

Systèmes d'Information Géographique

<https://go.epfl.ch/sig>

Modèles numériques d'altitude – Eléments de base

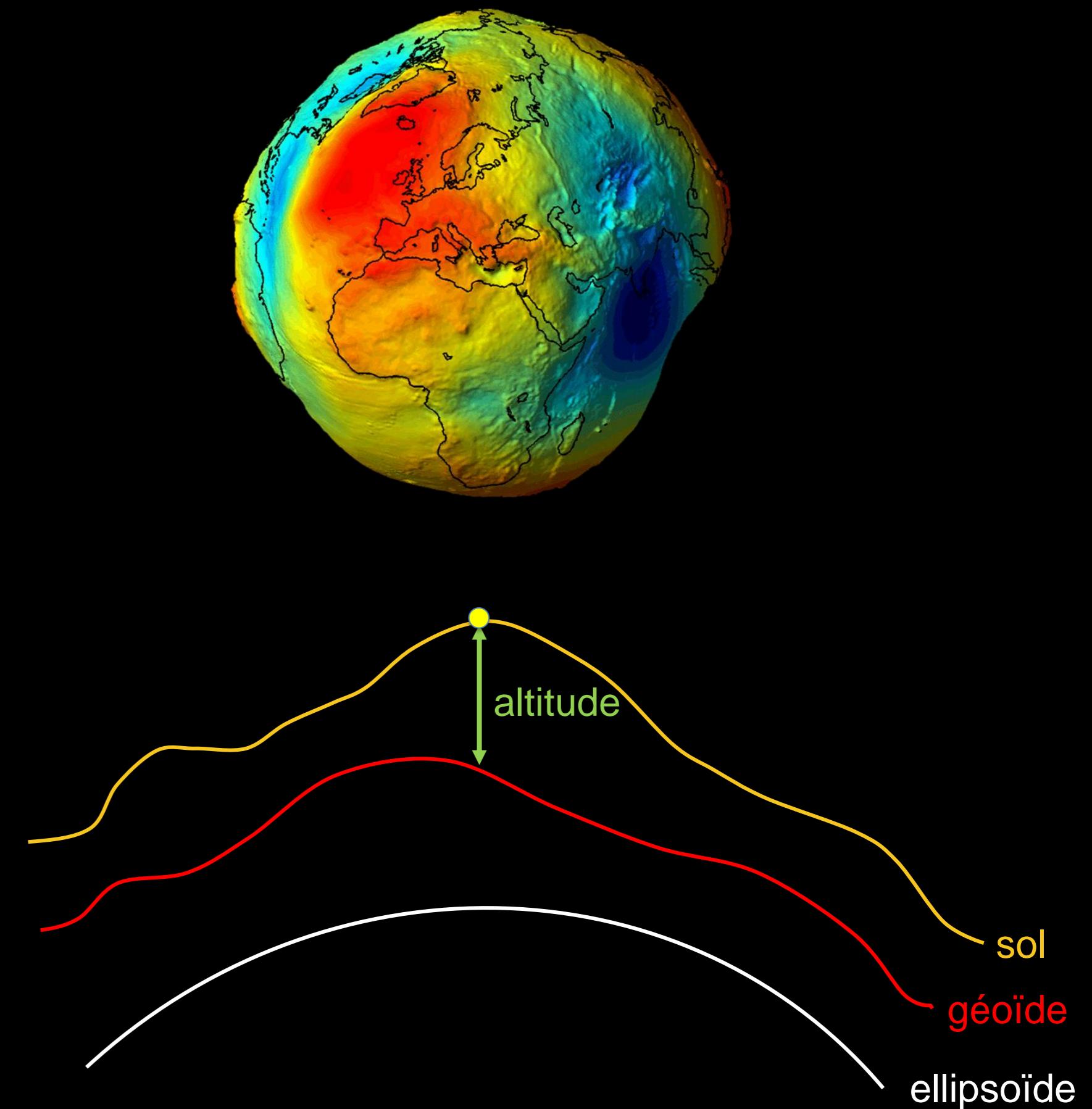
Stéphane Joost, Gabriel Kathari (GEOME-LGB)

Modèles numériques d'altitude

- Relief = forme et inégalités de la surface terrestre — issu des mouvements géologiques et climatologiques au cours de l'histoire de la terre
- Ses propriétés → conditions \pm favorables à l'évolution des règnes animal et végétal
- Conditionne l'appropriation de l'espace géographique par les êtres humains
- Relief = composante importante de l'analyse spatiale
- Mesure primaire du relief = altitude sur mer → fichier numérique avec mesures d'altitude aux nœuds d'une grille régulière = modèle numérique d'altitude (MNA)
- Nous allons passer en revue les modes d'acquisition de l'altitude et les techniques de représentation des modèles numériques d'altitude

L'altitude

- Mesure primaire du relief: l'altitude
 - Distance verticale entre un point ● et le géoïde terrestre (niveau moyen de la surface de la mer)
 - Variable continue → mesurée de façon discontinue pour créer un Modèle Numérique d'Altitude
- Les propriétés d'un MNA dépendent du mode d'acquisition et de la résolution
- Différents modes d'acquisition de l'altitude et différentes techniques de représentation



Mesure de l'altitude

Différentes méthodes de mesure de l'altitude:

- Nivellement (levé par théodolite)
- Photogrammétrie
- LiDAR — *Light Detection and Ranging*
altimétrie par laser à balayage

Mesure de l'altitude - Nivellement

Le nivelllement géométrique consiste à mesurer une différence d'altitude par rapport à un point d'altitude connue que l'on appelle repère de nivellation

