ajouter. On ajoute d'abord les modèles d'élévation.

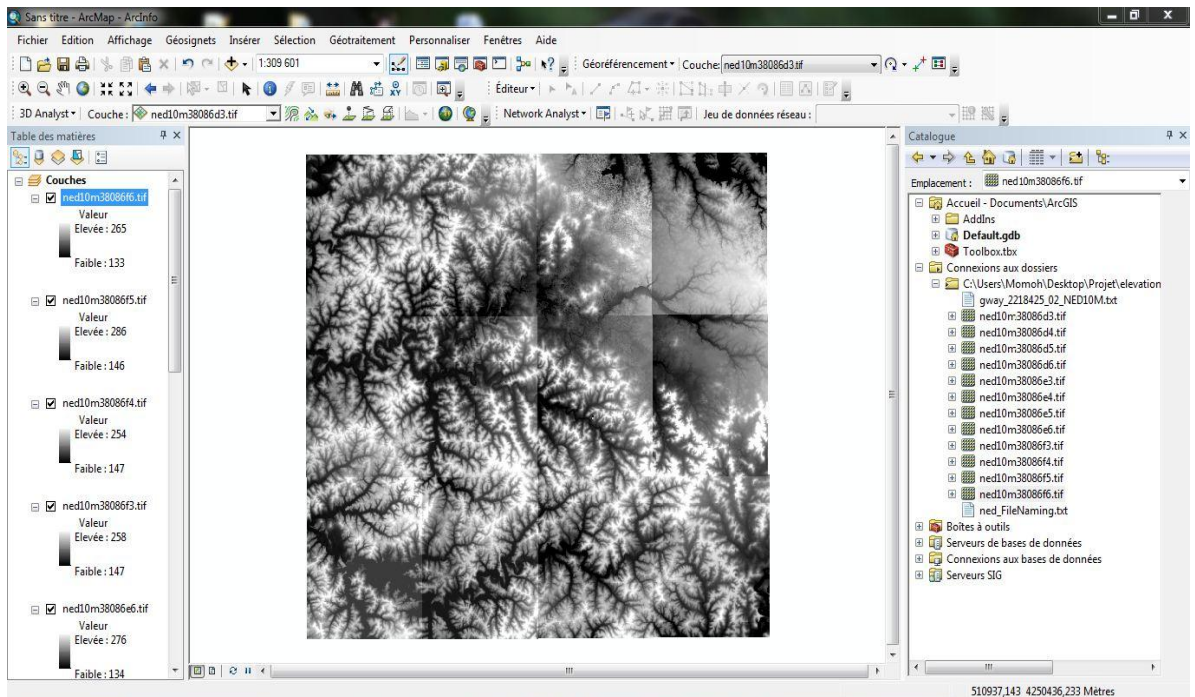


Figure 11: Ajout des élévations

Ensuite, on ajoute le nuage de points qui contient les données de tous les horizons comme épaisseur, profondeur, matière organique de chaque horizon.

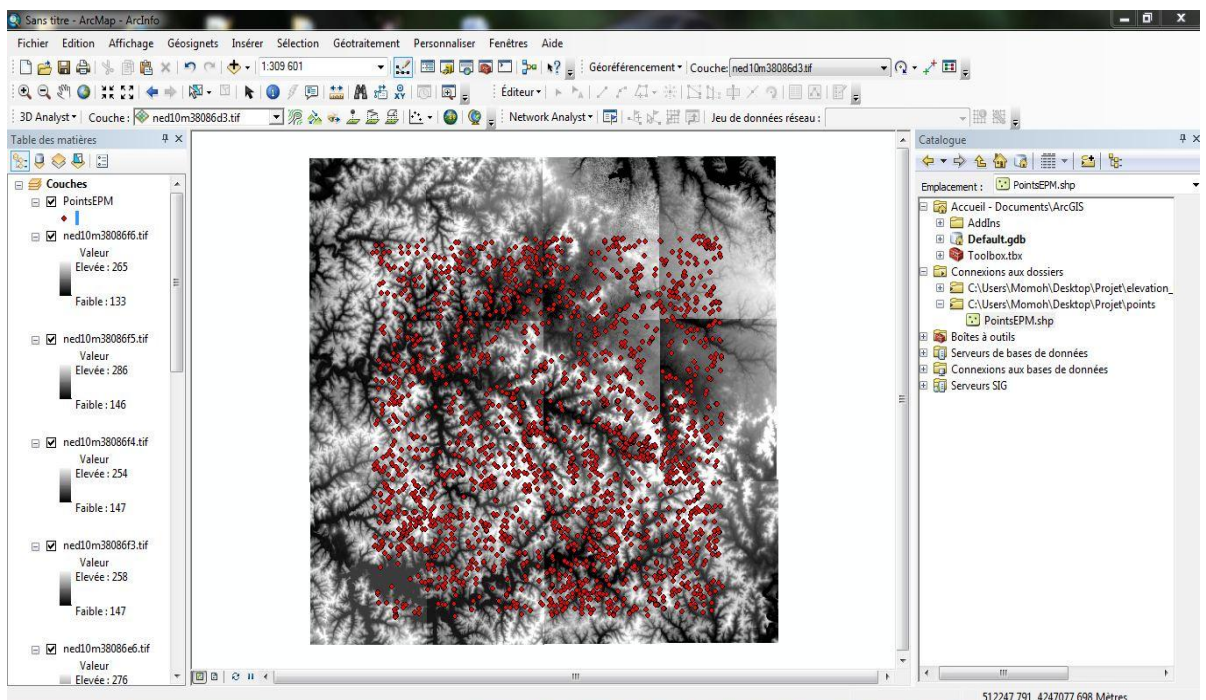


Figure 12: Ajout du nuage de point

Quand on ouvre la table de ces points on trouve les données précédentes

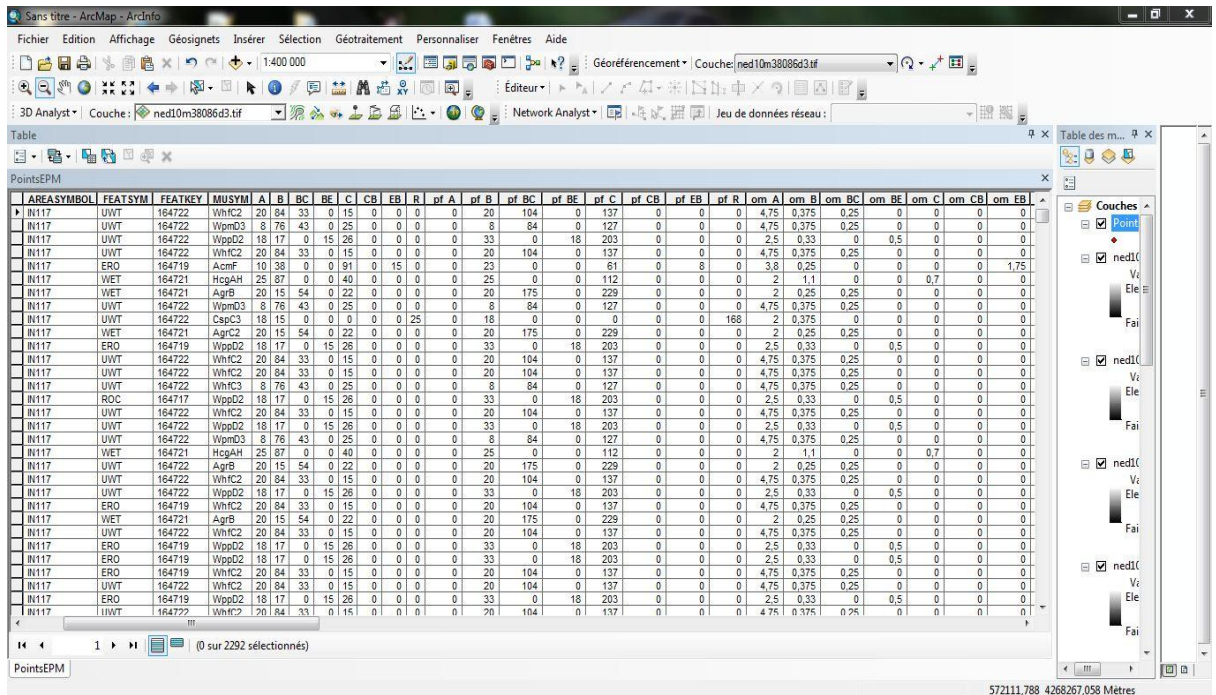


Figure 13: Données attributaires correspondantes

4.2. Extractions des élévations :

Cette étape permet d'extraire les élévations de chaque point. On utilise ArcToolbox puis Spatial Analyst Tools.tbx et on exécute l'opération : extraction de valeurs multiples vers des points. Ce processus traite des données raster et vecteur.

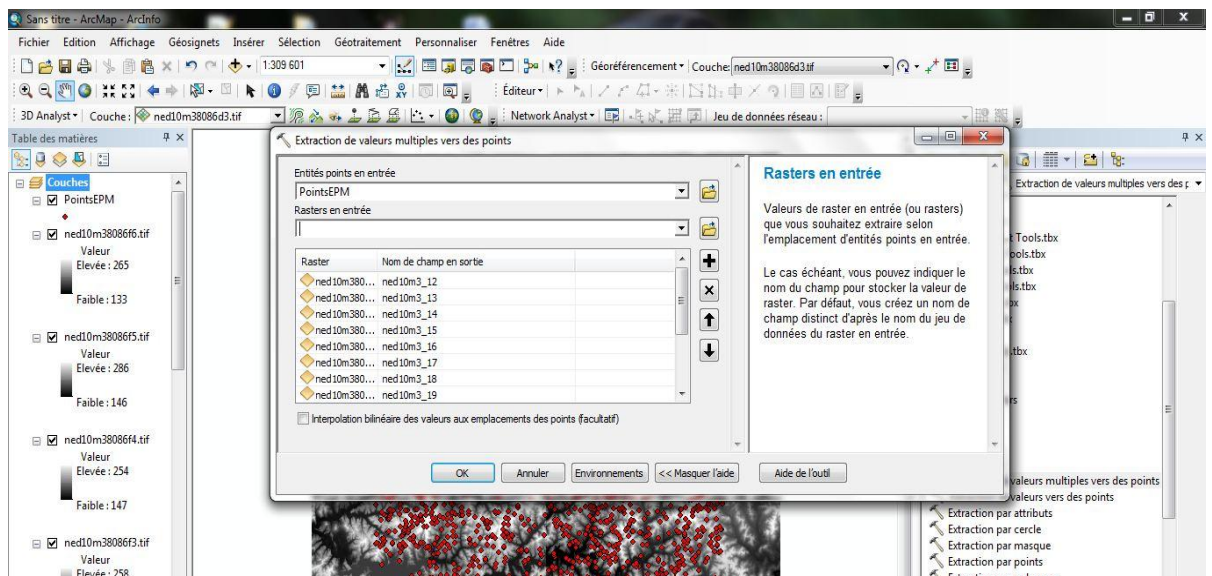


Figure 14: Extraction des élévations

Les résultats cette techniques sont des élévations de chaque point correspondantes à chaque image raster

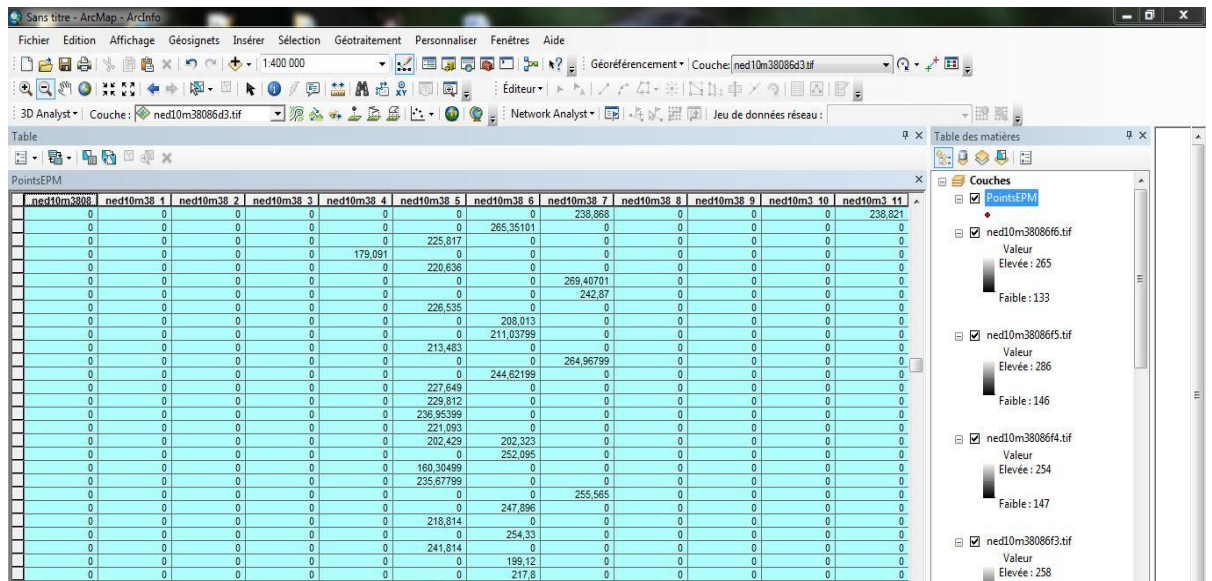


Figure 15: Les élévations extraites

Dernière étape de cette technique est la collections des élévation de tous les points dans une seule case « Elev »

