



Rapport de Stage

Elaboration d'une méthode de prospection de sites pour STEP
et de calcul de terrassement

Amine Aboufirass
Ingénieur Génie Civil
Penn State University

Juin – Aout 2014

Table des matières

Table des matières	0
Liste des figures	1
Liste des Tables	2
Remerciements	3
Abstract	4
Introduction	5
Sites Potentiels	6
Préparation des couches	6
Projection.....	6
Données	6
Démarche d'Identification de Sites Potentiels	9
Traitement MNT	12
Zones Protégées.....	14
Ciblage	19
Pente	20
Zones STEP	24
Autres Considérations.....	29
Quelques notes sur le Modelbuilder	29
Mise en Oeuvre.....	31
Terrassement	34
Préparation de surfaces	34
Utilisation de ArcSCAN	35
Import de données sur Civil3D	36
Calcul des Volumes.....	38
Critères et Digue « Type »	38
Volumes de terrassement sur Civil 3D	42
Conclusions	47

Liste des figures

Figure 1: découpage du Département du Cantal.....	6
Figure 2: Délimitation du Département sur Google Earth	7
Figure 3: délimitation d'une zone à partir du site ASTER	8
Figure 4: Dalles MNT englobant le Département du Cantal (MNT1, MNT2, MNT3, MNT4)	8
Figure 5: Fenêtre de lancement du modèle STEP	10
Figure 6: Géo algorithme du modèle STEP	11
Figure 7: Outil « Mosaic to New Raster »	12
Figure 8: « Mosaic.tif » ou Mosaïque des quatre dalles MNT	13
Figure 9: Algorithme de substitution pour le bloc « Traitement MNT »	13
Figure 10: Fonction « Batch » ou traitement par lots	15
Figure 11: Outil « Repair Geometry »	15
Figure 12: Outil « Union »	16
Figure 13: Zones Protégées avant fusion	17
Figure 14: Bloc « Zones Protégées »	18
Figure 15: Algorithme « Sub Model »	18
Figure 16: « Union.shp » (Couche de synthèse des zones protégées)	18
Figure 17: « CLIP » ou MNT extrait de l'aire du Département	19
Figure 18: « Extracting Polygon » ou masque d'élimination des zones protégées	20
Figure 19: « ClipZones » ou MNT hors zones protégées	20
Figure 20: Outil « Slope »	21
Figure 21: « SLOPE »	21
Figure 22: Outil « Raster Calculator »	22
Figure 23: « Nullslope » ou zones planes	23
Figure 24: « R.Mapcalc »	24
Figure 25: Exemple de traitement de l'outil « Focal Statistics »	25
Figure 26: Zoom sur « Nullslope »	25
Figure 27: Outil « Focal Statistics »	26
Figure 28: « Max » ou couche de voisinage maximal	26
Figure 29: « Min » ou couche de statistique minimales	27
Figure 30: Zones propices pour la création des STEPs	28
Figure 31: Répertoire des données du modèle STEP	29
Figure 32: Cantal: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)	31
Figure 33: Cantal: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)	31
Figure 34: Haute-Loire: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)	32
Figure 35: Haute-Loire: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)	32
Figure 36: Aveyron: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)	32
Figure 37: Aveyron: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)	32
Figure 38: Creuse: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)	33
Figure 39: Creuse: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)	33
Figure 40: Haute-Loire: Sites proposés par SmE superposés sur couche créée par le modèle STEP	33
Figure 41: Creuse: Sites proposés par SmE superposés sur couche créée par le modèle STEP	33

Figure 42: Site de Chabreyres et couche crée par le modele STEP.....	34
Figure 43: image en trois bandes d'origine (SCAN25).....	35
Figure 44: Image en bande verte isolée	35
Figure 45: Contours extraits de zones claires	36
Figure 46: Contours extraits de zones sombres	36
Figure 47: Histogramme des gris image en sombre	36
Figure 48: Histogramme des gris image zones claires	36
Figure 49: Surface TIN convertie en 3D du site Chabreyres.....	37
Figure 50: Commande « Mapimport ».....	37
Figure 51: Superposition des bassins sur la surface topographique.....	38
Figure 52: Digue « Type ».....	39
Figure 53: Etapes pour définir la surface TIN « bassin »	42
Figure 54: Fenêtre « Grading Tools »	43
Figure 55: Etape 1 : « Grade to distance » pour calculer le talus interne	44
Figure 56: Etape 2 : « Grade to distance » pour calculer la partie supérieure horizontale	44
Figure 57: Etape 3 : « grade to surface » pour rejoindre le terrain naturel.....	44
Figure 58: Etape 4 : « Infill » pour simuler l'excavation.....	44
Figure 59: Représentation tridimensionnelle du bassin	45
Figure 60: Avant optimisation de volumes de déblai/remblai.....	45
Figure 61: Apres optimisation de volumes déblai remblai.....	46

Liste des Tables

Tableau 1: Liste Indicative des zones protégées.....	14
Tableau 2: Données utilisées dans le modele STEP	30
Tableau 3: Variantes de calcul pour les quatre départements retenus	31
Tableau 4: Bassin Haut : Volume géométrique pour un incrément de 7 metres	40
Tableau 5: Bassin Haut : Volume Géométrique pour un incrément de 1 mètre	41
Tableau 6: Bassin Bas: Volume Géométrique pour un incrément de 7 mètres.....	41
Tableau 7: Bassin Bas: Volume géométrique pour un incrément de 1 metre	41
Tableau 8: Valeurs adoptées pour definition de la surface « Bassin ».....	43
Tableau 9: Bassin Bas Chabreyres: Tableau de Synthèse.....	46
Tableau 10: Bassin Haut Chabreyres: Tableau de Synthèse	47

Remerciements

I would like to take this opportunity to thank all the members of the Sun 'R and SmE team who have supported me throughout the duration of this internship. First of all, I owe a great deal of gratitude to Antoine Nogier, the President, who accepted to receive me as an intern in his company under unique circumstances, and who trusted in my ability to successfully complete a challenging research project. Secondly, I would like to personally thank Thomas Kohler and Davy Marchand-Maillet for their patience, guidance, and especially their constant interest in my work as an intern despite busy schedules and sometimes challenging circumstances. I cannot go without thanking Odile Martynoff, for her continuous encouragement and support, and willingness to go out of her way to make my stay in Paris a pleasant one. I would also like to express my gratitude to all the members of the SunR-SmE team for the friendly and convivial environment that exists on a consistent basis and which made my stay a memorable one.

Abstract

This research project involves two aspects of a developing Pumped storage hydraulic power plant product for SunR SmE. The objectives of the research project were firstly to automate the site selection process using a GIS tool and secondly to provide preliminary cut and fill volumes estimations for the water basins. The objectives of the first goal were met with the definition of a focal statistics and raster based method to define all points within given distance and elevation difference from each other and the development of a sophisticated geo-algorithm using the ArcGIS ModelBuilder to incorporate other key aspects of the GIS site selection process. The objectives of the excavation volume estimations were partially met using Civil 3D grading and volume tools to define a “typical” water basin for one of the sites under consideration by the company. Several trials were then carried out on Civil3D with varying embankment and surface parameters for purposes of comparison. The synthesis of a comparative table for similar variations across different sites was identified as a possible future development.

Introduction

Le stage s'inscrit dans le cadre du projet SunHydro lancé par Smart Energy, filiale de la Société Sun'R. Il s'agit d'un projet de recherche développement qui vise le développement d'une gamme de petites Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) innovantes, replicables et commercialisables sur le territoire Français ainsi qu'à l'étranger.

Le stage porte sur deux volets comme suit :

- Le développement d'une méthode d'automatisation de la sélection de sites potentiels pour recevoir des STEPs,
- L'établissement des éléments nécessaires pour l'estimation préliminaire des volumes de terrassement (déblai/remblai) pour la réalisation de STEPs.

Des efforts à travers le monde ont été menés pour le choix de critères pertinents et l'automatisation des procédures d'identification de sites¹. La méthode de Connolly et al (2010), particulièrement, paraît plus adaptée à la démarche et aux critères retenus par SmE, à savoir le dénivelé, la distance, les superficies des bassins, et le volume maximal de déblai/remblai. Cependant, elle diffère de la démarche développée par la présente étude par le fait qu'elle part de bassins existants (lacs naturels, barrages, etc.) et procède à l'investigation de sites potentiels pour le bassin bas dans le voisinage du bassin existant. Elle comporte également une démarche pour optimiser la recherche de zones plates en minimisant les déblais/remblais sur des cercles à diamètres prédéfinis.

Le logiciel implémenté dans la méthode de Connolly et al, est « Atlas Computers Survey Control Centre », qui a été choisi pour sa capacité à intégrer des calculs dynamiques de volumes de déblai/remblai en parallèle avec des fonctionnalités SIG classiques.

La présente étude s'inspire de cette démarche, tout en scindant la partie « recherche de couples de points » de la partie « calcul déblai/remblai ». La première partie s'est basée sur ArcGIS, qui dispose de fonctionnalités très performantes pour cette recherche mais moins performantes en matière de calcul de déblai/remblai. La deuxième partie a été réalisée sur la base du logiciel Civil3D, qui lui, offre une possibilité de calcul de déblai /remblai performante et dynamique à partir de la comparaison de deux surfaces.

¹ Knight Piesold (2010), British Columbia, Canada
Connolly et al (2010), Ireland
Hessami---Bowly (2010), Portland Victoria
Blakers (2010), central Tasmania and the Araluen Valley, NSW

Sites Potentiels

Préparation des couches

Projection

Il existe deux sortes de systèmes de coordonnées, le système projeté et le système géographique. Le système projeté utilise des coordonnées cartésiennes de latitude et de longitude. Le système géographique utilise des unités angulaires basées sur une date de référence. Le système de coordonnées adopté dans la cartographie de cette étude est le système Lambert 93, code EPSG 2154 qui est un système de coordonnées projeté.

Données

La démarche de prospection idéale nécessite plusieurs données d'entrées, notamment :

- un découpage administratif,
- des dalles MNT,
- des données hydrologiques (cours d'eau, bassins existants),
- des données environnementales (Zones protégées, réserves naturelles, etc.),
- la carte topographique scannée au 25millième et,
- des points de raccordement électrique.

Dans le cadre de la présente étude, les données utilisées ont été obtenues à partir des sources suivantes:

Découpage administratif:

Le découpage administratif français est d' accès libre sur le site de l'IGN «<http://professionnels.ign.fr/geofla> ». La figure 1 affiche le découpage du Département du Cantal retenu comme exemple dans cette étude.



Figure 1: découpage du Département du Cantal

Modèles Numériques de Terrain

D'après le site de l'IGN « un MNT est un fichier numérique contenant les données d'altitude d'un territoire, sous forme de grille à maille carrée, de grille triangulée ou de semis de points. ». Il s'agit d'une forme de données extrêmement flexible et manipulable dans le contexte des logiciels SIG.

A partir d'un fichier MNT de haute résolution, il est possible de réaliser plusieurs tâches :

- Extraire des contours en format vectoriel, éliminant ainsi le besoin de numériser les contours manuellement à partir d'une carte scannée,
- Créer une couche de pente,
- Convertir les cellules au format vectoriel (polygones, lignes, points), et vice versa,
- Programmer des requêtes utilisant les valeurs des cellules.

L'IGN dispose de dalles MNT payantes à très haute résolution. Il existe également une source d'accès libre de dalles MNT de précision de 30 mètres nommée ASTER. Cette précision est suffisante pour des requêtes 'Macro' de sites potentiels, elle ne suffit cependant pas pour effectuer des calculs précis de terrassement. Le calcul de volumes de terrassement nécessite une numérisation des contours de la carte de l'IGN. Ce point sera discuté dans la partie « Utilisation de ArcSCAN ».

Pour extraire les dalles qui coïncident avec le département en question, il est nécessaire d'abord de les délimiter en termes de latitude et de longitude. En utilisant Google Earth et la fonction « Grid » (Fig. 2) on peut constater que les limites N45,5°, N44,5°, E2° et E3,5° englobent le département du Cantal en entier.



Figure 2: Délimitation du Département sur Google Earth

Le site ASTER est accessible à partir du lien « <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/> ». La fonction « Select tiles by coordinates » (Fig. 3) qu'il offre permet à l'utilisateur de sélectionner des dalles à partir des limites observées sur Google Earth (ou autres).

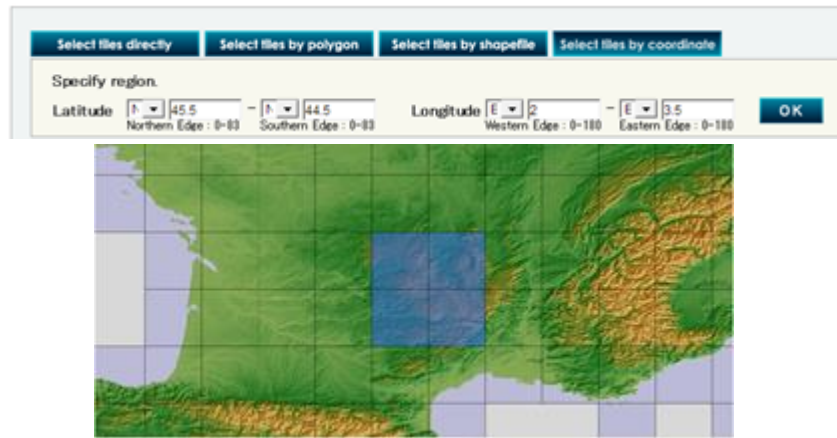


Figure 3: délimitation d'une zone à partir du site ASTER

Les dalles MNT, une fois importées sur ArcGIS, devraient apparaître comme sur la Figure 4:

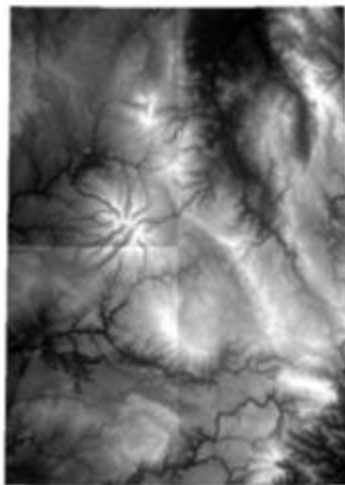


Figure 4: Dalles MNT englobant le Département du Cantal (MNT1, MNT2, MNT3, MNT4)

Cartes Topographiques Scannées

La carte scannée du territoire sous prospection est importante car elle permet de voir de plus près les zones sélectionnées pour une seconde phase d'évaluation et de vérification de validité du site. Cette carte est dénommée « SCAN25 » et existe en flux libre à partir du serveur du BRGM. Le lien vers ce flux est « <http://mapdmz.brgm.fr/cgi-bin/mapserv?map%3D/carto/infoterre/mapFiles/scan.map&> »

Zones Protégées

Le site de DREAL est une base de données regroupant toutes les informations concernant les zones protégées du territoire Français, toutes catégories confondues. Les données elles-mêmes ne sont pas toujours disponibles qu'au niveau local et ne peuvent être téléchargées que dans le site web du département concerné.