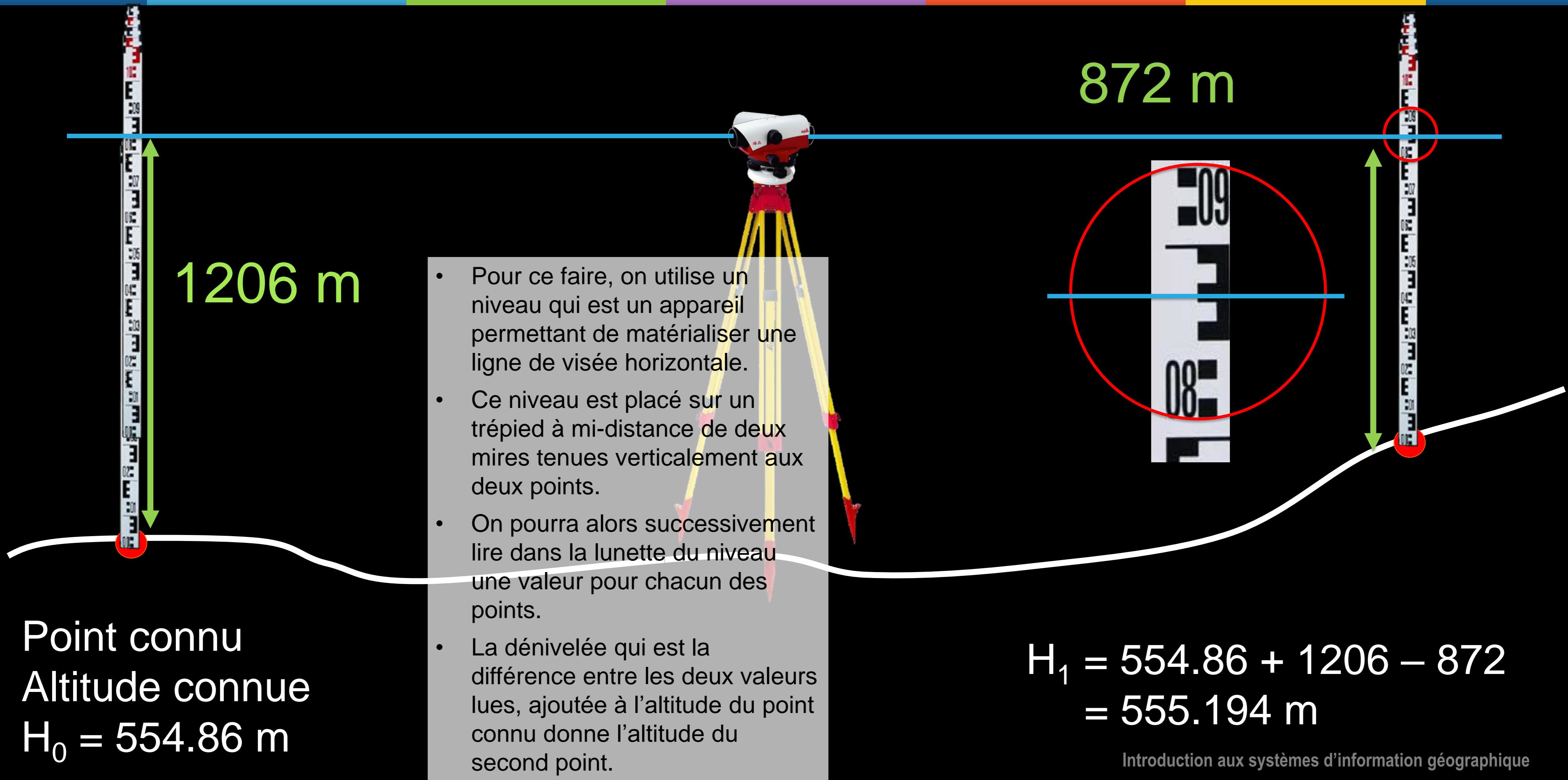
L'opération consiste à mesurer la différence de hauteur entre le point dont l'altitude est connue et le point dont l'altitude n'est pas connue, ce qui permet par simple soustraction de déterminer l'altitude des points