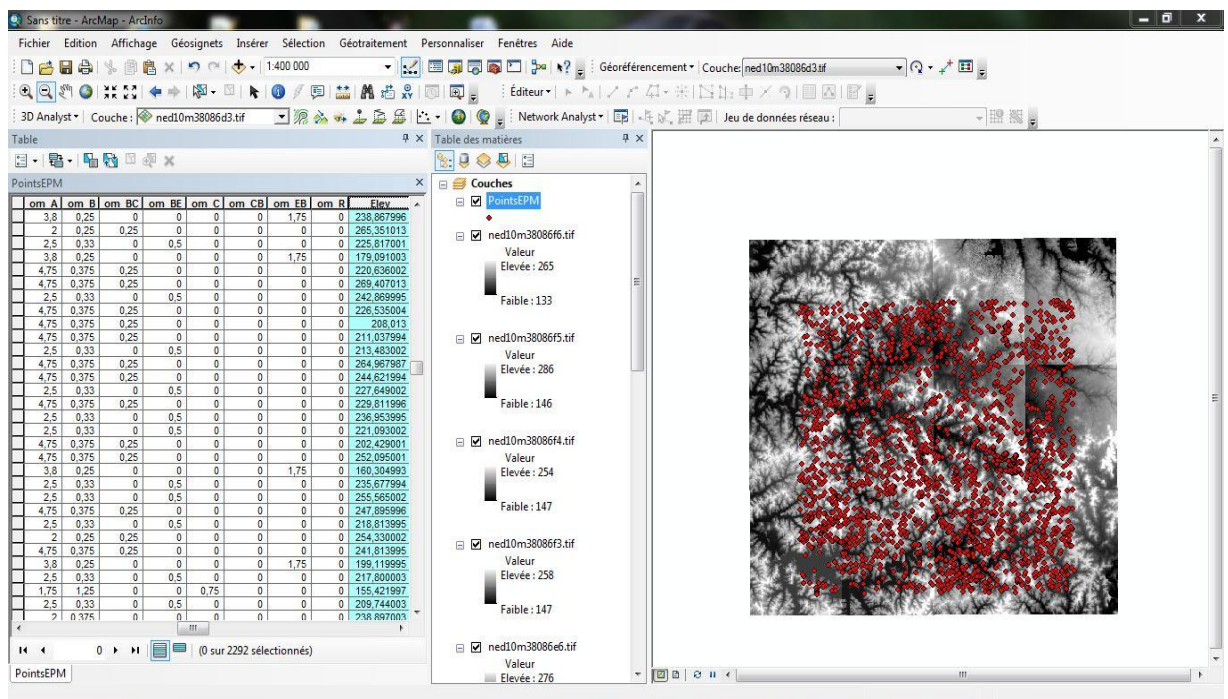


Figure 16: La colonne Elev

4.3. Calcul des élévations de chaque horizon :

A partir des résultats précédents on calcule les élévations de chaque horizon, on crée un nouveau champ appelé par exemple, dont les valeurs sont calculées à partir de l'expression : « Elev_A=Elev ». Pour les autres élévations on utilise une expression du type : « Elev_B - 5* B ». Ces calculs sont effectués avec la calculatrice de valeur de champs

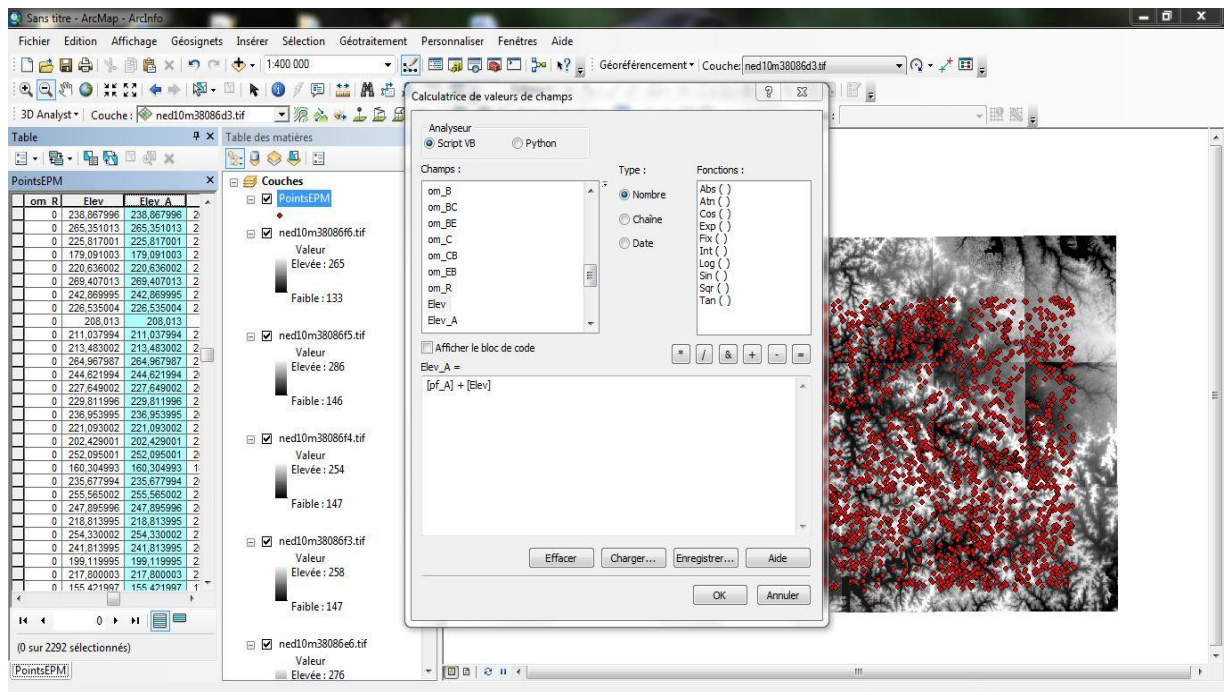


Figure 17: Calcul des valeurs d'élévations

Les résultats de ces calculs ressemblent à :

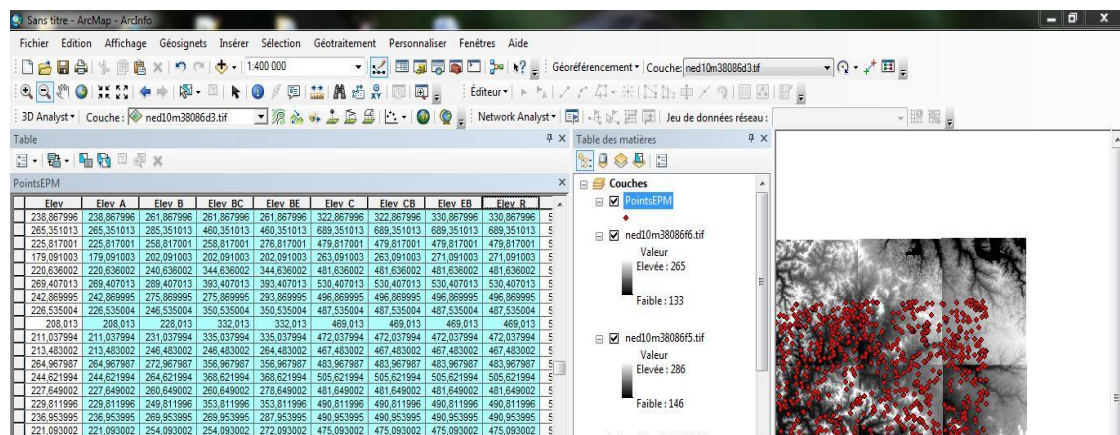


Figure 18: Elévations calculées

Il est aussi possible de calculer l'épaisseur totale des horizons comme suit :

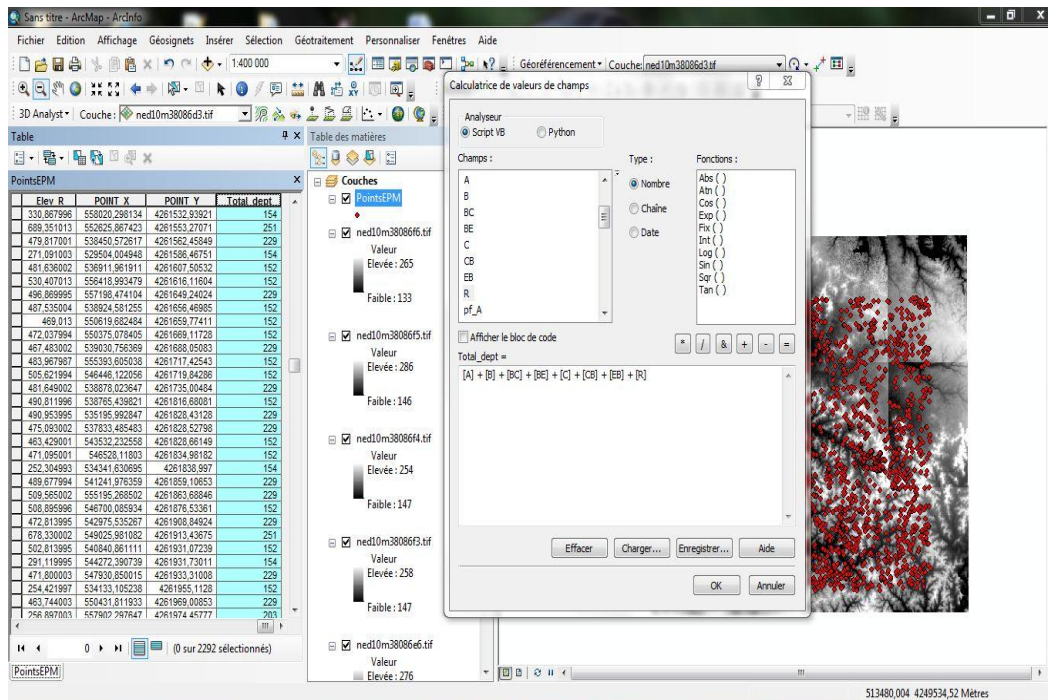


Figure 19: Calcul de l'épaisseur totale des horizons

4.4. Création les TINs des horizons :

Les données nécessaires étant maintenant disponible, on ouvre ArcToolbox ->Outils 3D Analyst puis gestion de TIN et on crée un TIN de chaque horizon

- On crée les TINs de chaque horizon par rapport à l'épaisseur :