Données Hydrologiques

Le site SANDRE contient les données hydrologiques sur l'ensemble des bassins du territoire Français. Le lien vers cette base de données est:

«<http://services.sandre.eaufrance.fr/telechargement/geo/BDCarthage/FXX/2013/arcgis/FranceEntiere/>».

Démarche d'Identification de Sites Potentiels

Traditionnellement, la prospection de sites par SmE utilise la plateforme « Quantum GIS ». Il s'agit d'une interface graphique d'accès libre (« Open Source ») regroupant diverses fonctionnalités. Ces fonctionnalités proviennent de sources hybrides (également « Open Source ») notamment GRASS, SAGA et GDAL. Cette plateforme est en cours de développement permanent et présente des opportunités intéressantes pour le développement futur des fonctionnalités SIG. Elle présente cependant des problèmes de stabilité, d'optimalité (lenteur de calculs) et de compatibilité de données.

Dans le cadre du présent travail, le logiciel ArcGIS a été adopté en tant qu'alternative à cette plateforme. En effet ArcGIS est jugé plus convivial et présente des fonctionnalités plus puissantes.

Le modèle « STEP » développé sur ArcGIS dans le cadre de cette étude a pour objectif d'identifier des zones propices pour la petite STEP. Ce modèle prend trois données d'entrée, notamment les dalles MNT d'ASTER, les zones protégées définies par l'utilisateur, et les limites administratives du Département. Il prend aussi trois paramètres qui sont le dénivelé, les options de distance ainsi qu'une valeur de pente maximale. En sortie, il produit une couche MNT contenant tous les points, hors zones protégées, intra-département, situés dans une zone « plane », à distance maximale et à dénivelé minimal donnés.

L'algorithme issu de ce modèle présente les avantages suivants:

- Il réduit d'abord la superficie de recherche en éliminant les zones sans potentiel,
- Il permet d'évaluer les zones présentant des opportunités invisibles à l'œil nu,
- Il permet de varier les critères de recherche par l'utilisateur pour faire des tests multiples et adaptés aux besoins exprimés,
- Il fait gagner du temps en automatisant les procédures manuelles classiques sur SIG.

Ainsi l'algorithme comprend 5 sous modèles ou blocs (Fig. 6):

- Traitement MNT,

- Zones Protégées,
- Ciblage,
- Pente, et
- Zones STEP.

Dans cet algorithme les cercles représentent des données (entrées) ou des résultats (sortie) et les rectangles représentent des processus (ou outils). La lettre “P” indique les paramètres modifiables par l'utilisateur. Concernant la nomenclature adoptée dans le rapport, elle sera, autant que possible, conforme à celle affichée dans l'algorithme (Fig. 6).

Les sections qui suivent décriront les blocs dans le détail et présenteront pour chacun les données d'entrées, les paramètres, le processus de traitement et les sorties. Chaque fois que possible, les applications et/ou adaptations sur QGIS seront mentionnées.

La Figure 5 présente la fenêtre de lancement du modèle STEP

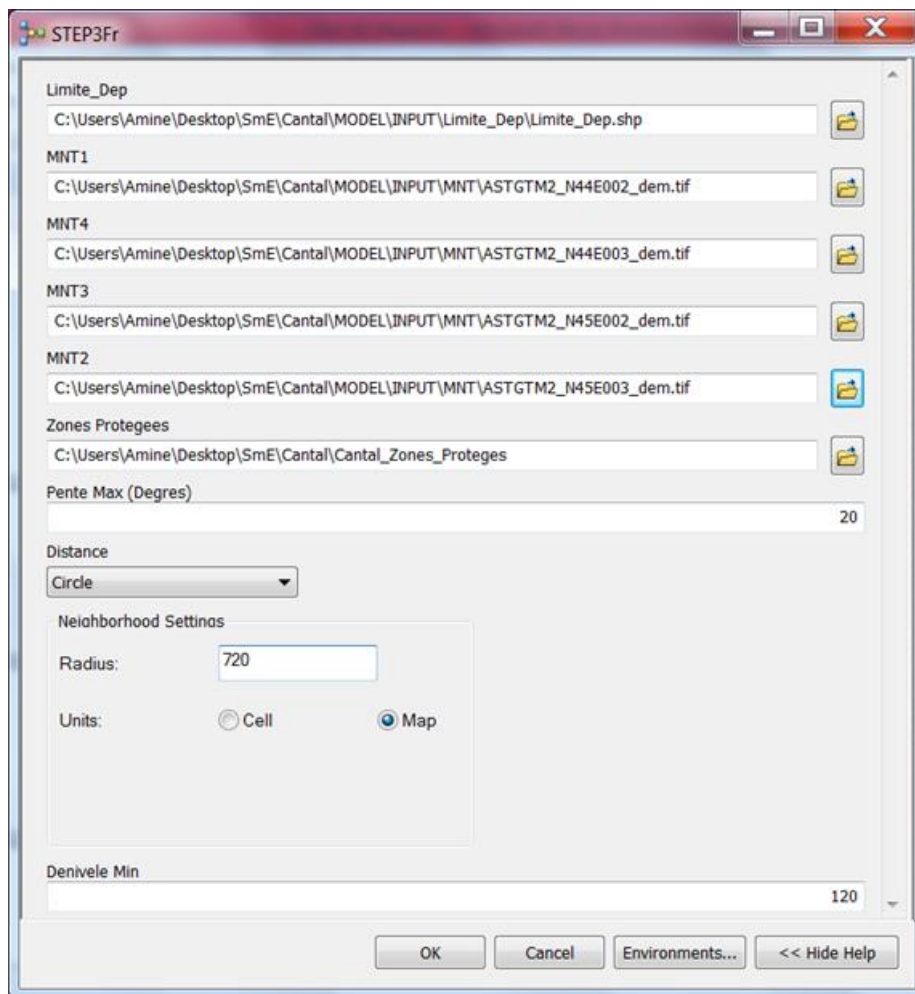


Figure 5: Fenêtre de lancement du modèle STEP

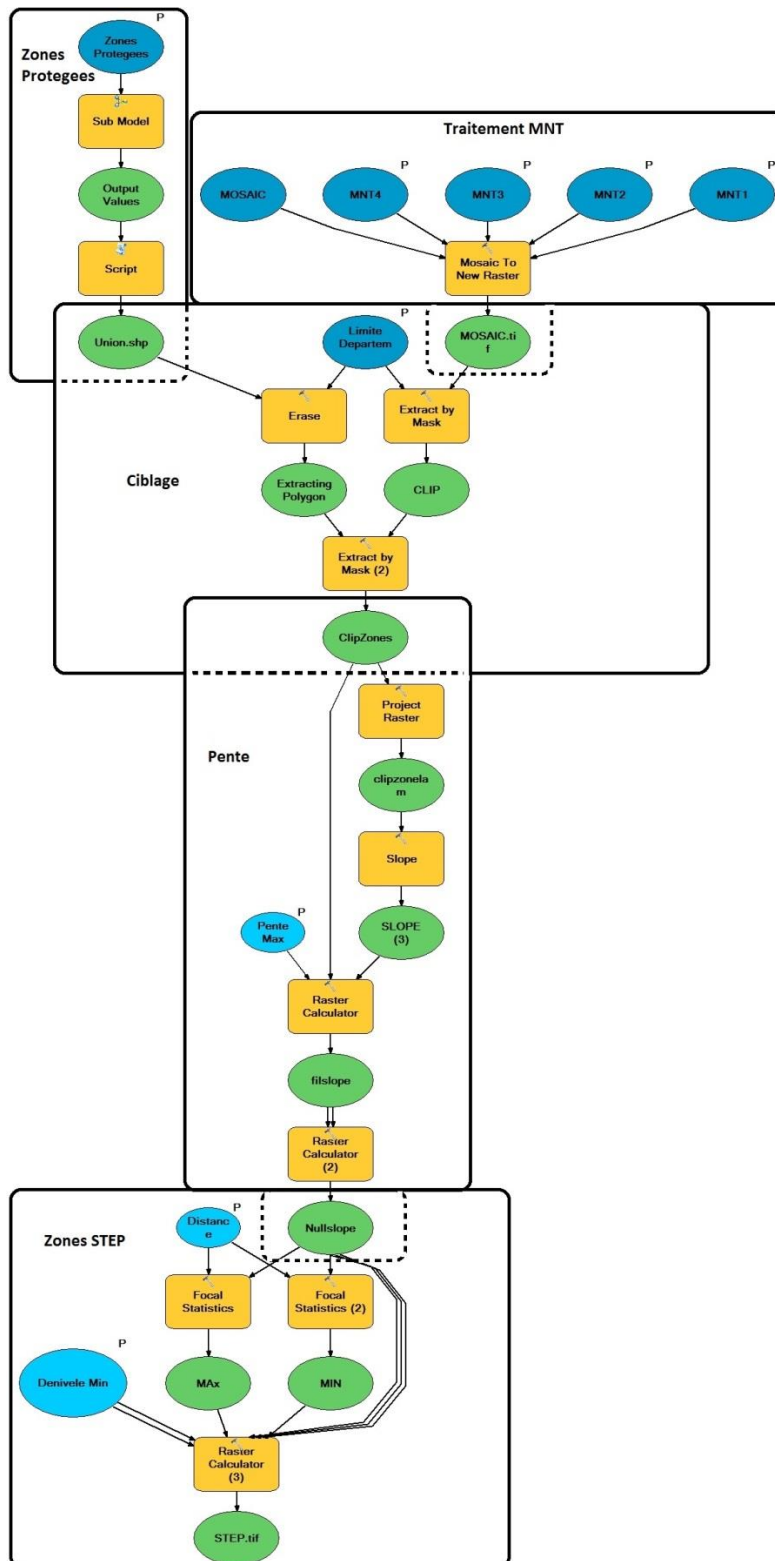


Figure 6: Géo algorithme du modèle STEP

Traitement MNT

Le premier bloc a pour objectif de prendre les dalles extraites du site ASTER et de les fusionner pour créer une couche homogène et modifiable par les limites du département.

- Entrées : **MNT1(ASTGTM2_N45E003), MNT2(ASTGTM2_N45E002), MNT3(ASTGTM2_N44E003), MNT4(ASTGTM2_N44E002)** (voir Fig. 4)
- Paramètres: **MNT1(ASTGTM2_N45E003), MNT2(ASTGTM2_N45E002), MNT3(ASTGTM2_N44E003), MNT4(ASTGTM2_N44E002)** (voir Fig. 4)
- Processus : Outil « Mosaic To New Raster » de ArcGIS

Ce processus demande 3 paramètres: la résolution, le nombre de bandes et l'échelle de classification des couleurs. La fenêtre ci-après montre les spécifications données pour ces paramètres dans le cas de la présente étude (Fig. 7).

A signaler que l'option « Mosaic Colormap Mode » agit principalement sur les couleurs et l'aspect esthétique, mais n'a aucun impact sur le résultat des calculs.

