

Comment représenter les reliefs géographiques dans les SIG en 3D?

-A-

Les

Courbes de niveaux

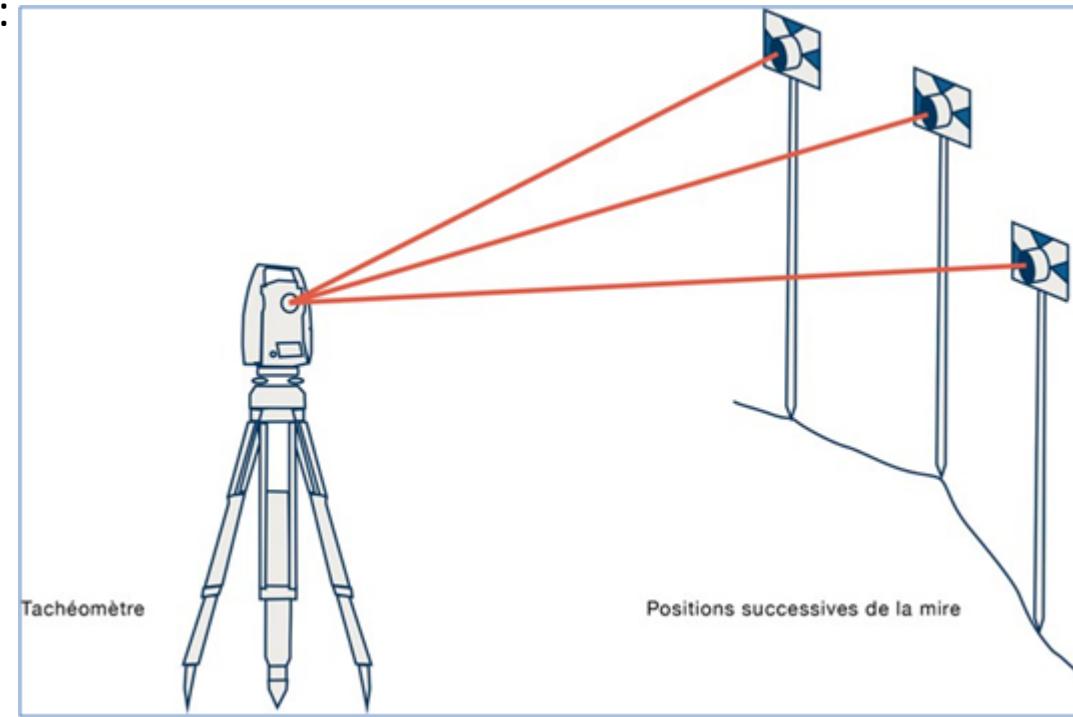
Mesure par Tachéomètre

distance < 300m

Un tachéomètre est un instrument de mesure optique de distance et d'angle comportant les trois fonctions suivantes :

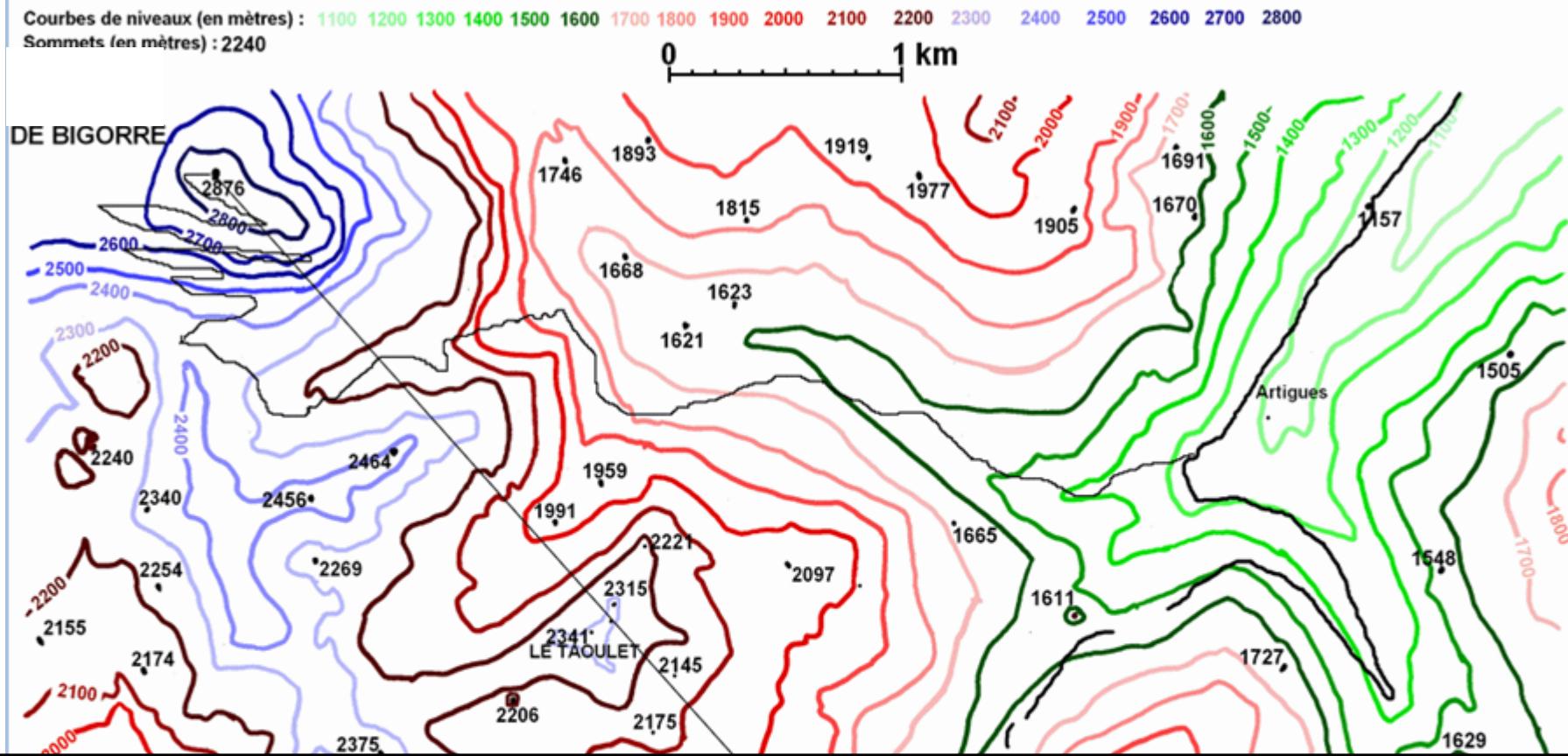
- fonction de goniomètre (*mesure des angles dans des plans horizontaux et verticaux*) ;
- fonction de clisimètre (*mesure des pentes*) ;
- fonction de stadiomètre (*mesure des distances grâce à un télémètre à visée infrarouge ou à un laser*).

La mesure est effectuée par deux opérateurs, l'un travaille sur le tachéomètre, l'autre arpente la zone d'étude avec une mire qui est positionnée sur les points de mesures. L'opérateur s'occupant de l'appareil vise la mire au travers de l'objectif du tachéomètre.



Principes d'un levé au tachéomètre le long d'un profil

Courbes de niveaux avec points cotés



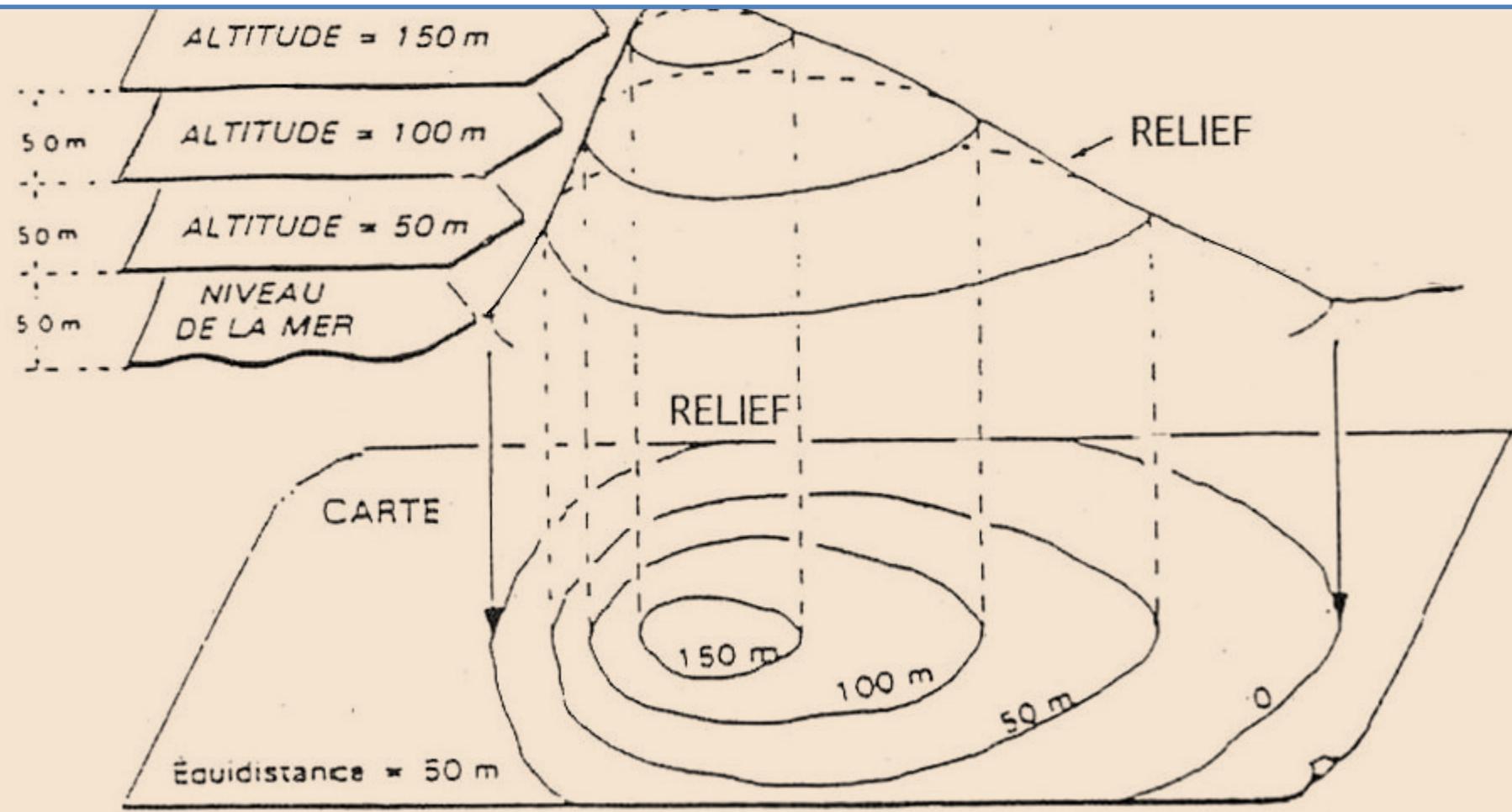
Principe: Les courbes de niveau sont en cartographie les courbes reliant les **points de la carte ayant la même altitude**. Un chemin qui suit une courbe de niveau est à plat (*il ne monte ni ne descend*), les courbes de niveau ne se croisent jamais.

Pour monter ou descendre il suffit de passer à une autre courbe.

Il y a beaucoup d'autres exemples de courbes de niveau ou « iso courbes » comme les courbes d'égale température (*isothermes*) ou d'égale pression (*isobares*) en météorologie.

Principe des courbes de niveau

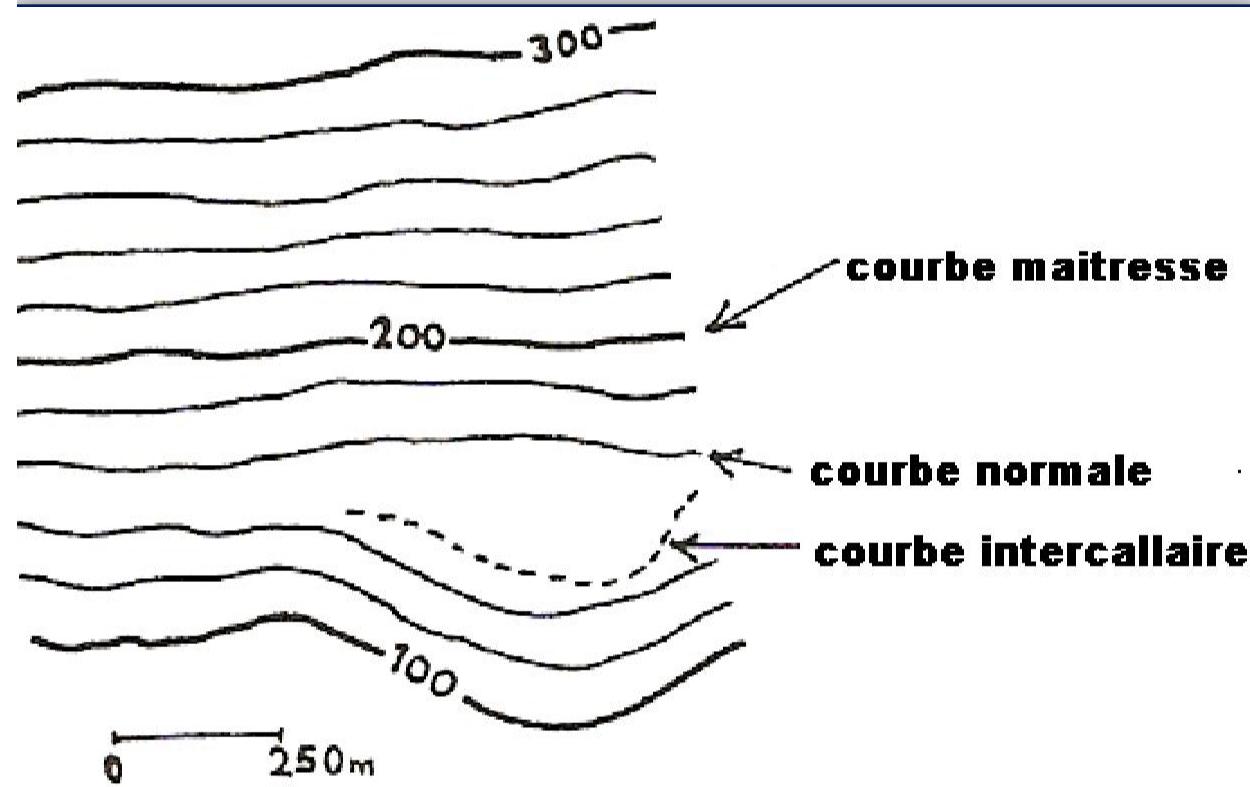
Définition: Une courbe de niveau est un trait qui représente l'intersection d'un plan horizontal avec la surface du terrain. C'est la projection de chaque courbe sur un fond 2D. La valeur de l'équidistance est notée dans la légende de la carte, elle peut varier d'une carte à l'autre en fonction de l'échelle, mais surtout du relief cartographié, elle évolue généralement par 50 ou 100m.



Les 3 courbes de bases

1-Courbes maîtresses : Elles sont dessinées en **traits plus accentués** qui indiquent toutes les courbes de rang 5 c'est-à-dire tous les 50 ou 100m, le plus souvent l'altitude est indiquée sur les courbes maîtresses ; noter qu'entre deux courbes maitresses il y a en général 4 courbes normales.

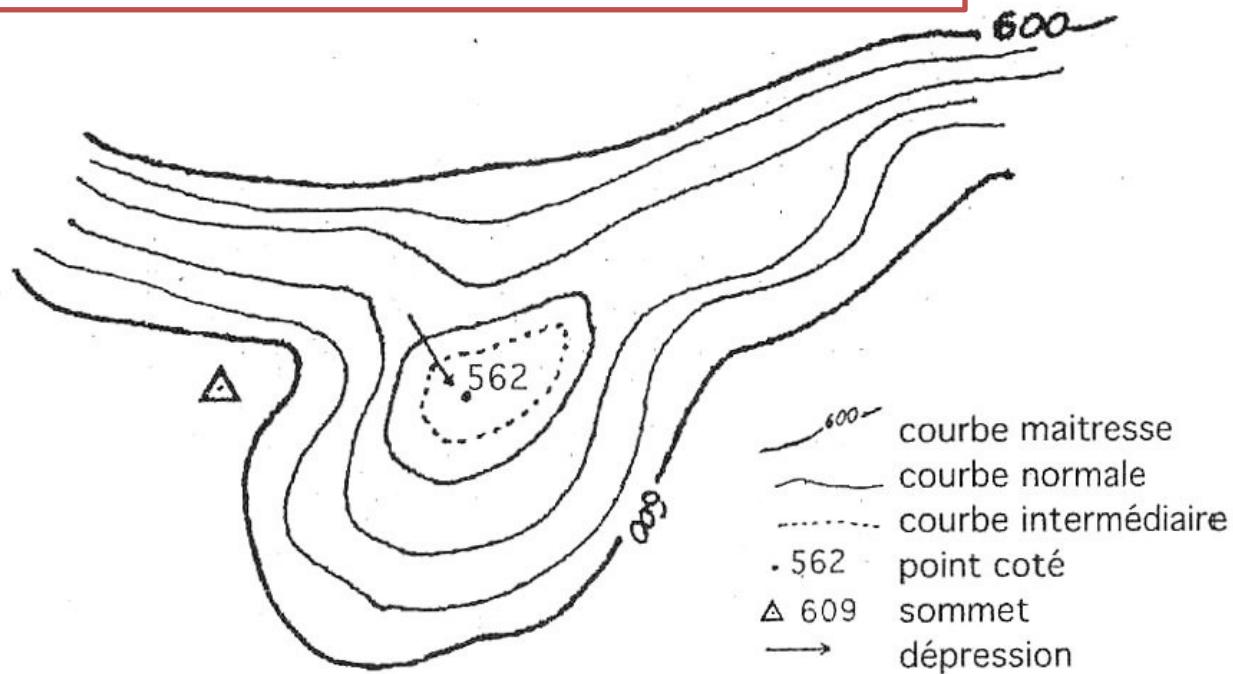
2- Courbes normales : Elles sont dessinées en **traits fins**, elles s'intercalent entre les courbes maîtresses.