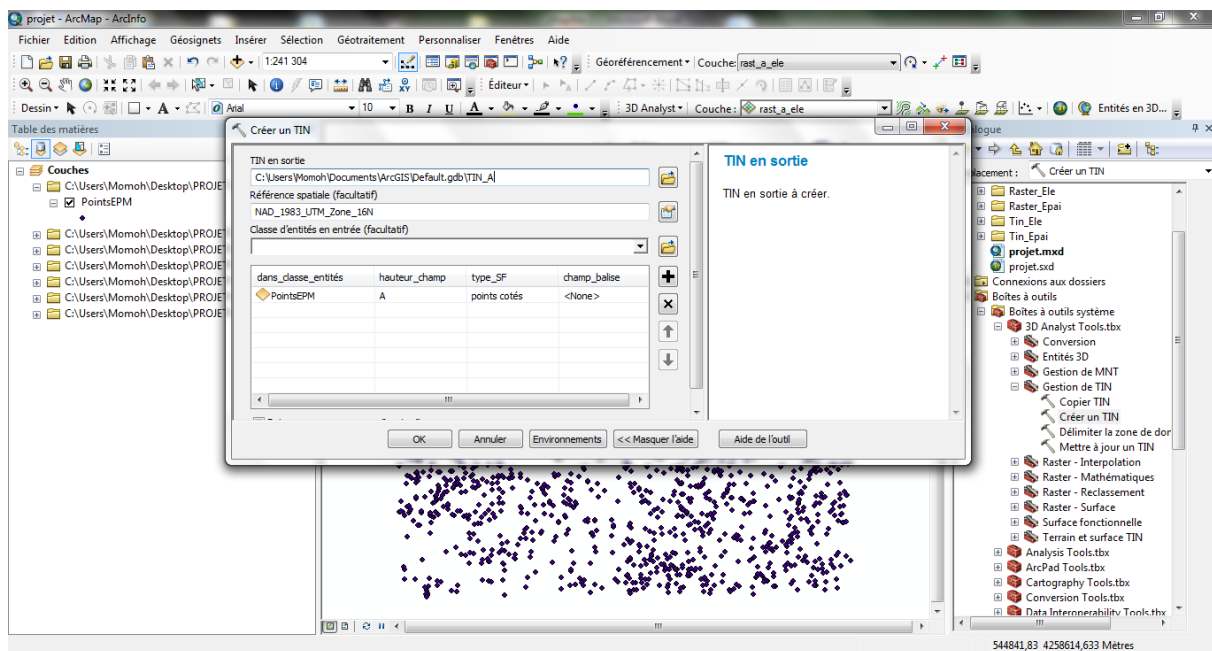


Figure 20: Création des TIN épaisseur

- On crée les TINs de chaque horizon par rapport à l'élévation de chaque horizon :

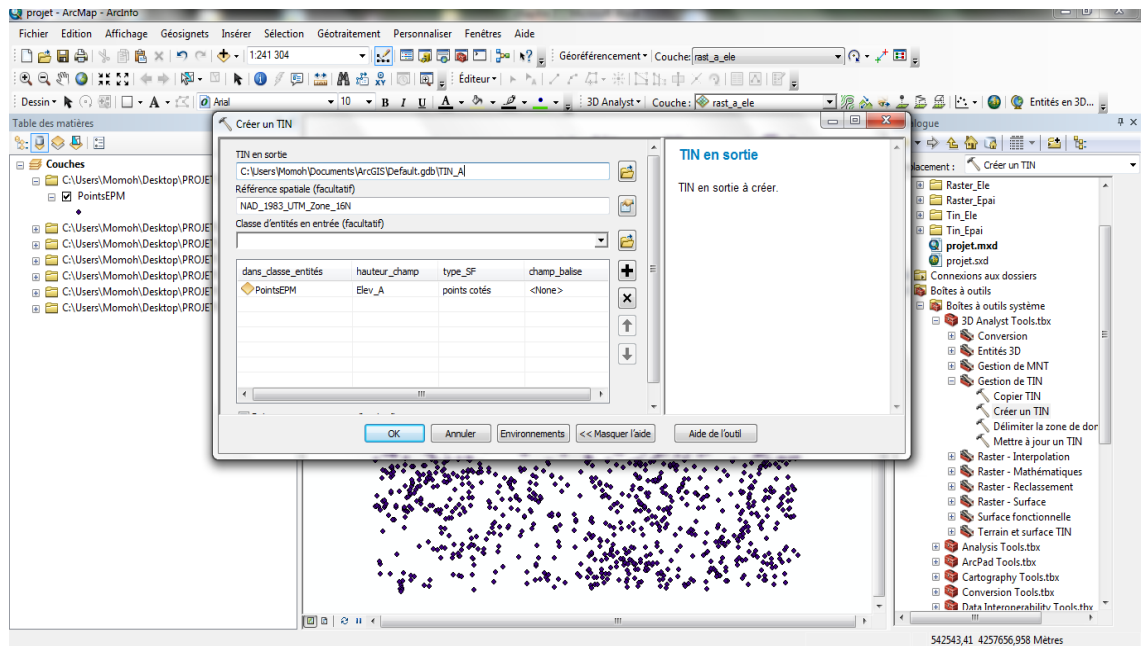


Figure 21: Création des TIN élévation

➤ Le résultat est comme suit :

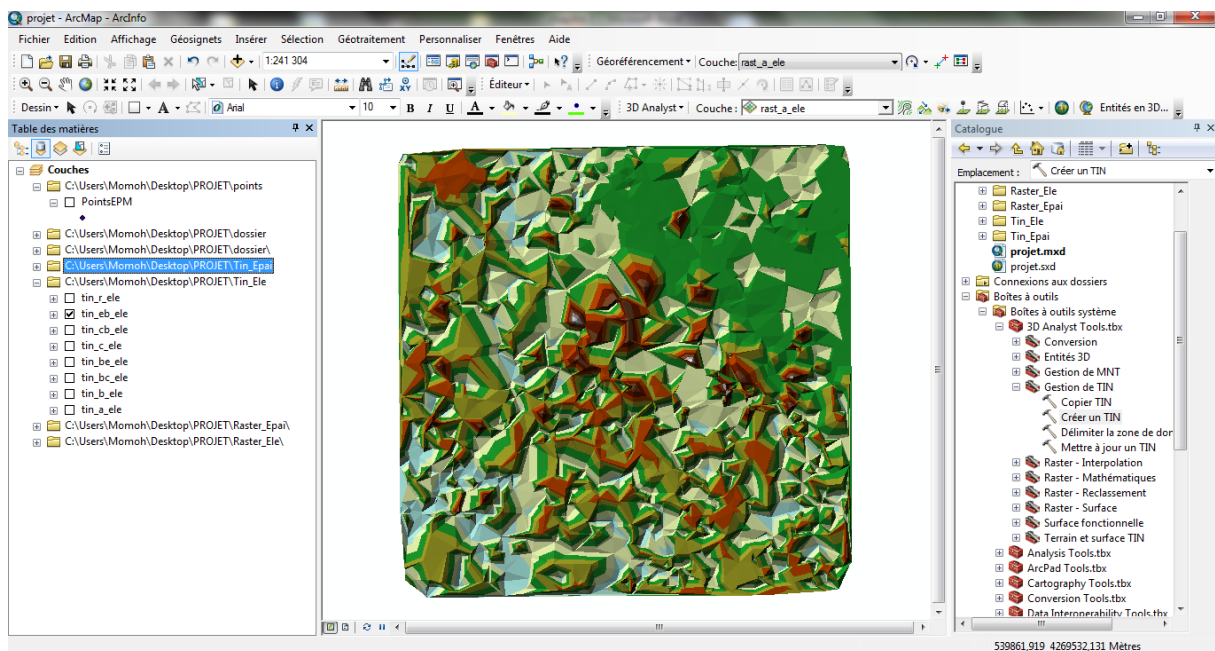


Figure 22: Aperçu d'un des TIN créés

4.5. Conversion TIN vers Raster :

On converti tous les TINs qu'on a créé en des rasters avec toujours ArcToolbox, Outils 3D Analyst, conversions, depuis un TIN et TIN vers Raster

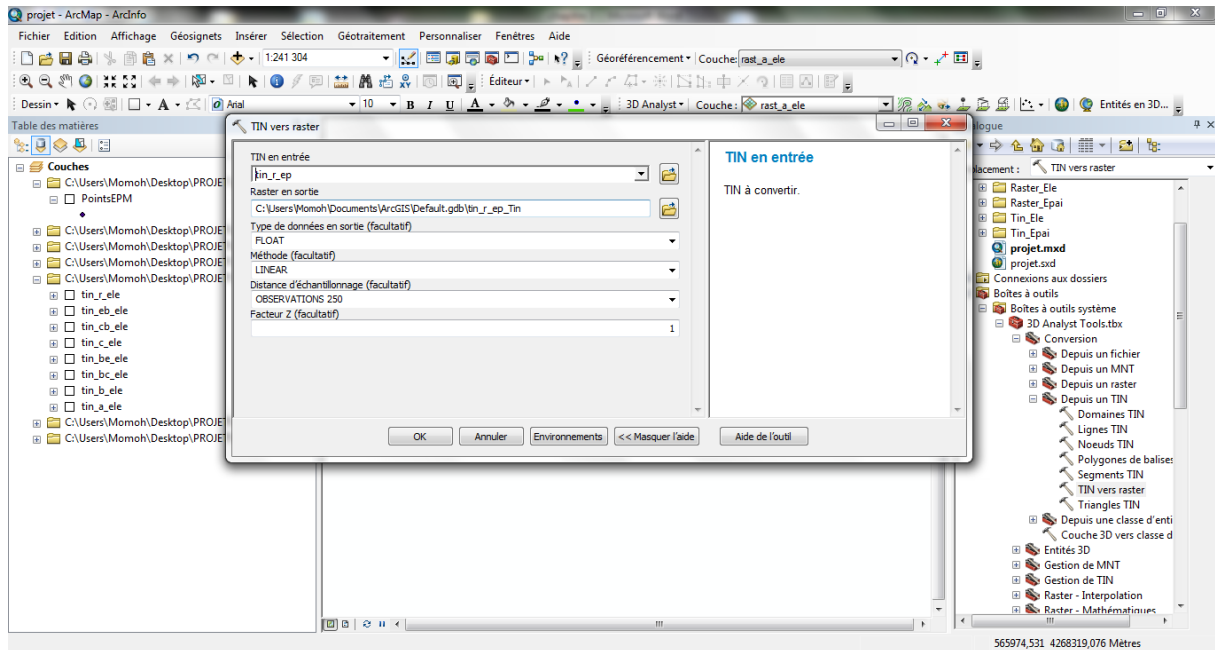


Figure 23: Conversion des TIN en raster

Les résultats ressemblent à ceci :

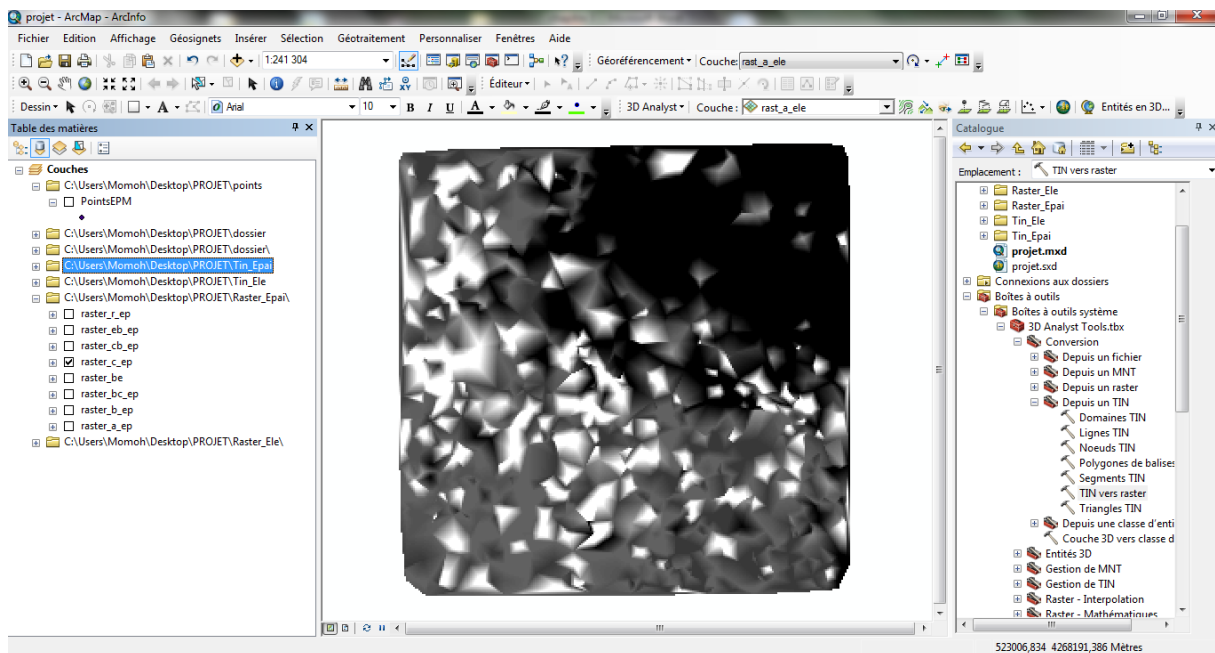


Figure 24: Rasters créés

5. Traitements avec ArcScene :

5.1. Importer les Rasters dans ArcScene :

Pour réaliser une visualisation 3D de nos horizons, on importe tous les rasters des horizons créés précédemment dans ArcScene. Tout en changeant la symbologie pour avoir une couleur pour chaque couche.

