



Année 2001-2002

PROJET de 3^{ème} année:

Octobre 2001 – Avril 2002

**Génération d'un Modèle Numérique de Terrain
à partir d'une carte munie de lignes de niveaux**

Etudiants :

Coustillac Laurent, Heit Sylvestre

Réalisé à l'ESSI

Encadreurs :

Fernandes Gilbert, Lingrand Diane

1	INTRODUCTION	3
2	CONTEXTE.....	4
3	CAHIER DES CHARGES.....	5
3.1	CALIBRATION	6
3.2	DÉTECTION DES LIGNES DE NIVEAUX.....	6
3.3	ESTIMATION DE L'ALTITUDE DE CHAQUE POINT (UNE FOIS LES LIGNES DE NIVEAUX DÉTECTÉES)	7
3.4	INTERPOLATION.....	7
4	PLANNING.....	8
5	TRAVAIL EFFECTUE	9
5.1	DÉTECTION DES LIGNES DE NIVEAUX	9
5.2	MÉTHODE D'AFFINAGE DES LIGNES DE NIVEAUX.....	11
5.3	ÉLIMINATION DES POINTS ISOLÉS	12
5.4	GÉNÉRATION DU MNT – INTERPOLATION.....	12
5.4.1	<i>Equation aux Dérivées Partielles.....</i>	<i>12</i>
5.4.2	<i>Méthode numérique de résolution.....</i>	<i>14</i>
6	INTERFACE HOMME MACHINE.....	16
6.1	DÉTECTER LES LIGNES DE NIVEAUX D'UNE CARTE	16
6.1.1	<i>Sélection d'une couleur de référence.....</i>	<i>16</i>
6.1.2	<i>Choix du système de colorimétrie et des tolérances.....</i>	<i>17</i>
6.1.3	<i>Détermination manuelle des altitudes des lignes et correction.....</i>	<i>19</i>
6.2	CALIBRER LA CARTE.....	23
6.2.1	<i>Placer un point de calibration.....</i>	<i>24</i>
6.2.2	<i>Déplacer les points de calibration</i>	<i>24</i>
6.2.3	<i>Effectuer la calibration</i>	<i>25</i>
6.3	GÉNÉRATION DU MNT	26
7	CONCLUSION	28
8	BIBLIOGRAPHIE	29

1 Introduction

Le but de ce projet est de réaliser une application en Java permettant d'analyser une carte géographique de manière à en extraire les lignes de niveaux, afin de réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) : une carte des altitudes en chaque point de la carte.

Un utilisateur pourra rectifier l'extraction des lignes de niveaux, car elle ne sera pas parfaite, et devra préciser l'altitude de certains points de référence, notamment les sommets et certaines lignes de niveaux.

Une IHM doit permettre de faciliter ces actions.

2 Contexte

Ce projet est proposé dans le cadre de la commission informatique du Comité Départemental de Spéléologie des Alpes Maritimes (<http://cds06.free.fr/commissions/com-info/com-info.html>).

Les spéléologues sont très demandeurs de ce type de logiciel, car ils cherchent à visualiser en 3D les réseaux souterrains des grottes qu'ils explorent, ainsi que le relief du terrain situé au dessus de la grotte (afin de localiser d'autres entrées par exemple). Des logiciels permettant de visualiser ces informations existent, tel que Vtopo (<http://www.multimania.com/vtopo/index.htm>).

S'il existe des logiciels gratuits pour visualiser un MNT, en revanche se procurer un MNT est très coûteux. Il n'existe pas, à notre connaissance, de logiciel gratuit permettant de réaliser ces MNT à partir de carte numériques (tel que les cartes IGN). Des sociétés d'imageries disposent de logiciels propriétaires effectuant ce travail, et elles les utilisent pour produire et vendre des MNT. Le but de ce projet est de fournir au grand public ce type de logiciel.

3 Cahier des charges

L'objectif est de créer une application permettant de réaliser un MNT à partir d'une carte de randonnée munie de lignes de niveaux.

Un MNT est une sorte de carte des altitudes. Il est réalisé ici en détectant les lignes de niveaux, en déterminant leur altitude, puis en estimant l'altitude de tous les autres points par interpolation. Il est difficile de faire en sorte qu'une telle application détecte parfaitement les lignes de niveaux. Il fallait donc fournir des outils permettant de les retoucher.

La détermination des altitudes des différentes lignes de niveaux se fait manuellement. L'utilisateur doit marquer l'altitude de plusieurs lignes et de certains points, les sommets. On ne fait pas d'analyse de forme pour savoir si un parcours se fait vers le bas ou vers le haut, si bien que ces informations doivent être fournies par l'utilisateur.

En outre, parce que la détection elle-même est imparfaite, l'utilisateur doit corriger lui-même les imperfections. De plus c'est à lui de fixer les paramètres de la détection, qui dépend de la couleur des lignes de niveaux, spécifique à la carte.

KartoMNT est donc destinée à un utilisateur capable de lire une carte, et ayant une connaissance des systèmes d'informations géographiques. Cet utilisateur devra fournir un travail important pour obtenir un résultat de qualité, car ce sera à lui d'affiner la détection des lignes de niveaux.

Nous avons à notre disposition les sources du logiciel Karto. Ce logiciel permet essentiellement de calibrer une carte et de placer des points topographiques. Nous allons pouvoir reprendre la fonction permettant de calibrer la carte à partir d'une liste des points de calibrations dans notre logiciel.

Notons que l'opération la plus difficile est de détecter les lignes de niveaux. Cette opération nécessite une certaine netteté. Or si certaines cartes sont très nettes (images numériques fournies par les organismes officiels), d'autres sont très bruitées, voire jaunies (ce qui est d'autant plus gênant que les lignes de niveaux sont souvent oranges). On ne s'attend pas du tout à obtenir les mêmes performances de détection selon la netteté de la carte. Une carte scannée à la va-vite donnera des résultats imprécis, tout en donnant beaucoup de travail à l'utilisateur.

Notre application, nommée KartoMNT, devait posséder les fonctionnalités suivantes :

- Calibration d'une carte
- Détection des lignes de niveaux
- Estimation de l'altitude de chaque point (une fois les lignes de niveaux détectées)
- Génération du MNT
- Sauvegarde du travail en cours pour permettre de le poursuivre plus tard
- Sauvegarde du MNT et exportation sous différents formats

Il devait également permettre un certain confort d'utilisation. Une IHM faciliterait le dialogue constant de l'utilisateur avec l'application.

Fonctionnalités optionnelles :

En outre deux apports notables seraient les bienvenus, si nous en avons le temps :

- Possibilité de fragmenter le travail sur une carte (c'est-à-dire de regrouper plusieurs MNT générés en travaillant sur plusieurs régions de la même carte)
- Fournir un moyen de visualiser un MNT en 3D.

3.1 Calibration

La calibration est une opération qui consiste à mettre en correspondance les coordonnées de l'espace image (ici les pixels d'une carte de randonnée) avec les coordonnées de l'espace réel.

Dans le cas qui nous intéresse, cela revient à déterminer, pour chaque point de la carte, ses coordonnées géographiques.

Nous disposons des sources du logiciel Karto, qui permettent déjà d'effectuer la calibration.

Cette calibration se fera vraisemblablement par une interface similaire à celle de Karto : l'utilisateur sélectionnera à la souris des points de référence (souvent visibles sur la carte, marqués par de grandes lignes) , marquera leur coordonnées géographiques, et lancera la calibration.

La calibration n'est pas nécessaire pour la détection des lignes de niveaux mais sera nécessaire pour l'interpolation car les dimensions du MNT et le pas d'échantillonnage seront donnés en coordonnées terrain.

3.2 Détection des lignes de niveaux

Cette opération est celle qui pose le plus de problèmes. Il s'agit de détecter, sur une carte, les lignes d'une couleur spécifique. Or les techniques de détections de contours détectent tous les contours, y compris les routes, les écritures, et autres informations.

Il faut donc utiliser une technique de détection de contours qui tienne compte de la couleur des lignes de niveaux

Les résultats sont assez imparfaits, malgré plusieurs techniques utilisées pour améliorer les résultats. Si le seuillage est trop souple, les lignes de niveaux, parfois très serrées, ont tendance à se recouvrir (et on risque ensuite de les confondre) S'il est plus sévère, les lignes de niveaux sont fragmentées, car certains de leurs points sont moins nets que les autres (trop clairs par exemple)

Il est important qu'une ligne de niveaux soit continue et non pas réduite à l'état de pointillés. Ce qui signifie que l'utilisateur devra joindre les fragments de ligne à la main (avec plus ou moins d'application selon le temps dont il dispose et la précision qu'il veut obtenir)

Une image temporaire, contenant les lignes de niveaux détectées, sera superposée (comme un calque) sur la carte, afin que l'utilisateur voie bien où la détection est incorrecte.

Il est clair que cette opération va être délicate, et demandera bien du travail lors de l'élaboration de l'IHM.