3- Courbes intercalaires : Elles sont dessinées en général **en tiret**. Lorsque la surface topographique est plate et que les courbes de niveau sont espacées, on est conduit à ajouter une ou plusieurs courbes intercalaires (ex: plaines)

Cotes, Equidistance et Ecartement

Les cotes correspondant aux courbes, doivent se lire **à l'endroit en allant vers le haut (en montant)**. L'altitude des courbes est souvent indiquée le long de leur tracé. En principe le bas des chiffres indiquant cette altitude est dirigé vers le bas de la pente.



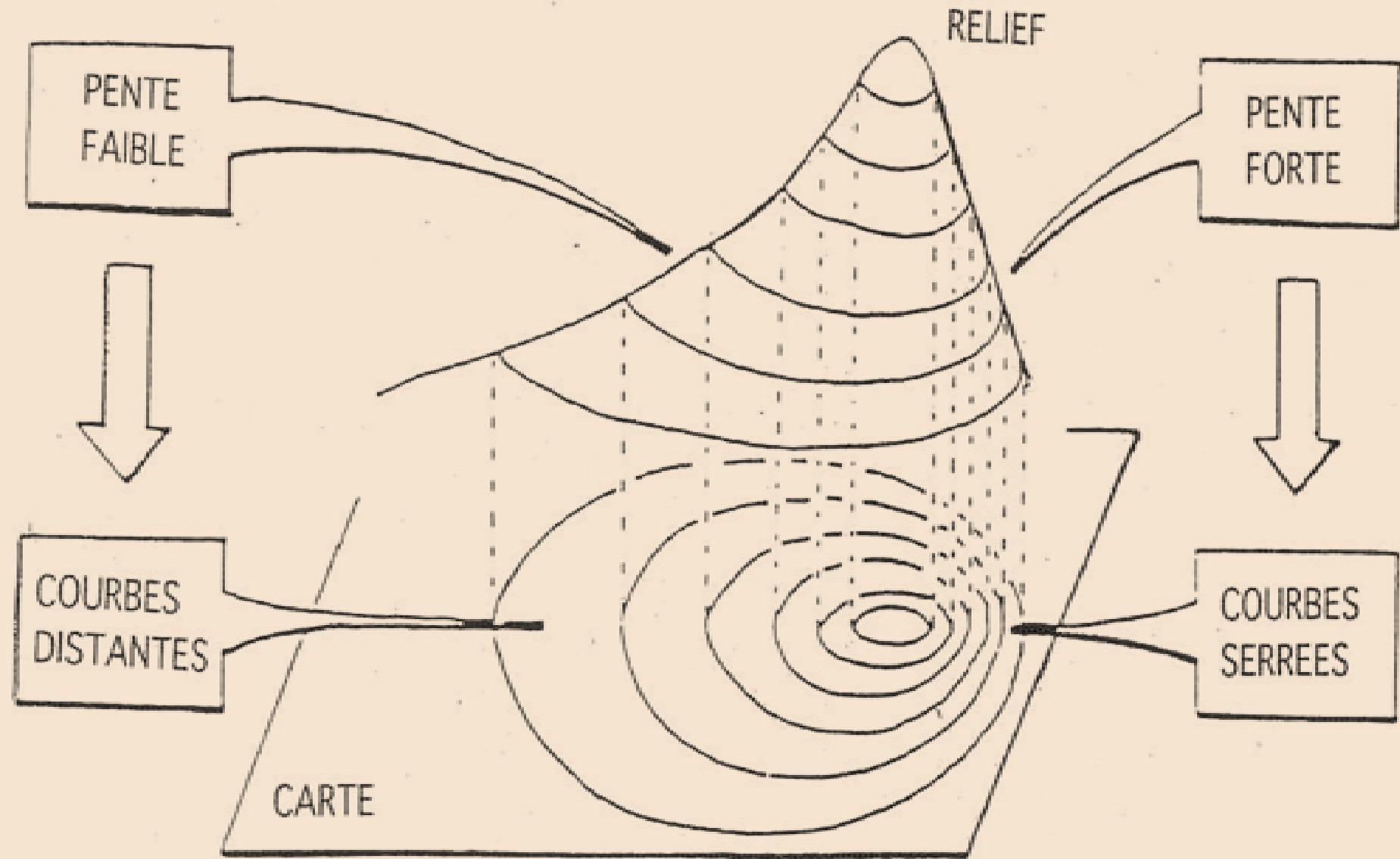
Equidistance et écartement, l'équidistance est la distance qui sépare deux plans horizontaux successifs sur la carte. Elle correspond à la différence d'altitude entre deux courbes de niveau consécutives. l'équidistance est **constante**.

L'équidistance est indiquée dans la légende, en bas de la carte. Dans les zones plates à faible relief elle peut descendre à 5 ou 10m ; pour les zones montagneuses, elle peut atteindre 200m ou plus.

Il ne faut pas confondre l'équidistance avec l'écartement des courbes en projection sur la carte.

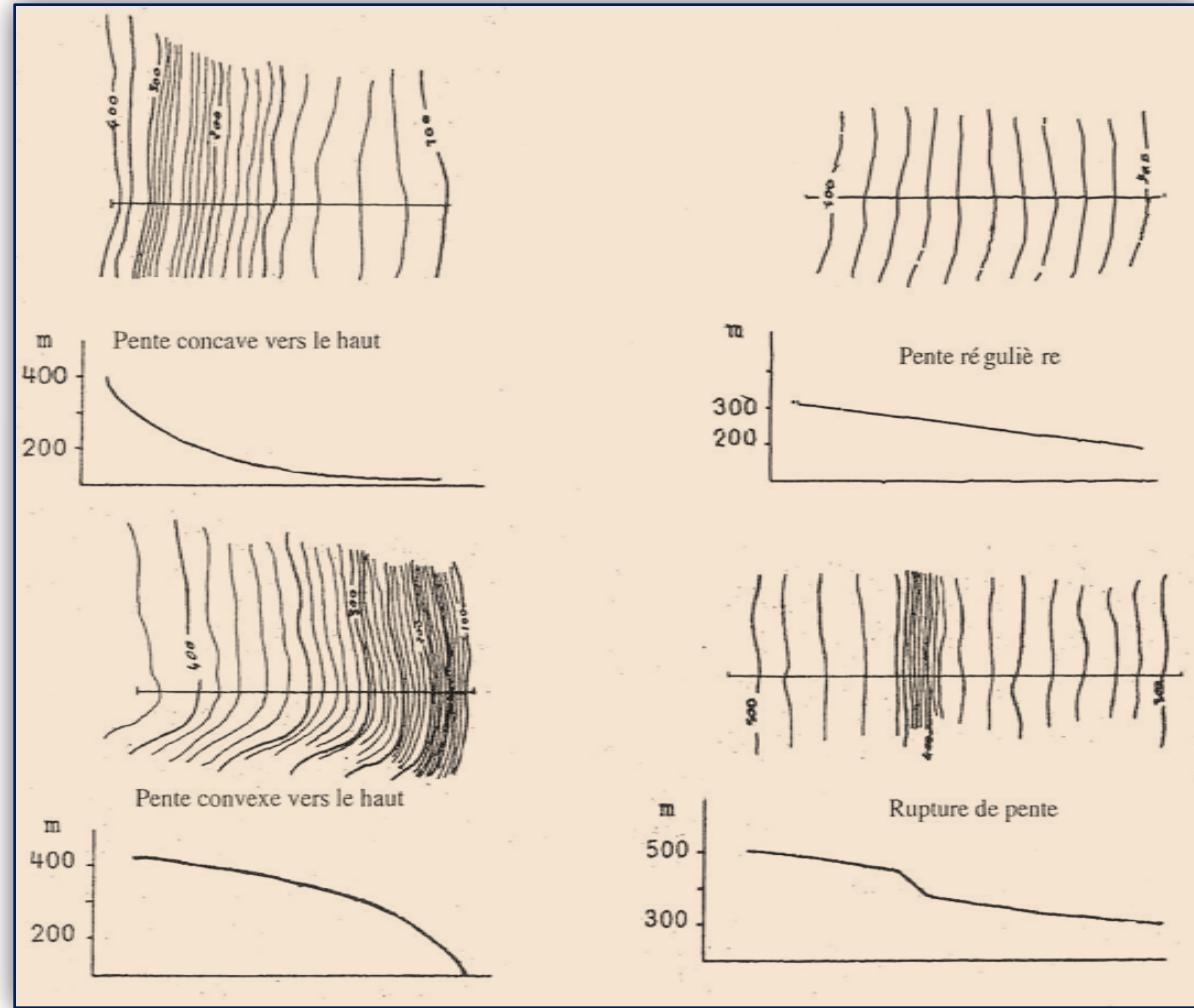
- l'écartement est **variable**, il dépend du relief.

Types de pentes : interprétation par l'écartement



Types de pentes : interprétation par l'écartement

1- Pente concave lorsque l'espacement entre les courbes s'éloigne en bas



2- Pente convexe lorsque l'espacement entre les courbes se rapproche en bas.

Annotations

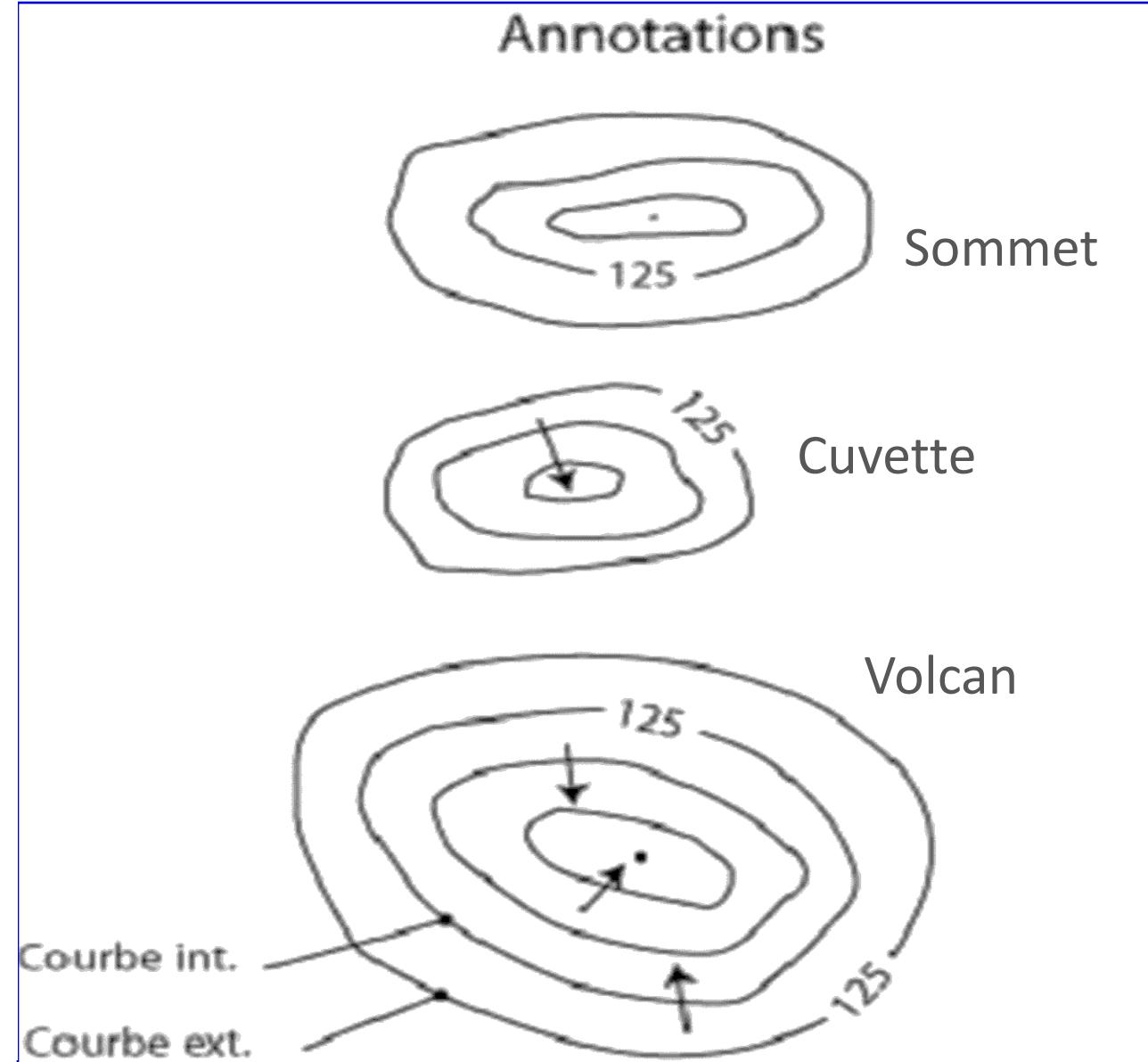
C'est l'information sur la troisième dimension qui est la mesure des altitudes. Essentielle dans bien des cas à une bonne perception du terrain et du modélisé du paysage.

La lecture des chiffres d'annotation indiquent le sens de la pente:

1- Lorsque nous pouvons les **lire** c'est que nous **montons**.

2- Lorsque nous les voyons **à l'envers** c'est que nous **descendons**.

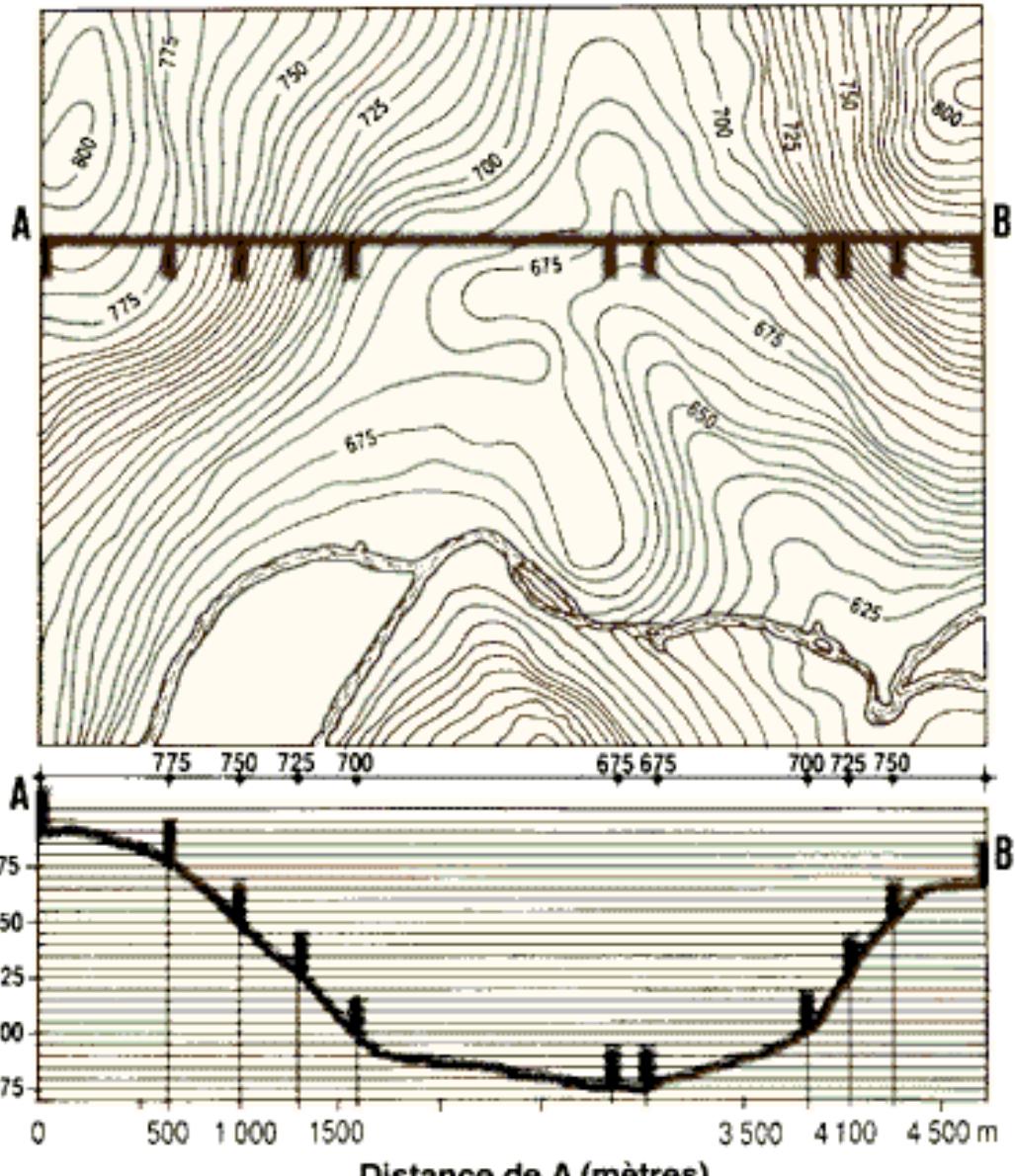
Attention: il faut placer les chiffres du côté de votre lecture et pas en face de votre lecture.