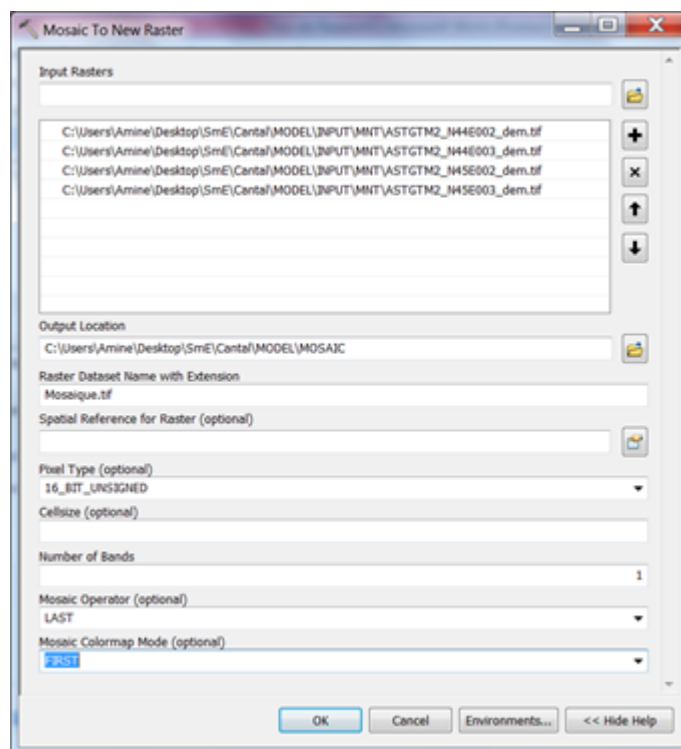


Figure 7: Outil « Mosaic to New Raster »

- Sortie : **Mosaic.tif**

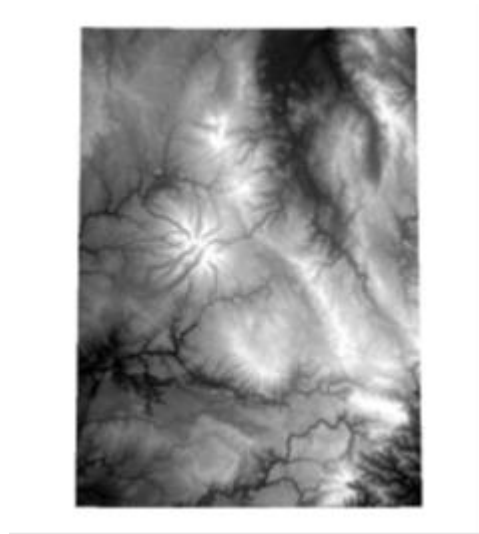


Figure 8: « Mosaic.tif » ou Mosaique des quatre dalles MNT

Au cas où il serait nécessaire d'avoir plus de quatre dalles, il sera possible d'ajouter manuellement des variables d'entrées supplémentaires dans le modélisateur ArcGIS, « ModelBuilder ». Cependant, une solution plus élégante serait d'ajouter une fonction itérative (similaire à celle employée dans le bloc « Zones Protégées ») et d'avoir comme donnée d'entrée un répertoire (« Workspace») au lieu de dalles individuelles. Cette technique permettrait de fusionner autant de dalles que nécessaire. La figure ci-dessous présente un exemple de substitution potentielle (Fig. 9):

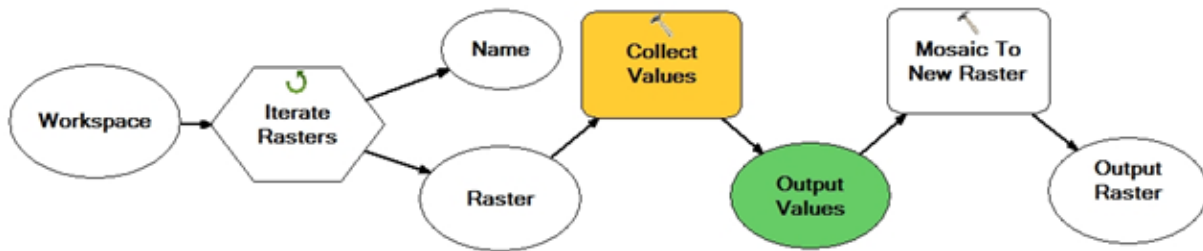


Figure 9: Algorithme de substitution pour le bloc « Traitement MNT »

- QGIS : Dans le cas de QGIS, l'équivalent de ce processus se trouve dans la boîte à outils "SAGA" et se nomme « Merge Raster Layers ».

Zones Protégées

L'importation des zones protégées nécessite d'abord une évaluation des catégories à éviter d'un point de vue réglementaire. Cette évaluation ne peut être effectuée qu'avec une connaissance approfondie et une expérience poussée dans le domaine des lois de protection de l'environnement, et l'impact de ces lois sur un éventuel projet STEP. Le tableau suivant (Tab. 1) donne quelques indications sur le choix des zones à éliminer de la prospection. Les zones à niveau d'importance "fortes" sont des zones à exclure de la prospection.

Tableau 1: Liste Indicative des zones protégées

	Inclure dans la couche SIG?	Commentaire, niveau d'importance
Espaces Protégés		
Arrêtés de Conservation de Biotope	Oui	Moyenne
Terrains des Conservatoires D'Espaces Naturels	Non	
Terrains du Conservatoire du Littoral	Non	
Parcs Nationaux	Oui	Faible
Parc Naturel Marin	Non	
Parcs Naturels Régionaux	Oui	Faible
Réserves Biologiques	Oui	Moyenne
Réserves de Biosphère	Oui	Moyenne
Réserves Naturelles Nationales	Oui	Moyenne
Réserves Naturelles Régionales	Oui	Moyenne
Réserves Naturelles de Corse	Non	
Réserves Nationales de Chasse et Faune Sauvage	Non	
Sites Ramsar	Oui	Moyenne
ZNIEFF/ZICO		
ZICO	Oui	Précurseur de Natura
ZNIEFF 1 Continentales	Oui	Forte
ZNIEFF 2 Continentales	Oui	Faible
ZNIEFF 1 Marines	Non	
ZNIEFF 2 Marines	Non	
NATURA 2000		
Natura 2000	Oui	Composées de ZSC et ZPS.

L'objectif du sous modèle « Zones Protégées » est d'éliminer définitivement les cellules qui coïncident avec ces zones jugées, pour des raisons réglementaires, à exclure de la prospection. Dans ce qui suit on distinguera traitement manuel et traitement automatique.

Traitement Manuel

Le traitement manuel du répertoire **Zones Protégées** se résume en deux étapes :

- La première étape est la correction de la géométrie. Les couches provenant directement du site du DREAL contiennent des erreurs géométriques du style : polygones ouverts, intersection de lignes, etc. L'outil «Repair Geometry» permet de rectifier ces erreurs en gardant l'intégrité globale des polygones d'origine. Cet outil, par contre, ne s'exécute que pour une couche à la fois. Il faut donc passer par la fonction « Batch » (ou traitement par lots) pour le faire itérer sur toutes les couches (Fig. 10 et Fig. 11).

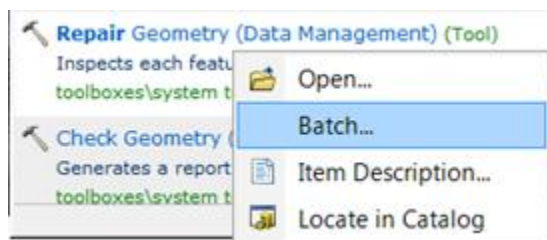


Figure 10: Fonction « Batch » ou traitement par lots

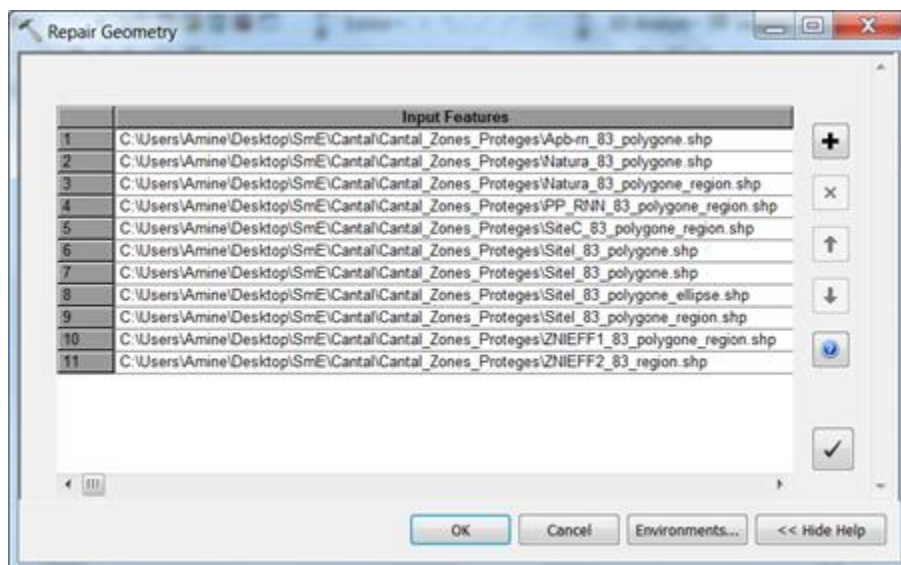


Figure 11: Outil « Repair Geometry »

- La deuxième étape consiste à fusionner toutes les couches (outil « Union »), l'objectif étant d'extraire toutes les cellules qui coïncident avec les zones protégées. Les attributs des différentes couches n'ont aucune importance ici, car la fusion est purement géométrique. Le paramètre « Join Attributes » est donc sélectionné pour fusionner tous les attributs sans distinction (Fig. 12).

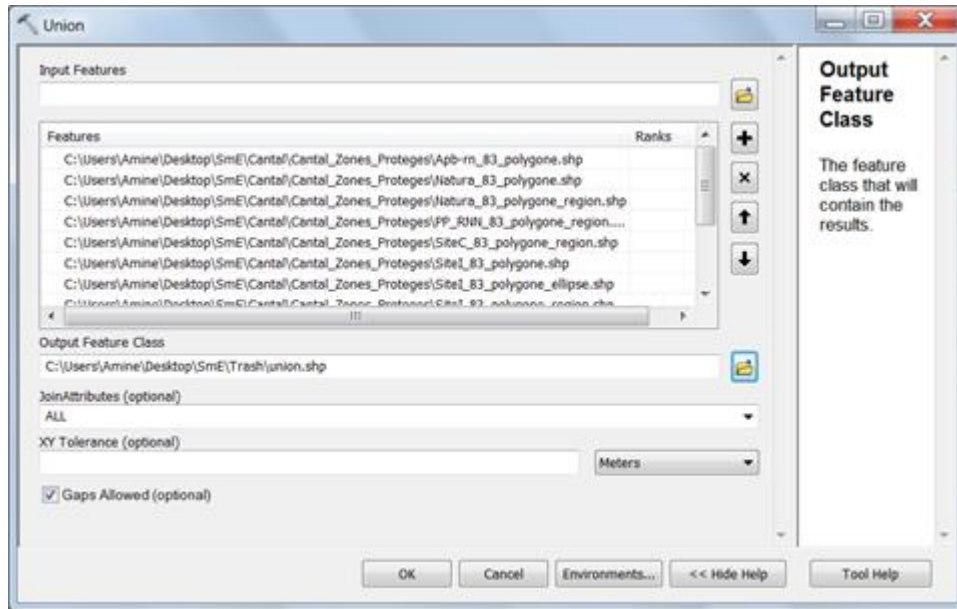


Figure 12: Outil « Union »

- QGIS : La boîte à outils QGIS ne dispose pas de fonctions réparatrices de géométrie et les possibilités de fusion d'attributs se limitent à deux ou trois couches. Il est préférable de simplement importer ces couches et de les superposer sur la couche finale (« Zones STEP »).

Traitement Automatique

Le traitement automatique se distingue du traitement manuel par le fait qu'il traite les couches l'une après l'autre dans un processus itératif (au lieu du traitement par lots proposé dans la méthode manuelle).

- Entrée: **Zones Protégées**, répertoire contenant toutes les zones protégées en format vecteur (Fig. 13).

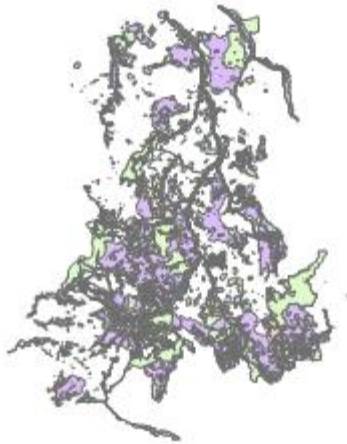


Figure 13: Zones Protégées avant fusion

- Paramètre : **Zones Protégées**
- Processus : La Figure 14 présente le processus « Zones Protégées » dans sa globalité. Ce processus comprend une sous routine (« Sub Model » élaboré dans la figure 15) qui traite en boucle les zones protégées l'une après l'autre en utilisant l'outil « Iterate feature classes ». Le traitement effectué dans la sous routine est résumé dans ce qui suit :
 - correction de la géométrie de la zone à chaque itération, (« Repair Geometry »)
 - Compilation des données (« Collect Values »)

Une fois les données compilées pour toutes les zones, l'outil "Script", élaboré dans le cadre de la présente étude dans le langage Python, permet de traduire les données du format Table (produit par l'outil « Collect Values ») au format Liste exigé par la fonction « Union ». La routine « Script » est présentée ci-après:

```
# Importer module ArcPy
import arcpy
# Fixer les paramètres d'entrée a partir de l'outil « Collect Values »
InputFeatures= arcpy.GetParameterAsText(0)
# Fixer les paramètres de sortie
OutputFeatureClass = arcpy.GetParameterAsText(2)
# Fixer les variables du sous-module « Union_Analysis »
JoinAttributes = "ALL"
XYTolerance = ""
GapsAllowed = True
# Exécuter le sous-module
```

« Union_Analysis

`arcpy.Union_analysis(InputFeatures, OutputFeatureClass, JoinAttributes, XYTolerance, GapsAllowed)`

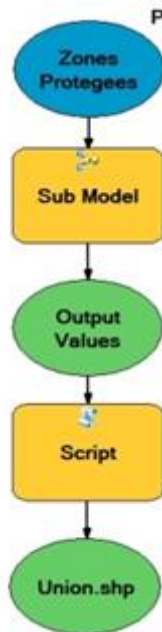


Figure 14: Bloc « Zones Protégées »

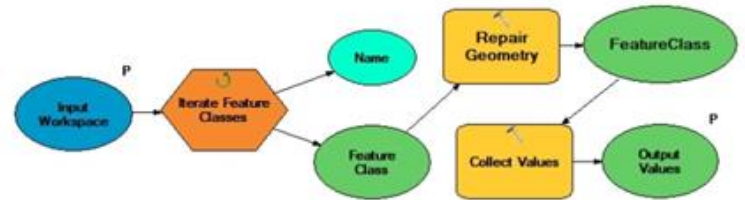


Figure 15: Algorithme « Sub Model »

- **Sortie:** Une fois l'union réalisée, aussi bien dans le cas manuel que dans le cas automatique, le produit final est la fusion géométrique de toutes les couches des zones protégées. (Fig. 16)

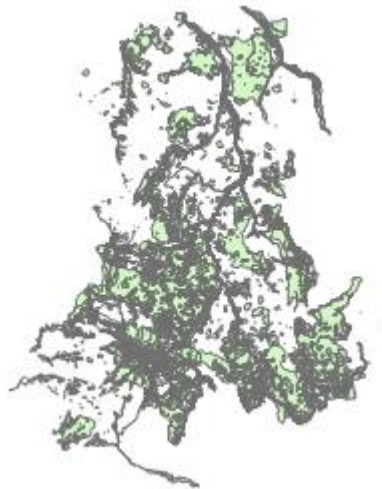


Figure 16: « Union.shp » (Couche de synthèse des zones protégées)

Ciblage

Ce bloc sert d'abord à découper la mosaïque des MNTs (**Mosaic.tif**) suivant les limites du département concerné (**Limite_Dep**). Ensuite, il élimine les **Zones Protégées** en les soustrayant de l'aire du département (**Limite_Dep**) pour créer un nouveau découpage départemental (**ClipZones**) excluant les zones protégées. Enfin, il extrait les cellules de la mosaïque pour avoir une couche de sortie MNT réduite. Cette réduction permet à la fois de minimiser le temps de calcul, ainsi que d'éliminer la possibilité que des points hors zones ne soient liés à des points en zone pour le calcul de dénivelé et de distance. Les éléments du bloc sont comme suit:

- Entrée : **Limite_Dep** (Fig. 1), **Mosaic.tif** (Fig. 8), **Union** (Fig. 16)
- Paramètres : **Limite_Dep**
- Processus : Ce processus permet la soustraction des **Zones Protégées** de l'aire du Département, puis l'extraction des cellules de **CLIP** (Fig. 17) par le masque résultant de cette soustraction **Extracting Polygon** (Fig. 18):
 - Extraction du MNT départemental: L'outil « Extract by Mask » permet d'extraire les cellules d'un raster en appliquant un masque vectoriel. Ici le masque est la limite du département.