L'IHM doit donner la possibilité de rectifier les lignes de niveaux mal détectées :

- ♦ Gommer certaines parties
- ♦ Tracer certaines parties à la main (outil de tracé de lignes, voire de splines)

Ces opérations se déroulent sur un calque distinct de l'image. L'IHM doit donner la possibilité de désactiver le calque contenant l'image ou les lignes de niveaux.

3.3 Estimation de l'altitude de chaque point (une fois les lignes de niveaux détectées)

Une fois que les lignes de niveaux ont été extraites, il est nécessaire de donner des altitudes aux différentes lignes de niveaux. Cette opération doit pouvoir être réalisée de façon conviviale grâce à l'IHM. Les manipulations ne doivent pas être trop lourdes pour l'utilisateur, pour cela il est préférable que l'utilisateur n'ait pas à spécifier les altitudes pour chaque ligne de niveaux, mais plutôt de définir l'altitude de deux lignes et que le logiciel en déduise l'altitude des lignes intermédiaires. Les lignes de niveaux obtenues lors de l'étape précédente ne doivent pas être interrompues; dans le cas contraire l'utilisateur doit joindre les différents morceaux. Le logiciel doit également donner la possibilité de donner l'altitude de points isolés (sommets).

3.4 Interpolation

Une fois que l'on possède les lignes de niveaux munies de leurs différentes altitudes, le logiciel doit donner la possibilité de générer le MNT (altitude en chaque point de la carte) en interpolant les altitudes entre les lignes de niveaux. Cette opération ne nécessite pas à priori d'intervention de l'utilisateur, et pourra être entièrement automatique.

4 Planning

Nous nous sommes réparti le travail selon le planning suivant :

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril
Sylvestre	1	2	4	5			7
Laurent		3		6			

1 Réunions et découverte du sujet

2 Développement interface graphique (ouverture image, boîte de dialogue détection de contour)

3 Test de plusieurs techniques de détection de contours, et seuillage

4 Rédaction du rapport intermédiaire

5 Suite interface graphique (gestion des calques, détermination des altitudes graphiquement...)

6 Interpolations, techniques de correction des lignes de niveaux détectées.

7 Rédaction du rapport et de la documentation utilisateur, préparation de la soutenance.

5 Travail Effectue

5.1 Détection des Lignes de niveaux

Nous avons testé plusieurs méthodes de détection de contours : norme du gradient, seuillage dans l'espace de couleur RGB ou YUV.

Norme du gradient :

Pour calculer le gradient on applique un filtre de Sobel horizontal, puis vertical. Il suffit ensuite de prendre la norme. On garde ensuite les valeurs qui dépassent un certain seuil.

Seuillage:

La détection de contour est réalisée par seuillage en testant si les 3 composantes sont comprises à l'intérieur d'un intervalle autour d'une couleur de référence. Cette détection peut se faire dans l'espace de couleur RGB ou YUV. Le passage de l'espace RGB à l'espace YUV se fait grâce à la transformation linéaire suivante

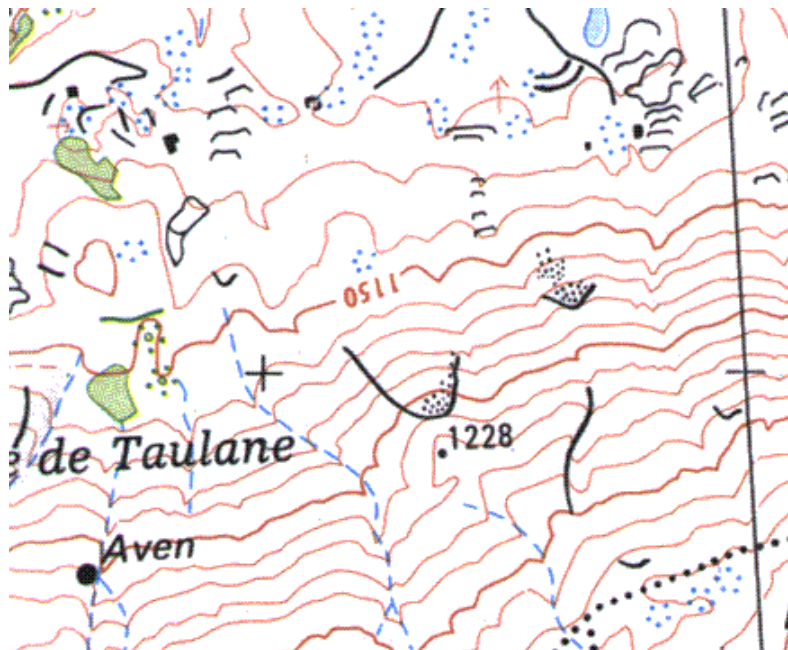
$$Y = 0.257 * R + 0.504 * G + 0.098 * B$$

$$U = -0.148 * R - 0.291 * G + 0.439 * B + 128$$

$$V = 0.439 * R - 0.368 * G - 0.071 * B + 128$$

La composante Y peut s'interpréter comme l'intensité lumineuse

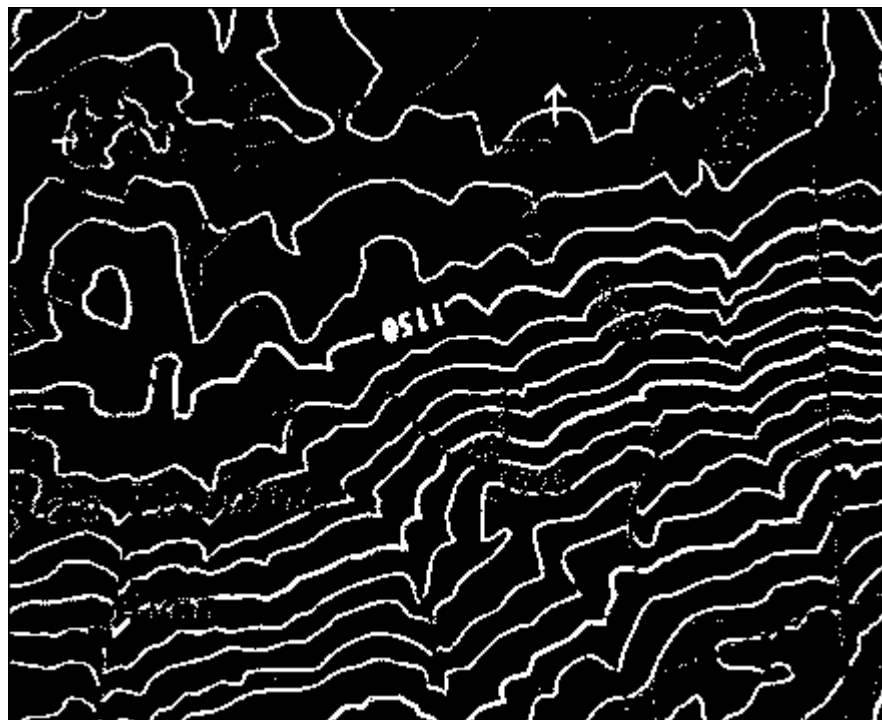
On constate que la détection de contour est de meilleure qualité dans l'espace YUV si on prend un intervalle d'erreur plus important pour Y que pour U et V. Cette méthode permet d'éviter de prendre en compte les ombres de la carte qui correspondent essentiellement à des variations de Y.



Carte initiale



Lignes de niveaux obtenues par la norme du filtre de Sobel



Lignes de niveaux détectées par seuillage dans YUV

5.2 Méthode d'affinage des lignes de niveaux

Un des Problèmes de la détection de contours est que les contours obtenus sont trop épais, ce qui peut provoquer des défauts sur le MNT interpolé. En outre affiner les lignes de niveaux pourra servir plus tard pour joindre automatiquement des lignes interrompues.

La méthode d'affinage des lignes de niveaux est basée sur le principe suivant :

Soit X un ensemble de points (les lignes de niveaux dans notre cas) On efface de l'ensemble X les points dont l'effacement ne déconnecte pas l'ensemble, c'est à dire ne transforme aucune partie connexe en plusieurs parties connexes. Une région connexe est une région pour laquelle tout couple de points peut être relié par un arc entièrement contenu dans la région.

On fait également en sorte de ne pas effacer les points se trouvant à une extrémité d'une courbe pour éviter de réduire une ligne en un point.

L'algorithme est le suivant :

On numérote les points entourant un point P_1 comme ceci :

P3	P2	P9
P4	P1	P8
P5	P6	P7

On suppose qu'un point P est à 1 s'il est dans l'ensemble et à 0 sinon

On note $Z_0(P_1)$ le nombre de passages de 0 à 1 dans l'ensemble ordonné $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9$ et P_2 .