Profil topographique

Méthode: Pour Créer un profil topographique, il faut reporter l'altitude du point d'intersection de chaque « courbe de niveau » en fonction de son altitude le long du plan de coupe.

- 1) Report des intersections entre le trait de coupe et les courbes de niveau.
- 2) Placer les points correspondant à leurs altitudes respectives.



Profil le long de la droite AB

Interpolation d'une altitude entre les courbes

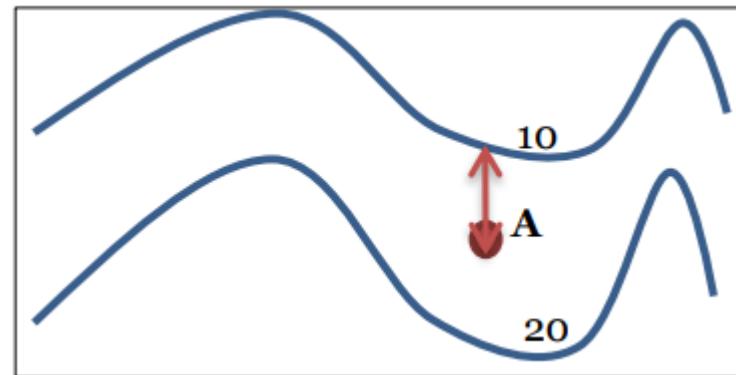
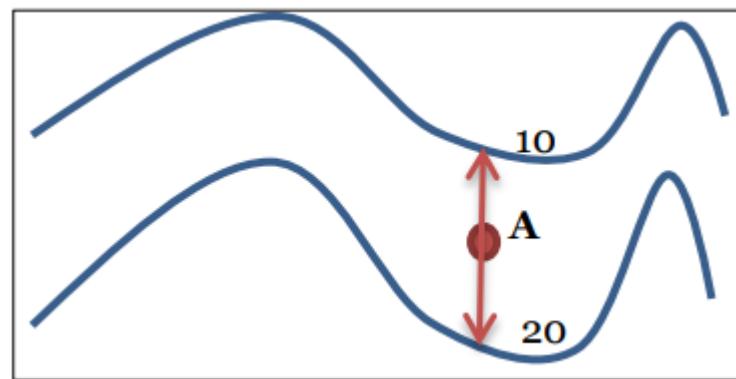
Les courbes de niveau et les points cotés permettent de déterminer l'altitude d'un point **A** par approximation, en supposant que la pente est localement uniforme.

Il faut commencer par déterminer l'altitude des courbes qui encadrent le point **A**.

THEORIQUEMENT: La différence d'altitude entre le point **A** et les courbes de niveau qui l'encadrent est proportionnelle à la distance qui sépare **A** de ces courbes.

Exemple: Le point **A** est entre deux courbes de niveau 10 m et 20 m.

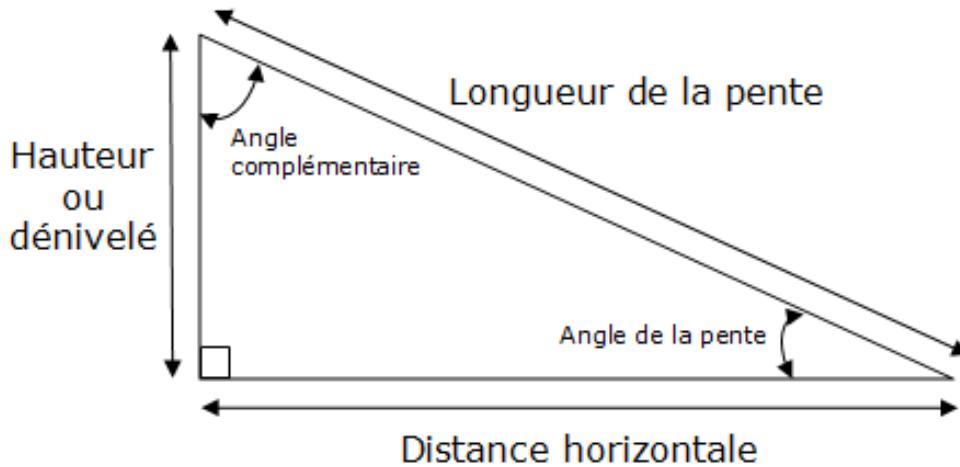
1. On mesure la distance entre les 2 courbes de niveau à hauteur du point **A**. Pour l'exemple la mesure est de 2 cm ; donc à cet endroit une dénivellation de 10 mètres = 2 cm (20 mm) sur la carte
2. On mesure la distance entre le point **A** et la première courbe. Pour l'exemple c'est une distance de 0,8 cm (8 mm) sur la carte
3. On applique la règle de 3 :
20 mm sur la carte = dénivellation de 10 mètres
1 mm sur la carte = dénivellation de 0,5 mètres
8 mm sur la carte = dénivellation de 4 mètres



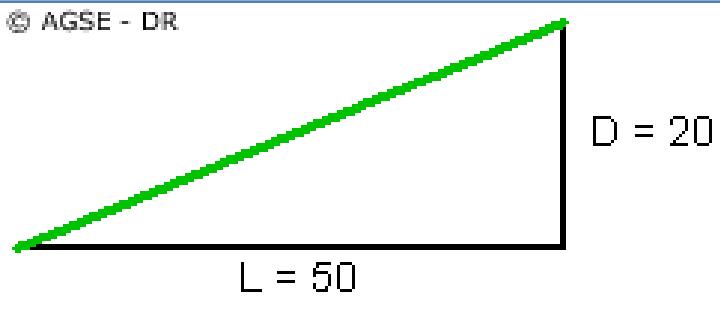
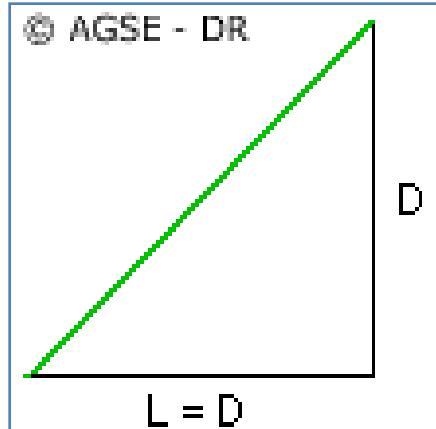
Le point **A** est donc à une altitude de 4 mètres supérieur à la courbe des « 10m ». Il est donc à une altitude de 14 mètres (10+4).

Calcul d'une pente

$$\text{Pente (\%)} = \frac{\text{Dénivelé (m)} * 100}{\text{distance horizontale (m)}}$$



Donc une pente est égale à 100 % lorsque le dénivelé est égal à la longueur ; (Angle=45°)



$$\text{Pente} = (20 \times 100) / 50$$

$$\text{Pente} = 40\%$$

Comprendre : si je fais 100 m en longueur, je monte de 40m en hauteur.

$$\text{J'ai parcouru en tout : } \sqrt{L^2 + D^2} = \sqrt{50^2 + 20^2} = 53,8 \text{ m}$$

-B-

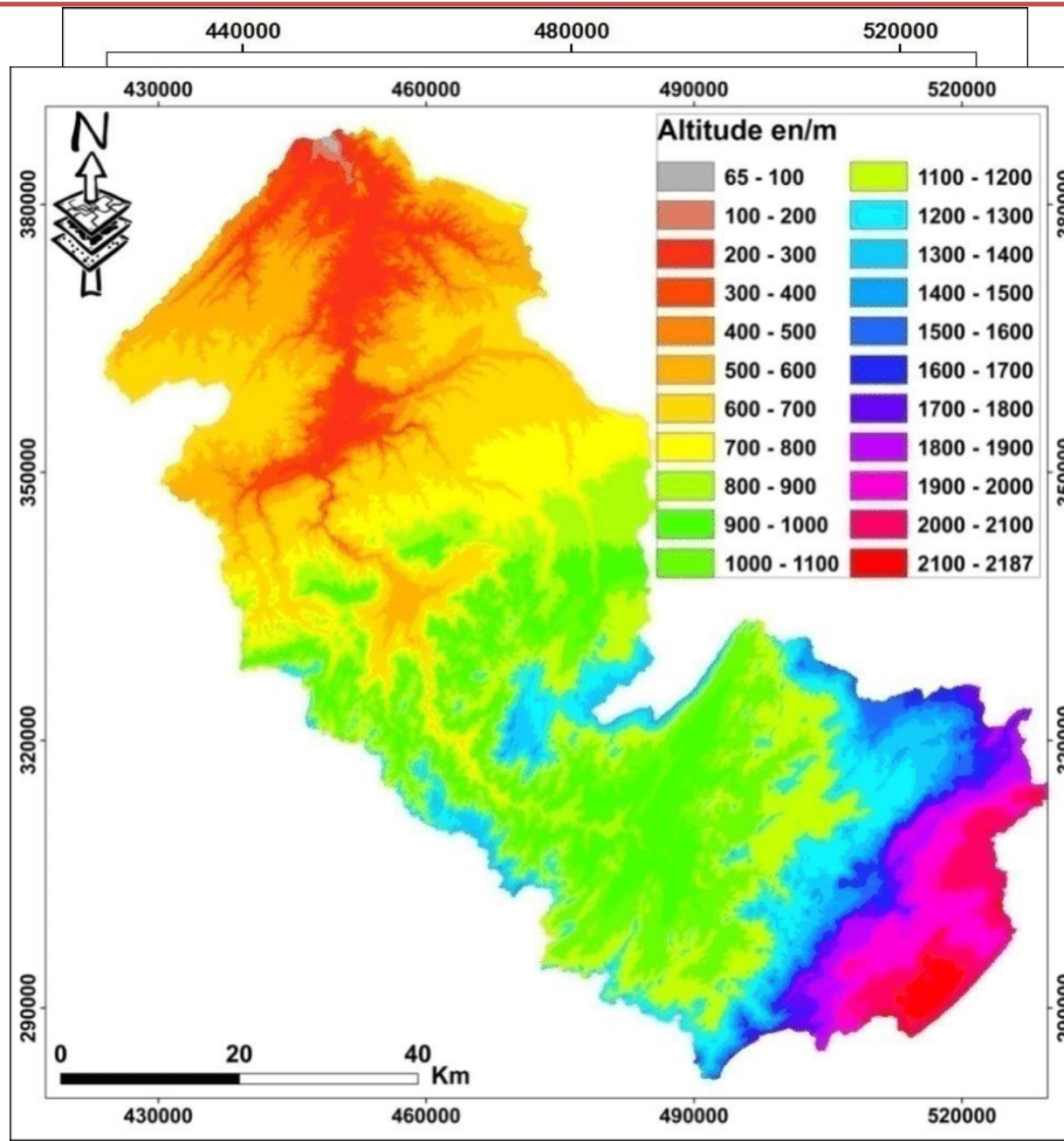
Les M.N.T

(Modèle Numérique de Terrain)

et les T.I.N

(Triangulated Irregular Network)

MNT satellitaire ou aéroporté



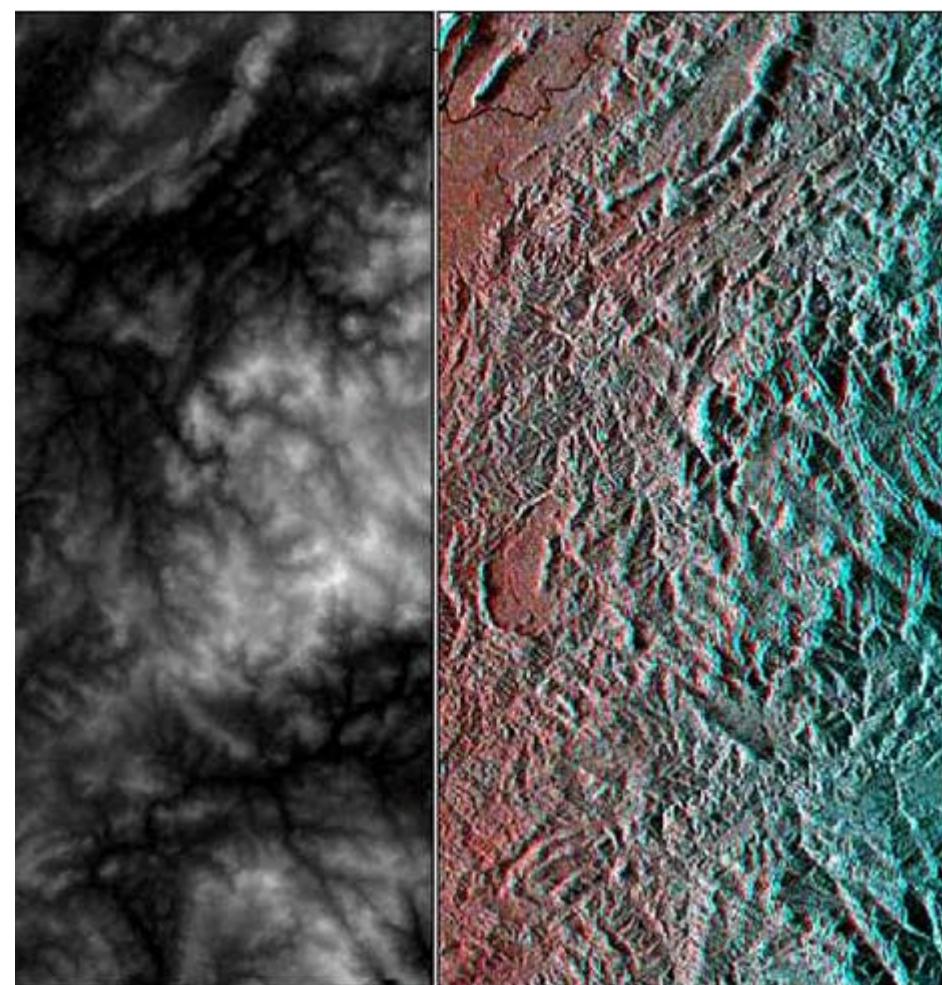
Définition: Il s'agit d'une **représentation numérique du relief** donc des valeurs d'altitude d'une zone donnée qui permet de passer d'une représentation (X,Y) à une représentation (X,Y,Z).

Nous pouvons en déduire des indications sur les valeurs des pentes et sur les reliefs de la surface topographique d'une zone donnée.

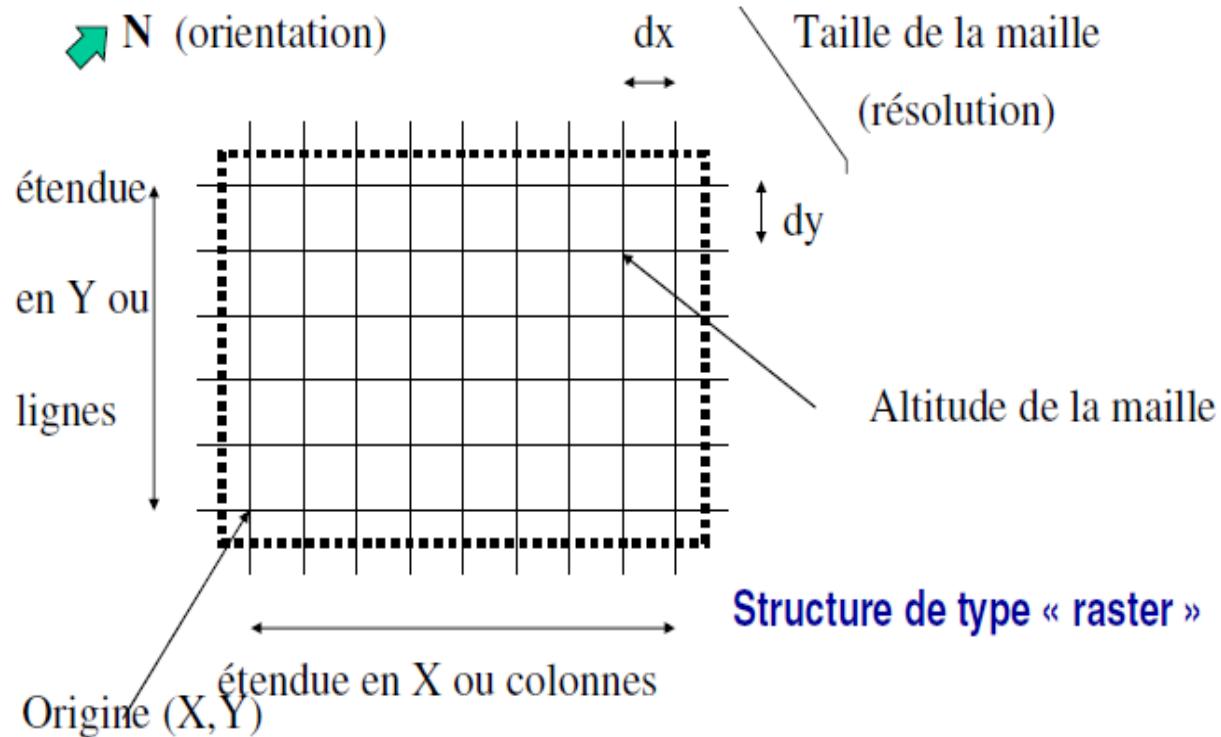
Si l'on représente uniquement l'altitude du **sol**, on parle de **MNT**. Si l'on prend en compte les hauteurs de tous les objets placés sur celui-ci comme les **bâtiments** et la **végétation**, ce que l'on appelle le « **sursol** », on parle alors de Modèle Numérique d'Altitude ou d'Elevation (**MNA/MNE**).