Figure 17: « CLIP » ou MNT extrait de l'aire du Département

- Elimination des zones protégées de la limite du département en utilisant l'outil « Erase.» (Fig. 18)



Figure 18: « Extracting Polygon » ou masque d'élimination des zones protégées

- Production du MNT de sortie en utilisant la fonction "Extract by Mask"
- Sortie : **ClipZones** : Toutes les cellules MNT hors zones protégées à l'intérieur du département.



Figure 19: « ClipZones » ou MNT hors zones protégées

Pente

Dans le cas du modèle développé pour la présente étude, un terrain plat est défini comme un terrain dont la pente ne dépasse pas une valeur maximale fixée par l'utilisateur. Le bloc « Pente » transforme la couche d'altitudes fournie par le MNT de l'aire du département (Fig. 17) en couche de pente en degrés. Ensuite, ce bloc isole les cellules de pente répondant à la condition fixée par l'utilisateur et retransforme les valeurs de ces cellules en valeurs d'altitude (MNT).

- Entrée : **ClipZones** (Fig. 19), **Pente Max** (« Float »)
- Paramètres : **Pente Max** (« Float »)

- Processus : Ce processus a pour objet de sélectionner toutes les cellules se trouvant dans des zones planes. Il utilise trois outils, notamment « Project Raster », « Slope », et « Raster Calculator » pour arriver à ce résultat.
 - L'outil « Project Raster » permet de convertir **ClipZones** du système géographique WGS 1984 en système projeté Lambert 93 pour éviter les problèmes d'échelle dans l'axe des Z par rapport aux X et au Y. La nouvelle couche créée se nomme **Clipzonelam**. Cette étape évite de devoir calculer un « Z factor » (voir la figure 20) autre que 1.
 - L'outil « Slope » permet de transformer **Clipzonelam** en une couche de pente en degrés dénommée **SLOPE** (Fig. 21).

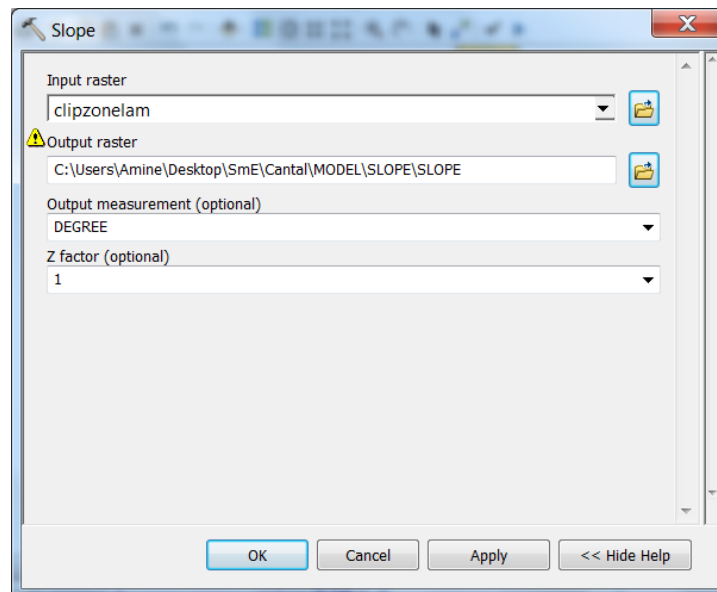


Figure 20: Outil « Slope »

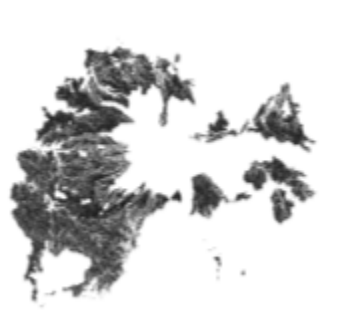


Figure 21: « SLOPE »

- L'outil « Raster Calculator » (Fig. 22) dans ArcGIS utilise une syntaxe en langage Python et permet d'effectuer des calculs sur toutes les cellules d'un raster ou sur plusieurs rasters en même temps.

Cette étape permet, à travers le « Raster Calculator », d'isoler les zones planes en remplaçant la valeur de chaque cellule de **SLOPE** ayant une valeur inférieure au paramètre **Pente Max** par une valeur de 1 (ou 0 dans le cas inverse). Les valeurs obtenues sont alors multipliées par les valeurs d'altitude des cellules de la couche **ClipZones**. Il en résulte une couche de zones dites « planes » (**filmslope**), où toutes les cellules ayant une valeur de zéro représentent des zones à forte pente, et où toutes les cellules ayant une valeur d'altitude représentent des zones à faible pente. La syntaxe employée pour cette requête est:

`("%SLOPE (3)%"<float(%Pente Max (Degres)%))*"%ClipZones%"`

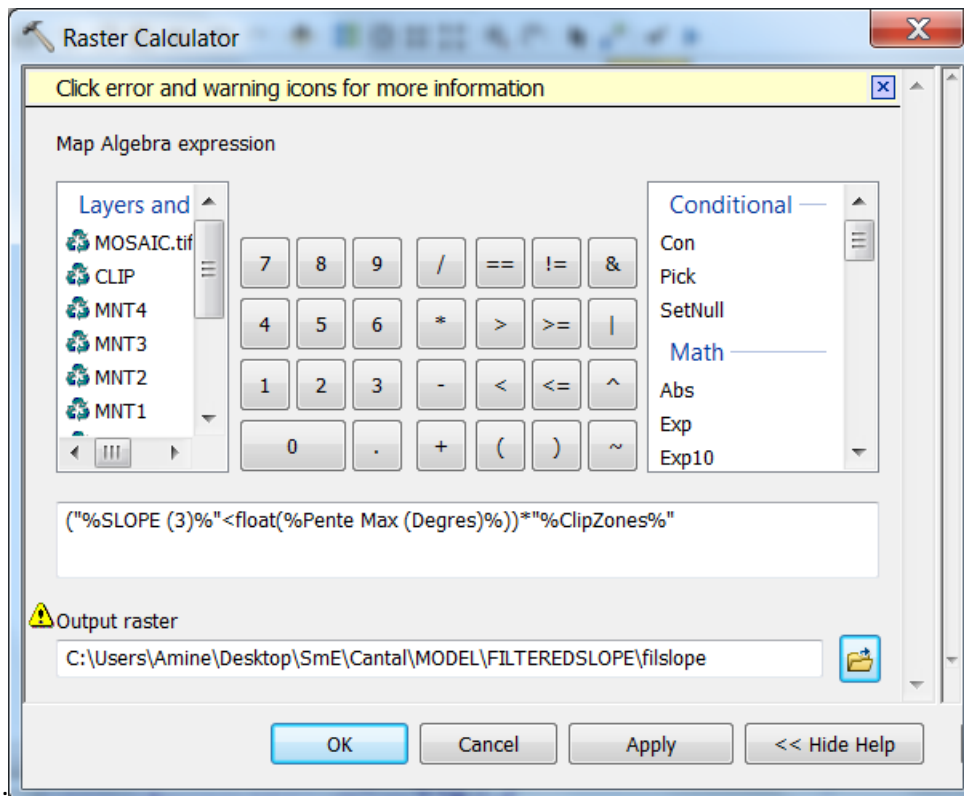


Figure 22: Outil « Raster Calculator »

- Le chiffre 0 figurant dans les cellules à pente forte doit ensuite être remplacé par la valeur « Nodata » (c'est-à-dire sans données). Cette démarche permet d'exclure ces cellules des calculs suivants. Pour cela, il est nécessaire de procéder à une deuxième application de « RasterCalculator ». La fonction « SetNull » permet d'effectuer cette tâche :

```
SetNull("%filslope%", "%filslope%", "VALUE= 0")
```

- Sortie : Couche des zones planes. **Nullslope** (Fig. 24)

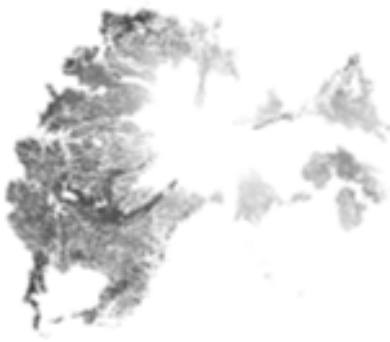


Figure 23: « Nullslope » ou zones planes

- QGIS : L'équivalent du « Raster Calculator » sur GRASS, à travers QGIS, se nomme « r.mapcalc » (Fig. 23). Il utilise une syntaxe différente basée sur le langage de GRASS. Pour parvenir au même résultat que celui du bloc « Pente », il y a lieu d'employer les formules suivantes :

Pour créer une couche de zones planes

$(B < 10) * A$

où A = MNT, et B = Couche de Pente

Formule 1

Pour transformer les cellules 0 en Nodata

$\text{If}(A=0, \text{null}(), A)$

où A est le résultat de la formule 1

Formule 2

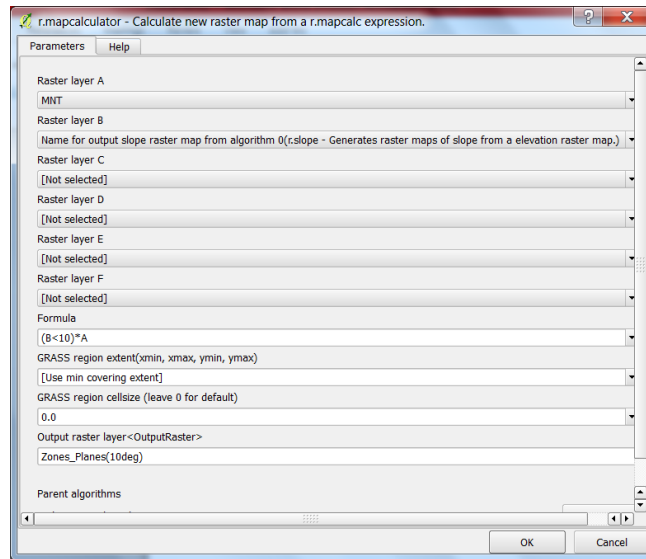


Figure 24: « R.Mapcalc »

Zones STEP

L'outil « Focal Statistics » (statistiques focales)² « effectue une opération de voisinage qui calcule un raster en sortie dans lequel la valeur de chaque cellule en sortie est fonction des valeurs de toutes les cellules en entrée situées dans un voisinage spécifié autour de l'emplacement de la cellule en entrée (cercle glissant). La fonction appliquée à l'entrée est une statistique : maximum, moyenne ou somme, de toutes les valeurs présentes dans ce voisinage. » Dans le cas de la recherche de sites potentiels de STEPs, les statistiques de sortie sont l'altitude minimale et maximale trouvées dans le cercle de voisinage (Fig. 25).

La décision de retenir ou de ne pas retenir un point au centre du cercle de voisinage dépend de la différence entre sa valeur et la valeur maximale du cercle ou la valeur minimale du cercle. Cette différence doit être supérieure au dénivelé minimal fixé par l'utilisateur. Cette démarche est résumée par l'algorithme suivant :

Altitude*(Si (Abs(Valeur du point – Valeur Max) OU Abs(Valeur du point – Valeur Min)) > Dénivelé min fixé

Valeur du point = 1

Sinon Valeur du point = 0)

A titre d'exemple, la figure 25 présente une itération simple du calcul. Si le dénivelé minimum fixé est de 10, le point de valeur 7 (centre du cercle de voisinage) sera retenu (aura une valeur de 1) car la

² <http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#na/009z000000r7000000/>

différence entre 7 et la valeur maximale (20) est de $13 > 10$. La condition sur la valeur minimale n'est cependant pas vérifiée ($7 - 2 = 5$).