Point dont on veut connaître l'altitude

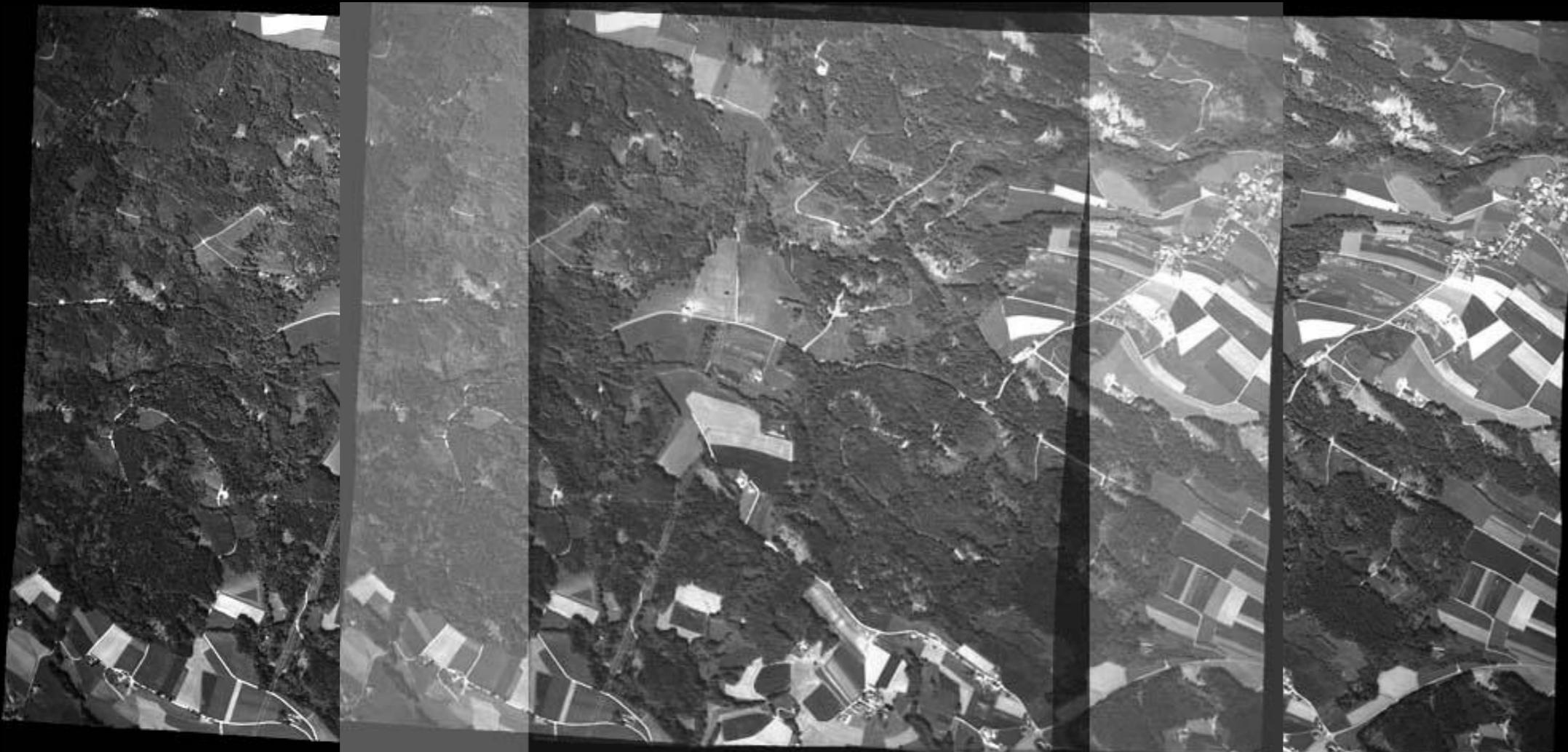


Point connu
Altitude connue
 $H_0 = 554.86 \text{ m}$

Mesure de l'altitude - Nivellement

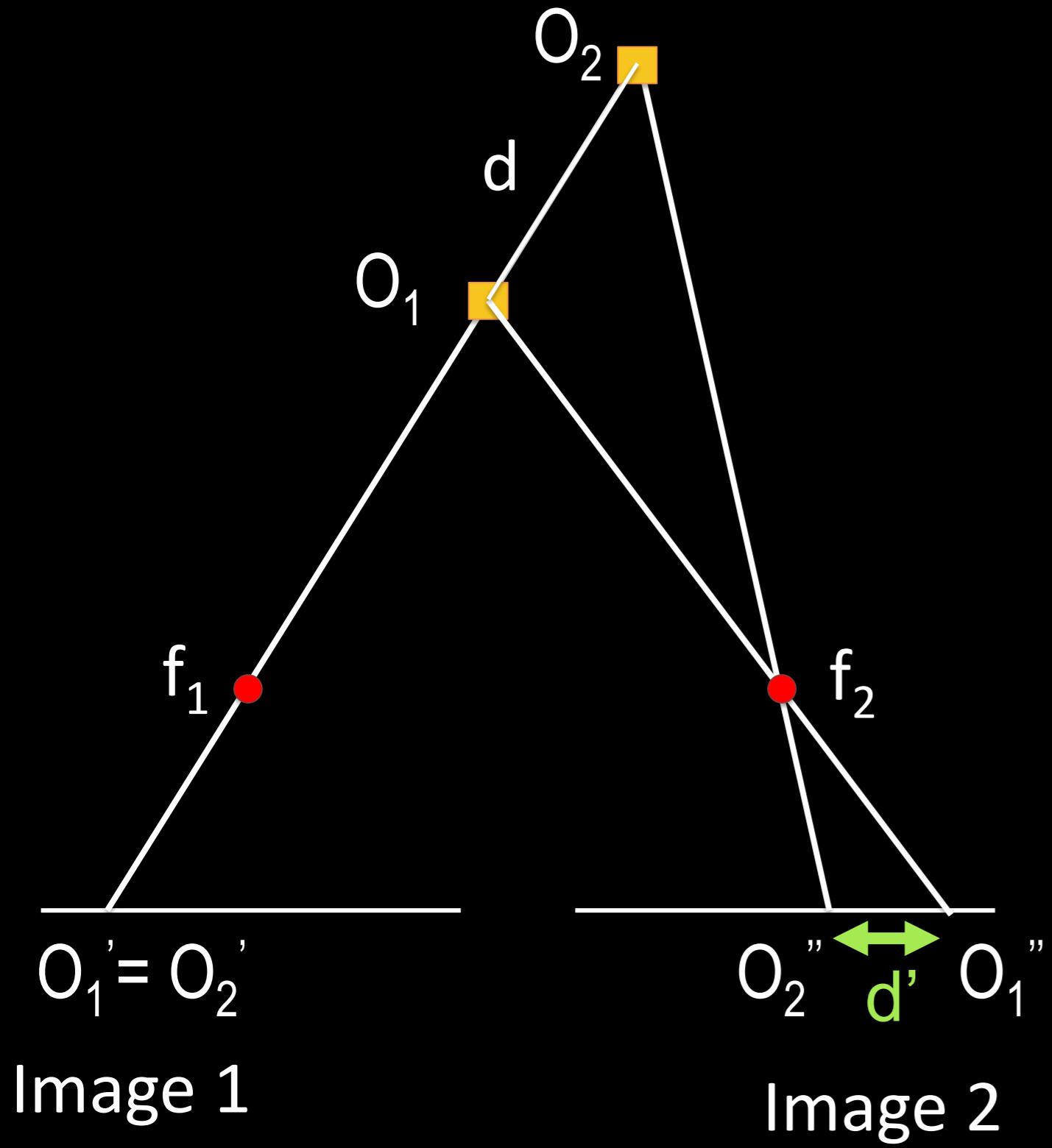


Mesure de l'altitude - Photogrammétrie



- Altitude dérivée d'images aériennes ou satellitaires
- Procédé similaire au système visuel humain – perception des objets sous 2 angles différents
- Une seule image est formée dans le cerveau, les différences de relation entre les objets se traduisent par la perception de la profondeur
- La photogrammétrie utilise 2 images planes (= 2 rétines) d'un même lieu et prises sous 2 angles différents
- Les 2 images forment un couple stéréoscopique à partir duquel on calcule le positionnement de tout objet au sol dans les trois dimensions X, Y et Z
- Implique une connaissance parfaite de la position de prise de vue des images

Mesure de l'altitude - Photogrammétrie



Principe = exploiter la parallaxe, soit le déplacement apparent sur les images d'un objet vu sous deux angles différents (plus le point est haut en altitude, plus sa position relative varie entre les deux vues)

1. O_1 et O_2 sont deux objets dans l'espace réel
2. Ces deux objets sont perçus sur la même ligne de visée
3. Comme on connaît la position relative des images 1 et 2, on peut en déduire des relations angulaires. Ici f_1 et f_2 sont les foyers photographiques des images 1 et 2. Les points O_1' , O_2' et O_1'' , O_2'' sont dits homologues des objets O_1 et O_2 – Cette identification d'une paire de points homologues est appelée appariement stéréoscopique
4. Connaissant les relations angulaires des triangles dont le sommet est f_2 , et la distance d' sur l'image 2, on en déduit la distance d
5. Pour assurer la restitution photogrammétrique, on doit disposer de points de repère au sol qui soient facilement identifiables sur les images