Un MNT peut prendre la forme de fichiers **Vecteurs** (*points, poly lignes*) où chaque entité porte l'**information altimétrique** ou d'un fichier **Raster** où chaque pixel porte l'information altimétrique.

Définition d'un MNT



Format Classique d'un MNT



Un **Modèle Numérique de Terrain** est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude. Il fournit des renseignements non seulement sur les formes du relief mais également sur leur position. La pente et l'orientation sont obtenues à partir des dérivées premières du MNT. Les dérivées secondes nous renseignent sur les courbures du terrain.

Images sources pour les MNT

Images optiques

Images Radar

Images Lidar

Aéroporté ou satellitaire

Photogrammétrie

Radargrammétrie

Altimétrie

Localiser et restituer géométriquement de façon précise des objets à partir d'images

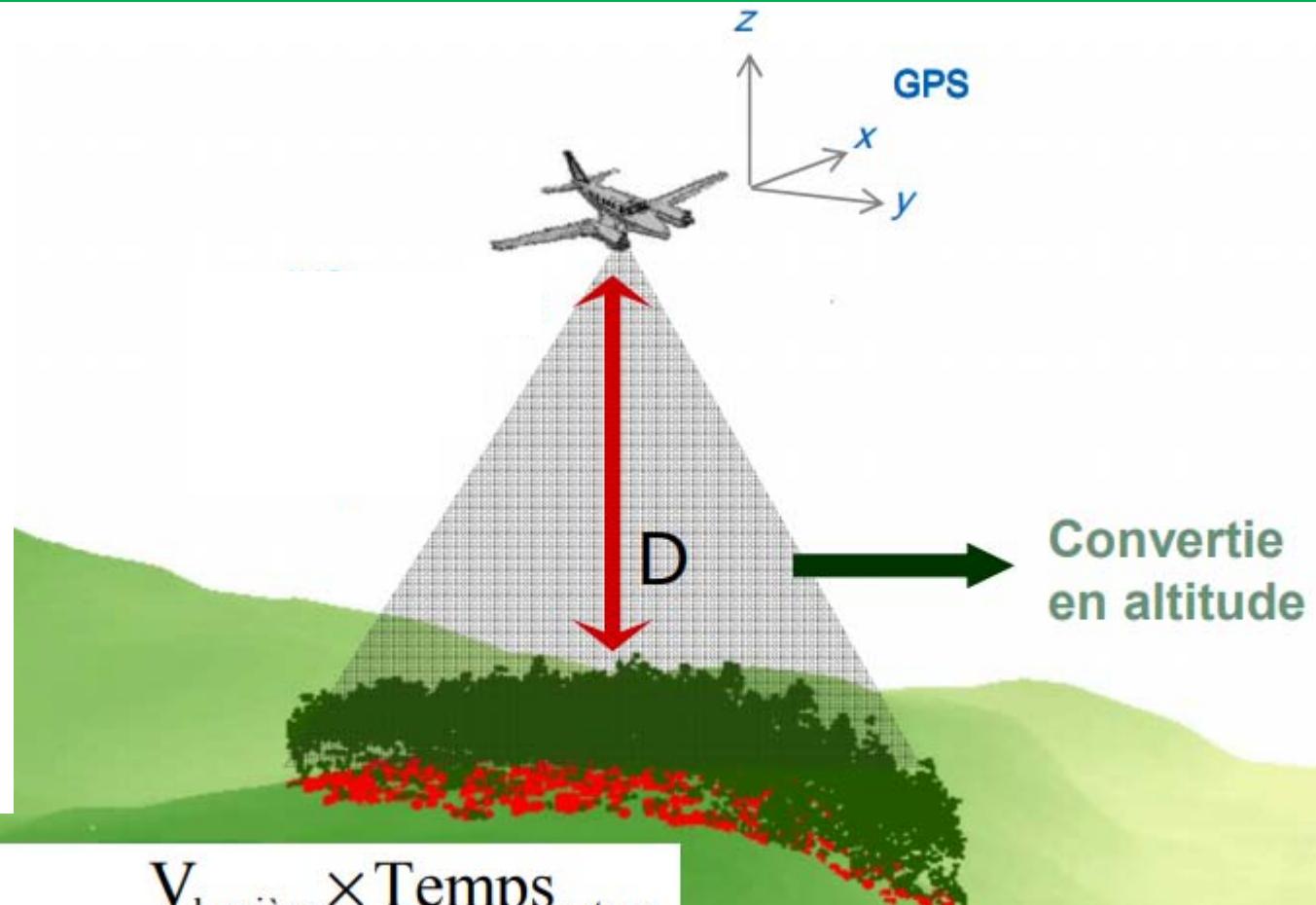
Techniques d'exploitation des images de Radar qui permettent de déterminer les caractéristiques géométriques du terrain

Représentation géométrique du relief, généralement au moyen de points cotés et de courbes de niveau

Le LIDAR

Définition: Le LiDAR (Light Detection And Ranging) désigne une technologie de télédétection aéroportée faisant appel à un rayon lumineux, c'est un rayon laser, émis vers la surface de la terre et qui est ensuite réfléchi au capteur.

Connaissant la vitesse de diffusion de ce laser **V** et le temps entre l'émission et le retour **T**, il est possible de calculer la distance **D** qui sépare le capteur du sol (*ou des objets opaques qui le recouvrent*) et obtenir ainsi leur Altitude.



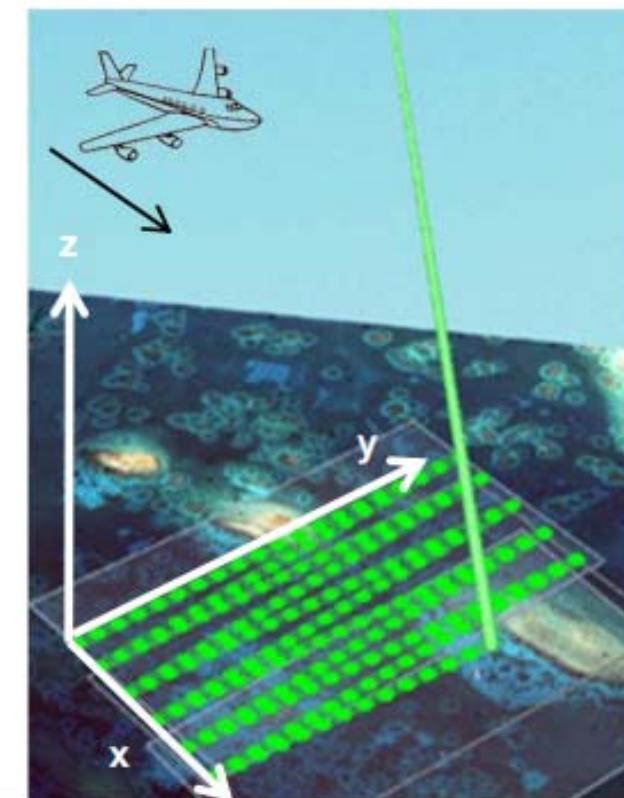
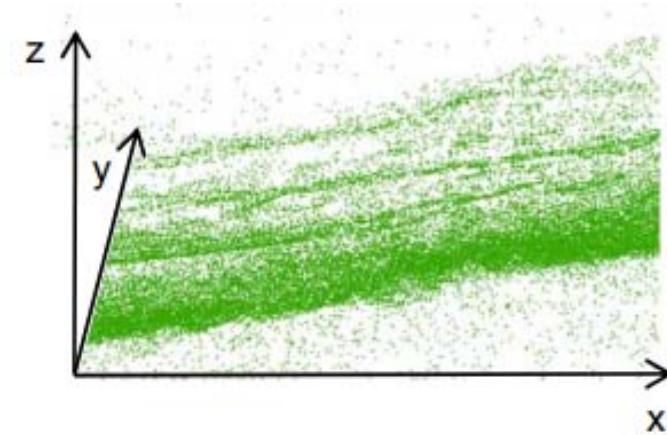
$$D_{\text{objet-lidar}} = \frac{V_{\text{lumière}} \times \text{Temps}_{\text{return}}}{2}$$

Le LIDAR aéroporté

Le signal n'est pas continu : le signal laser est envoyé vers le sol suivant une certaine fréquence, ou pulsation, qui définit une grille de points d'altitude (z) appelée nuage de points.

Les points de colonnes de cette grille sont captés suivant un balayage orthogonal (y) à la trajectoire de la plate-forme aéroportée.

Les points de lignes de cette même grille sont captés suivant le mouvement (x) de l'appareil. La résolution de la grille est donc fonction de la vitesse de la plate-forme aéroportée.



LIDAR terrestre

Définition: Le lidar terrestre, est un instrument de mesure qui utilise un faisceau lumineux pour collecter des nuages de points XYZ denses et géoréférencés qui serviront à représenter un objet ou la morphologie d'un lieu en 3D.

Le lidar terrestre est utilisé pour le relevé 3D de bâtiments, de structures, d'objets et de scènes complexes pour lesquels la topométrie classique ou la photogrammétrie ne sont pas opérationnelles.

Cette technologie de mesure sans contact, utilisant la lumière laser comme support d'information, permet d'éviter l'accès à des zones difficiles d'accès ou dangereuses.



Les différents systèmes de lidar terrestres peuvent être statiques ou dynamiques (*montés sur un véhicule en mouvement ou tenus à la main*)..

Ceci est utile dans différents domaines :

- Patrimonial et architectural
- Industriel et scientifique
- Génie civil et BTP
- Maquette numérique et modélisation...

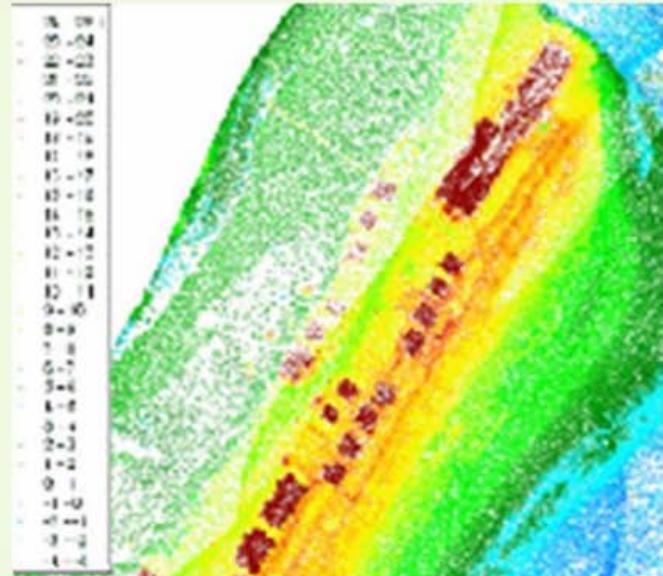


Matrice Raster par interpolation

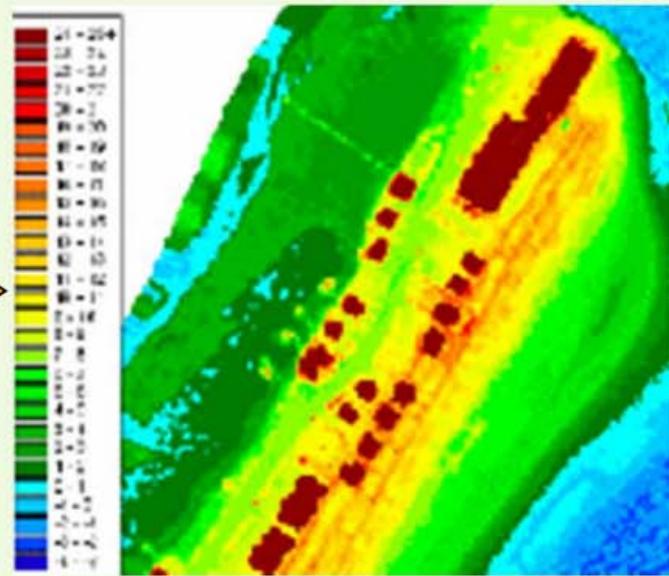
Afin de faciliter l'utilisation des données LiDAR, il est possible de générer une matrice raster par interpolation de l'altitude du semi de points classifiés.

On obtient donc un modèle numérique de terrain (MNT) en utilisant uniquement les points classés en « sol ».

NUAGE DE POINTS (x,y,z)

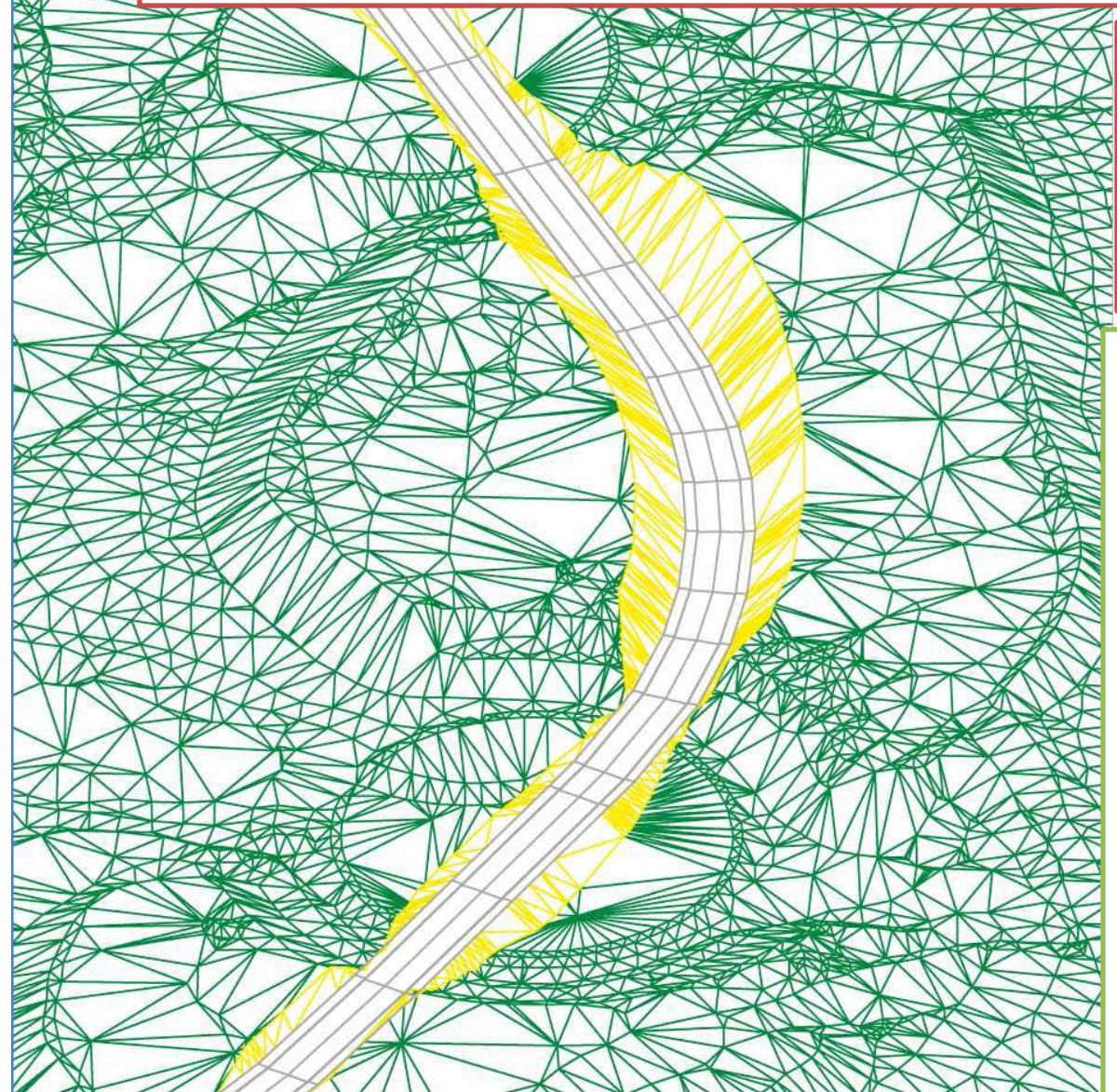


Matrice raster (pixels)