On note $NZ(P)$ le nombre de voisins de P à 1 (8 voisinage)

Le point P_1 est effacé si

$$2 \leq NZ(P_1) \leq 6$$

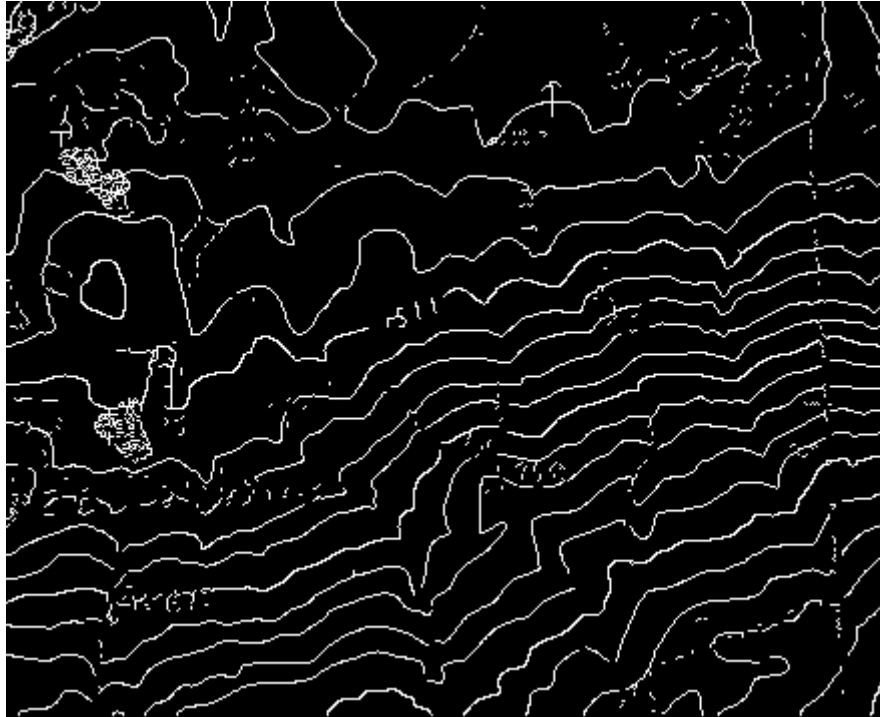
$$\text{et } Z_0(P_1) = 1$$

$$\text{et } (P_2.P_4.P_8 = 0 \text{ ou } Z(P_2) \neq 1)$$

$$\text{et } (P_2.P_4.P_6 = 0 \text{ ou } Z(P_4) \neq 1)$$

L'algorithme est appliqué à l'ensemble des points de l'ensemble X . On réitère le processus jusqu'à ce que l'ensemble X ne change plus.

Voici un exemple du résultat obtenu avec les lignes de niveaux du paragraphe précédent



Lignes de niveaux détectées par seuillage dans YUV affinées

5.3 Elimination des points isolés

Lorsque l'on détecte les lignes de niveaux, il y a souvent du bruit. C'est pourquoi nous proposons d'éliminer les points isolés. La méthode est très simple. Pour chaque point on regarde ses 8 voisins et si aucun des 8 voisins ne fait partie d'une ligne le point est effacé.

5.4 Génération du MNT – Interpolation

Une fois qu'on dispose de toutes les lignes de niveaux et de toutes les altitudes, il est possible de générer le MNT en interpolant au niveaux des points entre les lignes de niveaux.

Nous avons utilisé une méthode utilisant une Equation aux Dérivées Partielles

5.4.1 Equation aux Dérivées Partielles

Soit L l'ensemble des points appartenant aux lignes de niveaux et E l'ensemble des points de la carte (domaine ouvert)

Les lignes de niveaux vont être interpolées par la solution de l'équation :

$$\forall (x, y) \in E - L, \Delta \Psi(x, y) = 0 \quad (1)$$

avec la condition aux limites :

$$\forall (x, y) \in L, \Psi(x, y) = f(x, y) \quad (2)$$

Il est nécessaire d'avoir des conditions aux limites aux bords de la carte. Comme on ne peut pas imposer d'altitude au bord de la carte on impose une que le flux soit nul sur la frontière de la carte (sur $\partial E - L$) :

$$\text{grad}\Psi \vec{n} = 0 \text{ avec } \vec{n} \text{ normale au domaine } E$$

Une des propriétés de l'équation (1) est qu'elle vérifie le principe du maximum.

Principe du maximum :

Soit Ω un ouvert borné de \mathbb{R}^d , $\partial\Omega$ sa frontière et Ψ une fonction continue sur $\overline{\Omega}$ et de classe C^2 sur Ω

$$\text{si } \forall x \in \Omega, \Delta\Psi(x) = 0 \text{ alors } \forall x \in \Omega, \min_{x \in \partial\Omega} \Psi(x) \leq \Psi(x) \leq \max_{x \in \partial\Omega} \Psi(x) = 0$$

Donc si on a un domaine compris entre deux lignes de niveaux l'ensemble des valeurs prises à l'intérieur du domaine est comprise entre la valeur minimale et la valeur maximale atteinte sur le bord du domaine. Ceci est bien une propriété qu'on attend d'une interpolation

Nous allons vérifier dans un cas simple que cette équation réalise bien une interpolation

Considérons le cas unidimensionnel :

$$\Delta\Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = 0 \text{ sur }]A, B[$$

$$\Psi(A) = a \text{ et } \Psi(B) = b$$

$$\text{on a } \frac{\partial \Psi}{\partial x} = c \text{ donc } \Psi(x) = cx + d$$

donc la solution réalise bien une interpolation linéaire

Dans le cas général bidimensionnel il est difficile de démontrer que l'équation réalise bien une interpolation car il faudrait déjà définir ce qu'est une interpolation en 2D (ce qui peut être défini de plusieurs manières) Nous allons ici définir l'interpolation comme la solution Ψ vérifiant les équations de (1) et (2), ce qui nous dispense de démonstration.

L'équation (1) va être résolue par une méthode de point fixe :

$$\Delta\Psi(x, y, t) = \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2)$$

La solution de cette équation converge vers la solution de l'équation (1) ($\frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0$ à l'équilibre)

Cette EDP est discrétisée par une méthode de type différence finie

5.4.2 Méthode numérique de résolution

Approximation de la dérivée seconde

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, y)}{\partial x^2} \approx \frac{\frac{\Psi(x+d, y) - \Psi(x, y)}{\Delta x} - \frac{\Psi(x, y) - \Psi(x-d, y)}{\Delta x}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \approx \frac{\Psi(x+d, y) + \Psi(x-d, y) - 2.\Psi(x, y)}{\Delta x^2}$$

Approximation du Laplacien

$$\Delta \Psi(x, y) = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}$$

$$\Delta \Psi(x, y) \approx \frac{\Psi(x+\Delta x, y) + \Psi(x-\Delta x, y) - 2\Psi(x, y)}{\Delta x^2} + \frac{\Psi(x, y+\Delta y) + \Psi(x, y-\Delta y) - 2.\Psi(x, y)}{\Delta y^2}$$

Développement limité par rapport au temps en t1

$$\Psi(x, y, t + \Delta t) = \Psi(x, y, t) + \frac{\partial \Psi(x, y, t)}{\partial t'}(t_1).\Delta t + o(\Delta t)$$

En substituant

$$\begin{aligned} \Psi(x, y, t + \Delta t) &\approx \Psi(x, y, t) + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} . (\Psi(x + \Delta x, y, t) + \Psi(x - \Delta x, y, t) - 2\Psi(x, y, t)) \\ &+ \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (\Psi(x, y + \Delta y, t) + \Psi(x, y - \Delta y, t) - 2\Psi(x, y, t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{soit } \Psi(x, y, t + \Delta t) &\approx \left(1 - 2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right) \Psi(x, y, t) + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} . (\Psi(x + \Delta x, y, t) + \Psi(x - \Delta x, y, t)) \\ &+ \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (\Psi(x, y + \Delta y, t) + \Psi(x, y - \Delta y, t)) \end{aligned}$$

On peut montrer que ce schéma est stable sous la condition

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \leq \frac{1}{2}$$

L'équation précédente peut se réécrire sous la forme (en supposant $\Delta x = \Delta y$) :

$$\Psi_{i,j,t+1} = (1 - 2a)\Psi_{i,j,t} + a.(\Psi_{i+1,j,t} + \Psi_{i,j+1,t} + \Psi_{i-1,j,t} + \Psi_{i,j-1,t})$$

C'est cette équation qui sera utilisée pour actualiser les points qui ne font pas partie des lignes de niveaux.