Principe

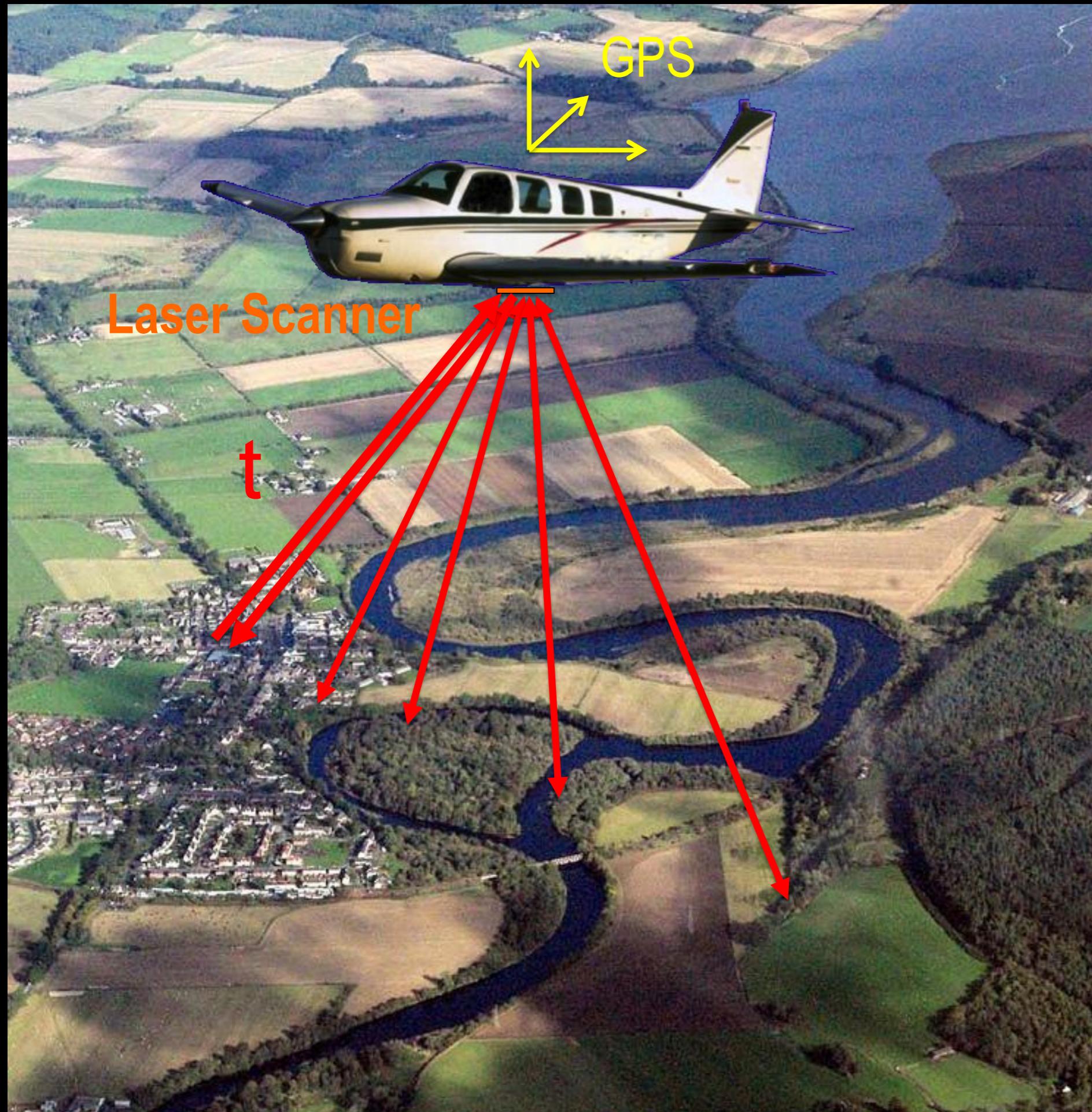
Quand on connaît:

1. Les positions et orientations précises des caméras (grâce à un GPS embarqué)
2. La position apparente du point sur chaque image (coordonnées pixels)

On peut reconstituer en 3D la position exacte du point par intersection de rayons issus de chaque caméra par triangulation

En répétant cela pour un grand nombre de points, on génère un **modèle numérique de terrain (MNT)** ou **modèle numérique de surface (MNS)**, qui donne l'altitude relative ou absolue de la surface terrestre