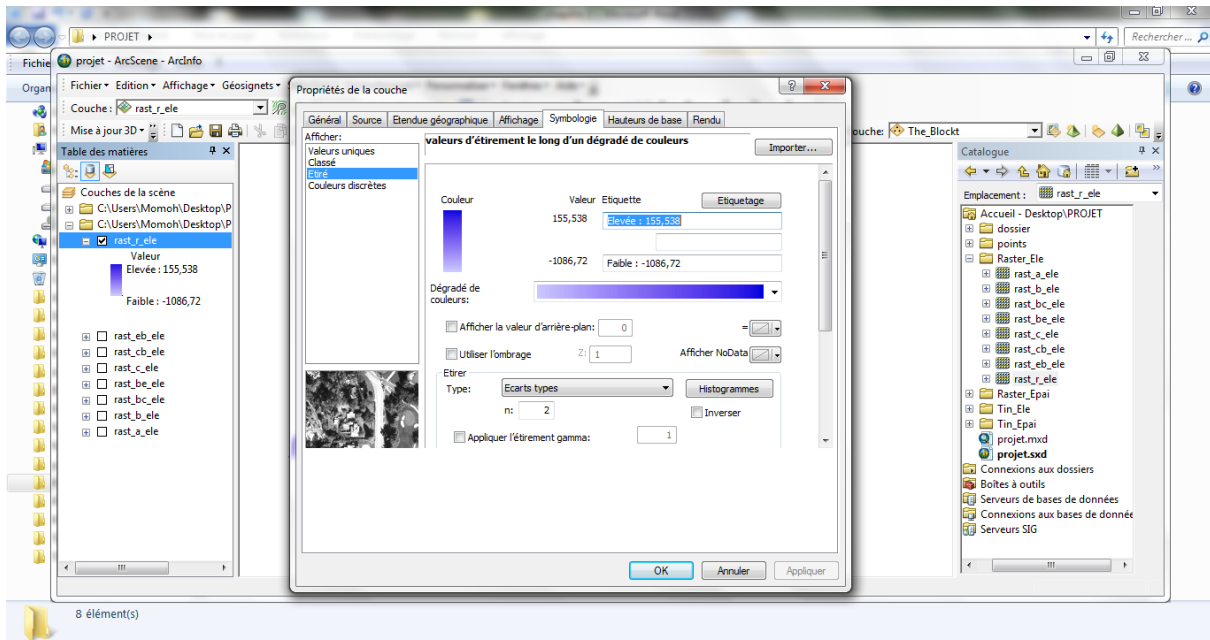


Figure 25: Détermination de la symbologie

Ensuite, on modifie la hauteur de base de chaque couche épaisseur en utilisant la le raster élévation correspondant qu'on a déjà calculé.

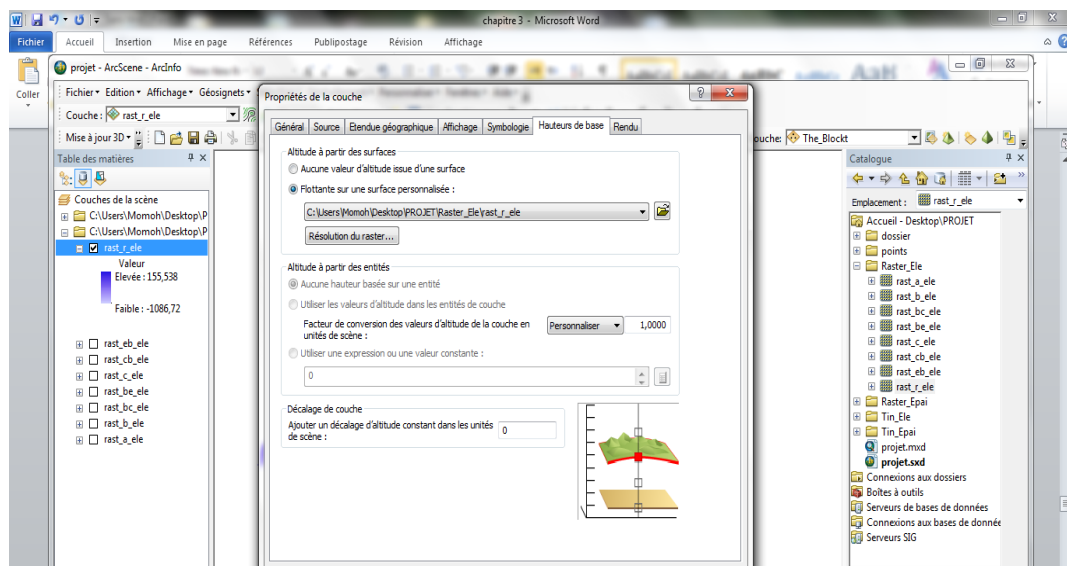


Figure 26: Détermination des élévations de base

On peut modifier l'exagération de la hauteur de la scène, par exemple 3 pour avoir des élévations plus au moins visibles :

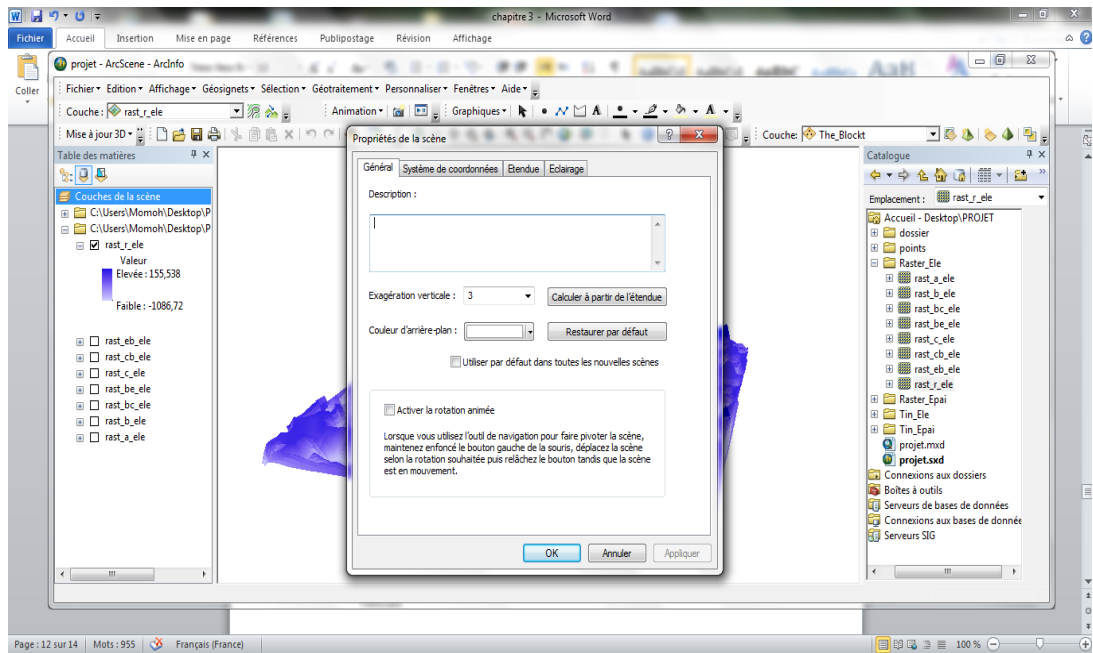


Figure 27: Exagération de la valeur verticale

Une des couches par exemple, va ressembler à ceci :

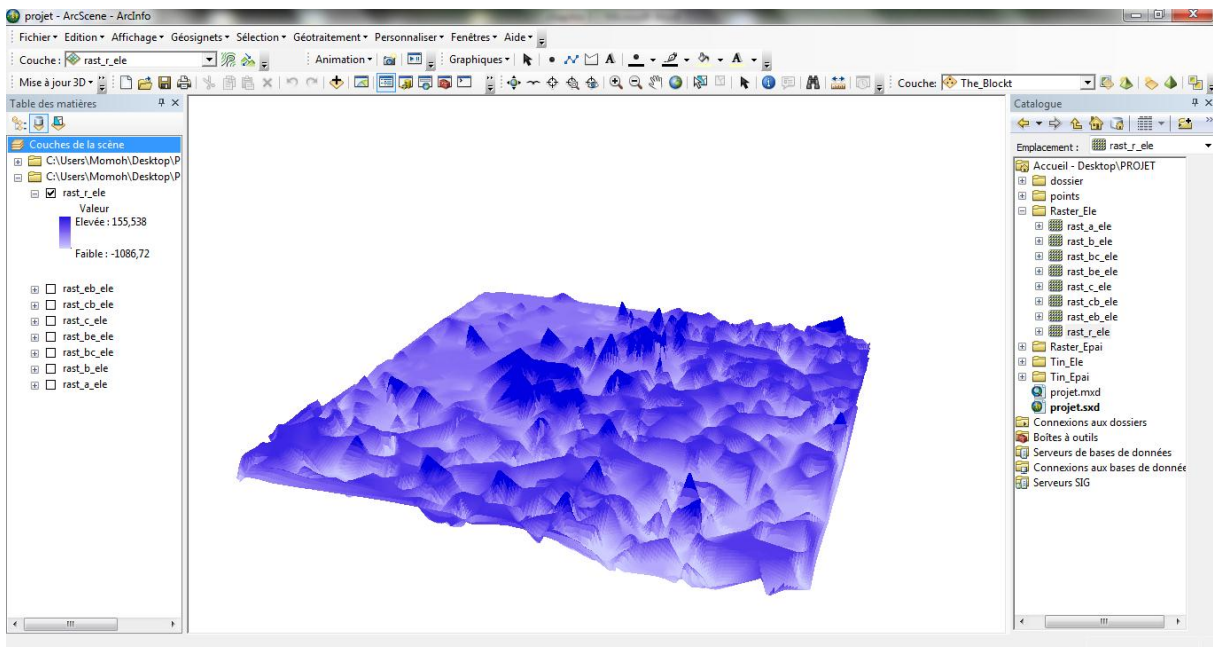


Figure 28: Une des couches épaisseur résultantes

5.2. Création de block :

On dessine un rectangle ou polygone dans ArcMap, avec l’outil dessin. Si on veut créer une vue en profil on dessine une ligne.

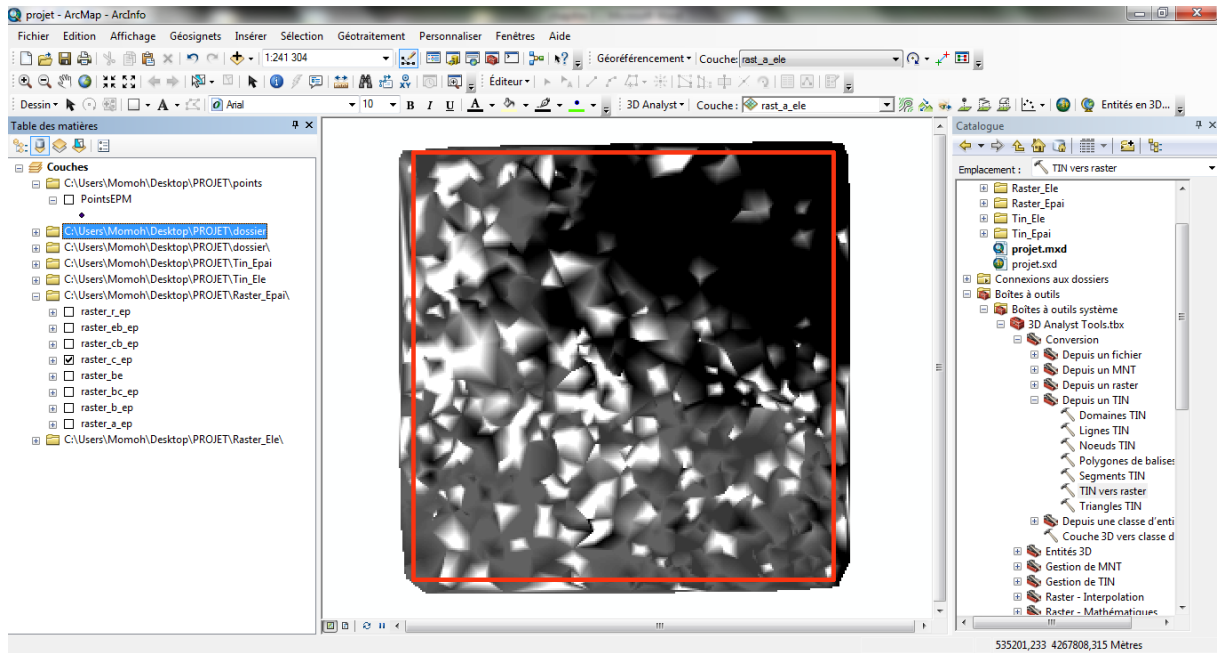


Figure 29: Block dessiné avec ArcMap

Après ça on fait quelques opérations :