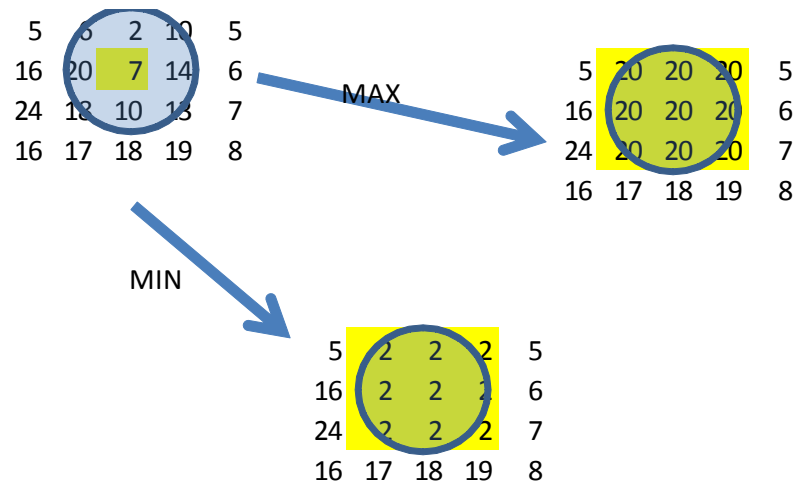


Figure 25: Exemple de traitement de l'outil « Focal Statistics

Ce bloc est résumé par les étapes suivantes :

- Entrée : Nullslope (Fig. 26), Distance, Dénivelé Min



Figure 26: Zoom sur « Nullslope"

- Paramètres : Distance (Float), Dénivelé Min

- Distance : « Focal Statistics » permet, entre autres, de constituer des voisinages circulaires ou rectangulaires. Le voisinage circulaire est la méthode la plus adaptée.

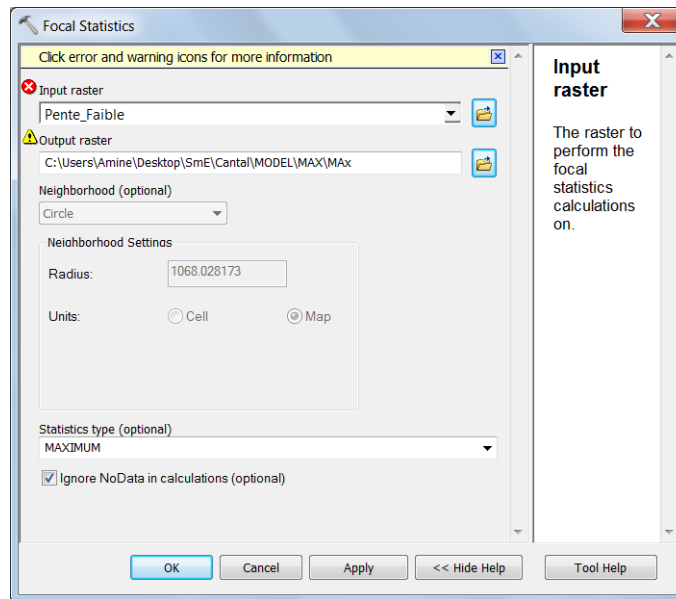


Figure 27: Outil « Focal Statistics »

- Processus : Mise en œuvre du processus de balayage décrit plus haut.
 - Couche de statistique maximale



Figure 28: « Max » ou couche de voisinage maximal

- Couche de statistique minimale

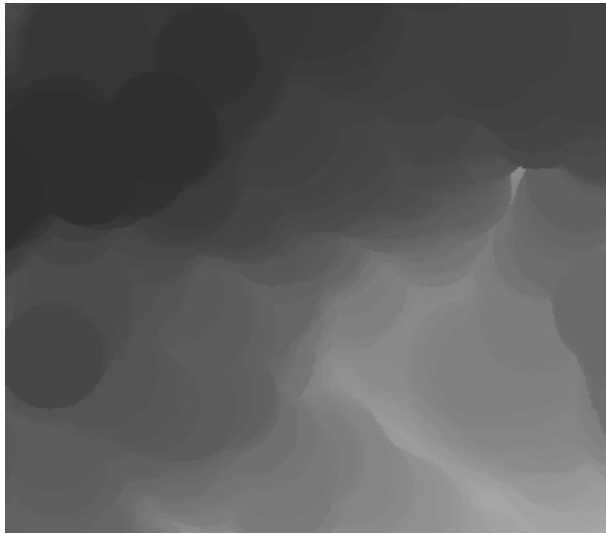


Figure 29: « Min » ou couche de statistique minimales

- Le « Raster Calculator » permet de traiter les trois couches **Nullslope**, **Max** et **Min** avec une fonction conditionnelle (« con ») qui est tout simplement une traduction en python du raisonnement expliqué auparavant:

```
Con(((Abs("%Pente_Faible%" - "%MIN%") > float(%Denivele Min%)) |  
(Abs("%Pente_Faible%" - "%MAX%") > float(%Denivele Min%))), 1, 0)*"%Nullslope%"
```

Il est nécessaire, comme dans le bloc « Pente », de convertir les cellules de 0 en cellules « Nodata » à travers la formule suivante dans le « Raster Calculator »

```
SetNull("%STEP%", "%STEP%", "Value = 0")
```

- Sortie : STEP

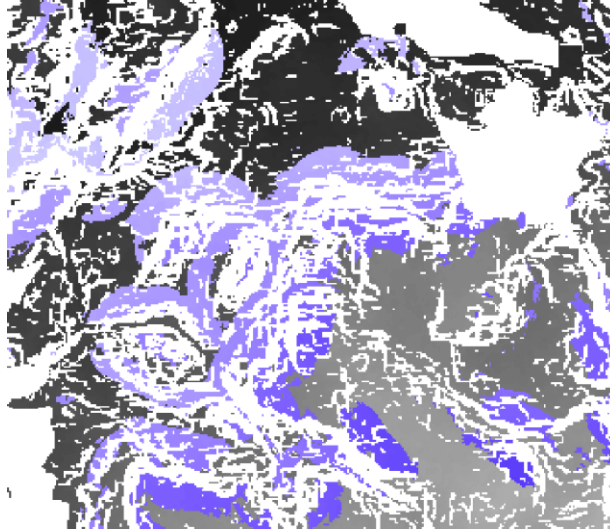


Figure 30: Zones propices pour la création des STEPs.

- QGIS : L'outil équivalent de « Focal Statistics » dans GRASS se nomme « r.neighbors ». Cet outil n'accepte que des nombres impaires de pixels. Le nombre saisi représente le *diamètre* du cercle de voisinage (contrairement à « Focal Statistics » où la distance saisie représente le *rayon* du cercle de voisinage). Par exemple, si la résolution des MNTs est de 30 mètres et la distance entre points souhaitée est de 720 mètres, le nombre de pixels à saisir est de $2 \times (720 \text{ m} / (30 \text{ m/pixel})) = 58$ pixels arrondie à un nombre impair c'est-à-dire 59.

L'outil « R.neighbors » a été conçu pour effectuer des calculs de voisinage inférieurs à 3 pixels. Par conséquent, le lancement d'un calcul de 59 pixels nécessite un temps de calcul important (environ 30 minutes pour un département, donc une heure pour les couches **Max** et **Min**). Concernant l'automatisation du procédé, le modélisateur graphique de QGIS (« Sextante ») ne permet pas de paramétrer des valeurs à l'intérieur de formules de « r.mapcalc ». Il n'a donc pas été possible de créer un algorithme complet pour effectuer des recherches à dénivelé variable.

Cependant, il est tout à fait possible de répliquer la méthode manuellement sous QGIS pour arriver à un résultat quasiment identique à celui du modèle STEP sous ArcGIS en utilisant les formules suivantes dans « R.mapcalc » :

Pour créer les couches **Max** et **Min**
 $(\text{xor}(\text{abs}(A-B), \text{abs}(A-C)) > 120) * A$
 où A est le résultat de la formule 2,
 B = Couche **Max** provenant de « r.neighbors »
 et
 C = Couche **Min** provenant de « r.neighbors »

Formule 3

Pour transformer les cellules 0 en Nodata
 $\text{If}(A=0, \text{null}(), A)$
 où A est le résultat de la formule 3

Formule 4

Autres Considérations

Dans ce qui suit sont relatées quelques remarques sur l'ajout de critères supplémentaires à la démarche implémentée dans ce modèle :

Cours D'Eau

La proximité au cours d'eau représente un critère essentiel pour la sélection de sites potentiels. Ce critère pourra s'intégrer le plus logiquement entre les blocs « Zones protégées », « Traitement MNT » et le bloc « Ciblage » afin d'extraire les cellules répondant au critère « proximité à un cours d'eau » avant le calcul.

Ce procédé pourra se réaliser en appliquant une Zone « tampon » ou « buffer zone » pour chaque cours d'eau intéressant basé sur « le remplissage de 6 mois », puis par l'extraction par masque des cellules qui coïncident avec ces zones « tampon ».

Raccordement

Les points de raccordement électrique sont disponibles mais ne sont pas téléchargeables au Géoportail. La création d'un géo processus pour isoler les zones proches au raccordement est faisable, mais son implémentation dans le cadre de la présente étude n'a pas été possible en raison de l'absence de données.

Quelques notes sur le Modelbuilder

Dans le cadre d'ArcGIS, le développement de modèles se distingue du traitement manuel sur plusieurs niveaux. Il est notamment plus important d'avoir un répertoire bien organisé avec des dossiers ciblés pour recevoir les données d'entrée, de sortie, et de données intermédiaires qui pourraient servir d'indicateurs du bon déroulement du processus. Ci-après est présenté le répertoire référencé dans le modèle STEP.

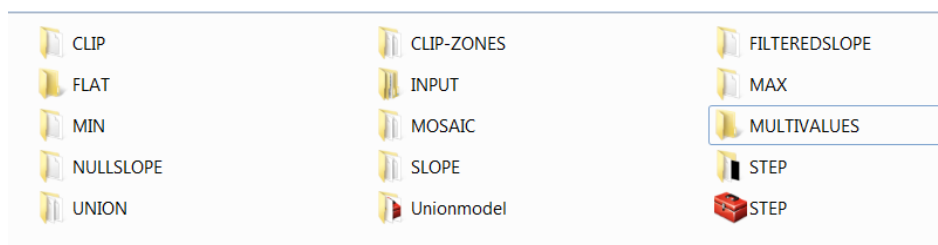


Figure 31: Répertoire des données du modèle STEP

Le tableau suivant présente un descriptif de toutes les données utilisées dans le modèle STEP.

Tableau 2: Données utilisées dans le modele STEP

Nom	Bloc	Description	Type
MNT1,2,3,4	Traitement MNT	Modèles numériques de terrain en dalles provenant du site d'ASTER	Raster Dataset
Zones Protégées	Zones Protégées - Model	Couches vecteur représentant diverses zones protégées par des lois de l'environnement	Workspace
Feature Class 1	Zones Protégées - Sub Model	« shapefiles » individuels répertoriés (znief1, znief2 etc)	Feature Class
Feature Class 2	Zones Protégées - Sub Model	« shapefiles » individuels après réparation de géométrie	Feature layer
Output Values	Zones Protégées	Table temporaire répertoriant les zones protégées	Multiple Value
Union	Zones Protégées/Nettoyage	Union géométrique des zones protégées	Feature Class
Limite_Dep	Nettoyage	Limite du département	Shapefile
MOSAIC	Traitement MNT	Mosaïque de dalles MNT	Raster Dataset
Extracting Polygon	Nettoyage	Polygone d'extraction figurant la limite du département moins les zones protégées	Feature Class
CLIP	Nettoyage	Modèle numérique de terrain du département	Raster Dataset
ClipZones	Nettoyage/Pente	Modèle numérique de terrain figurant la limite du département moins les zones protégées	Raster Dataset
Clipzonelam	Pente	Projection en Lambert 93 de ClipZones	Raster Dataset
Slope	Pente	Couche de pente de Clipzonelam	Raster Dataset
fillslope	Pente	Zones planes	Raster Dataset
Nullslope	Pente/Zones STEP	redéfinition des 0 de fillslope en valeurs NoData	Raster Dataset
Max	Zones STEP	Couche statistique de valeurs maximales	Raster Dataset
Min	Zones STEP	Couche statistique de valeurs minimales	Raster Dataset
Denivele	Zones STEP	Paramètre de dénivelé	Double
Pente Max	Pente	Paramètre de pente maximale	Double
Distance	Zones STEP	Paramètre contenant options de distance	Neighborhood

Mise en Oeuvre

Grace au modèle STEP, il est possible de prospecter sur plusieurs départements avec divers paramètres dans un délai raisonnable. Dans le cadre de la présente étude cette démarche n'a pas été mise en œuvre de manière extensive à tous les départements. Cependant des applications pilotes ont été réalisées sur les départements du Cantal, de l'Averron, de la Creuse, et de la Haute-Loire. Pour chaque département deux variantes ont été réalisées en gardant le ratio L/H inférieur à 6) :

Tableau 3: Variantes de calcul pour les quatre départements retenus

Parametres	Variante 1 (v1)	Variante 2 (v2)
Denivelé Min (H)	120 m	300 m
Distance Max (L)	720 m	1800m
Pente Max	10 deg	10 deg
L /H	6	6

Les données et résultats sont présentés dans le support numérique livré en annexe à ce rapport.

Les figures 32 à 39 présentent les cartes des zones favorables établies pour les quatre départements par le modèle STEP développé dans le présent rapport. A signaler que, en raison de l'ambiguïté concernant les zones protégées à éliminer, les cartes des départements n'ont pas pris en compte ce paramètre. A signaler également qu'un grand nombre de sites retenus par SmE pour étude de détail tombent dans les zones identifiés par le présent modèle (Fig. 40, 41 et 42) Ce constat constitue une première validation de la démarche adoptée dans ce modèle.