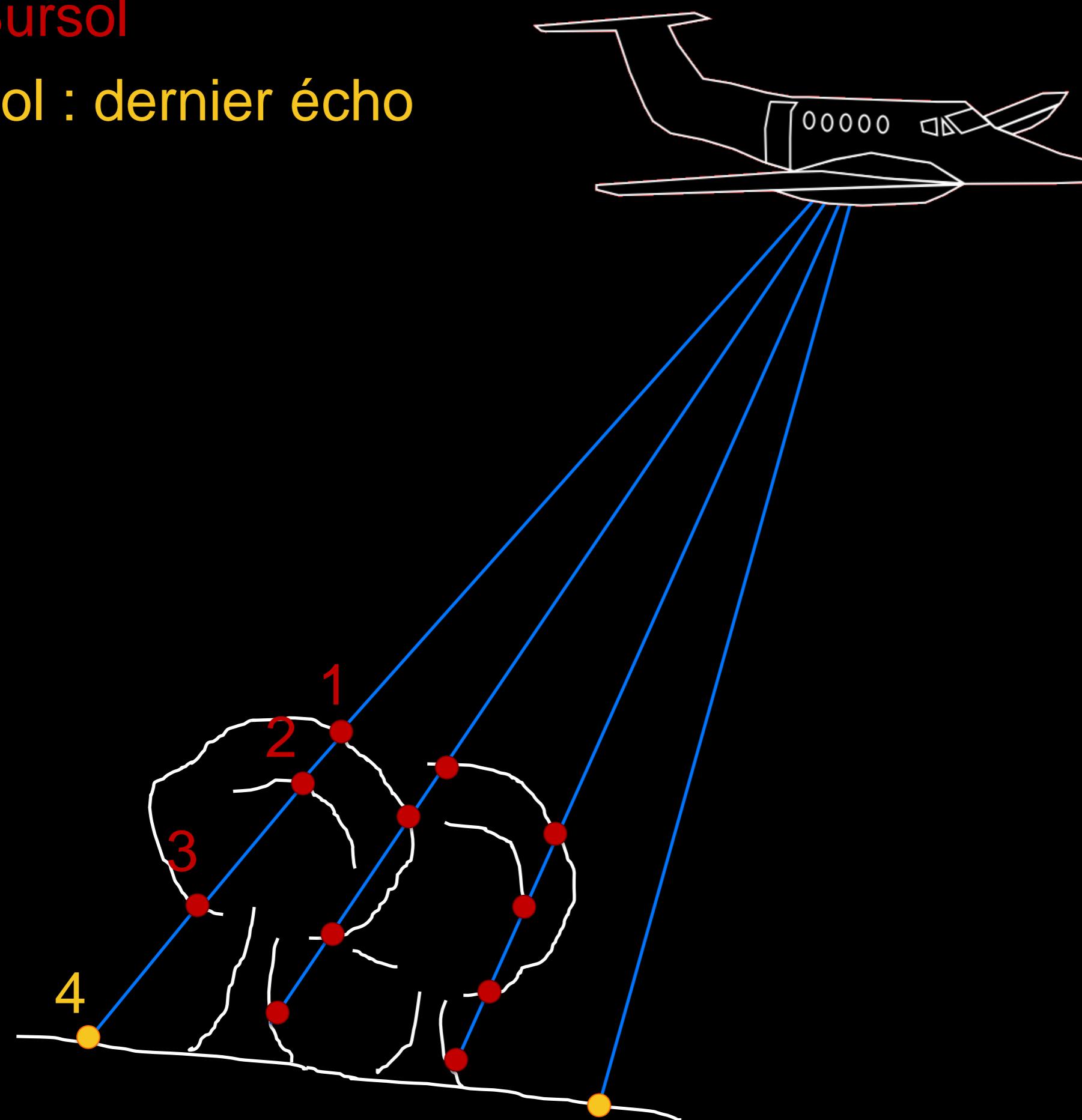
Mesure de l'altitude - LiDAR



- LiDAR = *Light Detection And Ranging*
- Altimétrie par laser à balayage aéroporté
- Position de l'avion mesurée très précisément avec un système GPS différentiel
- Mesure du temps de parcours aller-retour et de l'intensité d'un signal laser envoyé au sol
- Calcul de l'altitude du sol
- Plusieurs échos mesurés (sol et sursol)

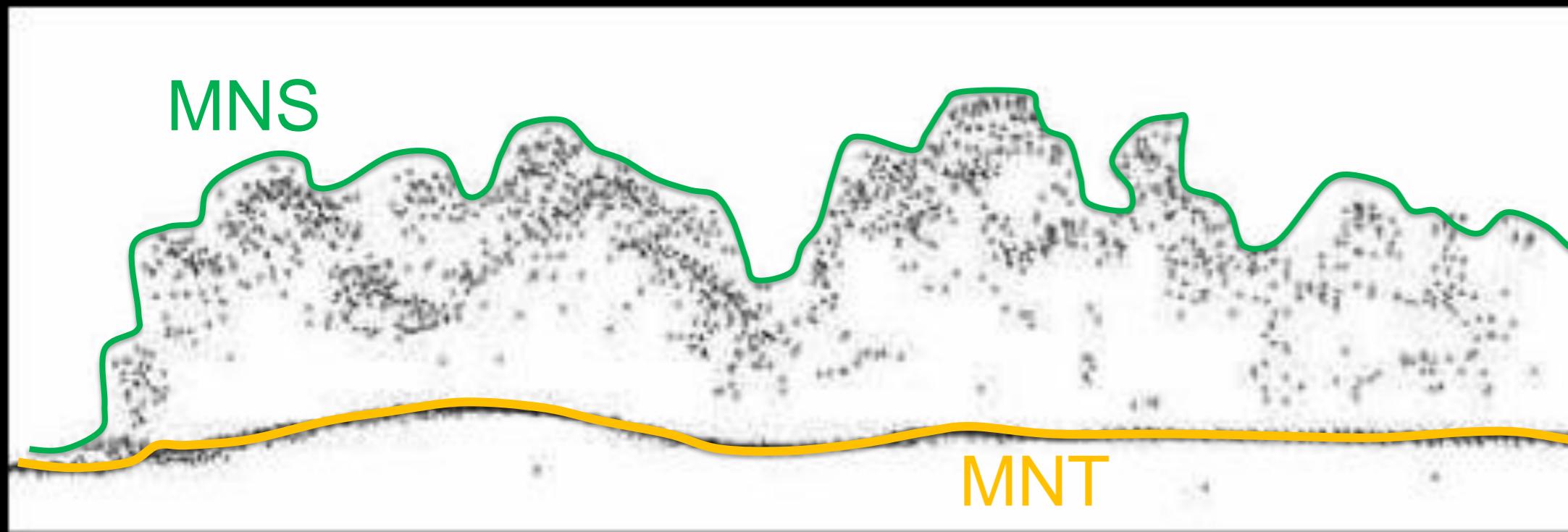
Mesure de l'altitude - LiDAR

- Sursol
- Sol : dernier écho



- LiDAR = *Light Detection And Ranging*
- Laser aéroporté
- Position de l'avion mesurée très précisément avec un système GPS différentiel
- Mesure du temps de parcours aller-retour et de l'intensité d'une onde envoyée au sol
- Plusieurs échos mesurés (sol et sursol)