Du MNT au Relief 3D ou TIN

Triangulated Irregular Network (Delaunay)

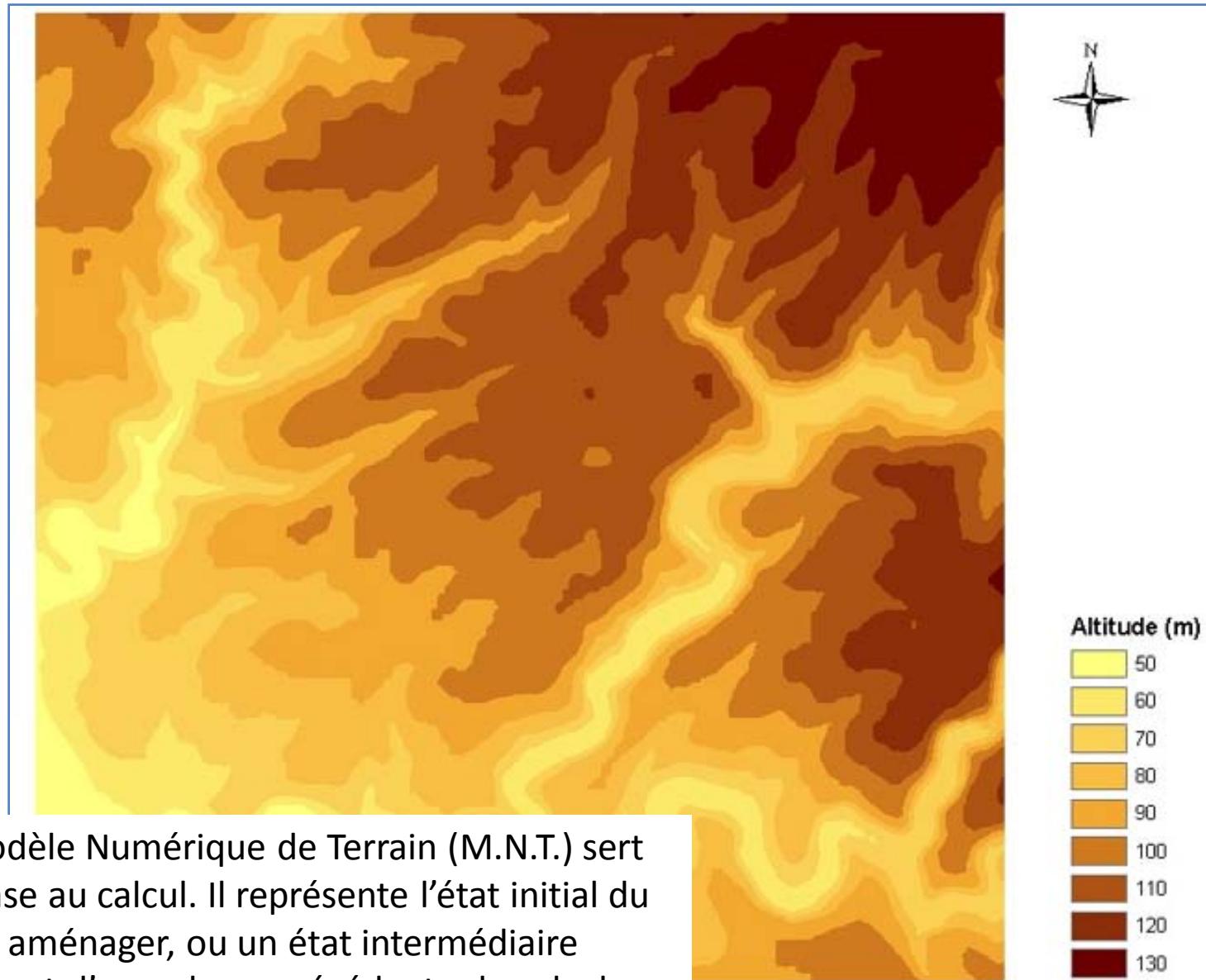


Le MNT, enrichi des lignes **de rupture de pente**, permet de réaliser une triangulation (TIN) donnant une description fidèle des mouvements du terrain.

Les TIN constituent une forme de **données géographiques numériques vectorielles** et sont construits en triangulant un ensemble de sommets ou points.

Les sommets sont reliés à une série de segments pour former un réseau de triangles. Il existe différentes méthodes d'interpolation pour former ces triangles, telles que **la triangulation de Delaunay** ou le classement des distances.

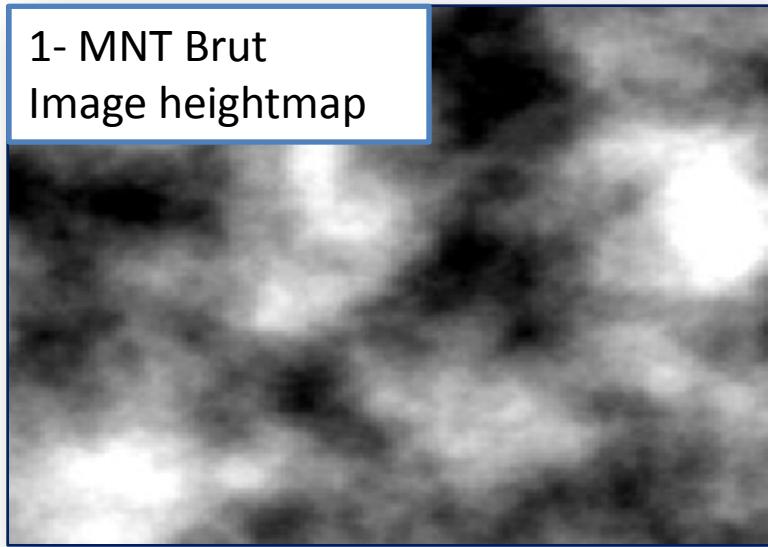
Etat initial du MNT



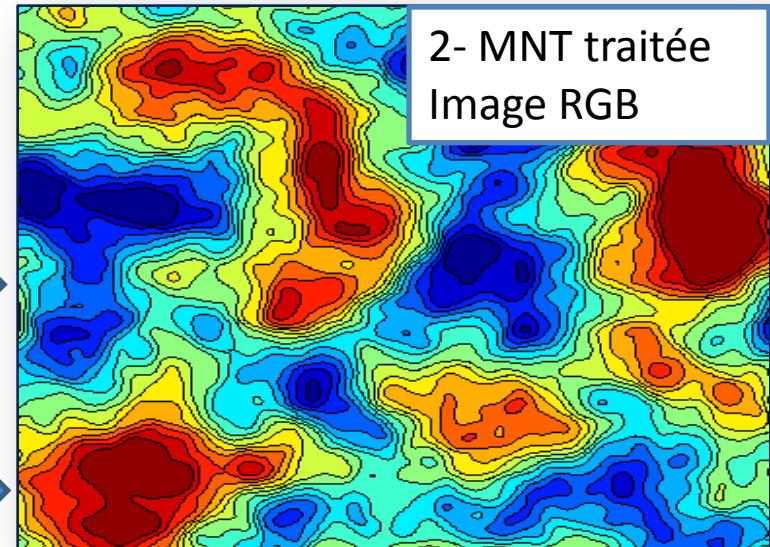
Calcul des courbes de niveaux à partir d'un MNT

(PFE de M^{elle}s HADJ CHERIF Shérazade et ZAOUACHE Lilia)