- 1- Dans la boîte d’outils puis data management Tools en suite entités on fait entités vers points :

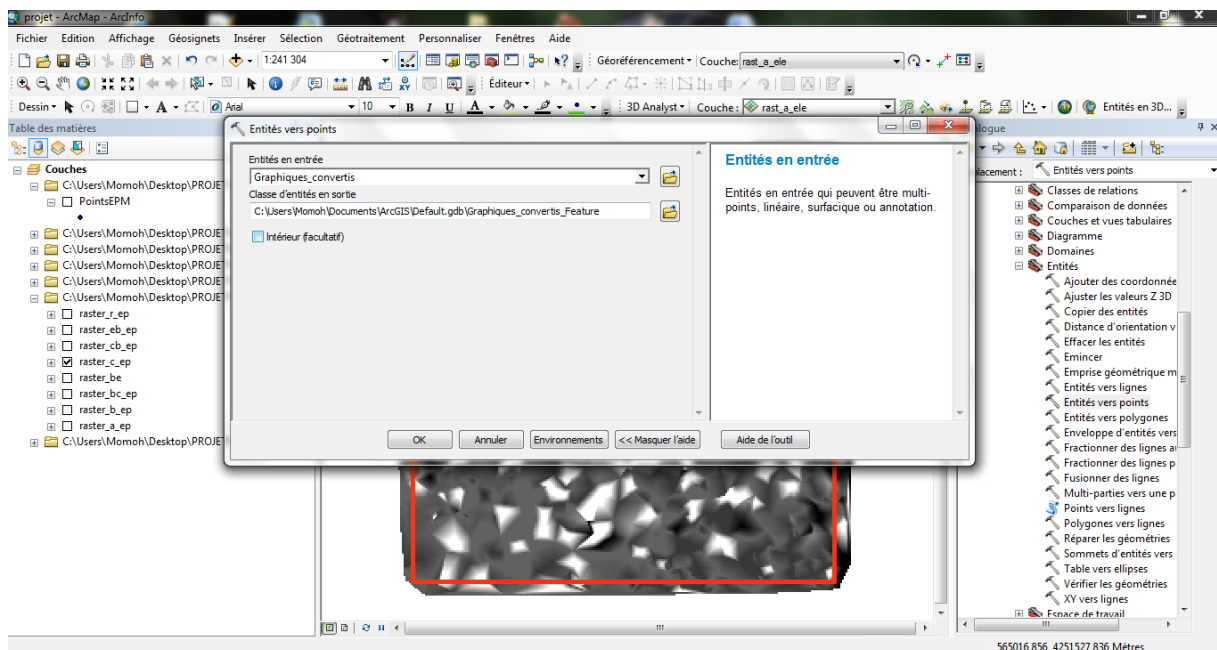


Figure 30: Conversion du polygone en points

2- Toujours dans le chemin précédent mais cette fois on fait polygone vers ligne

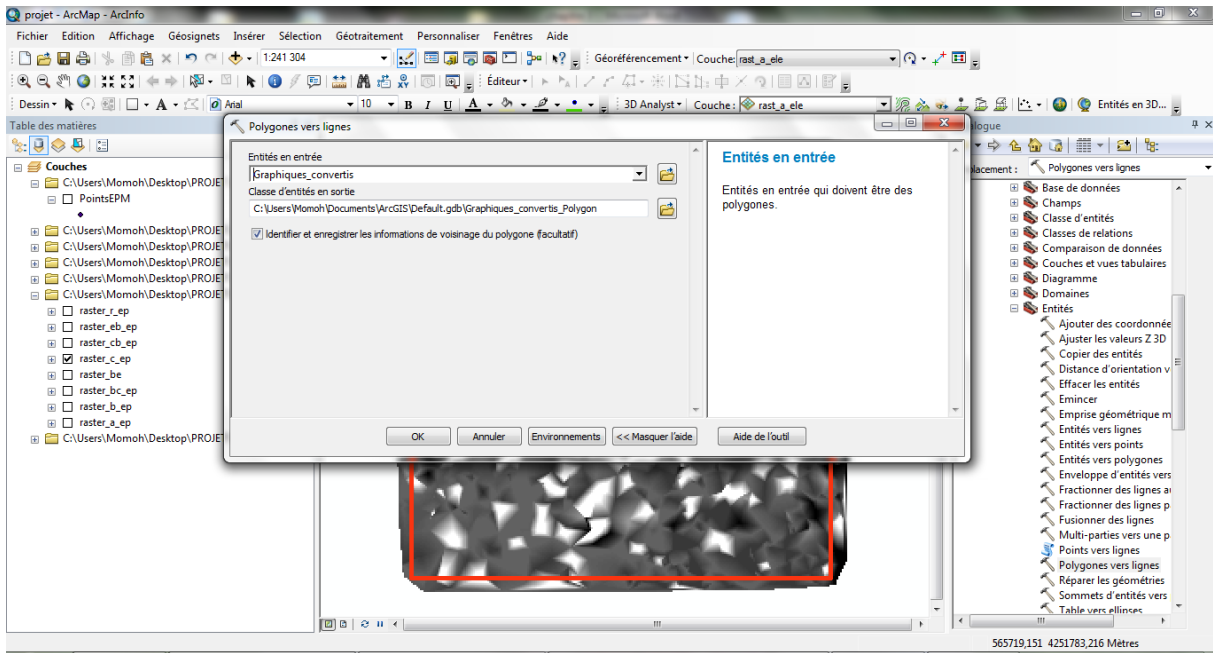


Figure 31: Conversion en ligne

Le résultat est comme suit :

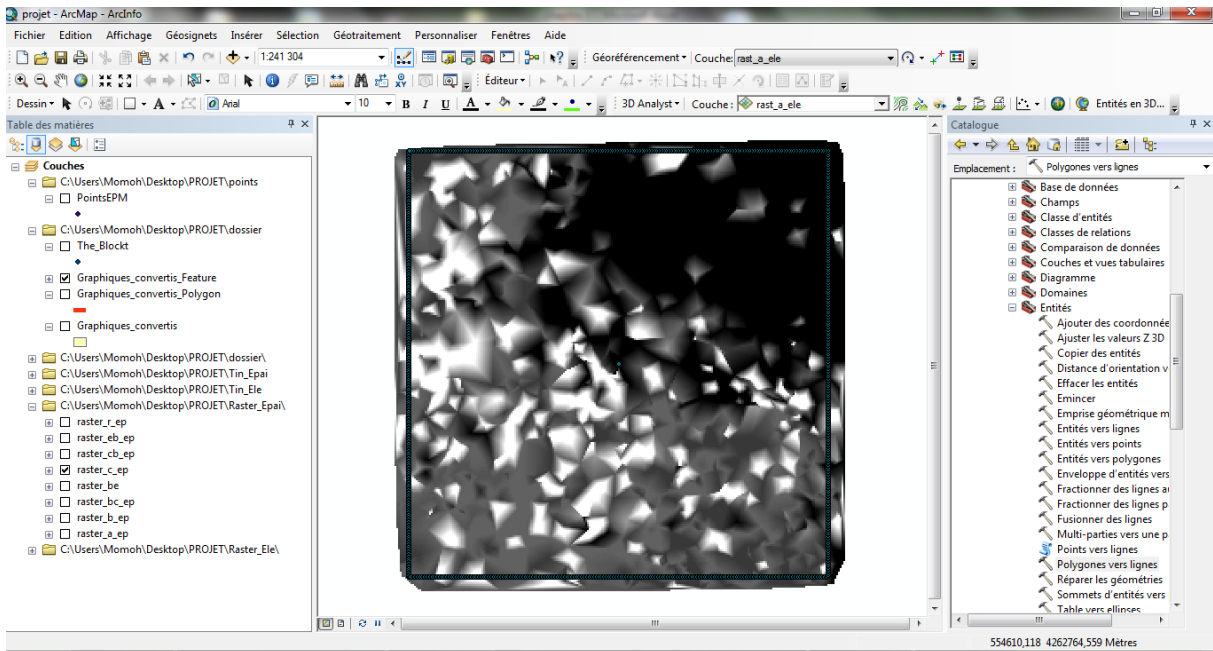


Figure 32: La zone du block délimitée

L'étape suivante est la conversion des entités en 3D de toutes les couches :

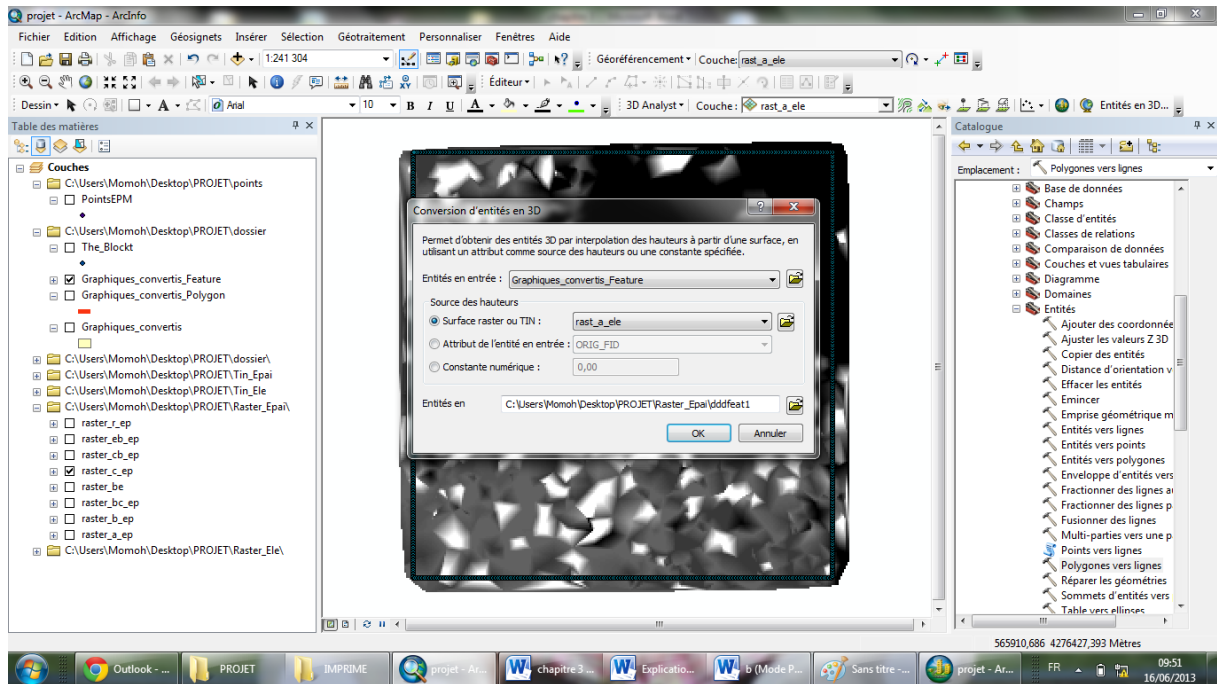


Figure 33: Conversion des entités en 3D

On ajoute la valeur de Z pour chaque entité créée :