Les points sur les lignes de niveaux n'ont pas besoin d'être actualisés. Les points aux bords de la carte seront actualisés d'une manière différente. Ils seront actualisés par simple copie (condition de flux nul):

$$\Psi_{i,0,t+1} = \Psi_{i,1,t}$$

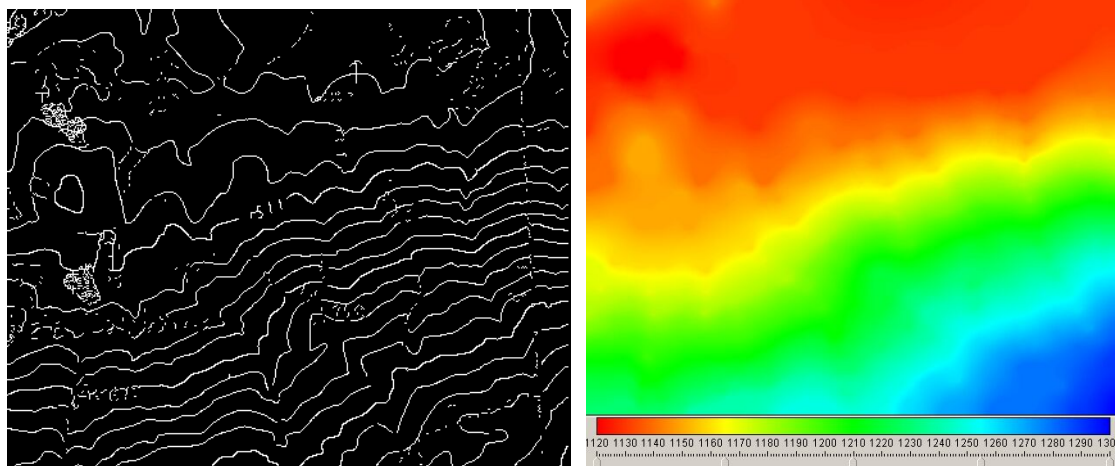
$$\Psi_{i,M,t+1} = \Psi_{i,M-1,t}$$

$$\Psi_{0,j,t+1} = \Psi_{1,j,t}$$

$$\Psi_{iN,t+1} = \Psi_{i,N-1,t}$$

Le problème avec cette méthode est que le temps de calcul est assez long, car il faut attendre que les altitudes « diffusent » à partir des lignes de niveaux, c'est pour cela que nous avons utilisé une méthode multi-résolution (inspiré des méthodes multigrilles). Cette méthode consiste à résoudre d'abord l'équation sur un domaine de taille réduite puis à interpoler la solution pour obtenir une solution à la résolution supérieure. On a une suite de grilles I_0, I_1, \dots, I_N . On passe d'une grille I_k à la suivante I_{k+1} en ne gardant qu'un échantillon sur 2. On résout d'abord l'équation sur la grille I_N puis on interpole la solution obtenue à la résolution supérieure sur la grille I_{N-1} . On part ensuite de cette solution comme condition initiale pour résoudre l'équation sur la grille I_{N-1} . Comme la condition initiale est proche de la solution la convergence est plus rapide. On continue de la même façon jusqu'à la résolution maximale sur la grille I_0 .

L'image suivante montre les lignes de niveaux et la carte des altitudes en fausses couleurs obtenue à partir de ces lignes de niveaux :

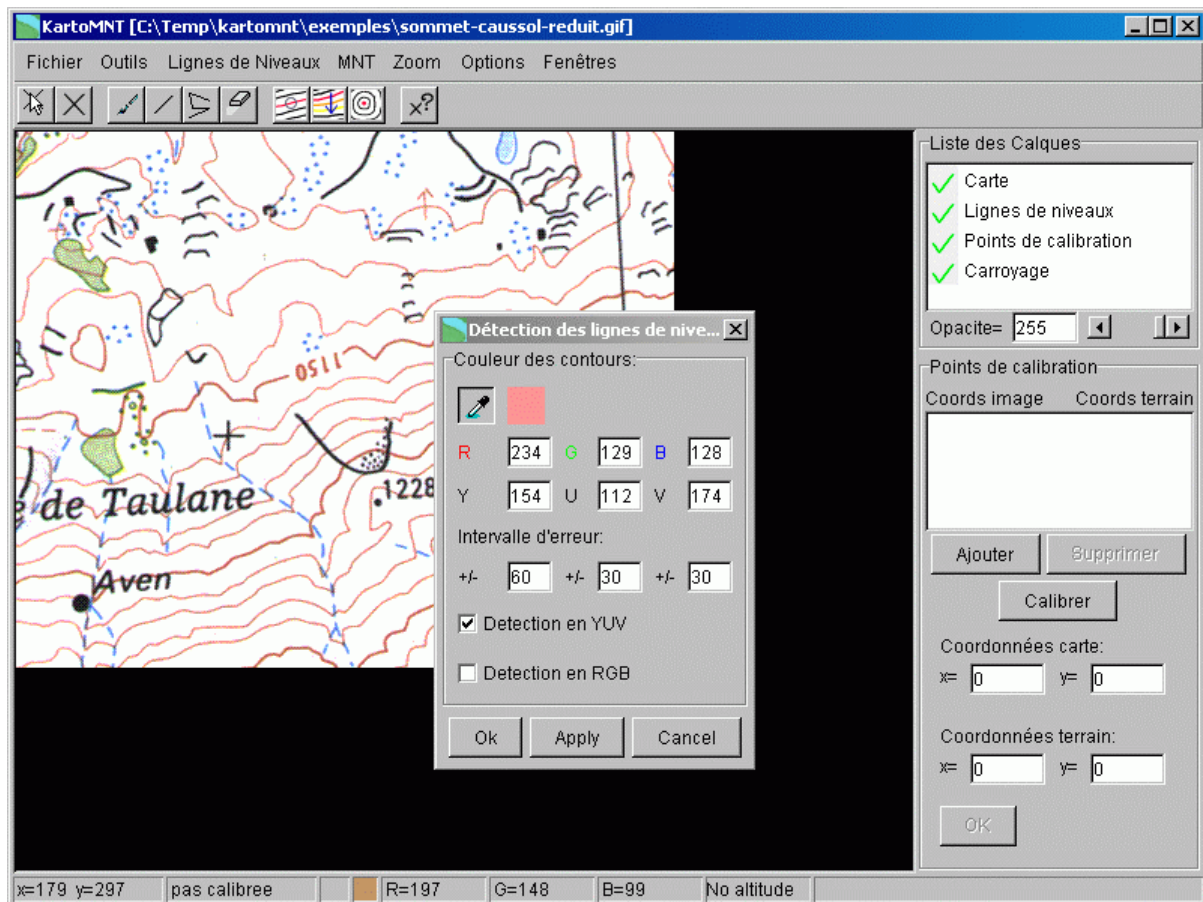


6 Interface Homme Machine

La partie du projet qui nous a pris le plus de temps est L'IHM. Elle a été réalisée en java en utilisant la librairie Swing. Dans cette partie nous allons présenter les différentes parties de l'IHM et leur utilisation, comme nous l'avons fait dans la doc utilisateur : il s'agit donc davantage d'un tutorial que d'une présentation.

6.1 Détecter les lignes de niveaux d'une carte

La détection des lignes de niveaux d'une carte se fait selon leur couleur. Elle se fait en ouvrant la boîte de dialogue de détection des lignes de niveaux, dans le menu Lignes de Niveaux->détection des lignes de niveaux.



Boîte de Dialogue pour la détection de lignes de niveaux

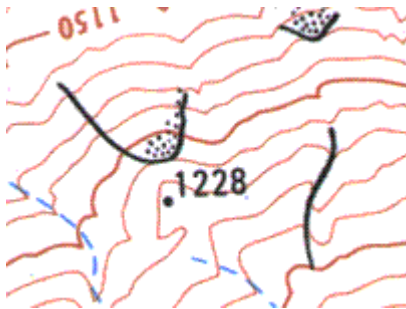
6.1.1 Sélection d'une couleur de référence

Puisque la couleur des lignes de niveaux dépend de la carte (et des conventions du dessinateur) c'est à vous d'indiquer à KartoMNT la couleur approximative d'une ligne de niveaux.

En ouvrant la boîte de dialogue, votre curseur a du prendre la forme d'une pipette. Dans le cas contraire, cliquez sur le bouton indiquant une pipette en haut à gauche de la boîte de dialogue de détection.

Cliquez ensuite sur une ligne de niveaux. La couleur que vous avez choisie s'affiche dans un carré en haut de la boîte de dialogue.

Il est possible que cette couleur soit assez mal choisie. En effet vous avez peut-être cliqué à côté de la ligne (problème qui peut être facilement évité en effectuant un zoom, grâce au menu du même nom), et de plus les lignes de niveaux n'ont pas vraiment une couleur homogène, comme on peut le voir dans ces deux images :



6.1.1.1 Image d'origine



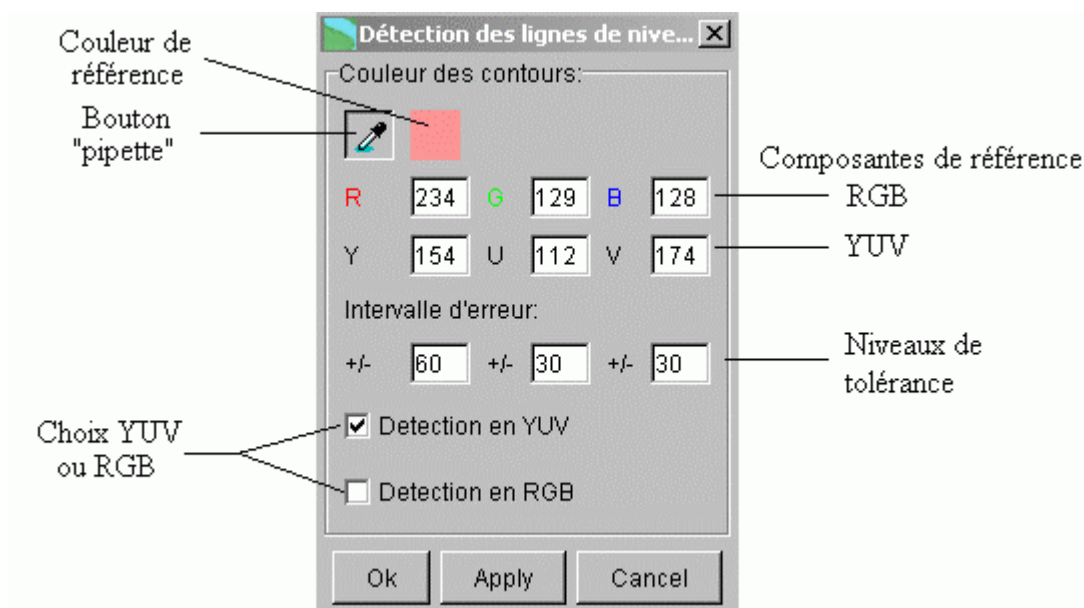
6.1.1.2 Image grossie huit fois

Assurez-vous donc que le point que vous sélectionnez est bien d'une couleur suffisamment typique. La barre d'état, barre située en bas de la fenêtre principale, indique la couleur du point situé sous la souris, ce qui permet de la choisir correctement.