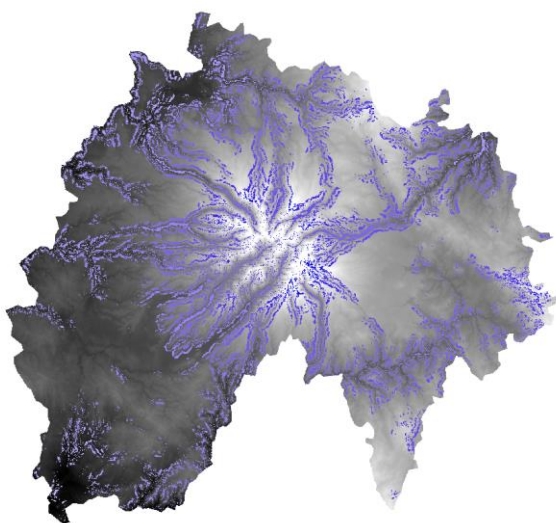


Figure 32: Cantal: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)

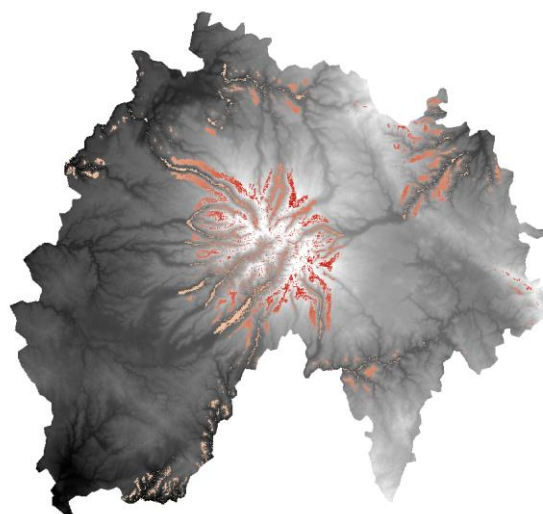


Figure 33: Cantal: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)

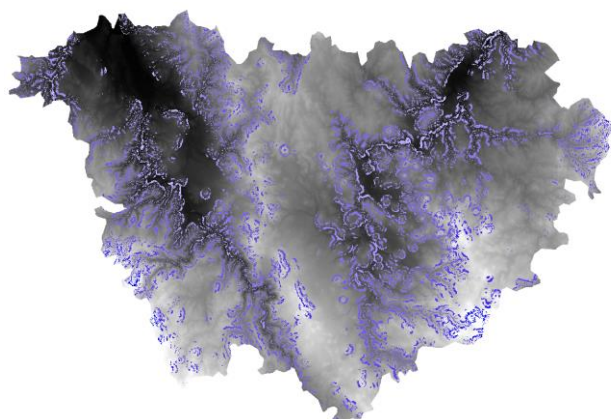


Figure 34: Haute-Loire: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)

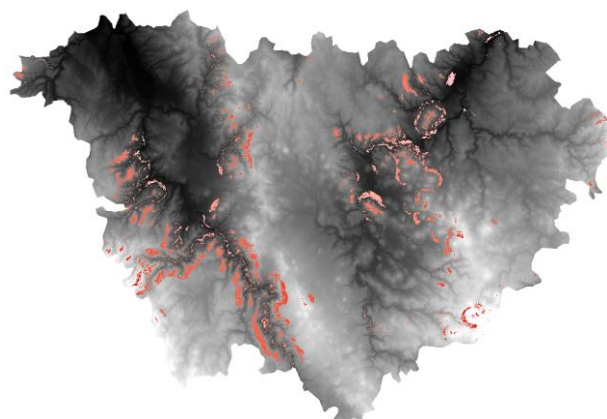


Figure 35: Haute-Loire: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)

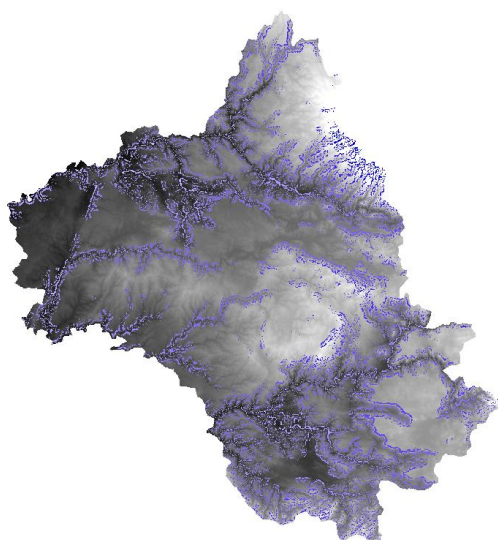


Figure 36: Aveyron: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)

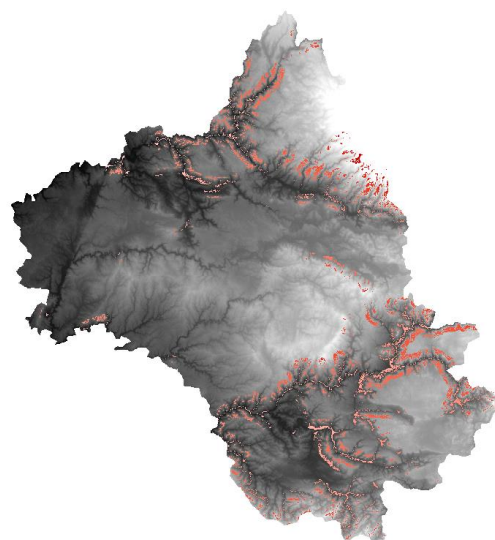


Figure 37: Aveyron: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)

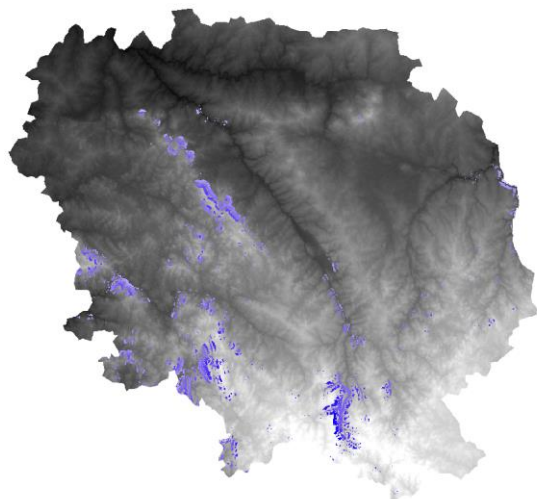


Figure 38: Creuse: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v1)

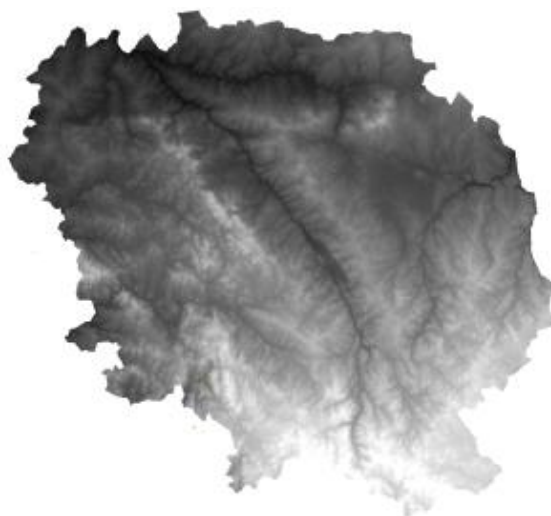


Figure 39: Creuse: Zones favorables pour sites potentiels STEP (v2)

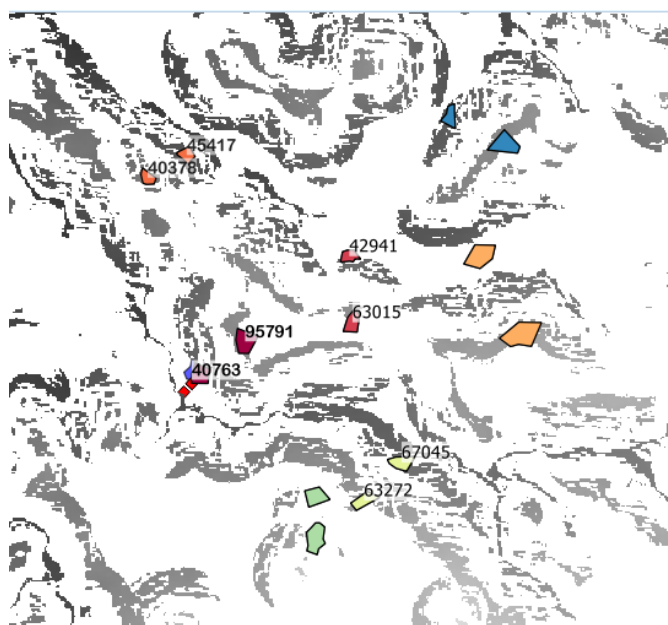


Figure 40: Haute-Loire: Sites proposés par SmE superposés sur couche créée par le modèle STEP

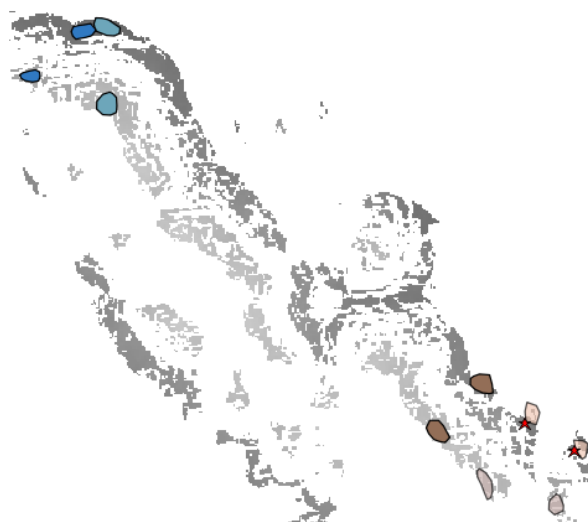


Figure 41: Creuse: Sites proposés par SmE superposés sur couche créée par le modèle STEP

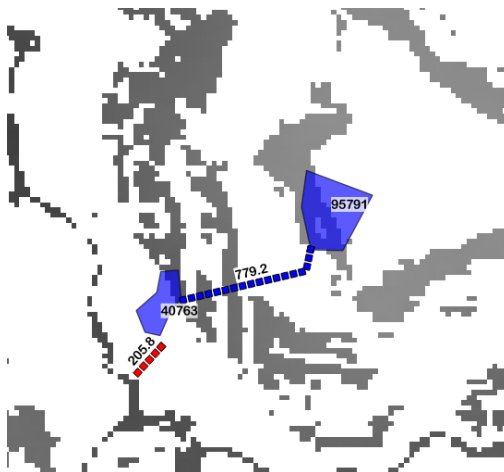


Figure 42: Site de Chabreyres et couche crée par le modele STEP

Il est à signaler que pour utiliser le modèle STEP, en plus du module de base d’ArcGIS, il est nécessaire d’acquérir également les modules spécialisés suivants :

- Spatial Analyst
- Data Management
- Analyst.

Terrassement

La démarche SIG décrite ci-dessus a permis d’établir les zones propices pour la réalisation de STEP basé sur un certain nombre de critères physiques, économiques, juridiques et administratifs. Cependant, un des facteurs décisifs pour le choix définitif de sites est le coût en génie civil, représenté en grande partie par l’optimisation des volumes de déblai /remblai. Dans le présent travail, ce calcul a été réalisé sur le site Chabreyres retenu par SmE.

Préparation de surfaces

Civil 3D exige que les surfaces à traiter soient présentées sous un format TIN (Triangulated Irregular Network) qui peut être généré à partir d’outils d’importation de données SIG sur Civil3D. Cette démarche a été faite en deux temps: une numérisation manuelle des contours en utilisant ArcSCAN, suivie d’une importation en utilisant l’outil “import from GIS Data” sur Civil3D.

Utilisation de ArcSCAN

La précision de 30 mètres des MNTs d'ASTER est insuffisante pour effectuer des calculs de terrassement. Les contours ont donc été informatisés à partir de la carte topographique scannée au 25 millième de l'IGN (Dénotée carte « SCAN 25 ») avec l'aide d'ArcSCAN.

ArcScan n'accepte que des rasters de type binaire (noir et blanc) ce qui n'est pas le cas du « SCAN 25 ». La carte « SCAN25 » comporte trois bandes de couleurs : Rouge, Bleu et Vert (Fig. a) . La bande verte a donc été isolée pour éliminer un des fonds problématiques et rapprocher la carte au format binaire (Fig. b).

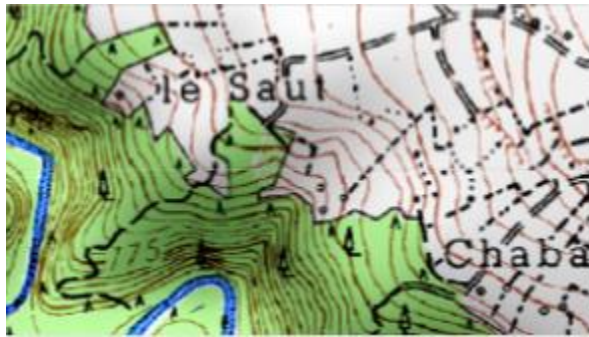


Figure 43: image en trois bandes d'origine (SCAN25)

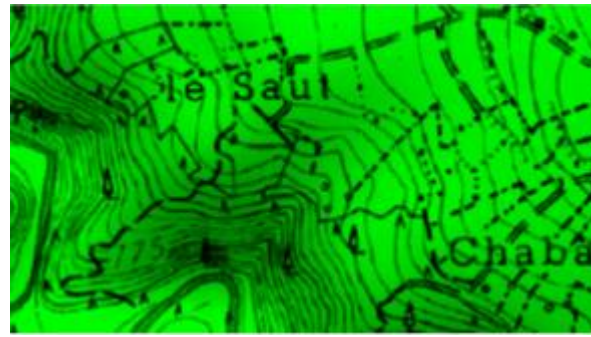


Figure 44: Image en bande verte isolée

Une fois la bande verte isolée, l'image peut être reconvertie en format noir et blanc. Ce format permet, grâce à un reclassement successif de l'histogramme³ des gris (Fig 47 et 48), de produire de proche en proche, les tracés continus des contours (Fig. 45 et 46), nécessaires pour la numérisation opérée par ArcScan.