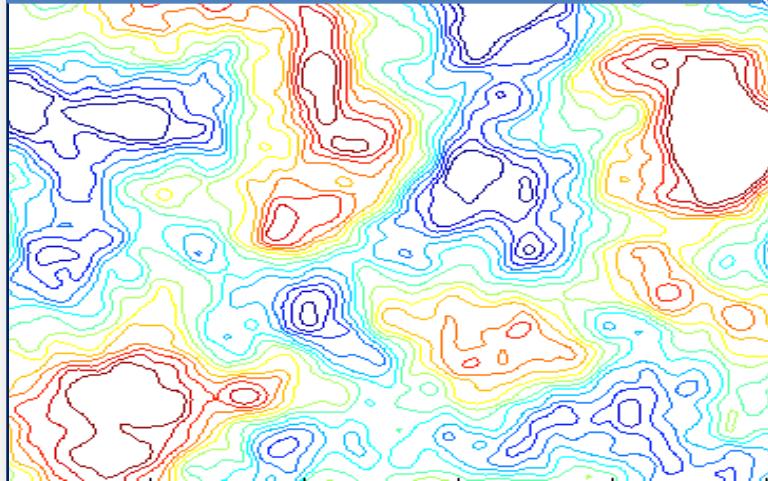
1- MNT Brut
Image heightmap



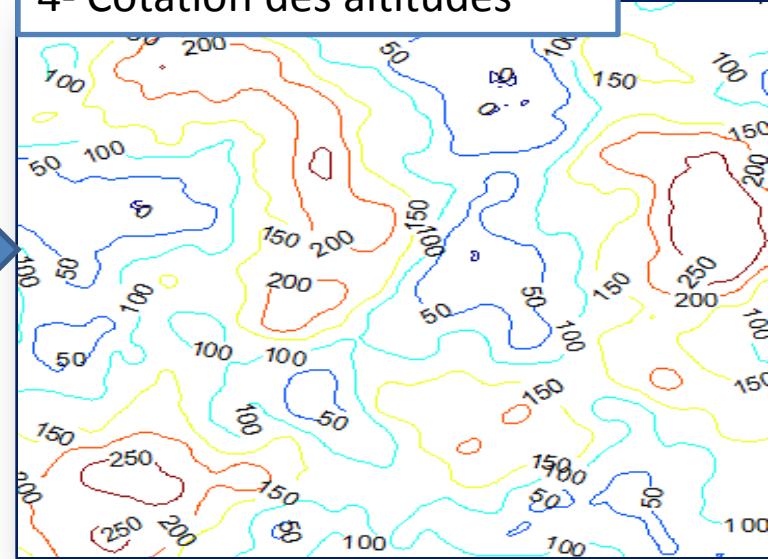
2- MNT traitée
Image RGB



3- Détection des contours
courbes de niveaux ou iso lignes

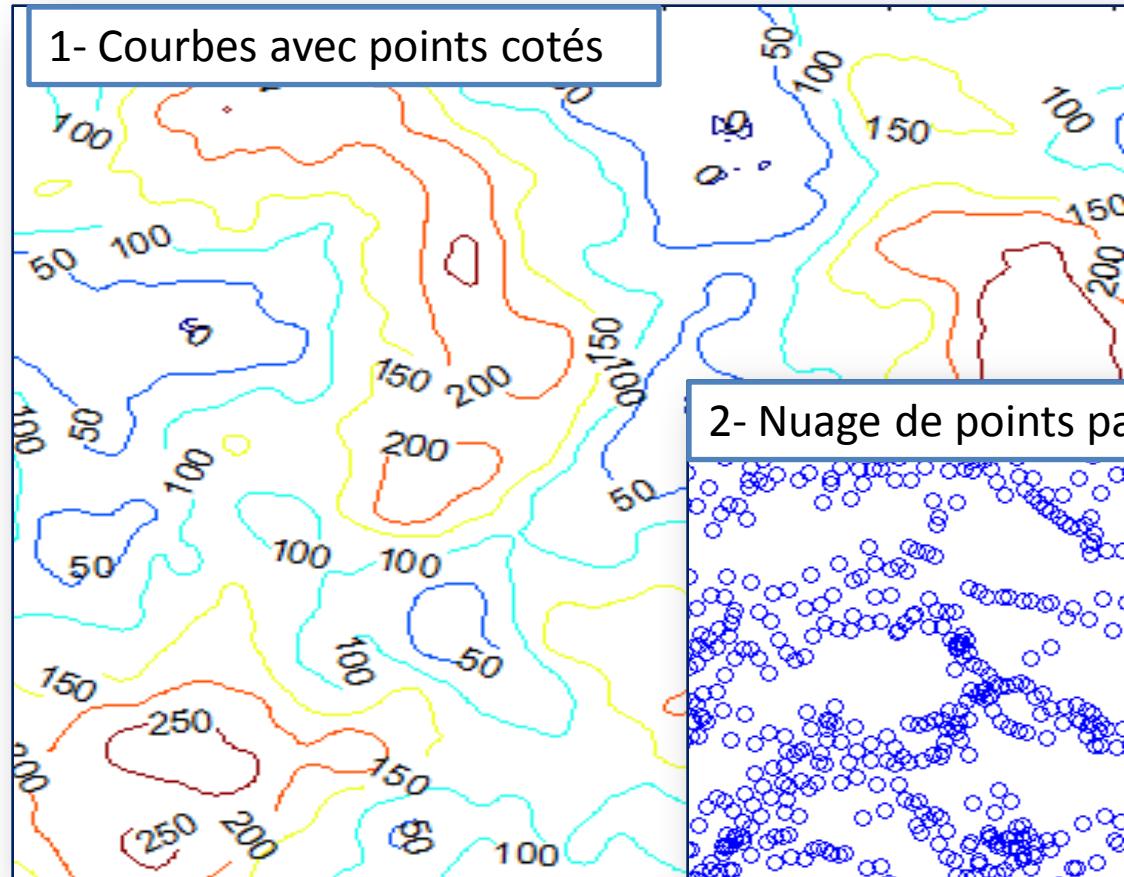


4- Cotation des altitudes

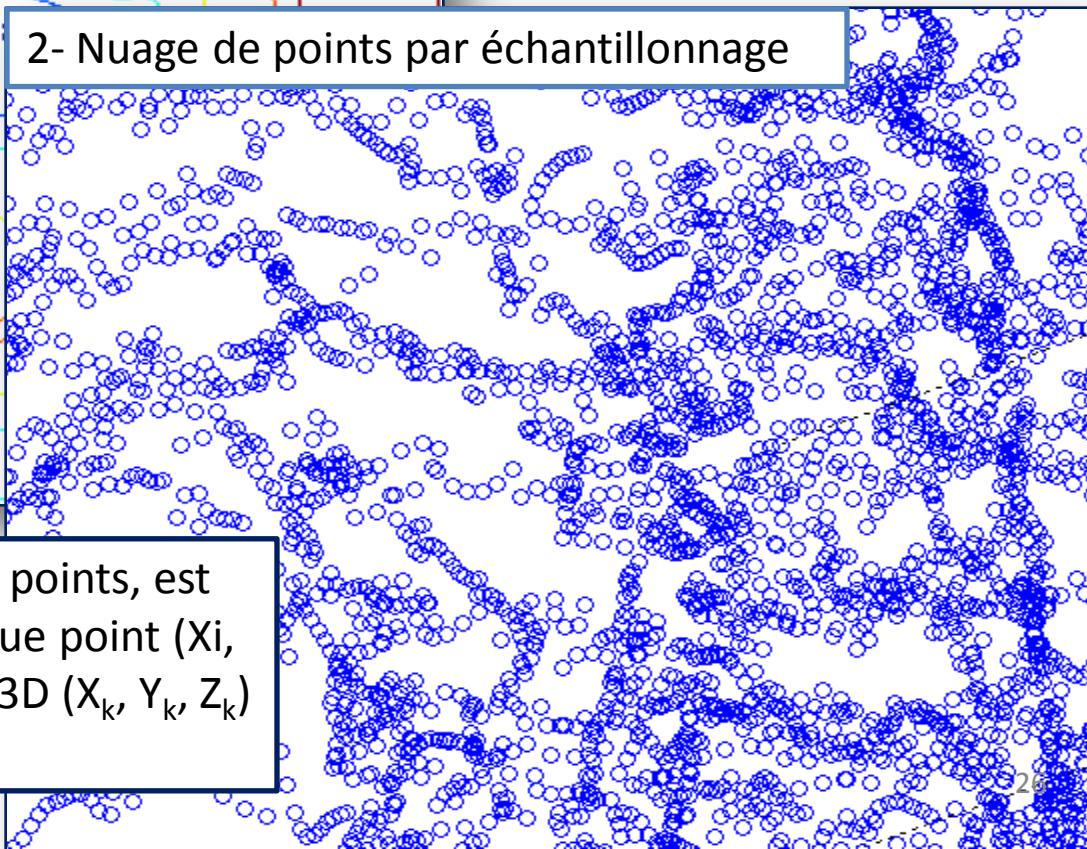


De la courbe de niveau au nuage de points

1- Courbes avec points cotés



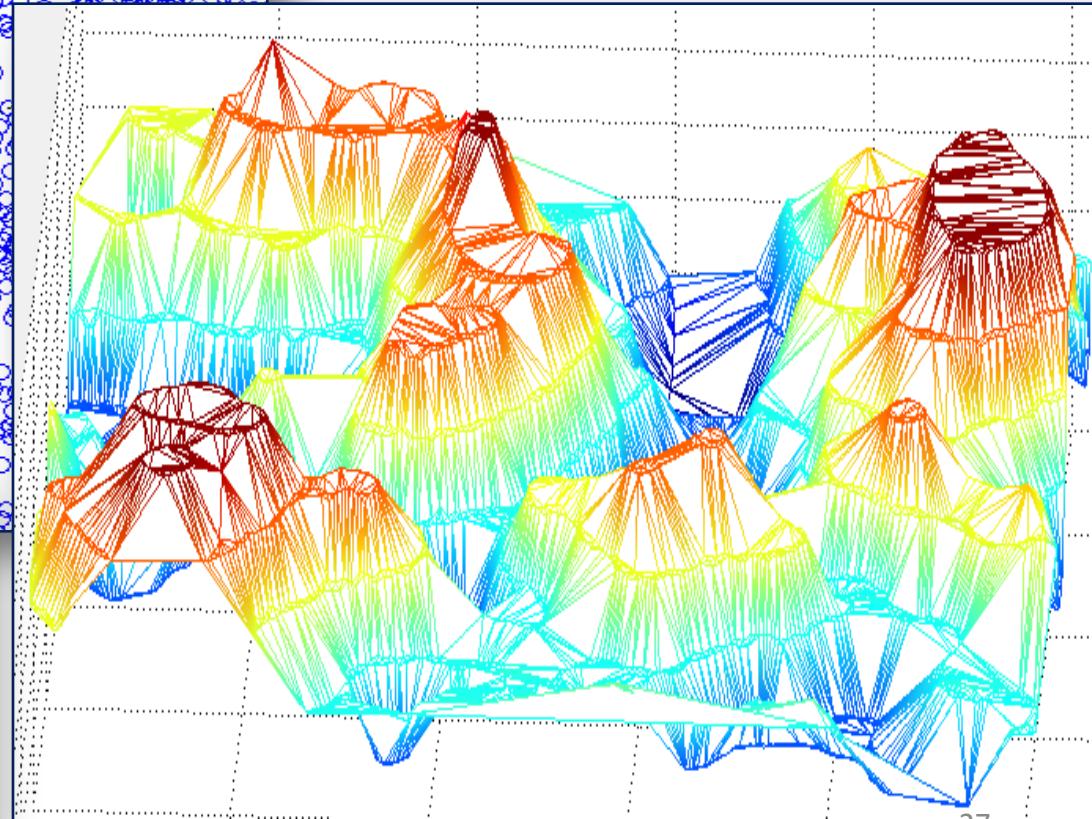
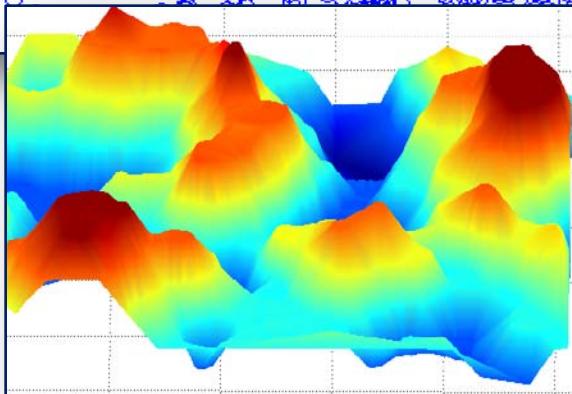
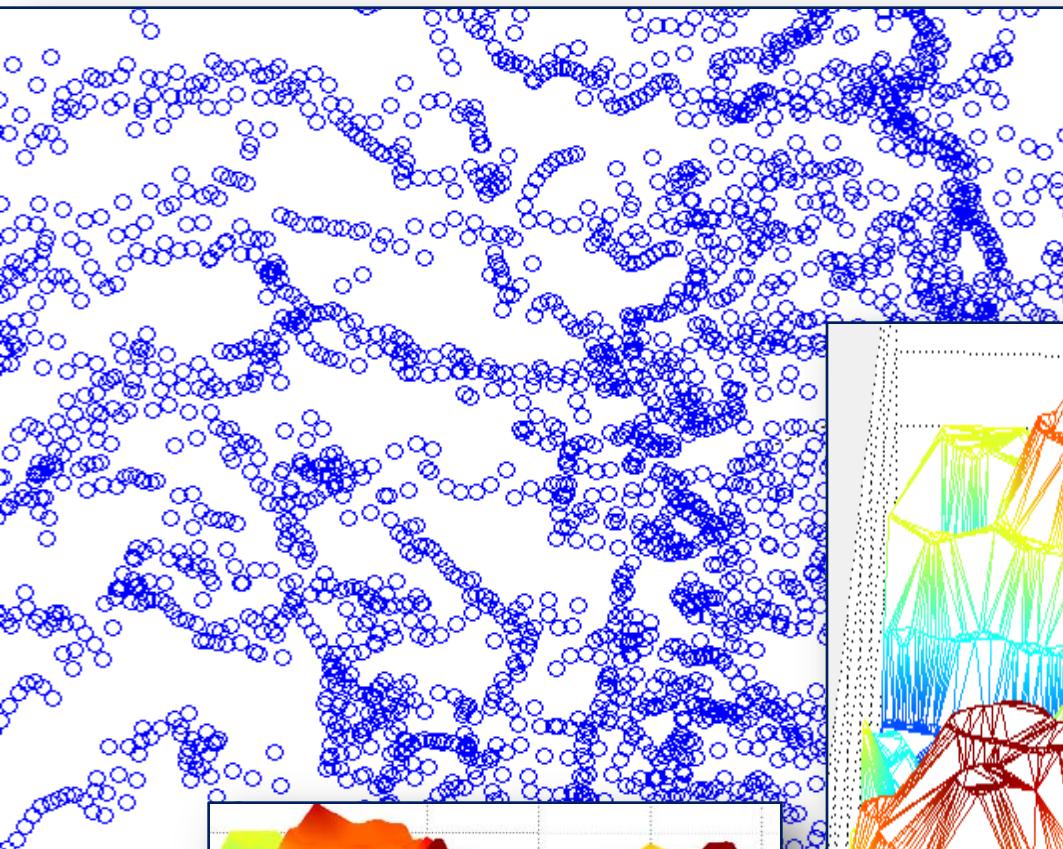
2- Nuage de points par échantillonnage



Le but de l'extraction du nuage de points, est de récupérer, l'altitude Z_{ij} de chaque point (X_i, Y_j) du plan, puis, afficher ce point 3D (X_k, Y_k, Z_k) dans la scène.

Du nuage de point aux TIN

Triangulated Irregular Network



Triangulation de Delaunay

Définition:

Une triangulation est une subdivision planaire où chaque division est un triangle dont les sommets sont les éléments de P (P : ensemble du nuage de points).

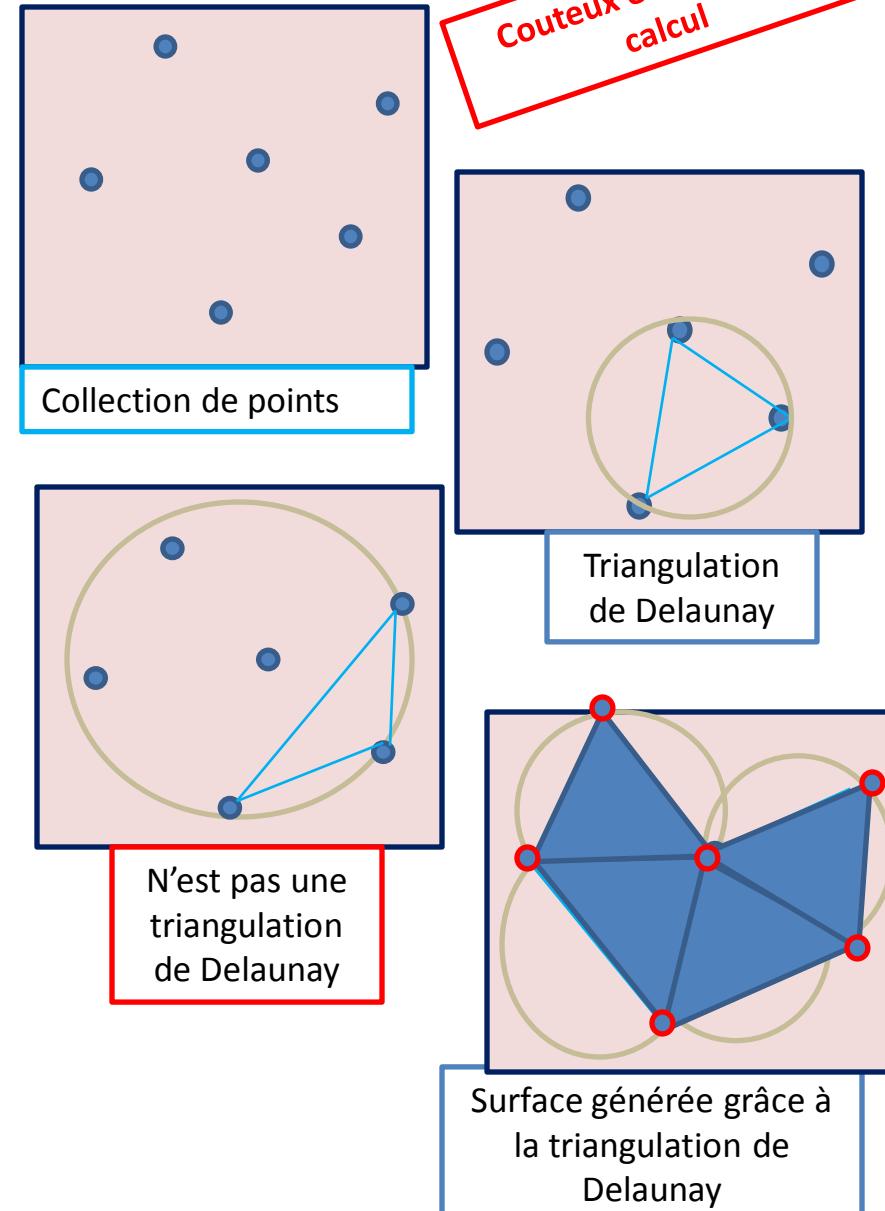
De plus, dans une triangulation T de P , il est interdit d'ajouter un segment connectant deux points en intersectant un segment existant déjà.

Théorème:

Tout polygone simple admet une triangulation, et toute triangulation d'un polygone simple à n côtés comporte exactement $n - 2$ triangles.

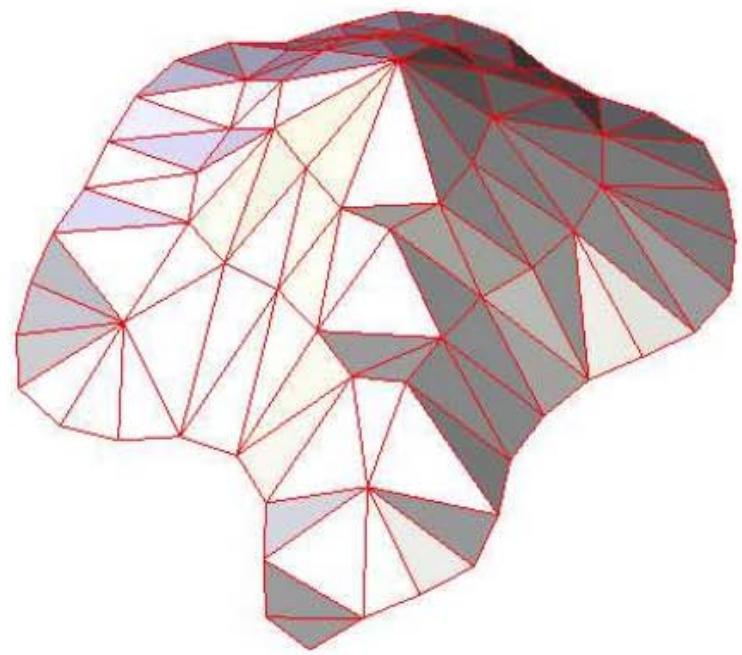
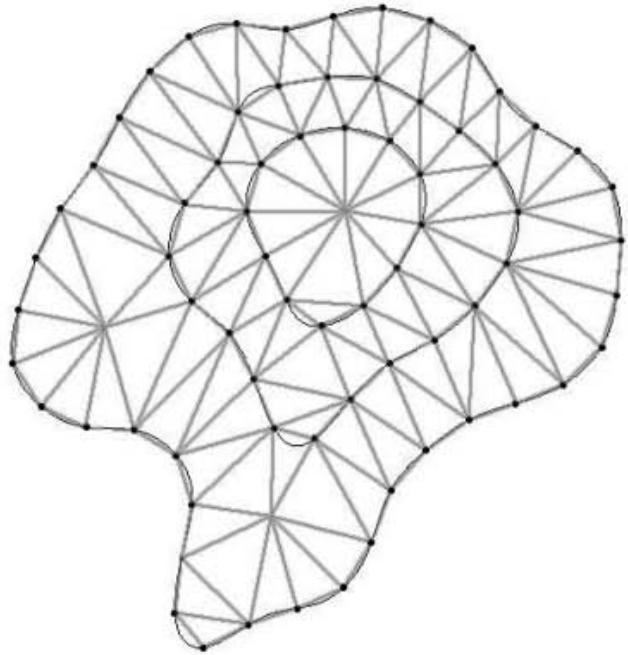
Critère du cercle:

un triangle de Delaunay est un triangle qui a comme sommet trois points, et tel que son cercle circonscrit n'ait en son intérieur aucun autre point.



Triangulation de Delaunay optimale

Cette figure montre 3 courbes de niveau et les points et facettes résultantes après triangulation pour aboutir à une vue 3D. La surface triangulée définie par des facettes de triangles de taille et forme irrégulières ne se chevauchant pas sont continues. A l'intérieur de chaque triangle, la surface est supposée homogène et représente un plan orienté dans l'espace.



-C-

MNE / MNS / MNA

*(Modèle Numérique d'Elévation de
Surface ou l'Altitude)*

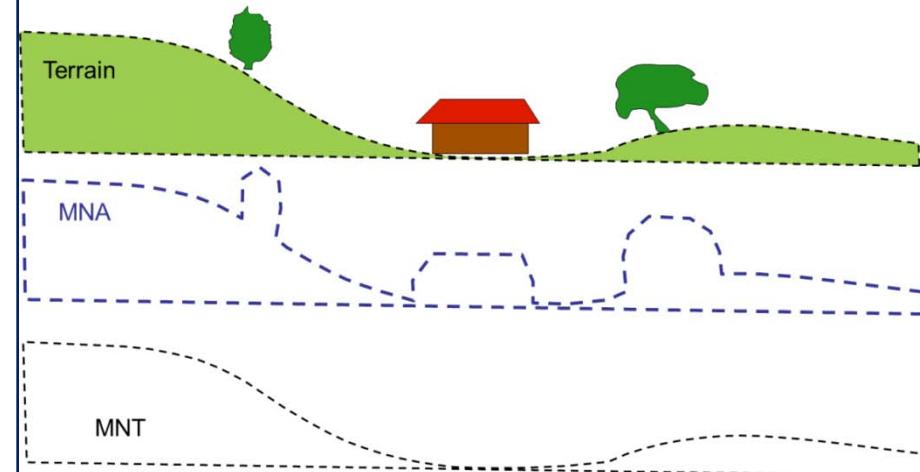
Définition

Un **Modèle Numérique d'Elévation** (MNE) est
Une représentation des élévations sur un terrain
comprenant la **végétation** et les **bâtiments**

L'intérêt de ce type d'application est multiple :

- 1) Il permet une **cartographie classique en fonction du thème retenu**.

(carte figurant l'occupation du sol par les bâtiments et constructions, par exemple: hôpitaux, écoles, administrations,...)



- 2) Il permet de **mettre en corrélation de façon systématique et visuelle des données contenues dans les différentes couches d'informations superposées**
(Couche sol (MNT), couche routes, couche bâties, couche canalisations souterraines, couche rails de tramways, etc....)