6.1.2 Choix du système de colorimétrie et des tolérances

Une fois la couleur de référence choisie, il faut déterminer un critère qui va permettre d'affirmer qu'un point de la carte a une couleur suffisamment semblable à celle du point sélectionné, pour déterminer si ce point appartient lui aussi à une ligne de niveaux.

Revoyons cette boîte de dialogue :



Dialogue de détection de lignes de niveaux

Les trois composantes de la couleur de référence sélectionnée sont indiquées selon deux systèmes de colorimétrie : RGB et YUV.

Le système RGB est très connu, et correspond à des niveaux de rouge, vert, et bleu. S'il permet assez bien de représenter une image, il est difficile de le manipuler pour effectuer des comparaisons entre deux couleurs.

Le système YUV, en revanche, présente l'avantage que la composante Y correspond à la luminance, tandis que les composantes U et V correspondent à la teinte, en quelque sorte.

Autrement dit, deux points d'une ligne de niveaux ont sans doute des valeurs proches pour les composantes U et V, tandis que la composante Y est bien plus variable selon que la ligne de niveaux se trouve ou non dans une zone d'ombre (par exemple un versant Sud)

Il est donc recommandé d'effectuer les comparaisons de couleurs en YUV et non pas en RGB. Cela se détermine en sélectionnant « Détection en YUV » ou « Détection en RGB », en bas de la boîte de dialogue.

Quel que soit le choix, il faut aussi régler les trois niveaux de tolérance. Ils représentent la différence maximale, pour une composante de couleur, entre la couleur d'un point et la couleur de référence.

Si cette différence est plus grande que la tolérance, alors le point n'est pas considéré, lors de la détection, comme faisant partie d'une ligne de niveaux. Si elle est plus petite ou égale, et selon les trois composantes, alors le point est considéré comme faisant partie d'une ligne de niveaux.

Dans l'exemple visible plus haut, avec une couleur de référence de (154, 112, 174) en YUV et une tolérance de (60, 30, 30), on va détecter les lignes de niveaux en considérant que chaque point de la carte fait partie d'une ligne de niveaux si sa composante Y est comprise entre 94 et 214, si sa composante U est comprise entre 82 et 142, et si sa composante V est comprise entre 144 et 204.

Notons que les trois composantes ont forcément des valeurs entre 0 et 255. Lorsqu'une tolérance est trop forte, on détecte trop de points, c'est-à-dire des points qui ne sont pourtant pas sur une ligne de niveaux. Si la tolérance est trop faible, de nombreux points des lignes de niveaux ne sont pas détectés, et elles sont fragmentées.

On recommande d'effectuer la détection suivant le système YUV, en prévoyant une tolérance assez grande selon Y, et des tolérances assez strictes (entre 20 et 40) pour les composantes U et V.

Il est parfois judicieux de modifier la composante Y de référence à la valeur 128 (valeur moyenne), pour une tolérance de 80 environ. Ainsi la sélection se fait surtout sur les composantes U et V, en rejetant également le noir et le blanc (les points beaucoup trop clairs ou trop foncés)

Il faudra sans doute tâtonner, et il est très improbable que vous trouviez le meilleur réglage du premier coup. Notez qu'il est peut-être intéressant de faire plusieurs tentatives, car vous gagnerez ainsi beaucoup de temps ou de précision dans la suite.

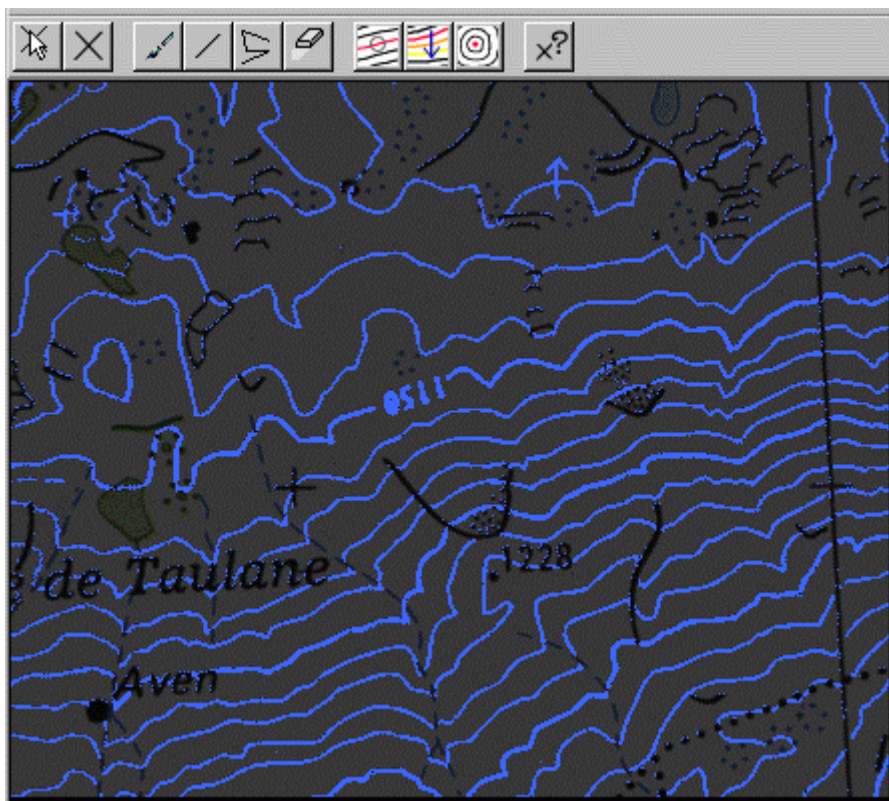
6.1.3 Détermination manuelle des altitudes des lignes et correction

Cette opération est assez fastidieuse, et le temps que vous y passerez déterminera fortement la qualité du MNT qui sera plus tard généré.

D'une part la détection a déterminé, pour chaque point, s'il appartient ou non à une ligne de niveaux, mais pas son altitude. Tous les points des lignes de niveaux sont considérés comme ayant une altitude indéterminée, jusqu'à ce que vous leur en donniez une. Ils apparaissent en bleu foncé sur le calque des lignes de niveaux.

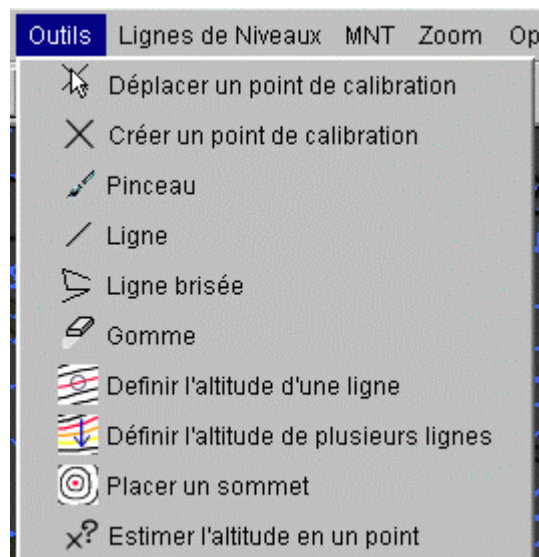
D'autre part la détection a été imparfaite : des trous morcellent les lignes de niveaux, et des points isolés, parasites ont été à tort considérés comme faisant partie d'une ligne de niveaux.

Voici l'allure de nos lignes de niveaux, dans l'exemple précédent. La carte d'origine apparaît légèrement, avec une faible opacité :



Lignes de niveaux brutes

C'est maintenant que vont servir la plupart des boutons situés en haut de la fenêtre. Ils sont également présents dans le menu « Outils » :



menu « Outils »

Les deux premiers boutons servent lors de la calibration, on en reparlera dans un chapitre consacré à la calibration.