Mesure de l'altitude - LiDAR



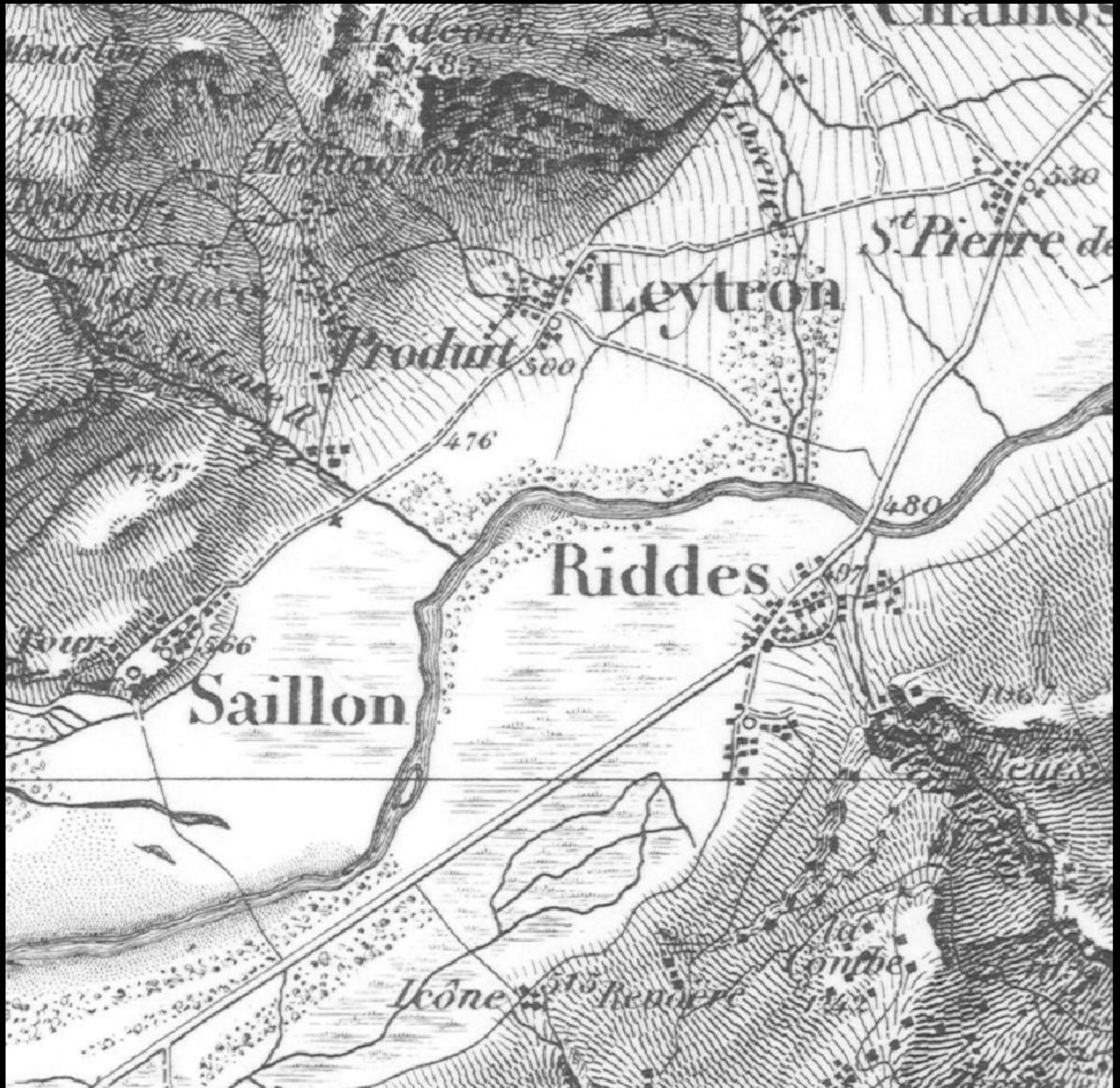
Profil vertical d'échos LiDAR

- LiDAR = *Light Detection And Ranging*
- Laser aéroporté
- Position de l'avion mesurée très précisément avec un système GPS différentiel
- Mesure du temps de parcours aller-retour et de l'intensité d'une onde envoyée au sol
- Plusieurs échos mesurés (sol et sursol)
- Nuage de points de haute résolution

Représentation de l'altitude

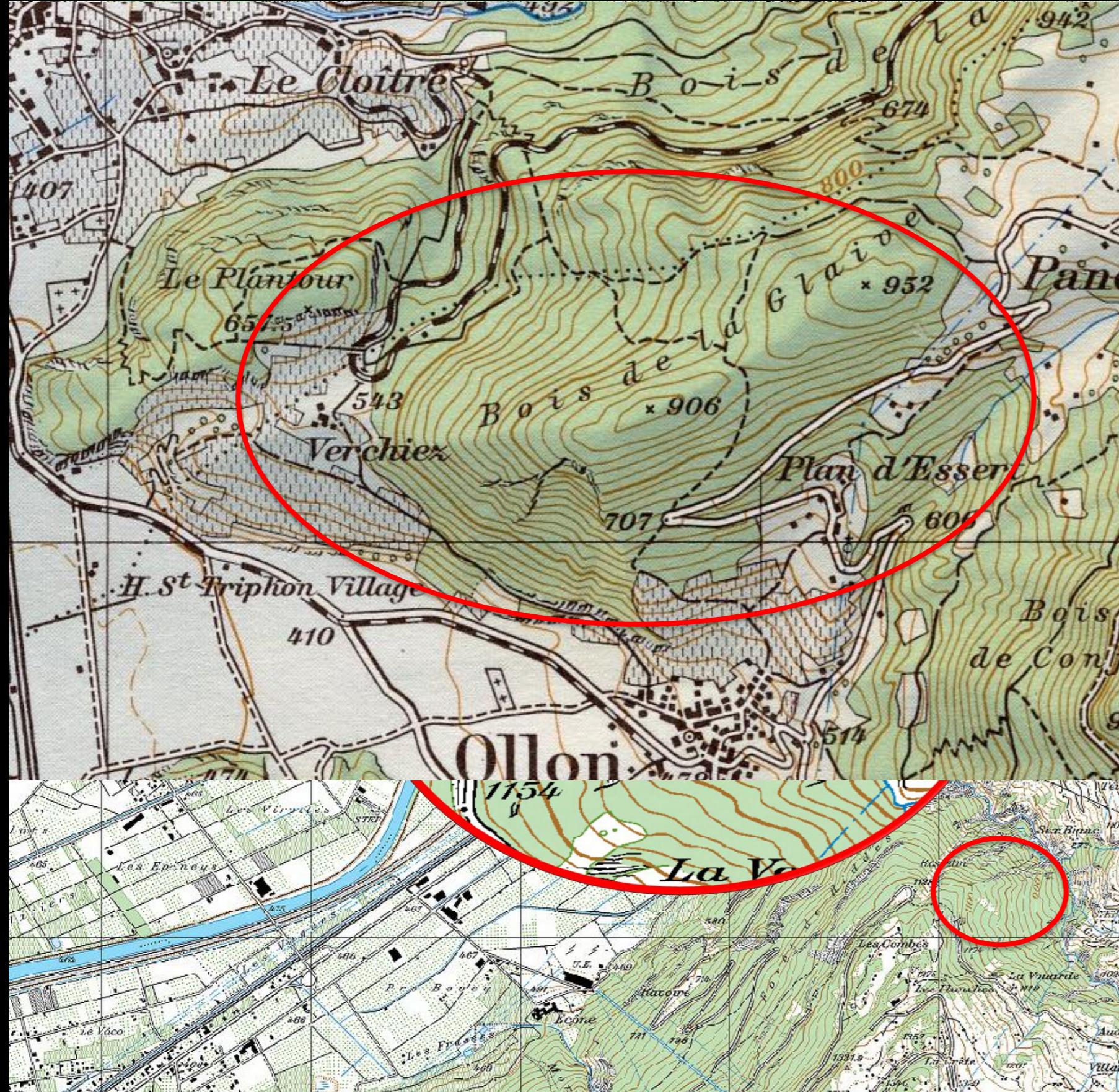
- Ombrage et courbes de niveaux
- Semis irrégulier de points - TIN
- Grilles régulières – modèles numériques d'altitude (MNA)