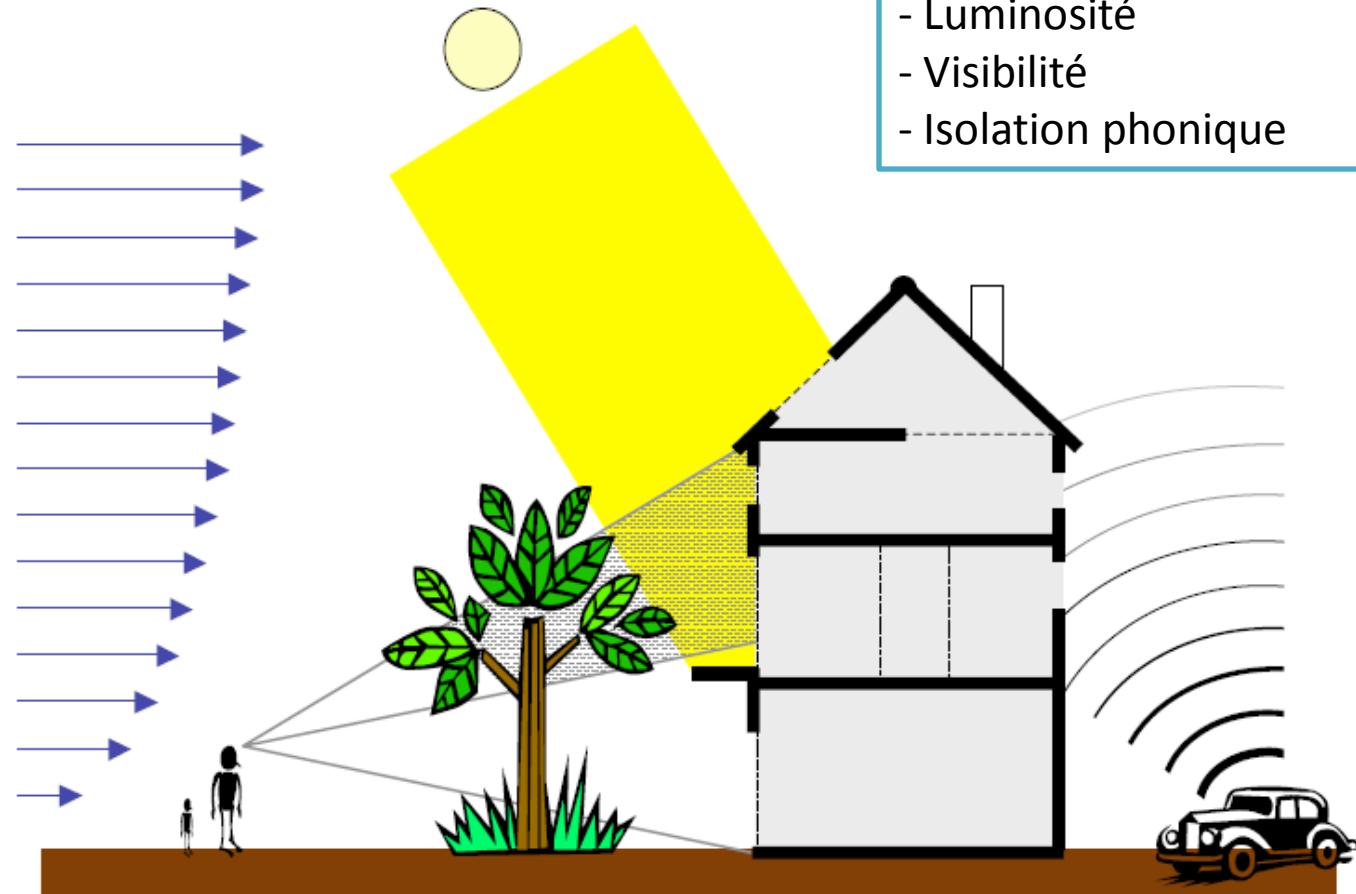
- 3) Le géo référencement permet **d'intégrer des paramètres purement géographiques** au raisonnement : ainsi le logiciel calcule de façon automatique les superficies, les densités, les pentes, la nécessité de ponts ou souterrains, etc...., et peut également réaliser des recherches afin de répondre à des requêtes.

Exemple de requête : sélection de tous les espaces où il n'y a pas d'école et où il y a beaucoup de bâtiments.

Nécessité de la 3^{ème} dimension «Smart Cities»

Que l'on parle de **ville numérique**, de modélisation d'infrastructures ou de SIG 3D, travailler en 3D à l'échelle de toute une région est un besoin nécessaire.

Pour visualiser, analyser ou simuler, il faut créer un modèle 3D complet précis et aussi réaliste que possible. La création de ce modèle se fait par la mise en commun de différentes sources de données:



- Ensoleillement
- Luminosité
- Visibilité
- Isolation phonique

- MNT - Modèle Numérique de Terrain
- Ortho photo plans
- Données sur les bâtiments et autres constructions (**BIM**)

Modèles de villes en 3D

Exemple de « CityEngine » de ESRI

Les modèles de villes en 3D sont de plus en plus utilisés dans les travaux de simulation comme la cartographie du bruit, la gestion des catastrophes, l'architecture, l'urbanisme et l'aménagement du territoire...

En plus de la géométrie 3D, et de l'information de l'apparence des objets, ces applications nécessitent une intégration forte d'informations sémantiques complexes. Ceci est du à la multiplicité des sources de données et de leur nature.

« CityEngine » est un produit de modélisation de villes en 3D qui s'adresse aux professionnels dans le cadre de la planification urbaine, simulation, et projets SIG 3D. C'est une solution qui permet la modélisation conceptuelle et la création de bâtiments et de villes en 3D de manière efficace et rapide, grâce à l'application de règles procédurales.

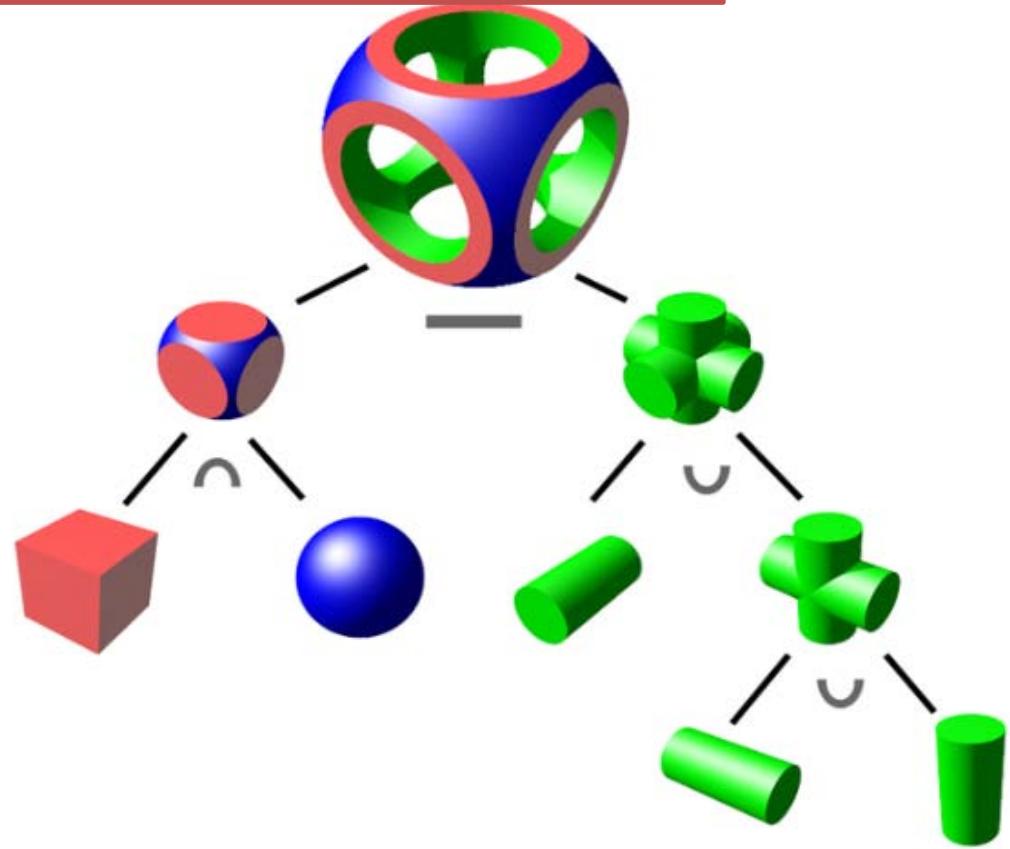
Ainsi il sera possible de comparer et analyser différents scénarios d'aménagement de bâtiments et de quartiers sous chaque angle. Cela permet d'économiser du temps et surtout de l'argent.

Modélisation Booléenne

Constructive Solid Geometry (CSG)

La modélisation géométrique des solides procède selon la méthode **CSG** (*Constructive Solid Geometry* dite aussi « modélisation solide » ou "modélisation volumique").

C'est la méthode qui consiste à soustraire, à additionner, ou à réunir un objet avec un autre. C'est une technique appréciée par beaucoup d'infographistes, car elle simule les techniques traditionnelle de la sculpture et du modelage



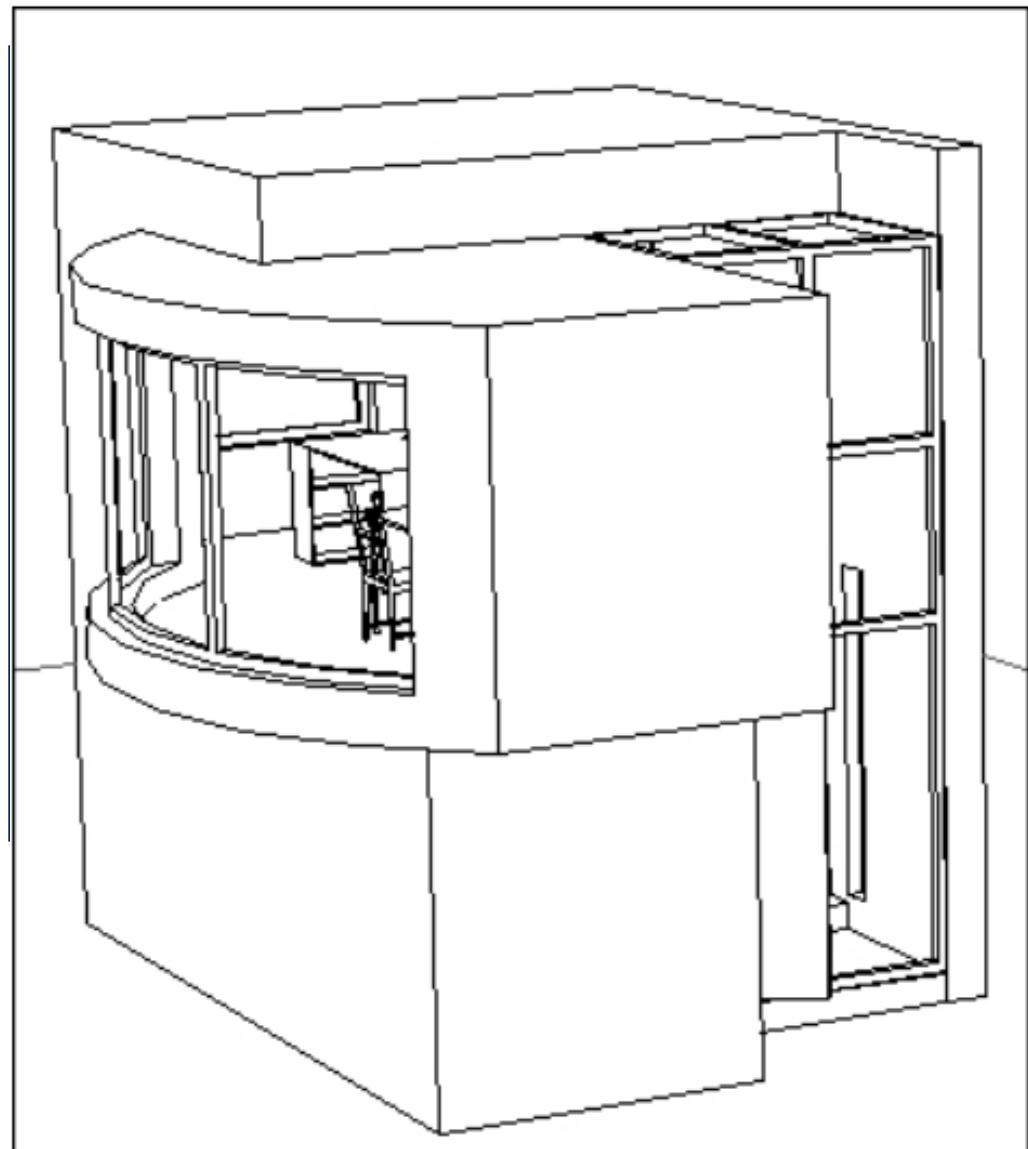
- 1- L'**union** joint les objets comme s'ils étaient modelés en terre glaise.
- 2- La **soustraction** creuse un objet avec un autre, comme en sculpture (*ici l'ordre de soustraction des objets est important*)
- 3- L'**intersection** ne laisse que ce qui a été creusé ou taillé à l'emporte-pièce par un autre objet

Modélisation Booléenne complexe

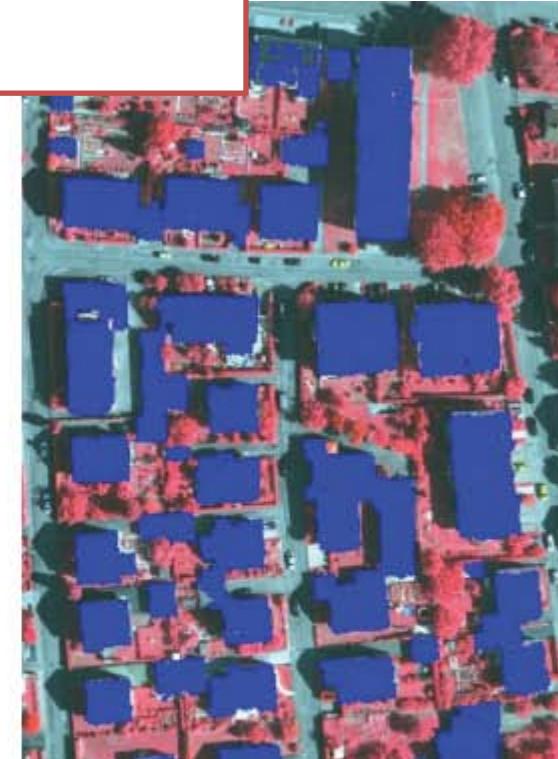
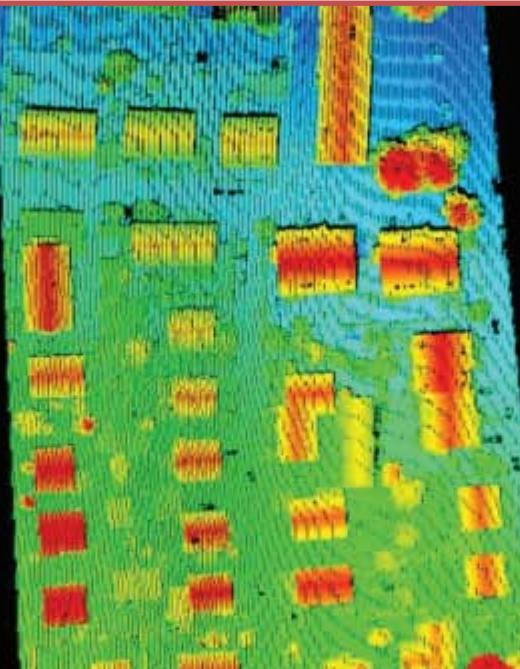
Les opérations booléennes peuvent être répétitives sur un objet ou plusieurs objets.

Après avoir créé un objet booléen, nous pouvons effectuer d'autres opérations booléennes à la même géométrie en sélectionnant l'objet comme opérande « A » pour un nouvel objet composé booléen.

Il est possible d'arriver à créer une véritable « arborescence booléenne » complexe et néanmoins avoir accès par la suite à chacune des opérations booléennes individuelles



Calcul de hauteur de bâtis à partir d'un MNE



Des chercheurs introduisent une approche axée sur la détection des toits grâce à la reconstruction du modèle 3D correspondant.

Les toits sont supposés planaires (*La méthode est moins précise lorsque des zones de végétations denses entourent un bâtiment*) en utilisant simultanément les données LiDAR et les images aériennes.

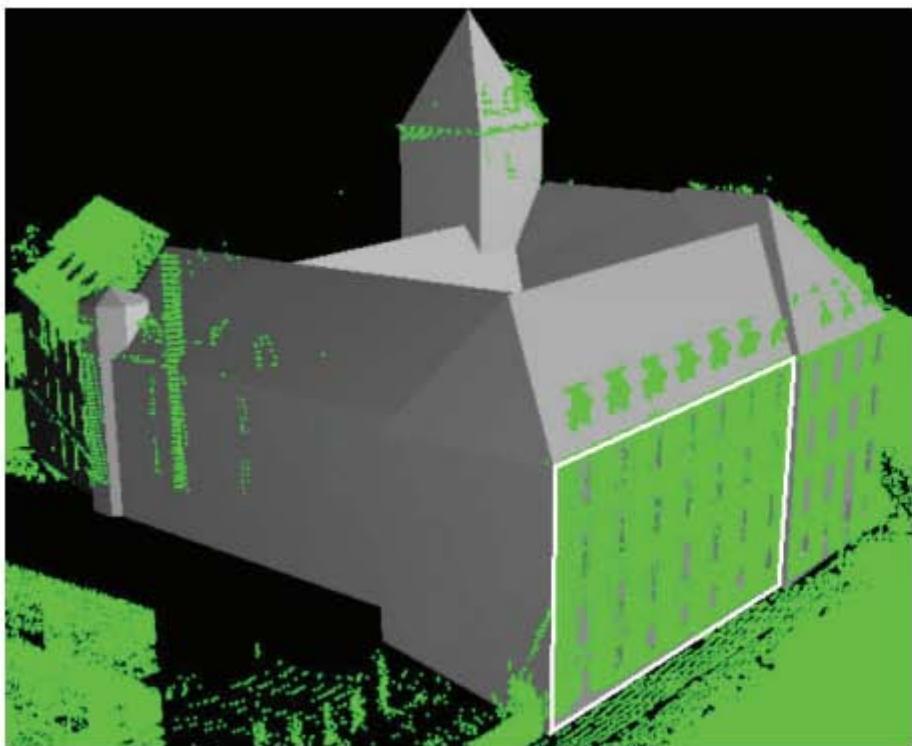
L'hypothèse est faite que les plans décrivent parfaitement la projection au sol des bordures des toits. Les primitives 2D décrivant les toitures sont ensuite ajustées au modèle afin de retrouver leurs formes et hauteur originales. Des modèles assez détaillés peuvent ainsi être obtenus automatiquement malgré des données laser faibles en densité de points.