Bien que vous puissiez choisir d'adopter une autre méthode, on recommande de commencer par placer les sommets (qui n'ont sans doute pas été détectés, pour peu qu'ils ne soient pas de la même couleur que les lignes de niveaux), puis de fixer l'altitude de quelques lignes de niveaux.

Placer un sommet :

Pour placer un sommet, cliquez sur le bouton correspondant, sélectionnez la taille du point qui le représentera, son altitude, et cliquez à son emplacement. Il apparaît en bleu clair, la couleur des lignes de niveaux d'altitude déterminée.

Dans cet exemple on choisit une taille de 6, une altitude de 1228 mètres, et on clique à l'emplacement du sommet correspondant :



Sommet placé

Déterminer l'altitude d'une ligne de niveaux :

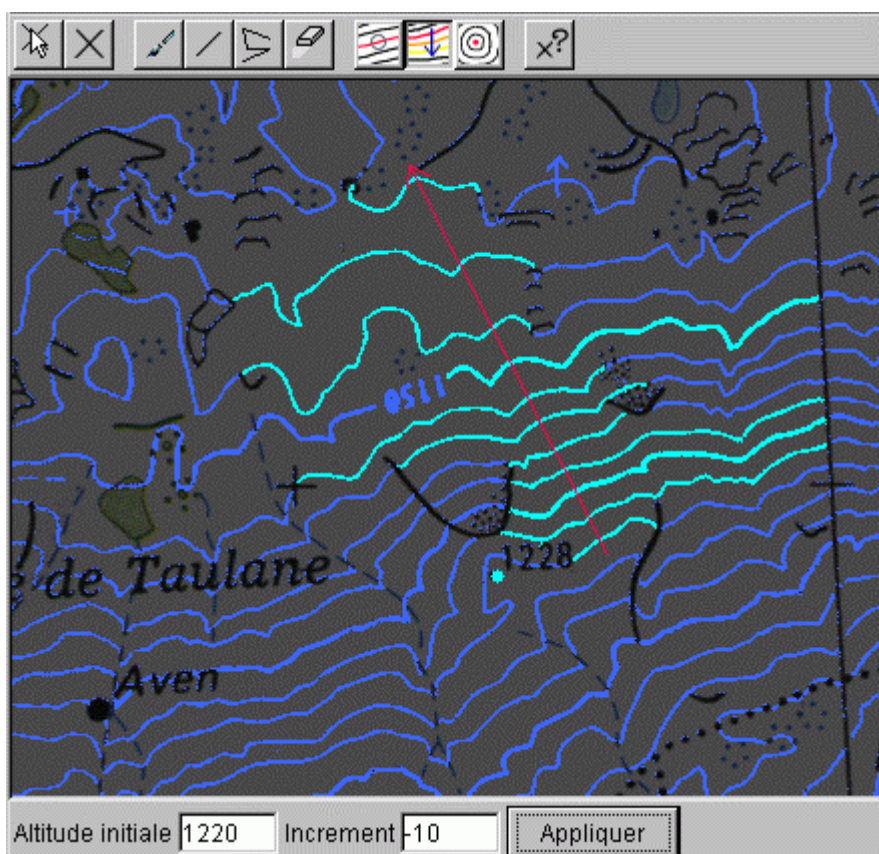
Pour déterminer l'altitude d'une ligne de niveaux – on verra plus tard que ce n'est pas la manière de procéder la plus rapide – cliquez sur le bouton correspondant.

Fixez une taille de curseur (la taille du curseur permettant de sélectionner la ligne) et l'altitude de la ligne que vous sélectionnerez, puis cliquez dessus.

Déterminer les altitudes de plusieurs lignes de niveaux :

Cette opération permet d'aller bien plus vite que la précédente. Elle consiste à tracer une ligne droite traversant plusieurs lignes en précisant l'altitude de la première, et la différence de hauteur entre deux lignes de niveaux successives.

Notons qu'il ne faut surtout pas que cette droite traverse une même ligne deux fois (par exemple en un coude), ni à travers un trou. Dans le cas contraire le compte des lignes traversées est faussé.



Détermination des altitudes de plusieurs lignes

On peut remarquer que les lignes de niveaux n'ont pas vu leur altitude déterminée sur toute leur longueur : des coupures des lignes, qui subsistent après la détection, parce que la tolérance était trop faible ou parce qu'une route ou du texte traversait la ligne, empêchent la propagation de l'altitude des lignes.

Cette technique est à favoriser car elle est la plus rapide.

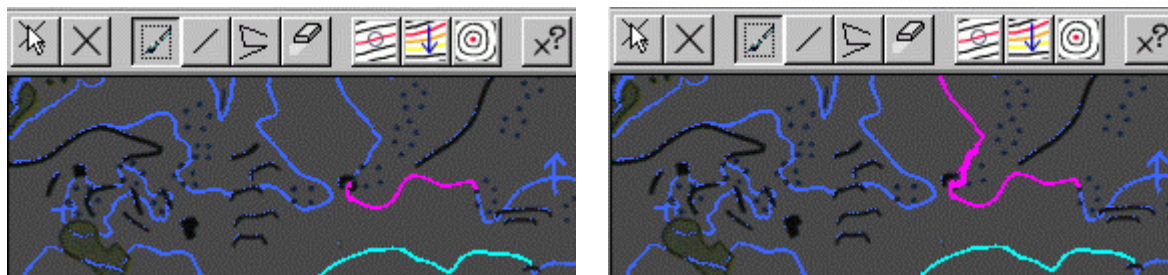
Nous vous recommandons de vérifier l'altitude des lignes de niveaux, par exemple la dernière croisée par la flèche, au moyen de la fonction « *Estimer l'altitude en un point* », décrite un peu plus loin.

Joindre deux lignes :

Pour que les altitudes se propagent correctement, il faut combler les trous qui les séparent. Cela se peut faire au moyen du pinceau, des fonctions ligne ou lignes brisée. Sans oublier de régler la taille du curseur de ces fonctions, vous pouvez les utiliser pour joindre deux parties d'une même ligne de niveaux ou en tracer une nouvelle.

Notez que si vous joignez une section de ligne d'altitude déterminée à une autre section, l'altitude se propage. Cela peut permettre de fixer rapidement l'altitude des segments isolés, après avoir fixé celles de nombreux segments par la méthode précédente.

Dans cet exemple on joint de lignes au moyen du pinceau, réglé sur une épaisseur de trois pixels :



Jonction de deux lignes de niveaux au pinceau

Pour commencer, cliquez sur la ligne d'altitude déterminée, que vous souhaitez prolonger. Notez que cela entraîne sa sélection, et qu'elle apparaît en violet. Puis sans relâcher la souris, on trace un trait pour joindre les deux lignes de niveaux. Lorsque le trait atteint la seconde ligne, elle apparaît elle aussi en violet, et prend l'altitude de la première.

Gomme :

La gomme permet d'effacer des points isolés ou des portions de ligne de niveaux. Cela peut servir pour tous les parasites : points isolés, lignes pointillées à mi-altitude, flèches et autres indications d'altitude qui ne sont pas des lignes de niveaux.

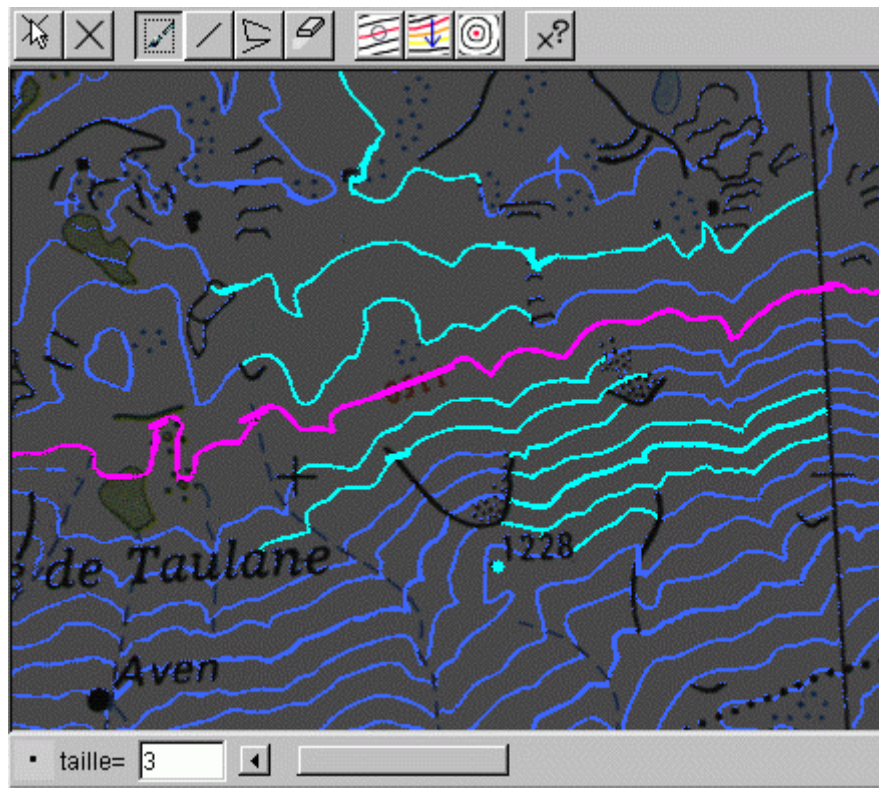
Estimer l'altitude en un point :

Cette fonction permet d'obtenir une estimation de l'altitude d'un point sur lequel on clique, afin de s'assurer que les lignes de niveaux n'ont pas pris de valeur erronée.