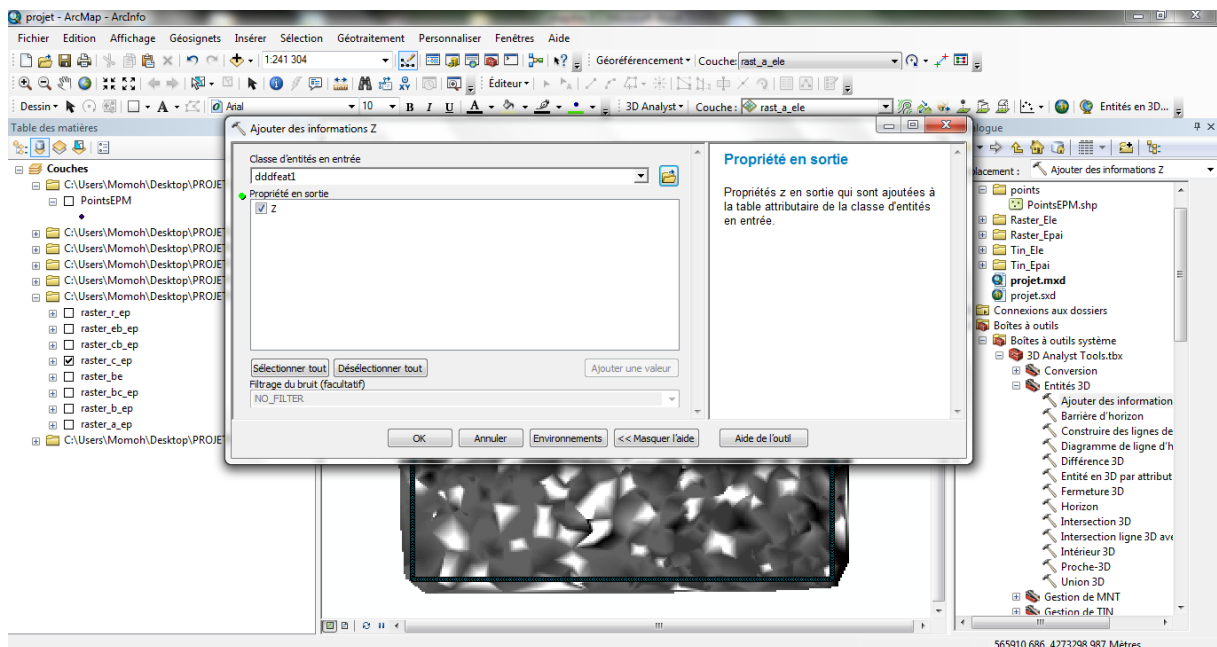


Figure 34: Ajout de l'élévation Z

Et on change l'alias de Z pour chaque horizon :

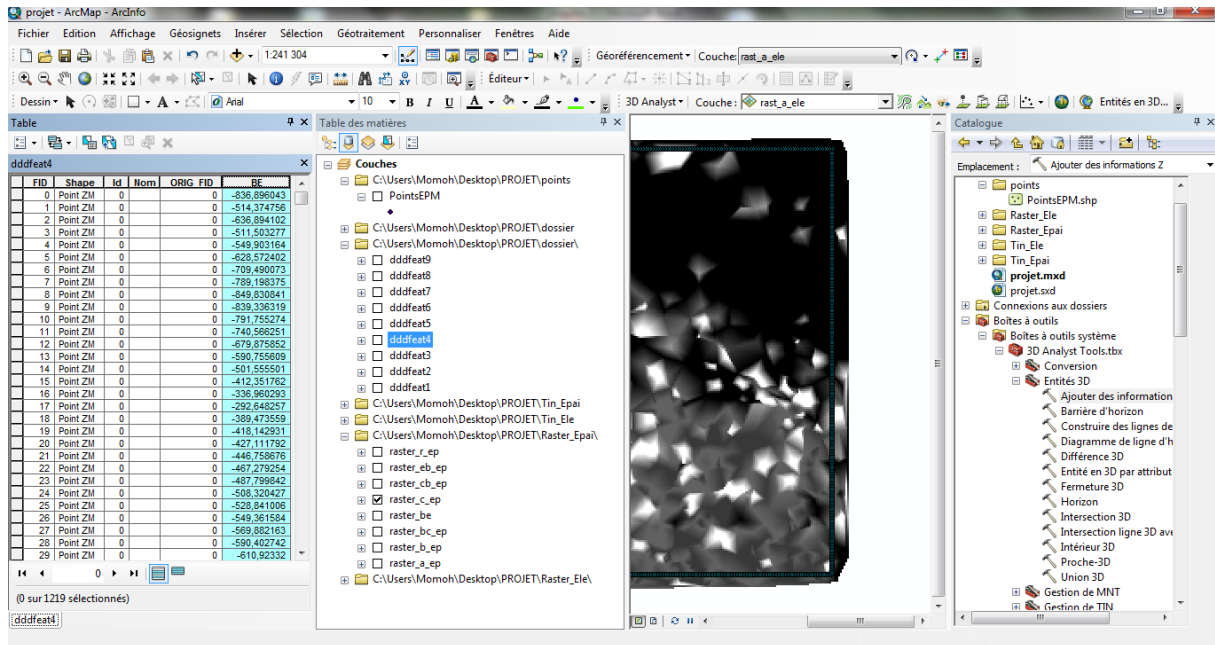


Figure 35: La valeur de Z ajoutée.

Après ça on fait la jointure avec toutes les tables précédentes :

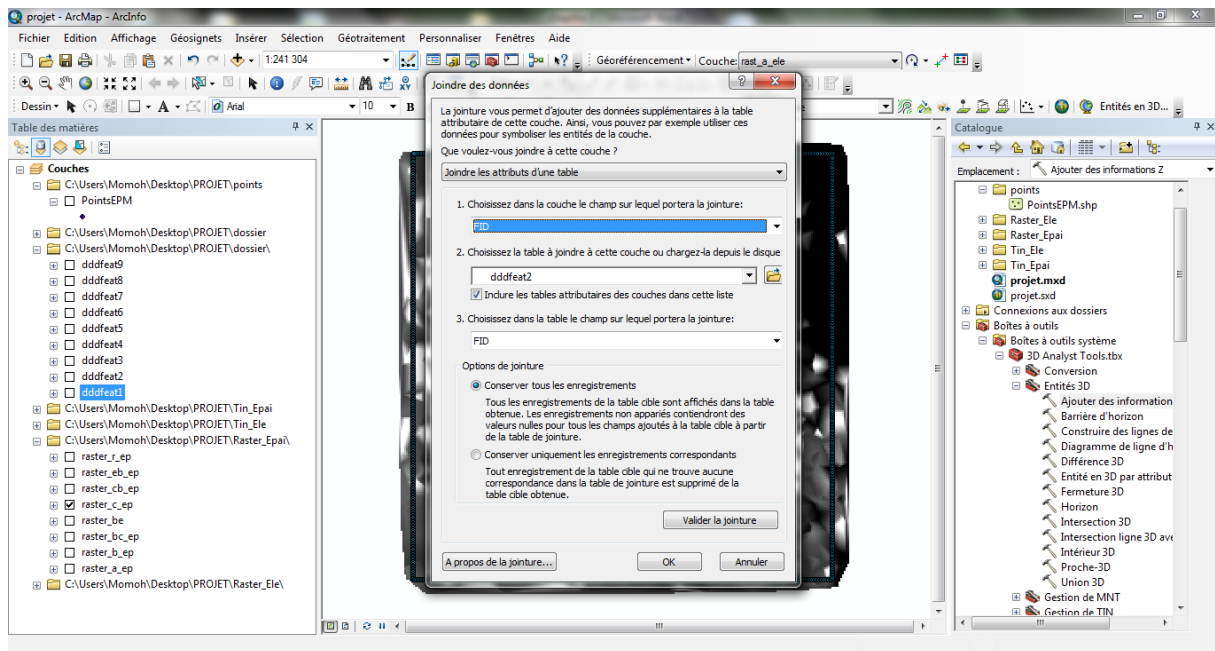


Figure 36: Jointure

On fait les jointures avec toutes les tables créées, on obtient le résultat suivant:

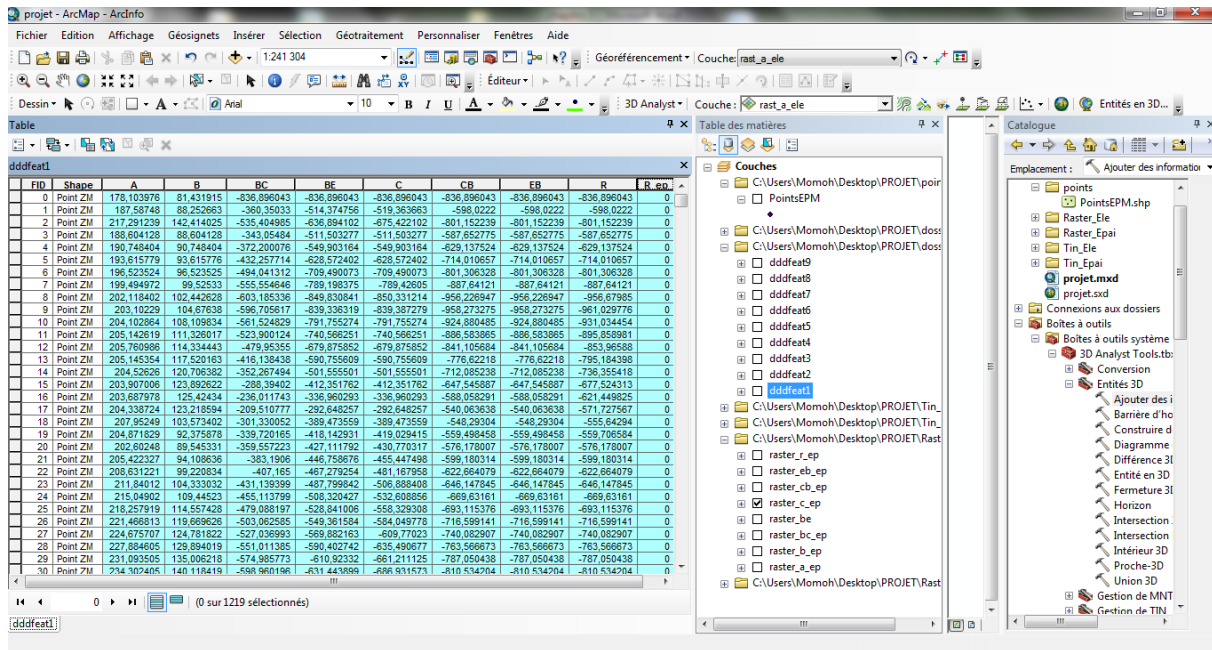


Figure 37: Résultat des jointures

L'opération suivante concerne l'exportation de résultat précédents en une nouvelle couche nommée « The_Block » :

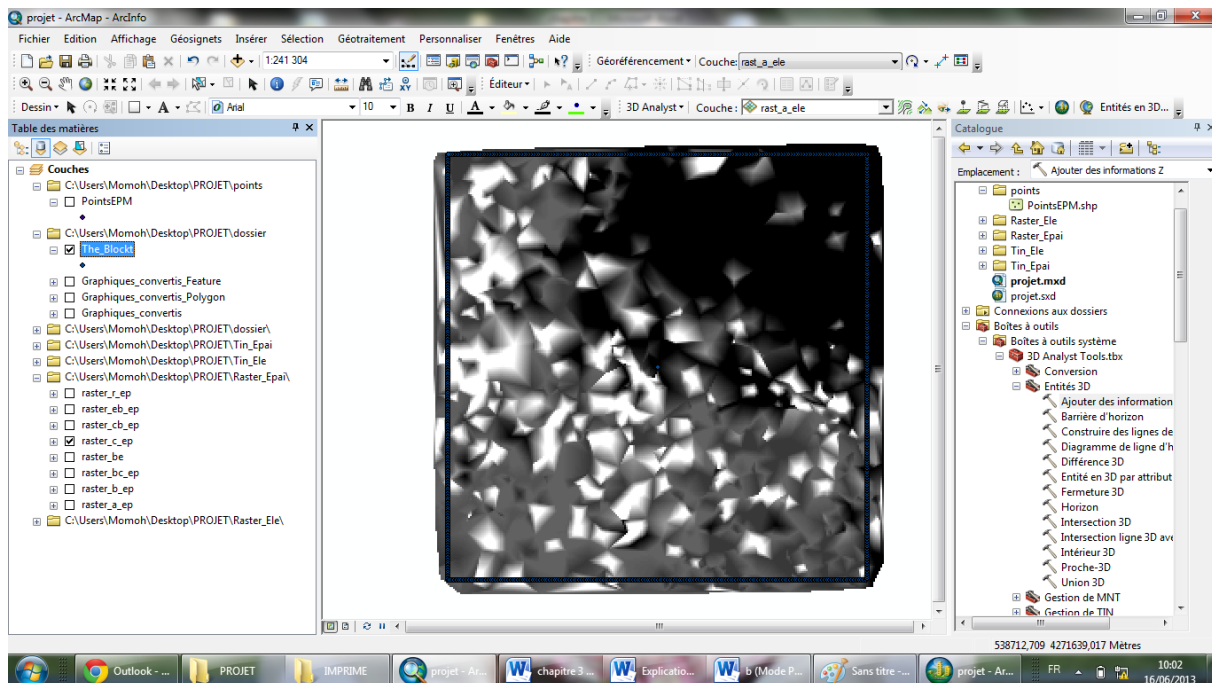


Figure 38: Le block qui sera utilisé dans ArcScene

La dernière étape de la création du block consiste à l'ajouter dans ArcScene et de réaliser ensuite les étapes suivantes :