Ombrage et courbes de niveaux



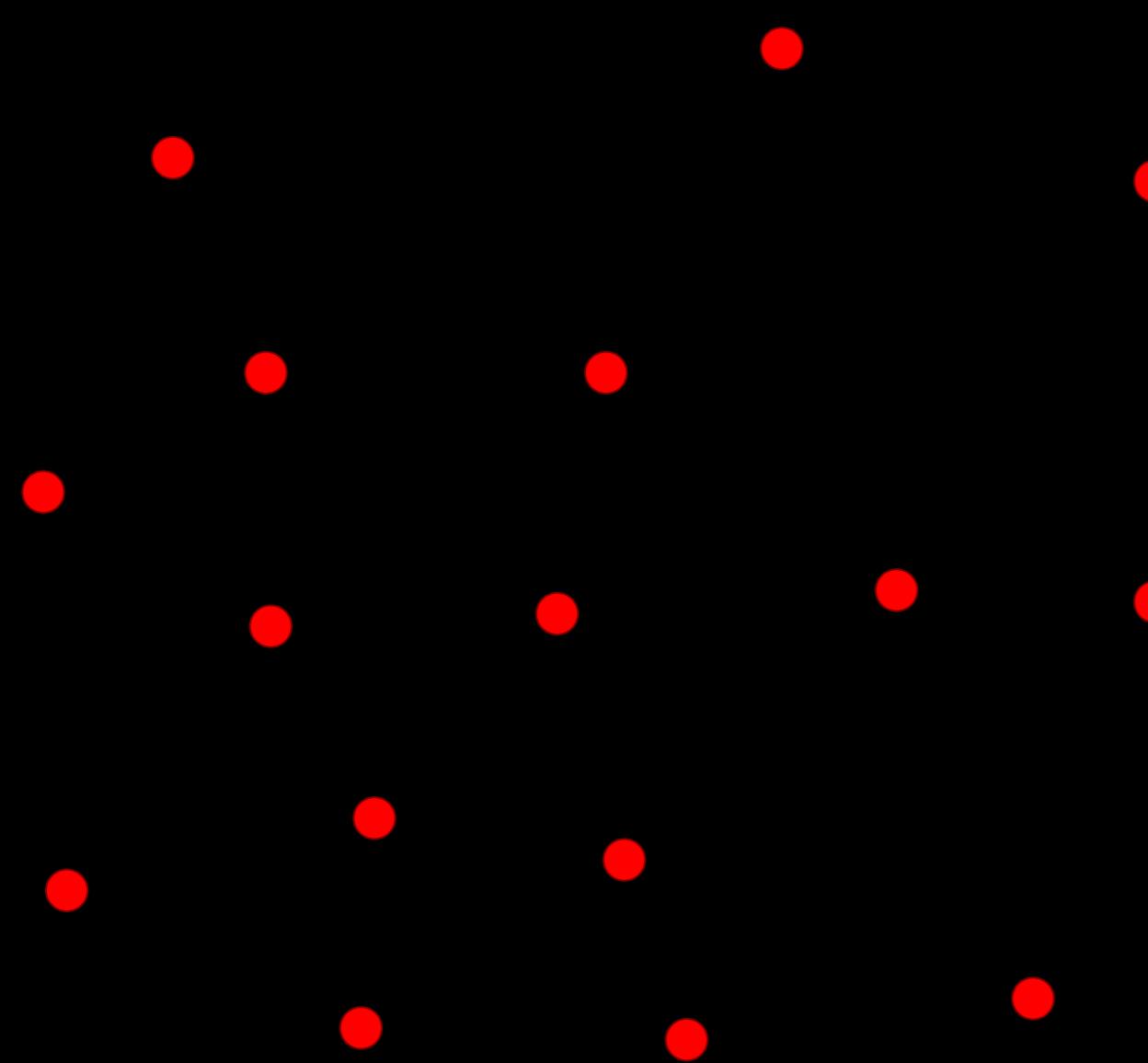
- Sur les premières cartes, on représentait le relief avec des hachures (carte Dufour)