Une fois les images reclassées préparées, l'algorithme d'ArcScan permet de suivre un tracé de cellules à partir d'une position définie par l'utilisateur jusqu'à l'interruption du tracé. A noter qu'il existe aussi des options pour améliorer la définition des contours en épaississant les tracés de cellules et en réduisant l'intervalle de tolérance de chaque interruption.

Après numérisation de chaque contour, il est nécessaire d'ajouter un champ " cotes" dans la table d'attributs pour les altitudes et d'y entrer les valeurs respectives.

³L'axe des x dans l'histogramme figure des valeurs de 0 (noir) à 255. En classant ces valeurs en 2 catégories, il est possible d'extraire des couche multiples pour avoir des rasters pour différencier les contours des zones claires ainsi que des raster pour différencier les contours des zones sombres.



Figure 45: Contours extraits de zones claires



Figure 46: Contours extraits de zones sombres

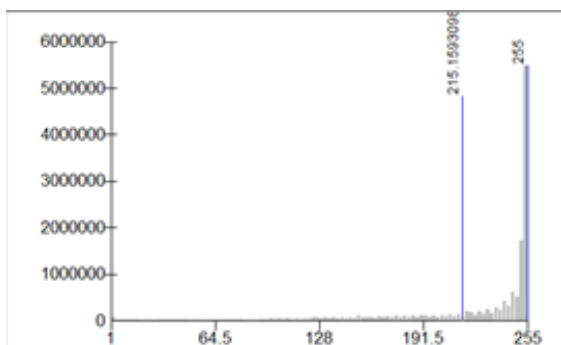


Figure 47: Histogramme des gris image en sombre

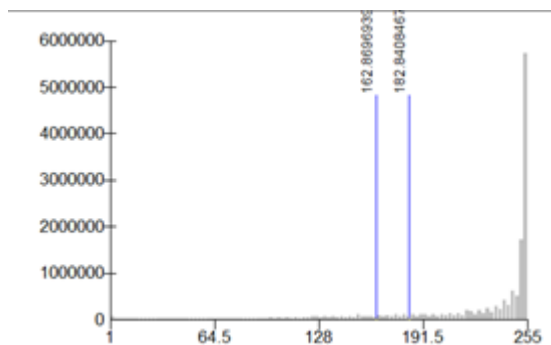


Figure 48: Histogramme des gris image zones claires

Import de données sur Civil3D

Cet import concerne deux types de données à importer:

- Les contours à convertir en surface TIN
- Les polygones SIG délimitant les superficies des bassins

Il est important de signaler que la projection joue un rôle primordial pour l'importation des données à travers les plateformes SIG et Civil3D. La projection adoptée dans le cadre du présent travail par ces deux logiciels est la projection Lambert 93 EPSG 2154.

Les contours ont été importés en utilisant la commande « Create surface from GIS data ». Cette commande permet d'associer l'attribut de cotes défini par le SIG à la propriété Civil3D « elevation » pour ensuite calculer une surface TIN, voir ci-dessous :

GIS Field	Civil3D Property
Default:Contours	
Cotes	Elevation
Geometry	

Une fois l'import complété la surface TIN peut être rendu en 3D (Fig. 49). On peut y distinguer les cours d'eau ainsi que le plateau sur lequel se situera le bassin supérieur du site Chabreyres.

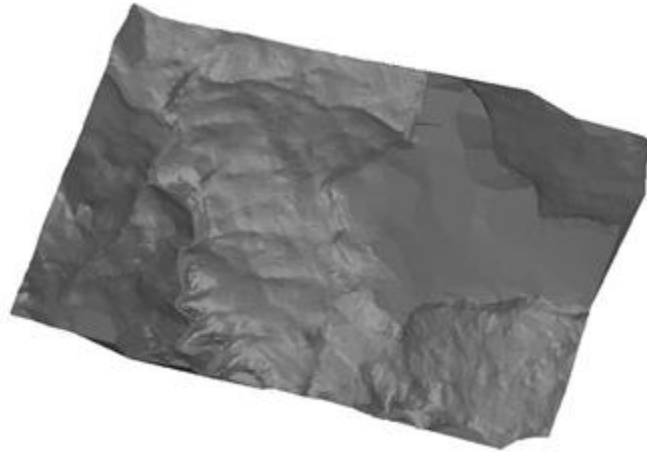


Figure 49: Surface TIN convertie en 3D du site Chabreyres

En ce qui concerne le deuxième type de données, la commande Mapimport sert à importer des données SIG vectoriels pour les convertir au format Poly ligne AutoCAD. On peut constater que les données importées ainsi que la plateforme d'import ont la même projection (Fig. 50).

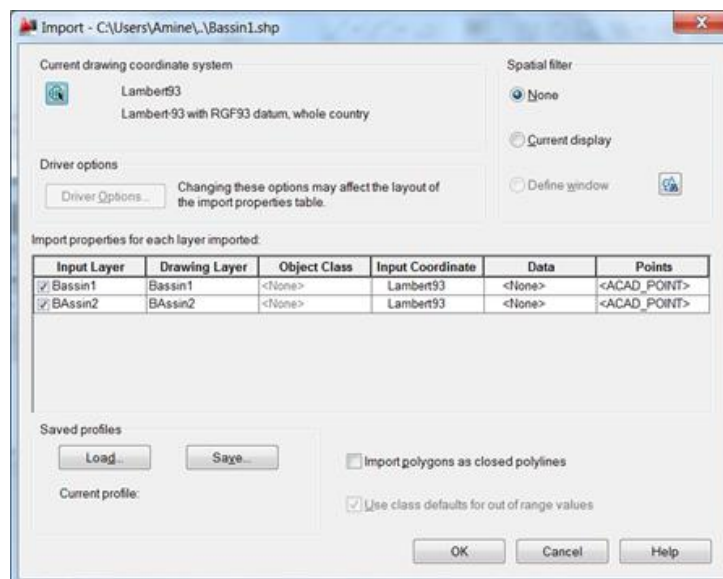


Figure 50: Commande « Mapimport »

Après validation, les polygones délimitant les bassins devraient correctement se superposer sur la surface (Fig 51).



Figure 51: Superposition des bassins sur la surface topographique

Calcul des Volumes

Il est important ici de faire une distinction entre le volume de stockage, le volume géométrique et le volume de terrassement. Le volume *de stockage* dépend de la production énergétique envisagée. Le volume *géométrique* dépend de la géométrie du bassin et doit être supérieur au volume de stockage pour fournir cette production. Enfin, le volume *de terrassement* représente les volumes de sol à déblayer et à remblayer pour construire le bassin.

L'objectif étant d'estimer des volumes de terrassement, les volumes de stockage et les volumes géométriques deviennent des critères à prendre en considération et non des objectifs en soi.

Critères et Digue « Type »

L'étude de génie Civil pour ce stade initial de recherche développement du projet SunHydro n'est pas encore disponible. Il a donc été nécessaire de définir une digue « type » pour permettre le calcul des volumes. La documentation disponible sur le chantier 3, notamment le CDCF ainsi qu'une étude réalisée par le Melbourne Energy Institute (Australie)⁴ et la réglementation Française en matière de barrages ont été pris comme référence pour la définition de la digue type. Les éléments extraits de ces références sont comme suit:

⁴Pumped Hydro Energy Storage in Australia

- CDCF
 - hauteur de marnage (7 mètres, environ)
 - volume de stockage
 - recommandations sur les classes de digue à respecter (classe C et D, < 20 mètres)
 - cycle de temps production (6 heures)
 - Puissance (12 MW)
 - Dégagement pour prendre en considération la revanche (run-up). (> 1,5 mètres)
- Melbourne
 - Pente type de digues (1,3 à 1)
 - Recommandations sur la digue type
- Règlementation Française
 - Classement des digues
 - les éléments pour lever les ambiguïtés concernant la définition de la « hauteur de la digue »;



Figure 52: Digue « Type »

Le volume de stockage est fonction du dénivelé. Il est gouverné par les formules suivantes:

$$E = \mu mgh$$

$$E = Pt$$

$$M = \rho V$$

où t est le cycle de turbinage, P est la puissance, μ est un facteur de rendement pour la turbine ou du pompage, ρ est la densité, V le volume, M la masse, g l'accélération de la gravité, h le dénivelé, E l'énergie produite. Ainsi selon le Cdcf pour le site Chabreyres,

$t = 6$ heures, $P = 12$ MW ; $h = 50$ m et un rendement de 82% selon le CdCf.

$$(12 \cdot 10^6) W \cdot 21600 \text{ s} = 0.82 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot V \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 150 \text{ m}$$

$$V = 215000 \text{ m}^3$$

Le volume géométrique est une fonction du niveau de marnage. Il existe deux méthodes pour estimer ce volume pour des formes irrégulières, la méthode de cônes et la méthode de superficie d'extrémité moyenne.

Méthode de cônes:

$$V = (1/3) \cdot h \cdot (A_1 + A_2 + (A_1 \cdot A_2)^{0.5})$$

Méthode de superficies d'extrémité moyenne:

$$V = [(A_1 + A_2)/2] \cdot h$$

La précision de ces deux méthodes dépend de l'intervalle de discrétisation adoptée. Pour un calcul approximatif, on peut utiliser la moyenne entre la superficie du plan d'eau à hauteur maximale et la superficie du fond du bassin (Tab. 4). Pour un calcul plus précis, on procède à une discrétisation de la hauteur plus ou moins fine (Tab. 5). Il existe une fonction dans Civil3D nommée « StageStorage » pour effectuer ces calculs à haute résolution.

A noter que les deux méthodes, quand elles ne sont pas incrémentées à petites intervalles, conduisent à une surestimation du volume.

Pour le Bassin Haut:

Tableau 4: Bassin Haut : Volume géométrique pour un incrément de 7 metres

h_{marnage}	7	m	Méthode des Cônes
h_{digue}	9.2	m	
Volume	239699.8	m^3	Surface d'extrémité moyenne
Volume	240170	m^3	
A1	30597	m^2	
A2	38023	m^2	

Tableau 5: Bassin Haut : Volume Géométrique pour un incrément de 1 mètre

Contour EL...	Contour Ar...	Incremental Dep...	Avg. End Area L...	Avg. End Area ...	Conic Incremental Vol. (cu. ...	Conic Cumulati...
980.000	53,162.84	0.000	0.00	61608.88	0.00	54682.72
981.000	34,632.66	1.000	43897.75	105506.64	43568.12	98250.84
981.000	51,892.88	0.000	0.00	105506.64	0.00	98250.84
982.000	35,751.86	1.000	43822.37	149329.01	43572.52	141823.36
982.000	50,633.13	0.000	0.00	149329.01	0.00	141823.36
983.000	36,882.08	1.000	43757.61	193086.61	43576.42	185399.79
983.000	49,383.58	0.000	0.00	193086.61	0.00	185399.79
984.000	38,023.32	1.000	43703.45	236790.06	43579.88	228979.67
984.000	48,144.12	0.000	0.00	236790.06	0.00	228979.67
985.000	39,175.58	1.000	43659.85	280449.91	43582.88	272562.55

Le Tab. 5 montre qu'en considérant une altitude de référence de 977 mètres (fond du bassin) le volume à 7 mètres de remplissage et une altitude de 984 mètres, serait de 236790 m³ selon la méthode de superficies moyenne et de 228989 m³ selon la méthode de cônes. Pour le Bassin Bas:

Tableau 6: Bassin Bas: Volume Géométrique pour un incrément de 7 mètres

h _{marnage}	7	M
Volume	245710	m ³
Volume	246228.5	m ³
A1	31228	m ²
A2	39123	m ²

Tableau 7: Bassin Bas: Volume géométrique pour un incrément de 1 metre

Contour EL...	Contour Ar...	Incremental Dep...	Avg. End Area L...	Avg. End Area ...	Conic Increment...	Conic Cumulati...
822.000	36,755.23	1.000	26958.52	153354.83	26344.17	147617.34
822.000	20,075.60	0.000	0.00	153354.83	0.00	147617.34
823.000	37,933.74	1.000	29004.67	182359.50	28535.13	176152.47
823.000	23,609.76	0.000	0.00	182359.50	0.00	176152.47
824.000	39,123.24	1.000	31366.50	213725.99	31041.76	207194.23
824.000	26,449.15	0.000	0.00	213725.99	0.00	207194.23
824.000	0.30	0.000	0.00	213725.99	0.00	207194.23
825.000	40,323.72	1.000	20162.01	233888.00	13477.83	220672.05
825.000	29,537.33	0.000	0.00	233888.00	0.00	220672.05

Le Tab. 7 montre qu'en considérant une altitude de référence de 817 mètres (fond du bassin) le volume à 7 mètres de remplissage et une altitude de 824 mètres, serait est de 213726 m³ selon la méthode de superficies moyenne et de 207194 m³ selon la méthode de cônes

Volumes de terrassement sur Civil 3D

La démarche utilisée pour calculer les volumes de terrassement est basé sur la comparaison de (i) la surface « bassin » et (ii) la surface du terrain naturel.

La définition de la surface « bassin » à partir des polygones importés du SIG est réalisé selon la chronologie indiquée dans la Figure 53.

Le polygone importé du SIG correspond au coin A du profil de la digue (Fig. 53).