- On copie le block et on le colle 7 fois car il y a 8 couches :

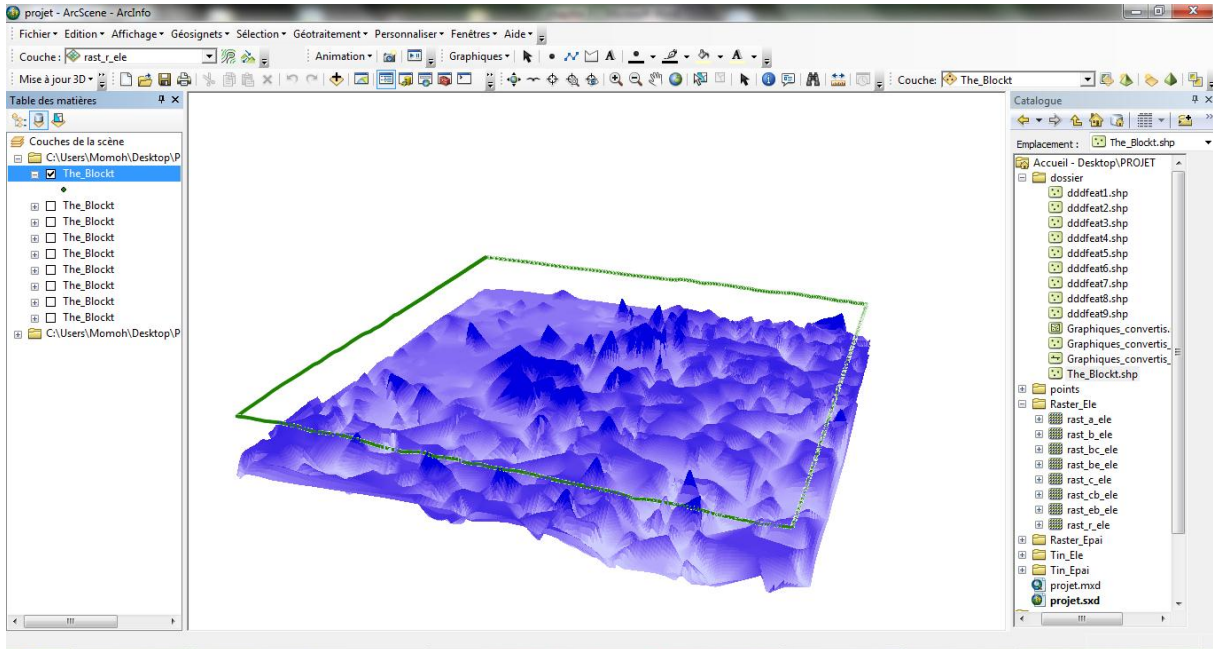


Figure 39: Copie du block

- Après ça on définit les valeurs d'élévation et d'extrusion :
 - Dans hauteurs de base on utilise une expression ou une valeur constante

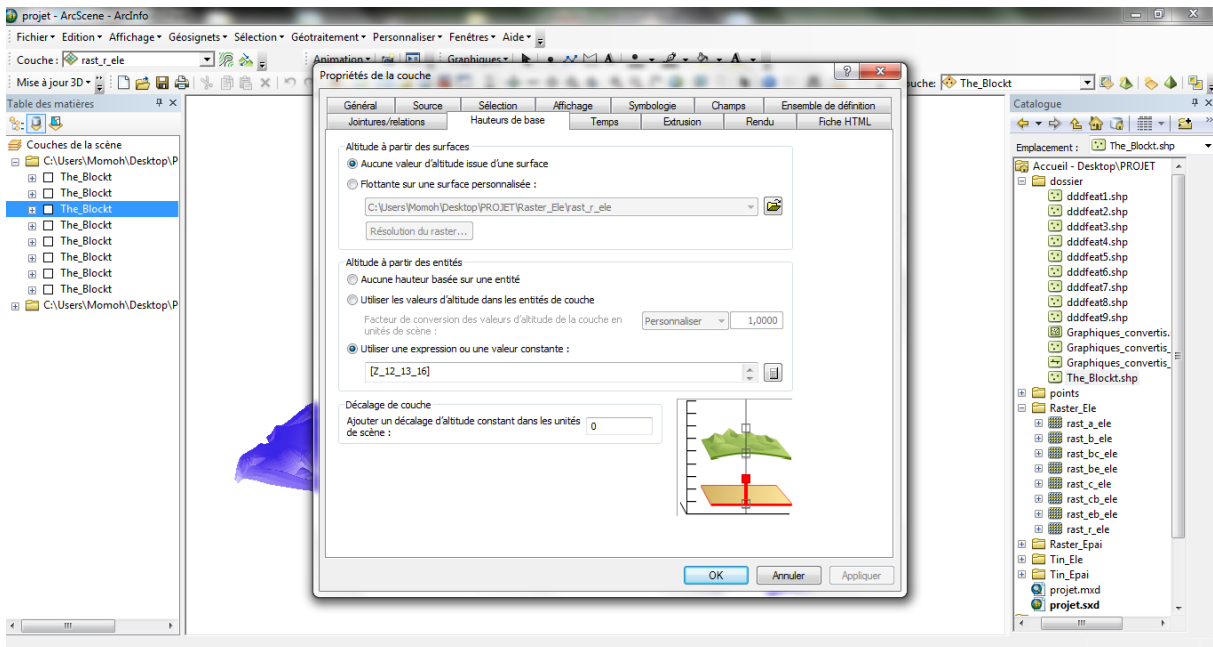


Figure 40: Définition de la hauteur d'un block

- Et dans l'extrusion on met une valeur ou une expression :

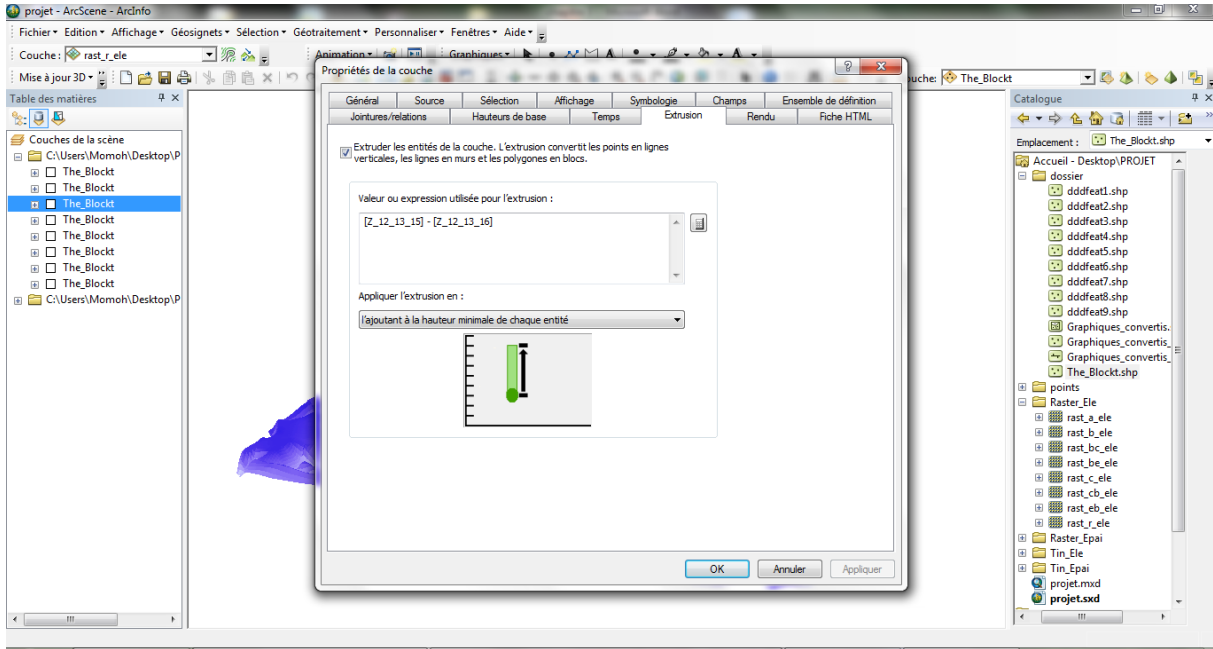


Figure 41: Définition de l'extrusion du block

- On fait ça avec toutes les copies de blocks avec le changement de couleurs correspondant :

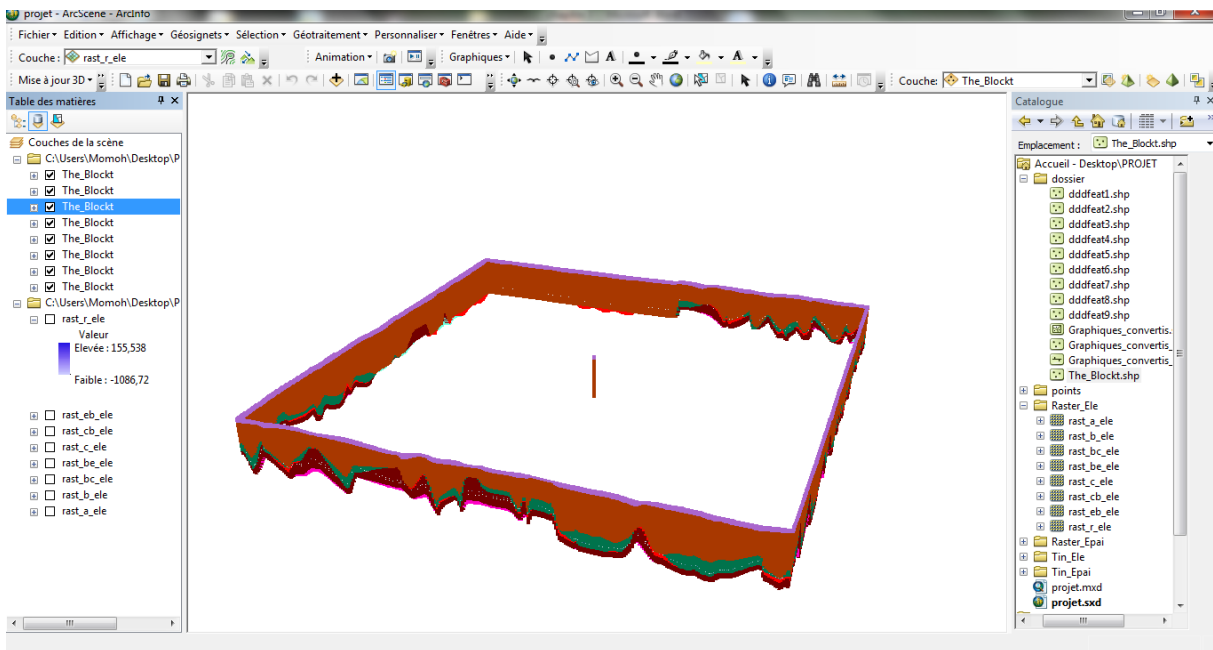


Figure 42: Le block créé

5.3. Visualisation pseudo 3D des horizons :

Finalement, c'est la visualisation et la représentation 3D des horizons du sol. Dans cette étape finale on ajoute tous les horizons avec les blocks et on obtient le résultat suivant :