MNE par Reconstitution de façades

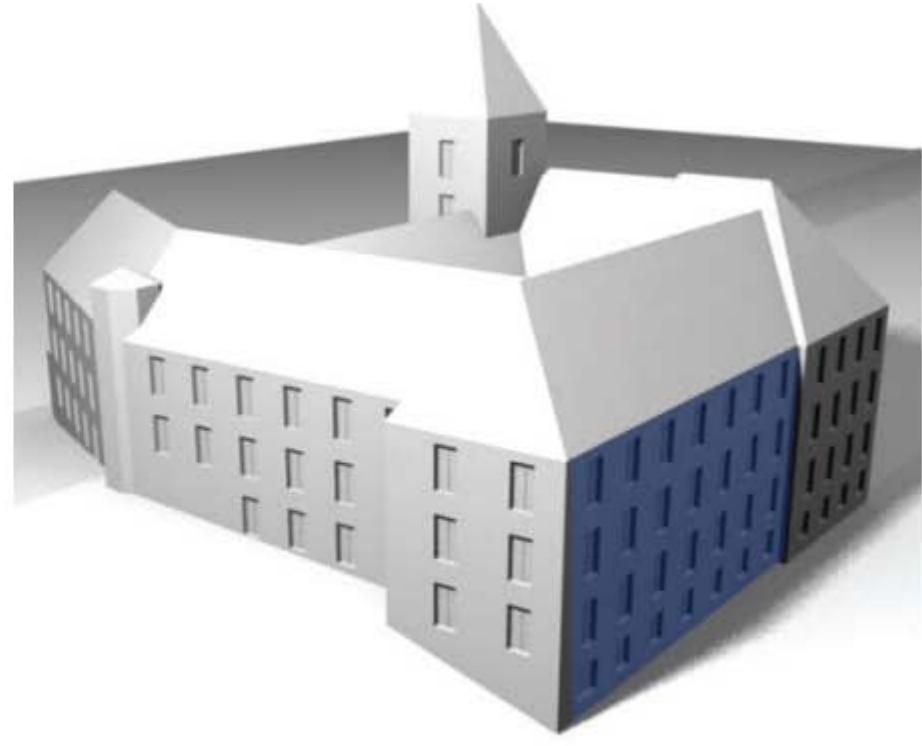
Les nuages de points acquis avec des scanners fixes ou mobiles terrestres couvrent en général une rangée de paysage plus réduite que les Lidars aéroportés.

Les données obtenues sont donc plus adaptées à la reconstruction de bâtiments seuls, plutôt que le modèles de toute une ville, et permettent généralement de couvrir des zones de la taille d'une rue ou d'un quartier.

Mais toutes ces méthodes dépendent de la qualité des données d'entrée et la limitation des reconstructions proposées à de simples modèles surfaciques extérieur , car il est difficile de reconstruire de manière correcte ce qui est inconnu.



(a)



(b)

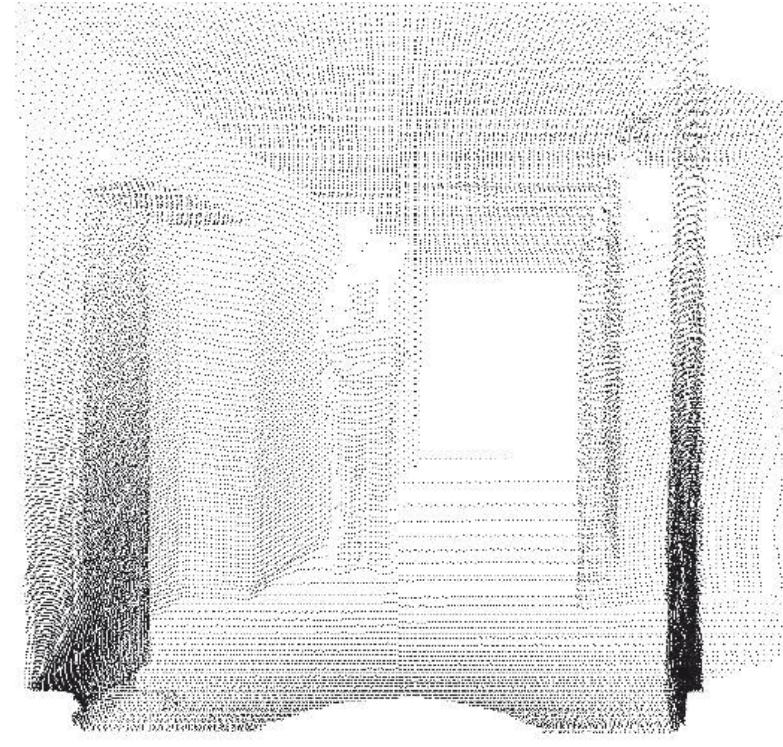
MNE par Reconstitution de L'intérieur d'un bâtiment

En se basant sur une méthode de balayage de plan, les structures verticales (murs) et horizontales (sols, et plafonds) sont détectées à travers des histogrammes.

La projection au sol des plans détectés permet d'obtenir une subdivision cellulaire, Les cellules sont fusionnées pour obtenir des polygones 2D correspondants à l'empreinte au sol du modèle. Ce dernier est alors extrudé (*donner de l'épaisseur*) pour former un polyèdre fermé qui correspond à l'intérieur d'un bâtiment.



(a)



(b)

Le standard « CityGML »

City Geography Markup Language

Les caractéristiques clés de **CityGML** (*qui est un standard proposé par l'OGC -Open Geospatial Consortium- depuis Aout 2008*) pour les MNE sont :

- 1- **Modélisation thématique** : le modèle couvre une **large gamme d'objets urbains**, y compris les bâtiments, les réseaux de transport, l'hydrographie, la végétation, le relief du terrain, l'occupation des sols, le mobilier urbain...
- 2- **Modularité du modèle** : chaque **modèle thématique** est packagé dans un **module UML séparé**.
- 3- **Gestion multi-échelle de la région au bâtiment** avec le concept de LOD (*Level Of Detail*) permettant d'exprimer la **Résolution** ou précision avec laquelle **un modèle 3D** est représenté.
- 4- **Références externes**: les objets de bases de données externes peuvent être référencés à partir du bâtiment ou de l'objet urbain auquel ils correspondent grâce aux **BIM (template)**
- 5- **Capacité d'extension** « orientée métier » grâce aux extensions ADE (*Application Domain Extensions*) de CityGML.

Niveaux de détails

CityGML spécifie cinq niveaux de détail:

LOD0 : **Vue régional**, c'est une représentation du terrain. Une ortho-image ou une carte peut être drapée sur un MNT (Modèle Numérique de Terrain) avec des données de niveau régional d'occupation des sols, d'hydrographie et de réseaux de transport.

LOD1 : **Vue urbaine**. Les bâtiments sont modélisés sous forme de bloc à toits plats.

LOD2 : **Vue d'un quartier**. Les bâtiments sont modélisés avec leur structure de toit, et des surfaces qui les délimitent sémantiquement classifiées. Des objets de végétation, du mobilier urbain et des réseaux de transport plus détaillés peuvent également être modélisés sans détail.

LOD3 : **Modèle architectural (extérieur)** et infrastructures ou objets urbains. Les structures détaillées des façades et des toits, (balcons, fenêtres) sont modélisées, ainsi que les textures « haute résolution », les objets de végétation, de mobilier urbain et de réseau de transport détaillés.

LOD4 : **Modèle architectural (intérieur)**. Ce niveau a été conçu en cohérence avec le **modèle IFC** (standard permettant de modéliser les intérieurs et extérieurs de bâtiments). Le LOD 4 permet donc de décrire la géométrie intérieure d'un bâtiment, ainsi que les portes, escaliers ...

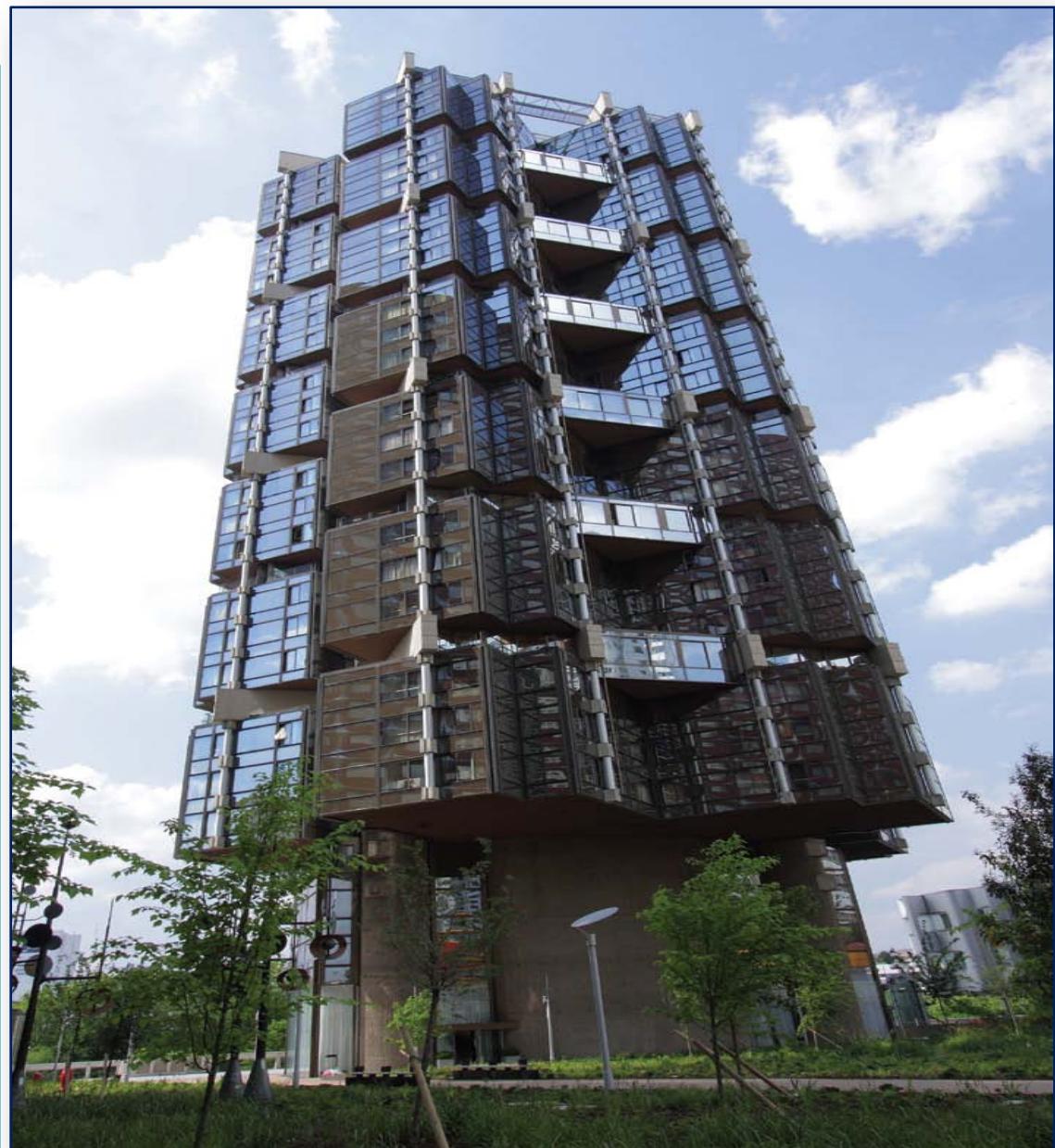
Complexité du bâti

Cependant les architectes conçoivent de plus en plus de **projets originaux**, pour lesquels nous ne savons pas déterminer simplement la superficie, vu que chaque niveau possède une emprise différente.

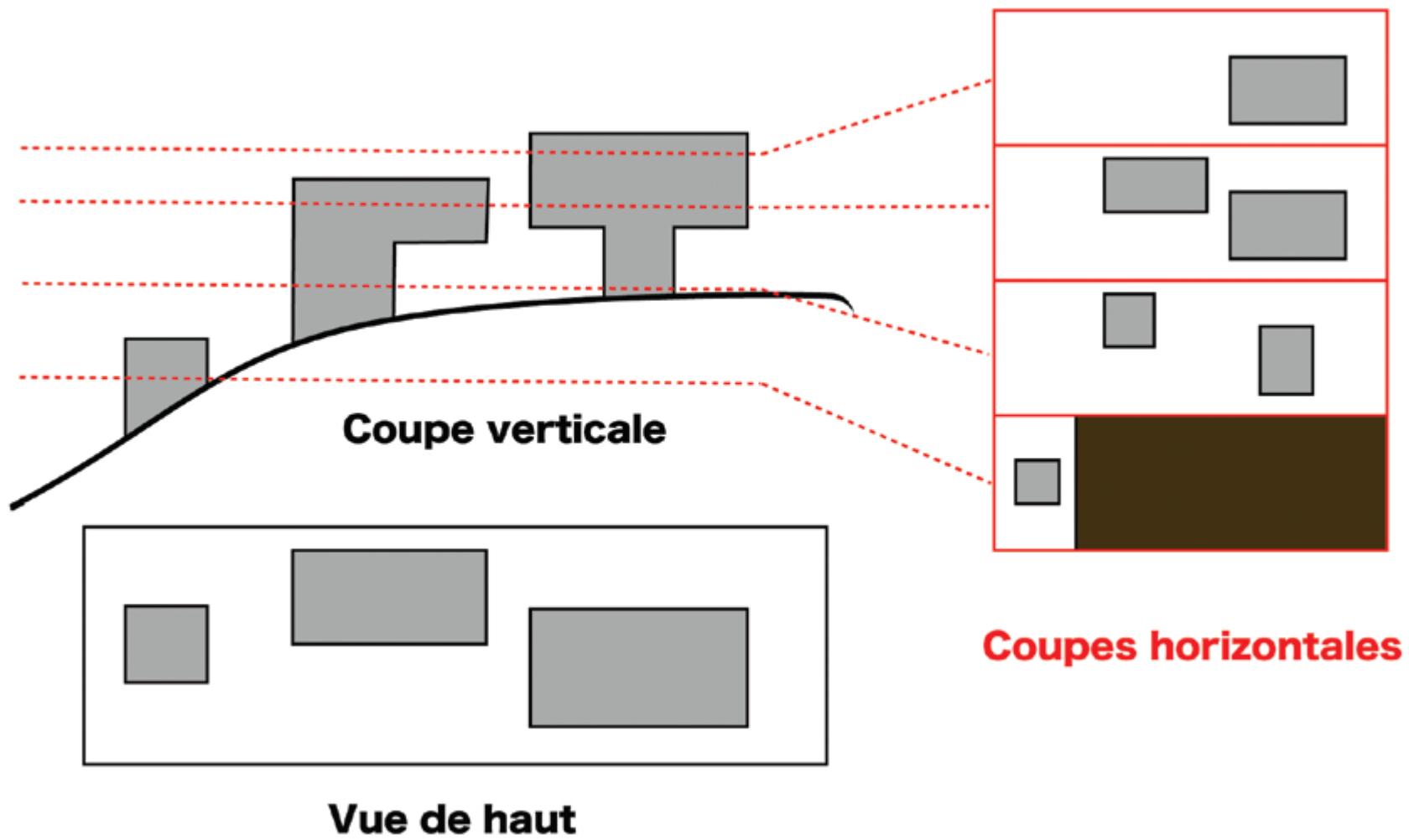
-Comment dessiner un tel bâti sur un plan ?

- Faut-il représenter l'emprise au sol, l'emprise vue de haut ?

Toutes ces questions impliquent de définir une nouvelle représentation du bâti, qui devra être simple et, associée à une indication de hauteur, elle modélisera le volume de la construction et ses surfaces complexes.



Format de type « IRM »



Elle s'inspire de l'**IRM** (*technique d'imagerie médicale*) l'objet 3D est découpé en une série de tranches (*tomographie*) qui reconstituent l'ensemble du bâti; chacune de ces tranches est assimilable à un plan. Le principe de cette méthode est donc de proposer un certain nombre de vues qui constituerait autant de **plans** cartographiques urbains.