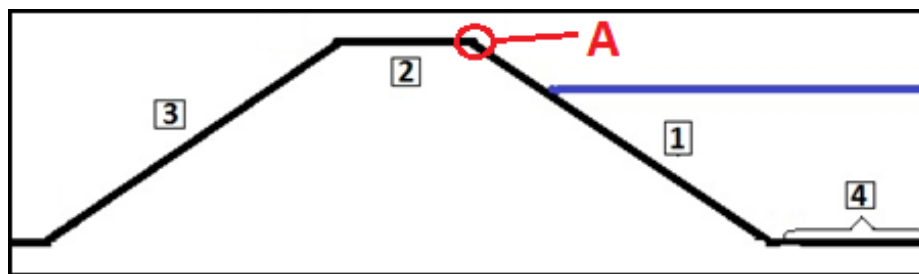


Figure 53: Etapes pour définir la surface TIN « bassin »

L'outil utilisé pour la réalisation du calcul terrassement est "Grading Creation Tools" (Fig. 54) disponible sur Civil3D, et qui offre les trois fonctionnalités suivantes:

- "Grade to distance" qui permet de traiter les talus en spécifiant des valeurs pour la pente et la distance, utilisée pour les étapes 1 et 2 (Fig. 55 et Fig. 56)
- "grade to surface" qui permet de traiter les talus en spécifiant une valeur de la pente et qui laisse le logiciel déterminer la distance nécessaire pour rejoindre la courbe de niveau associée au terrain naturel. Cette fonctionnalité a été utilisée pour l'étape 3 (Fig. 57)
- "Infill" qui permet de simuler l'excavation du bassin, utilisé pour l'étape 4. (Fig. 58).

Les valeurs adoptées pour chacune des étapes susmentionnées dans le cadre du site Chabreyres sont comme suit:

Tableau 8: Valeurs adoptées pour définition de la surface « Bassin »

Paramètre	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4
pente	1,3 : 1	Horizontale	1,3:1	-
distance	11,7	5	Variable	-

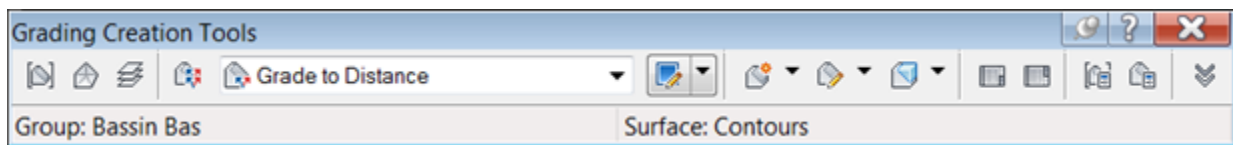


Figure 54: Fenêtre « Grading Tools »

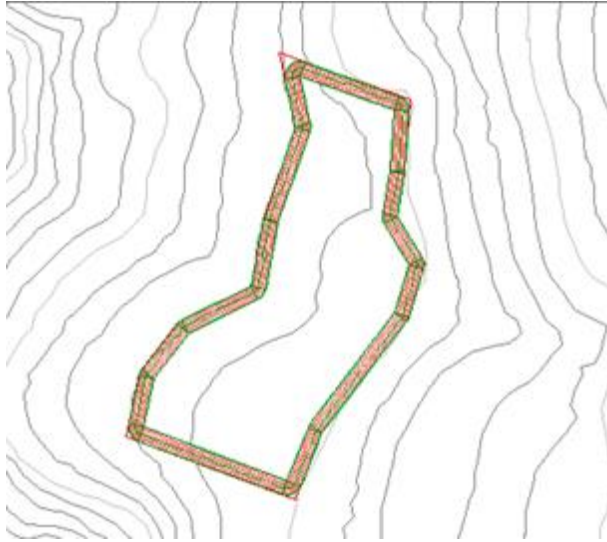


Figure 55: Etape 1 : « Grade to distance » pour calculer le talus interne .



Figure 56: Etape 2 : « Grade to distance » pour calculer la partie supérieure horizontale



Figure 57: Etape 3 : « grade to surface » pour rejoindre le terrain naturel

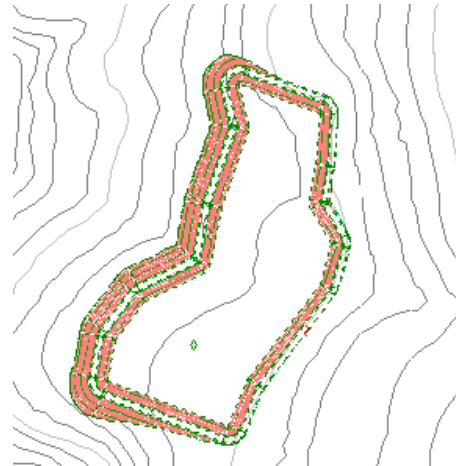


Figure 58: Etape 4 : « Infill » pour simuler l'excavation

La figure 59 montre une présentation tridimensionnelle du bassin (Bassin Bas) après dessin des talus.

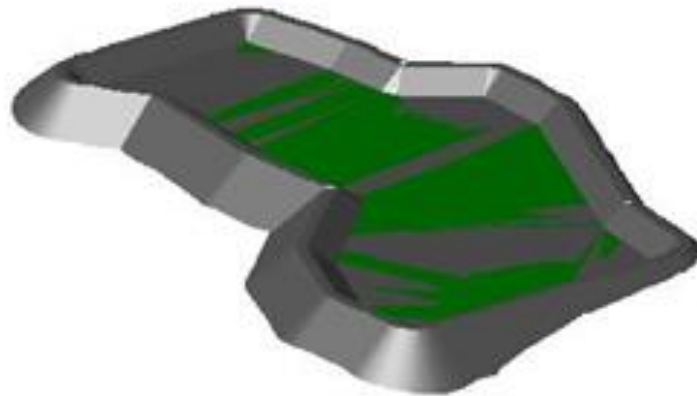


Figure 59: Représentation tridimensionnelle du bassin

Une fois ces étapes achevées et le bassin dessiné, l'outil « Grading Volume » calcule automatiquement le volume de déblai et de remblai correspondant. Il permet également de déterminer le niveau d'enfouissement nécessaire pour équilibrer les déblais remblais ou les faire converger vers une valeur prédéfinie (Fig. 60 et Fig. 61).

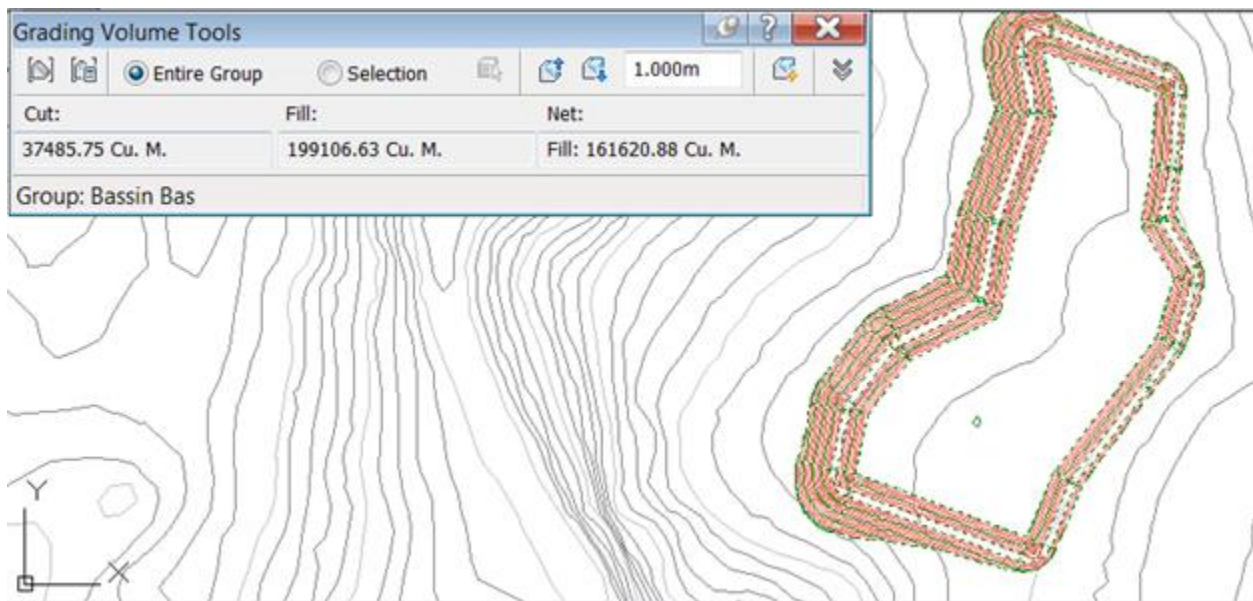


Figure 60: Avant optimisation de volumes de déblai/remblai

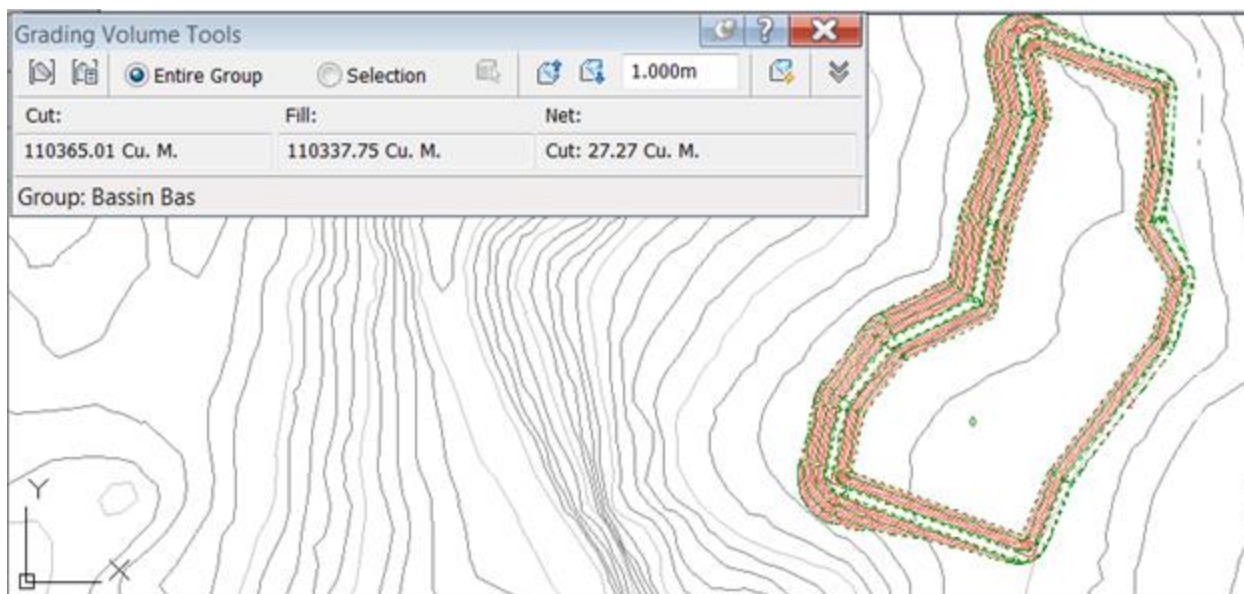


Figure 61: Apres optimisation de volumes déblai remblai

Les tableaux 9 et 10 présentent l'ensemble des résultats de calculs des volumes de terrassement pour le bassin haut et le bassin bas respectivement. Les tableaux montrent que dans le cas d'une optimalité déblais/ remblais (différence quasi nulle), la hauteur des digues dépasse en général la hauteur limite fixée par la réglementation Française des barrages pour les digues de classe C (Cas 1). Pour rester dans cette classe il a été proposé de fixer la hauteur de la digue à une valeur acceptable à la réglementation et de déterminer les volumes de déblais/ remblais qui en résultent (Cas 2). Pour chaque cas, deux tests ont été effectués, le premier en utilisant la surface provenant des contours numérisés à partir de la carte scannée de l'IGN, et le deuxième en utilisant la surface provenant des contours interpolés à partir du MNT d'ASTER. On peut constater que les différences de volumes de terrassement calculés sont relativement proches. Ceci permet de conclure que l'usage des MNT ASTER peut donner une idée suffisamment précise des volumes de terrassement pour faire des études de sites comparatives.

Tableau 9: Bassin Bas Chabreyres: Tableau de Synthèse

Cas	TIN	V (m3)	Deblai (m3)	Remblai(m3)	Net (m3)	Digue (m)	Classe	Deniv (m)
1	IGN	207160	110397	110424	~0	16	B	153
	ASTER	207160	117867	117867	~0	16	B	151
2	IGN	207160	335110	32460	302650	9	C	156
	ASTER	207160	315188	40646	274541	9	C	153.6

Tableau 10: Bassin Haut Chabreyres: Tableau de Synthèse

Cas	TIN	V (m3)	Deblai (m3)	Remblai (m3)	Net (m3)	Digue (m)	Classe	Deniv (m)
1	IGN	240000	85768	85785	~0	12	B	153
	ASTER	240000	100157	100165	~0	12	B	151
2	IGN	240000	173054	40325	132729	9	C	156
	ASTER	240000	189805	49936	139869	9	C	153.6

Conclusions

Le travail effectué au cours de ce stage a porté sur l'élaboration d'une démarche d'(i) établissement de zones favorables pour la réalisation de STEP sur des critères de dénivelé et de distance donnés, et le (ii) calcul et l'optimisation de volumes de déblai/remblai pour les sites choisis.

Dans l'objectif de poursuivre et d'améliorer ce travail, Il est recommandé de :

- Ajouter le traitement de projection au début du modèle
- Etendre le tableau de synthèse pour inclure d'autres sites en utilisant les surfaces provenant du site ASTER dans le but d'établir une comparaison de volumes de terrassement.
- Réaliser un calcul plus précis de volume de stockage
- Pousser les efforts de pré-dimensionnement de digues (calcul de structures)
- Compléter le modèle SIG en incluant le critère de « proximité a cours d'eau » et de « proximité au raccordement » et améliorer le bloc « Zones Protégées »
- Créer un modèle similaire sur QGIS ou GRASS.
- Délimiter les zones STEP supérieurs à une superficie donnée « raster to vector ».
- Evaluer les fonctionnalités de calcul déblai/remblai à partir de surfaces TIN sur ARC GIS.

Ce travail constitue une première étape pour effectuer une prospection globale en termes de choix de sites et de cout en génie civil pour la réalisation de petites STEP. Les recommandations en conclusion auraient pour objectif de lier les deux volets principaux de cette étude et de pouvoir faire de la prospection ainsi que des estimations de déblai/remblai à partir d'un seul outil (ARCGIS).