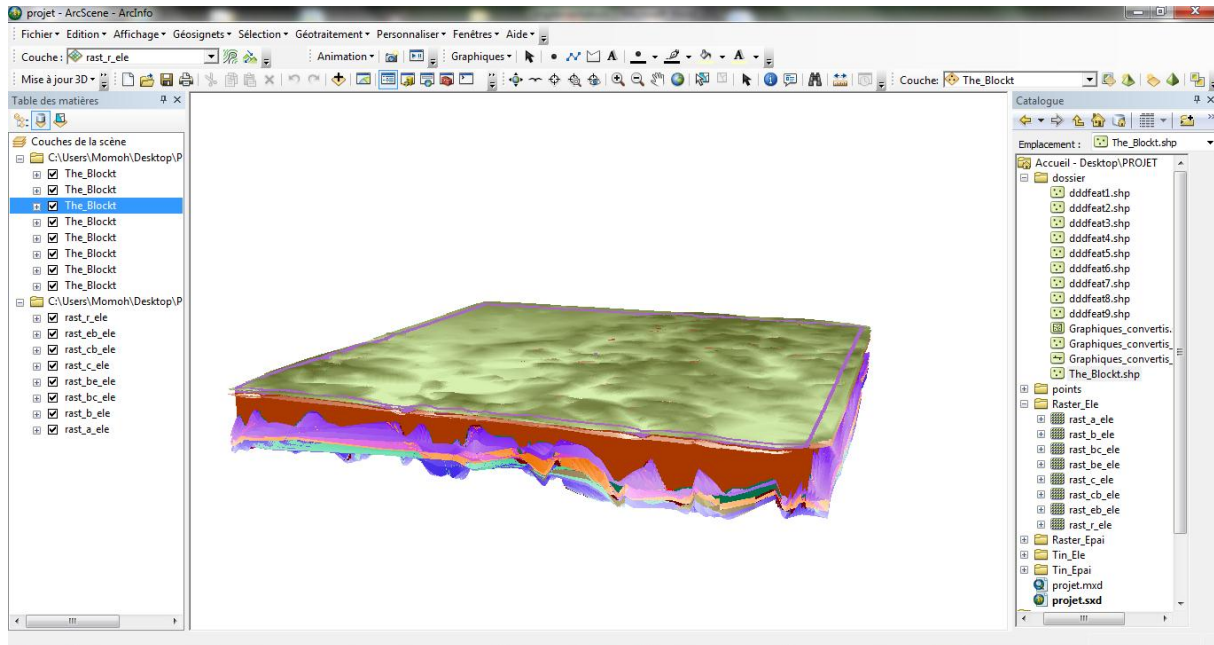


Figure 43: Visualisation pseudo 3D du sol par horizons

6. Création d'un modèle sur ArcToolbox:

Afin d'automatiser le travail, il est possible de créer un modèle et l'ajouter à la boîte d'outils d'ArcToolbox . Ceci permet de concevoir un outil dédié à une tâche particulière.

On importe toutes les fonctions qu'on a utilisées et on crée un dossier pour le stockage. Ensuite, on exécute le modèle et on importe les résultats dans ArcMap ou Arcscène



Figure 44: Création du modèle

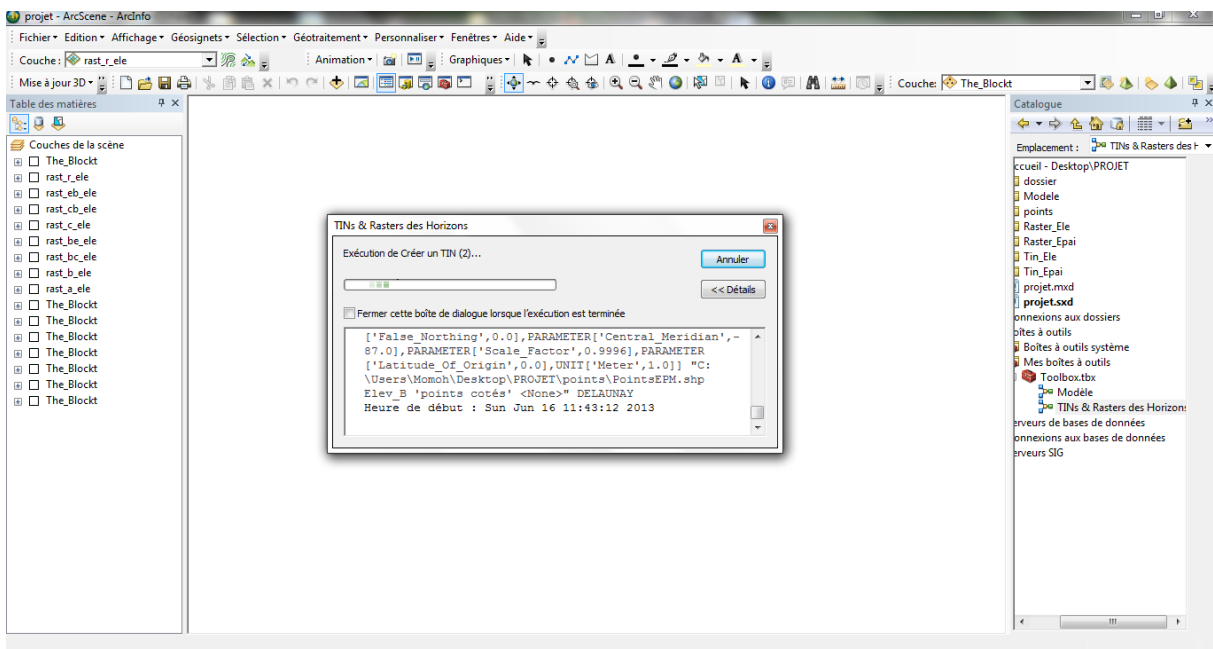


Figure 45: Exécution du modèle

7. Conclusion :

Cette étude est une première tentative de modélisation 3D du sol. En l'absence d'outils d'interpolation 3D pour les données qualitatives du sol, cette approche pseudo-3D représente un compromis efficace, rapide et simple, qui met en évidence les

processus qui ont été manqués par des approches 2D traditionnelles. Les coupes en profil permettront plus tard d'étudier le sol et d'établir les relations existantes entre ses horizons et les phénomènes qui lui sont associés.

Conclusion

La méthode proposée est très intéressante, car en modélisant les horizons, représentants des caractéristiques qualitatives du sol, elle permet de mieux comprendre les phénomènes liés à ce dernier.

Cette représentation a aussi été facilitée par l'utilisation du SIG ArcGIS, en particulier lorsque l'on considère le type et le nombre d'horizons à être mis en correspondance, et les différentes procédures de gestion des données spatiales et d'interpolations. De plus, cette approche cartographique permet le calcul des volumes d'horizons. Ces calculs pourraient être utiles aux explications de plusieurs phénomènes liés au sol.

Cette modélisation démontre aussi l'utilité indéniable des SIG pour la facilitation de la gestion de l'ensemble des données spatiales, la spatialisation, l'analyse, la visualisation et la cartographie d'une manière interactive. Elle démontre aussi l'intérêt de modéliser les données qualitatives.

Cette technique reste à améliorer, cependant elle démontre que la modélisation tridimensionnelle est un outil utile pour comprendre plusieurs phénomènes liés au sol, en plus des approches classiques en 2D.

Pour les travaux à venir, il serait intéressant de proposer une automatisation des étapes de modélisation d'une part, et de proposer de modéliser les autres caractéristiques du sol quelque soit leurs nature.

Références bibliographiques

[MARIE-HELENE, 2010] :MARIE-HELENE. INTRODUCTION A LA STATISTIQUE DESCRIPTIVE. SEDE-MARCEAU: CTU master AGPS de la donnée à la connaissance : traitement, analyse et transmission, 2010.

[BENOIT LE BOCEY ,2010] : BENOIT LE BOCEY. GESTION DYNAMIQUE DES ECHELLES DE DONNEES RASTER DANS UN ENVIRONNEMENT INTERACTIVE : Projet de Master 2010, E COL E POLY TECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE ,2010.

[SOUDANI KAMEL , 2006] : ARCGIS DESKTOP 10.0 HELP. IGN : Support de cours ESRI France 2000, JUILLET 2002.

[FRANCINE ET MARC DIENER, 2008]: MATHEMATIQUES POUR LA BIOLOGIE : Cours de Loi de conservation du système de Lotka-Volterra, UNIVERSITE DE NICE, 2008.

[ENRIQUE R VIVONI ET AL, 2002] : ENRIQUE R. VIVONI, VALERI Y, IVANOV, VANESSA TELES, RAFAEL L, BRAS AND DARA ENTEKHABI. TRIANGULATED IRREGULAR NETWORKS AND SIMILARITY IN LANDSCAPE PROCESSES: MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 10 DÉCEMBRE 2002.

[AGIRE, SD] : AGIRE, HYDROLOGIC & HYDRAULIC MODELING WITH THE WATERSHED MODELING SYSTEM, **[EN LIGNE]**. DISPONIBLE SUR: <<http://www.agire-maroc.org/>>

[SPATIAL TECHNIQUES,SD]: SPATIAL TECHNIQUES, TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK **[EN LIGNE]**. DISPONIBLE SUR: [HTTP://WWW.IAN-KO.COM/](http://www.ian-ko.com/).

[ANDERSON, S ,2001]: AN EVALUATION OF SPATIAL INTERPOLATION METHODS ON AIR TEMPERATURE IN PHOENIX, DEPARTMENT OF GEOGRAPHY, ARIZONA STATE UNIVERSITY TEMPE, AZ 85287-0104, 2001.

[SEVERINE MORTIER, 2007] : SEVERINE MORTIER. INTERPOLATION ET REPRESENTATION 3D DE DONNEES METEOROLOGIQUES EN MILIEU URBAIN. LAUSANNE : CERTIFICAT DE GEOMATIQUE - MEMOIRE DE STAGE, 2007.

[JIN LI ET ANDREW D. HEAP, 2008] : Jin Li, Aandrew D, A REVIEW OF SPATIAL INTERPOLATION METHODS FOR EVIRONMENTAL SCIENTISTS, GEOSCIENCE AUSTRALIA RECORD, 2008, N°23.

[M. AZPURUA ET K. DOS RAMOS, 2010]: M. AZPURUA AND K. DOS RAMOS , A COMPARISON OF SPATIAL INTERPOLATION METHODS FOR ESTIMATION OF AVERAGE ELECTROMAGNETIC FIELD MAGNITUDE. PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH M, 2010, VOL. 14, PP 135,145.

[JULIEN KRONEGG, 2004] : JULIEN KRONEGG .TECHNIQUES D'INTERPOLATION. UNIVERSITE DE GENEVE, NOVEMBRE 2004.

[ANES MISSOUMI, 2010]: ANES MISSOUMI.LA MODELISATION GEOSPATIALE POUR DES APPLICATIONS URBAINES EN 3D: RAPPORT DE STAGE, 2010.

[BENOIT POUPEAU, 2008]: BENOIT POUPEAU. ANALYSES ET REQUETES DE DONNEES GEOGRAPHIQUES 3D : THESE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS EST - MARNE-LA-VALLEE EN SCIENCES DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, PARIS, 16 SEPTEMBRE 2008.

[DELARUE ET AL, 2009] : FRÉDÉRIC DELARUE, SOPHIE CORNU, JOËL DAROUSSIN, SÉBASTIEN SALVADOR-BLANES, HOCINE, BOURENNANE, PATRICK ALBÉRIC, AURÉLIE VENNINK, ARY BRUAND ET DOMINIQUE KING. 3D REPRESENTATION OF SOIL DISTRIBUTION: AN APPROACH FOR UNDERSTANDING PEDOGENESIS. COMPTES RENDUS GEOSCIENCE, 2009, VOL 341, N°6, PP 486–494.

[M.L. MENDONC SANTOS ET AL, 2000]: M.L. MENDONC SANTOS, C. GUENAT, M. BOUZELBOUDJEN, F. GOLAY. THREE-DIMENSIONAL GIS CARTOGRAPHY APPLIED TO THE STUDY OF THE SPATIAL VARIATION OF SOIL HORIZONS IN A SWISS FLOODPLAIN .LAUSSANE.MARS 2000

[CENTRE DE FORMATION TOULOUSE, SD] : HUIITS STAGIAIRES .RAPPORT DE STAGE PERFECTIONNEMENT QUANTUM GIS / GRASS : FAIRE DE LA 3D,CENTRE DE FORMATION TOULOUSE

[MOHAMED ALI HADHRI, 2010]: MOHAMED ALI HADHRI. LA MODELISATION 3D: RAPPORT DE STAGE, 3/10/2010

[Volker Mell, 2011]: Volker Mell. ARCGIS DESKTOP 10 TUTORIAL: NASA RESEARCH EXPERIENCE FOR UNDERGRADUATES, CONFEDERATED TRIBES OF GRANDE RONDE 2011