Il suffit de cliquer en un point pour obtenir une estimation de son altitude. Si les lignes de niveaux alentour ont encore une altitude indéterminée (et sont donc marquées en bleu foncé) cette estimation sera bien sur faussée.

Remarque concernant les codes de couleurs :

On utilise trois couleurs différentes pour représenter les lignes de niveaux, comme on peut le voir dans cet exemple :



Trois couleurs des lignes de niveaux

- bleu foncé : En bleu foncé apparaissent les lignes de niveaux d'altitude indéterminée. Elles le resteront jusqu'à ce vous leur donniez une altitude, que ce soit directement, à l'aide du bouton « déterminer l'altitude de plusieurs lignes de niveaux » ou en prolongeant des lignes de niveaux d'altitude connue.
- bleu clair : Les lignes de niveaux (et les sommets) d'altitude connue apparaissent en bleu clair. Sauf bien sûr celle qui est sélectionnée.
- Violet : le Violet est la couleur de la ligne de niveaux sélectionnée. Elle a notamment pu être sélectionnée pour être prolongée, comme dans cet exemple où le pinceau est en cours d'utilisation.

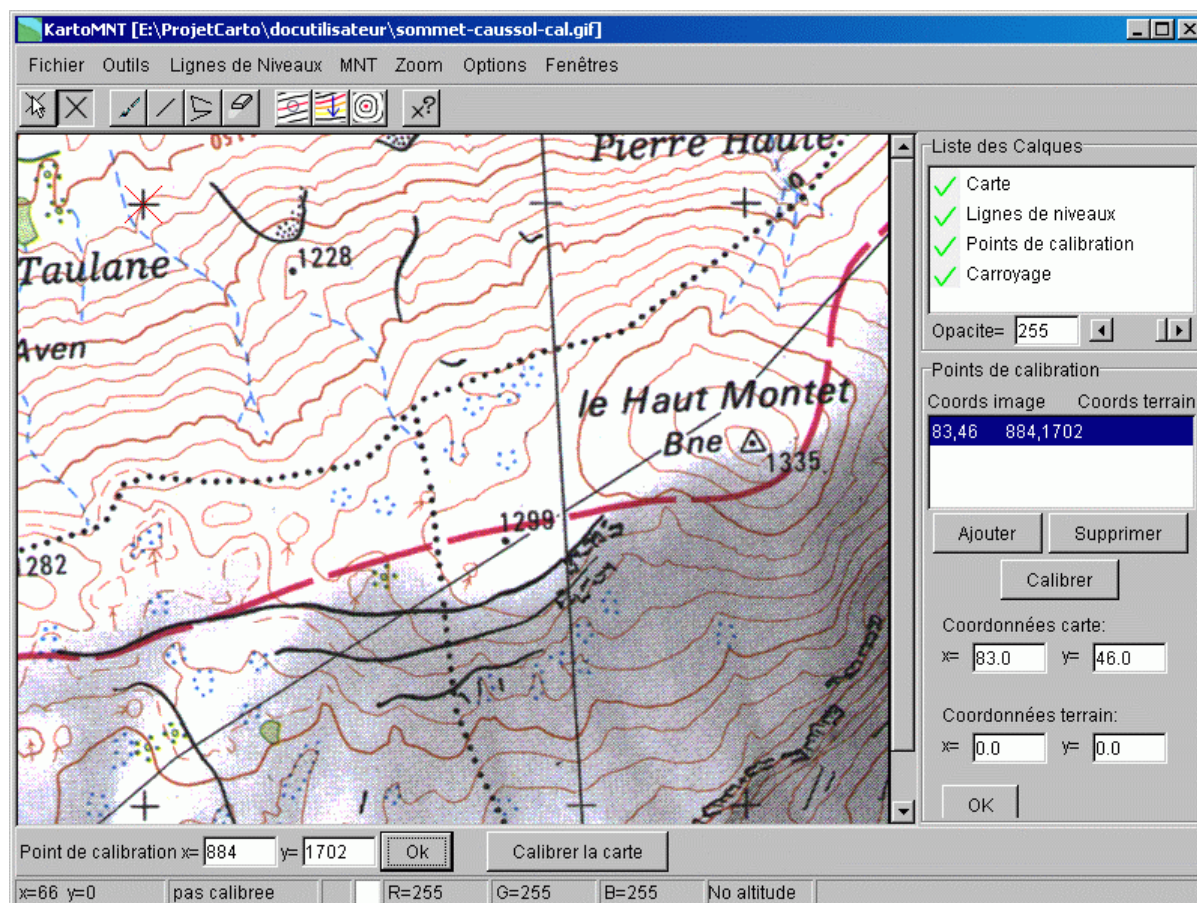
6.2 Calibrer la carte

Tant qu'une carte n'est pas calibrée, les pixels qui la composent ne peuvent être mis en correspondance avec des coordonnées géographiques réelles. Il faut donc que vous interveniez pour indiquer la position de plusieurs points de repère appelés points de calibration, pour que KartoMNT puisse ensuite estimer les coordonnées de chaque point dans le monde réel.

6.2.1 Placer un point de calibration

Pour placer un point de calibration, sélectionnez la fonction correspondante dans le menu *Outils > Créer un point de calibration* ou cliquez sur l'icône en forme de croix en haut à gauche.

Cliquez ensuite sur le point de la carte dont vous voulez faire un point de calibration.



Création d'un point de calibration

Ensuite indiquez les coordonnées du point sur le terrain, dans la barre de dialogue disponible en bas de la fenêtre, ou dans la sous fenêtre consacrée aux points de calibration, à droite.

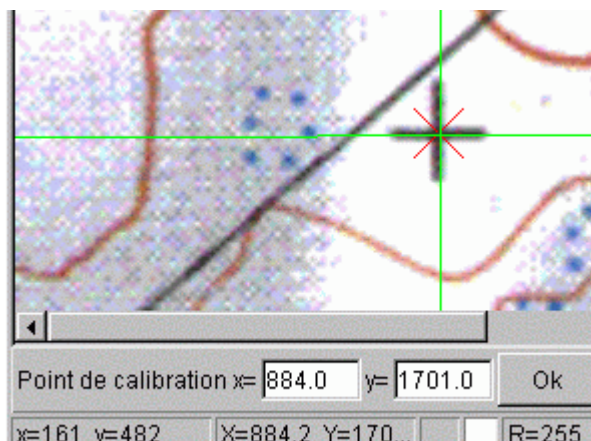
Dans cet exemple nous donnons des coordonnées terrain totalement fantaisistes.

6.2.2 Déplacer les points de calibration

Pour obtenir une calibration précise, nous vous recommandons de placer les points de calibration avec précision.

Une fonction, disponible dans le menu « *Outils > Déplacer un point de calibration* » ou par le bouton de gauche de la barre des outils, permet de sélectionner et déplacer un point.

Cela peut notamment permettre de le placer avec une grande précision, dans le cas où la carte comporterait, comme ici, des points de repère géographiques.



Déplacement d'un point de calibration

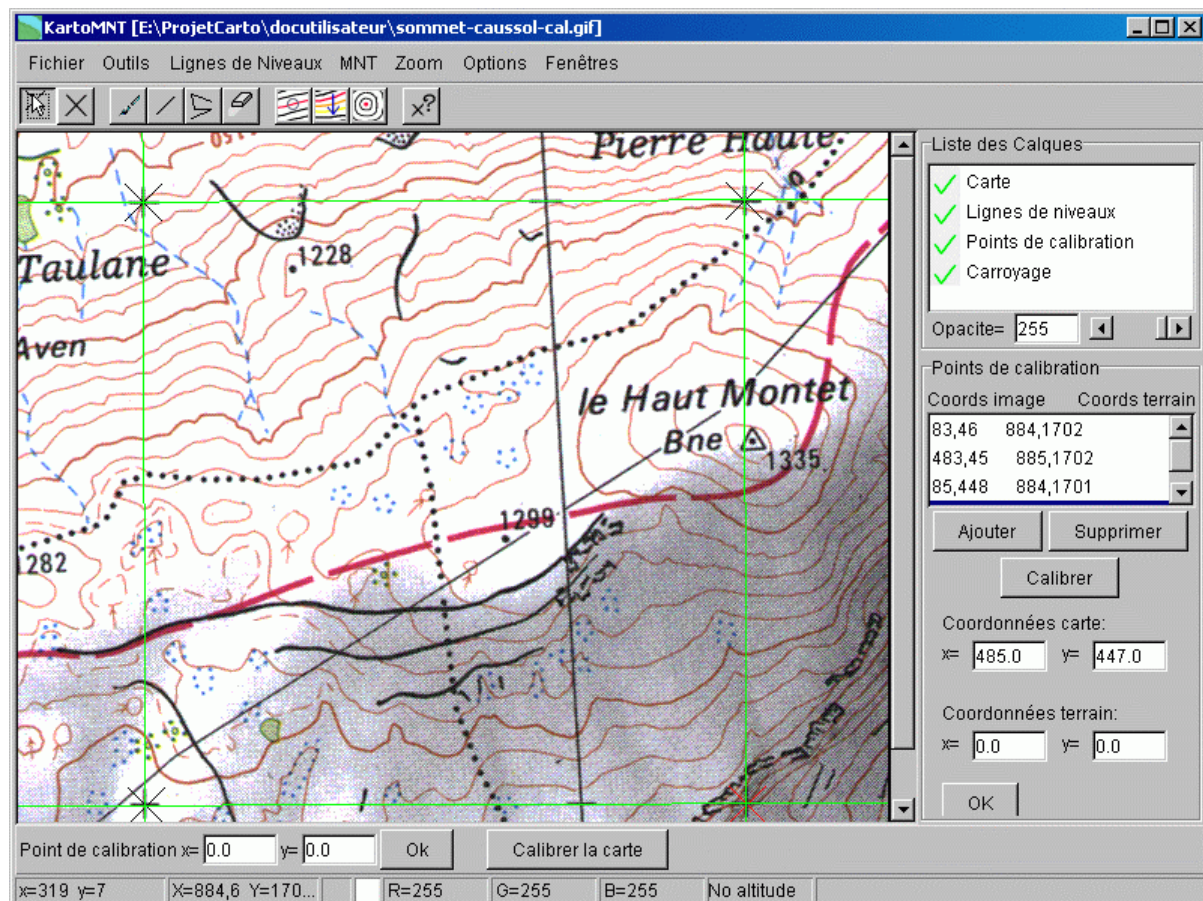
Dans cet exemple on souhaite refaire une calibration en plaçant les points de calibration plus précisément : on effectue un zoom, et place le point de calibration bien au milieu du repère sur la carte.

Notez que dans cette opération, on modifie les coordonnées du point sur la carte, mais pas sur le terrain.

6.2.3 Effectuer la calibration

Lorsque assez de point de calibration ont été placés, lancez la calibration. Il faut au moins trois points de calibration, non alignés. Vous pouvez notamment le faire au moyen du bouton « calibrer la carte », dans la sous-fenêtre consacrée aux points de calibration, à droite.

Des lignes de carroyage vont apparaître. Il peut y en avoir un nombre gênant, mais vous pouvez régler leur fréquence d'apparition dans le sous-menu « Option > Options carroyage ». Dans cet exemple, on a choisi d'afficher une ligne de carroyage par kilomètre.



Carte calibrée

Les lignes de carroyage permettent notamment de se rendre compte si la calibration a été correctement effectuée. En principe vous devez obtenir des lignes droite parallèles et orthogonales.

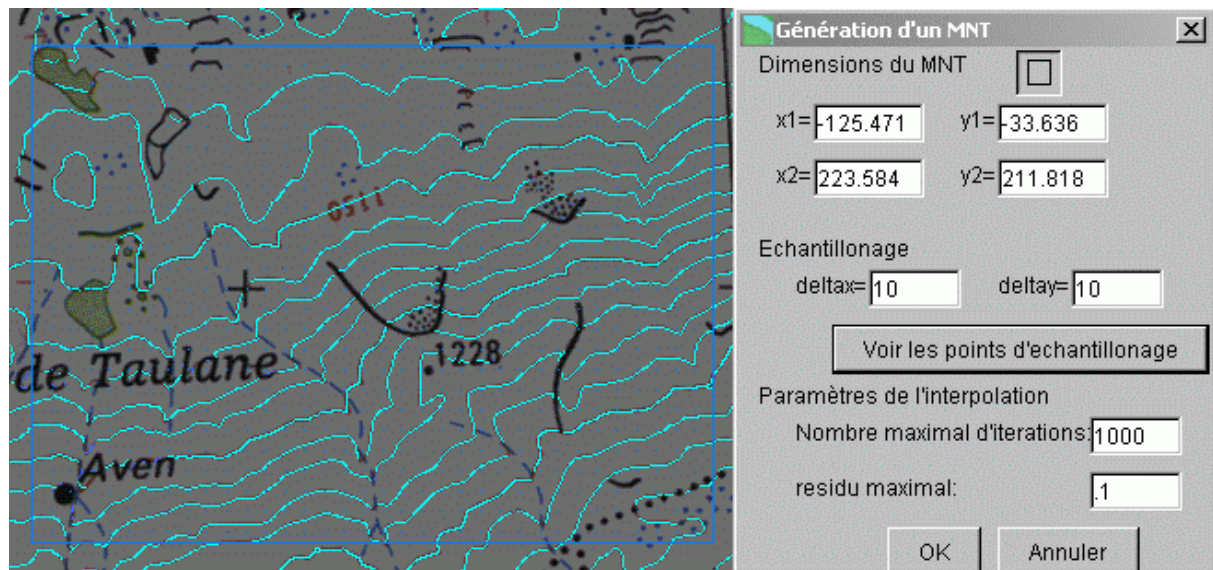
Si les lignes de carroyages n'ont pas du tout ces attributs, vérifiez que vous avez correctement saisi les coordonnées terrain de vos points de calibration.

De légères anomalies peuvent en revanche être dues à une mauvaise qualité de votre carte, peut-être apparue lors de sa numérisation.

6.3 Génération du MNT

Une fois la carte calibrée, et les lignes de niveaux détectées (et leur altitude déterminée), vous pouvez générer le MNT.

Ouvrez la boîte de dialogue correspondante, dans le menu « *MNT* > *Génération du MNT* »



Génération d'un MNT

La première chose à faire est de sélectionner, à la souris, le contours de la zone sur laquelle le MNT va être généré. En effet celui-ci ne peut être généré que sur un rectangle dont les côtés sont parallèles aux lignes de carroyage.

Ensuite choisissez le pas en x et y du MNT, c'est-à-dire la distance entre deux points consécutifs du MNT. Ce pas doit être exprimé dans la même unité que les coordonnées terrain des points de calibration.

Le bouton « voir les points d'échantillonnage » permet de voir les positions des points que représentera le MNT.

Paramètres de l'interpolation :

Les points du MNT sont évidemment déterminés par interpolation, à moins de se trouver sur une ligne de niveaux.

Ces interpolations se font par la méthode dite de diffusion. Vous pouvez modifier ces deux paramètres. Le nombre maximal d'itérations détermine fortement le temps de calcul, de même que le résidu maximal.

En augmentant le nombre maximal d'itérations et en réduisant le résidu maximal, vous augmentez le temps de calcul, en améliorant la qualité des interpolations.

Toutefois ces interpolations sont imparfaites, et il est inutile d'entrer des valeurs extravagantes pour ces paramètres. Modifiez les au plus d'un facteur dix.

Valeurs suggérées : entre 1000 et 10000 pour le nombre maximal d'interpolations, et entre 0.01 et 0.1 pour le résidu maximal.

7 Conclusion

Ce projet nous a permis d'avoir une expérience dans la réalisation d'un projet logiciel de taille conséquente doté d'une IHM conviviale. Il nous a permis de nous confronter aux problèmes posés lors du travail à plusieurs sur le même projet et aux difficultés à respecter les délais.

Nous avons notamment des difficultés à travailler en même temps, étant de deux filières différentes (CSI et VIMM). Nous avons donc des emplois du temps différents, et de nombreux mini-projets qui ne nous ont jamais permis de nous consacrer entièrement à ce projet, pas même pendant les rares semaines théoriquement prévues pour ce projet.

La majorité des objectifs imposés au début du projet ont été atteints, mais il reste néanmoins un certain nombre de fonctionnalités ou d'amélioration à apporter au produit comme :

- L'assemblage de plusieurs MNT : Il serait important de pouvoir assembler plusieurs MNT correspondant à deux parties d'une même région, pour obtenir un MNT couvrant une plus grande région. Le principal intérêt à cela serait de pouvoir fragmenter une carte et travailler dessus par régions, pour réduire le coût en mémoire, ou distribuer le travail en plusieurs utilisateurs.
- La visualisation du MNT obtenu en 3D, de préférence en lui superposant la carte d'origine ou une photo aérienne.
- L'amélioration de l'IHM et de l'installation du logiciel.
- Améliorer la technique de détection des lignes de niveaux, voire de l'interpolation. Il serait notamment utile de fournir une technique pour prolonger automatiquement les lignes de niveaux interrompues.

8 Bibliographie

<http://karto.free.fr> et <http://www-sop.inria.fr/agos-sophia/sis/COV/ST.html>, Sites des Sophi-taupes, fournissant le logiciel Karto.

Anil K.Jain, « Fundamentals of digital image processing », Prentice Hall, 1989

Jean-Antoine Désidéri, « Modèles discrets et schémas itératifs, application aux algorithmes multigrilles et multidomaines », Editions Hermès, 1998.