Ombrage et courbes de niveaux



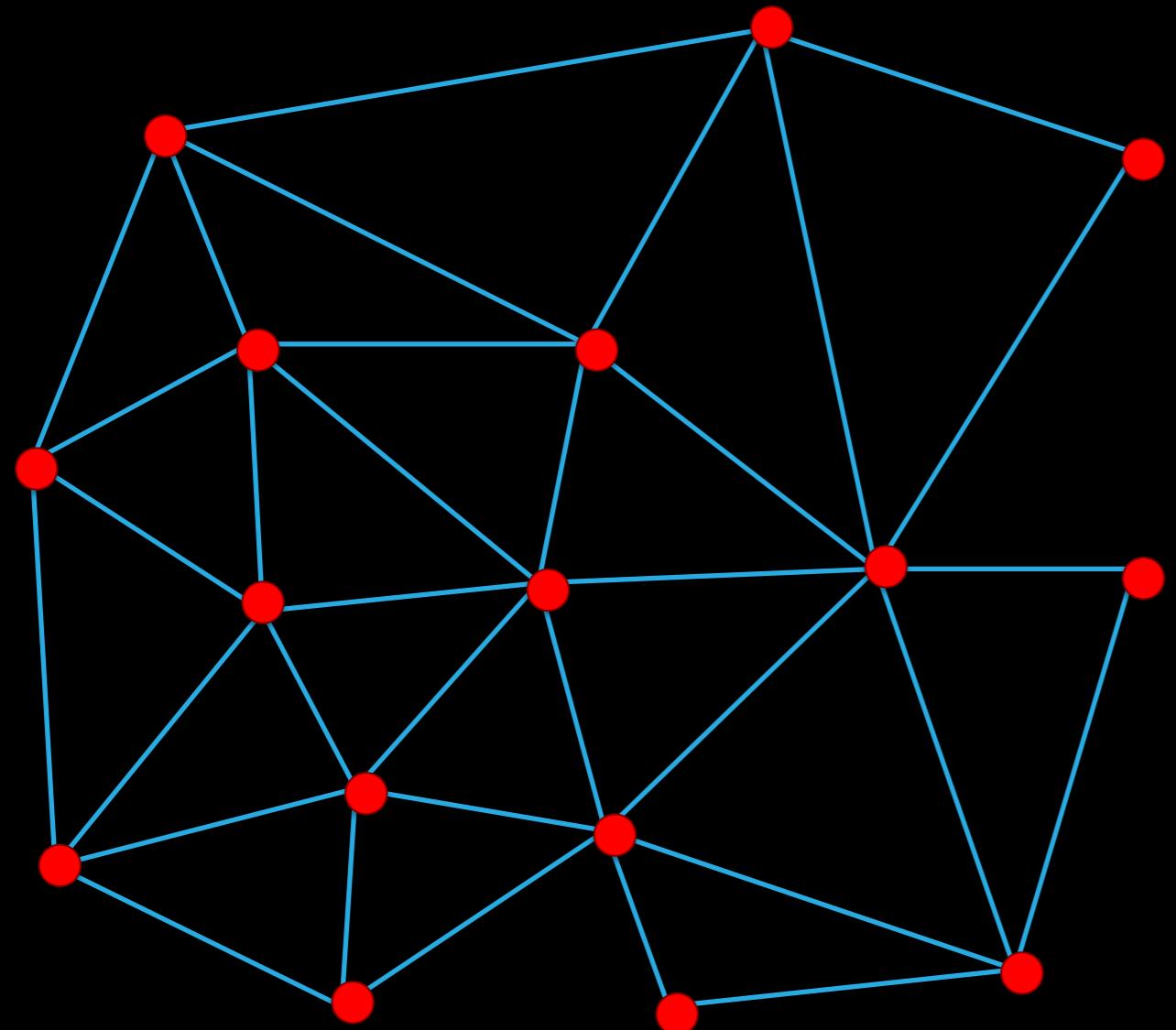
- Sur les premières cartes, on représentait le relief avec des hachures (carte Dufour)
- On utilise maintenant l'ombrage et les courbes de niveaux
- Ombrage : représentation qualitative
- Courbes de niveau : représentation quantitative
 - Lignes reliant des points de même altitude (isolignes)
 - Inconvénient: difficile d'utiliser ces objets linéaires pour des calculs, tels que la pente ou l'orientation

Semis de points irréguliers



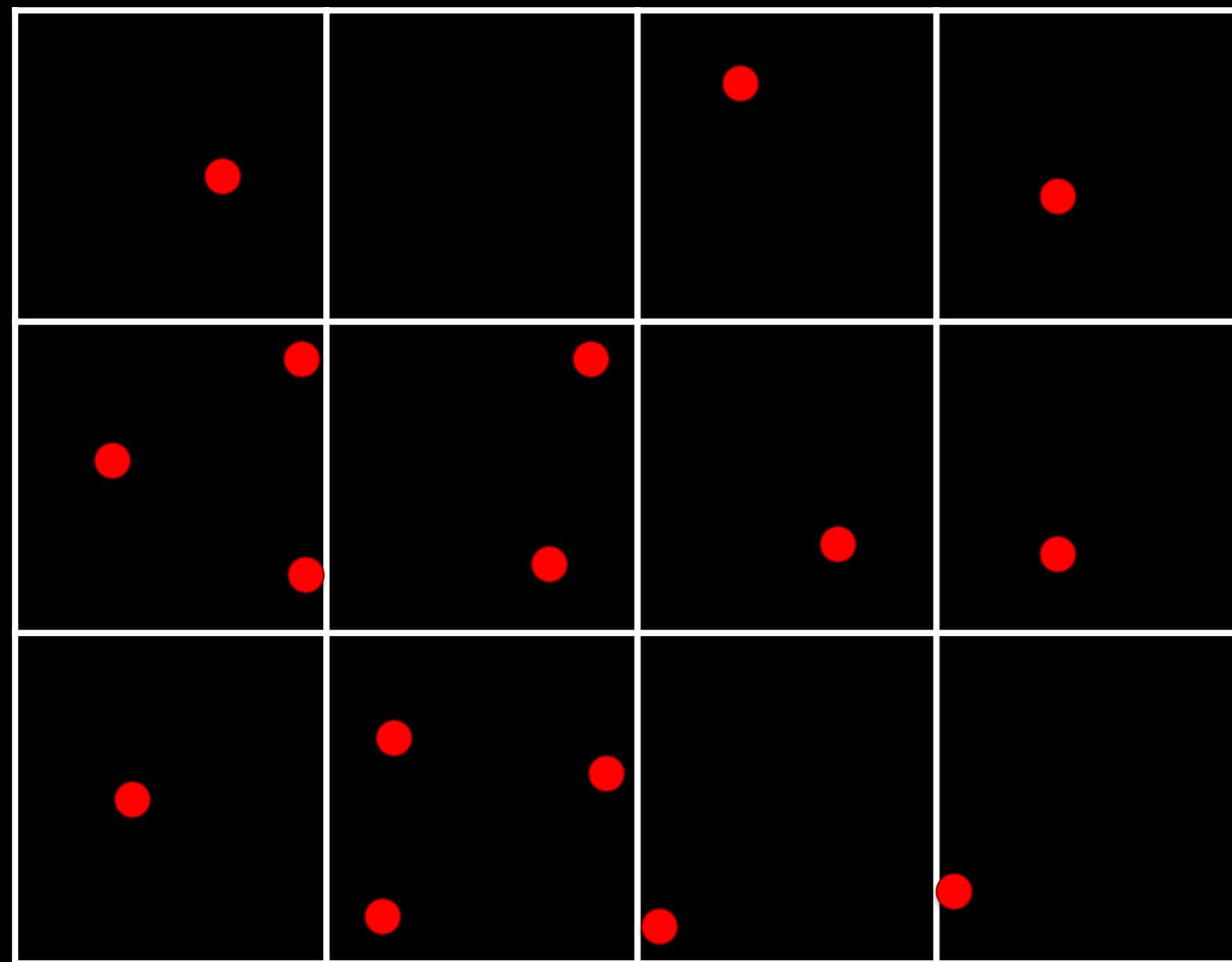
- Altitude mesurée ponctuellement
- Points distribués de façon irrégulière sur le territoire

Semis de points irréguliers (TIN)



- Altitude mesurée ponctuellement
- Points distribués de façon irrégulière sur le territoire (e.g. sommets)
- Création d'un modèle triangulé
- Avantage: permet de représenter précisément des points d'altitude particuliers (sommet, crête, fossé,...)

Grille et points réguliers

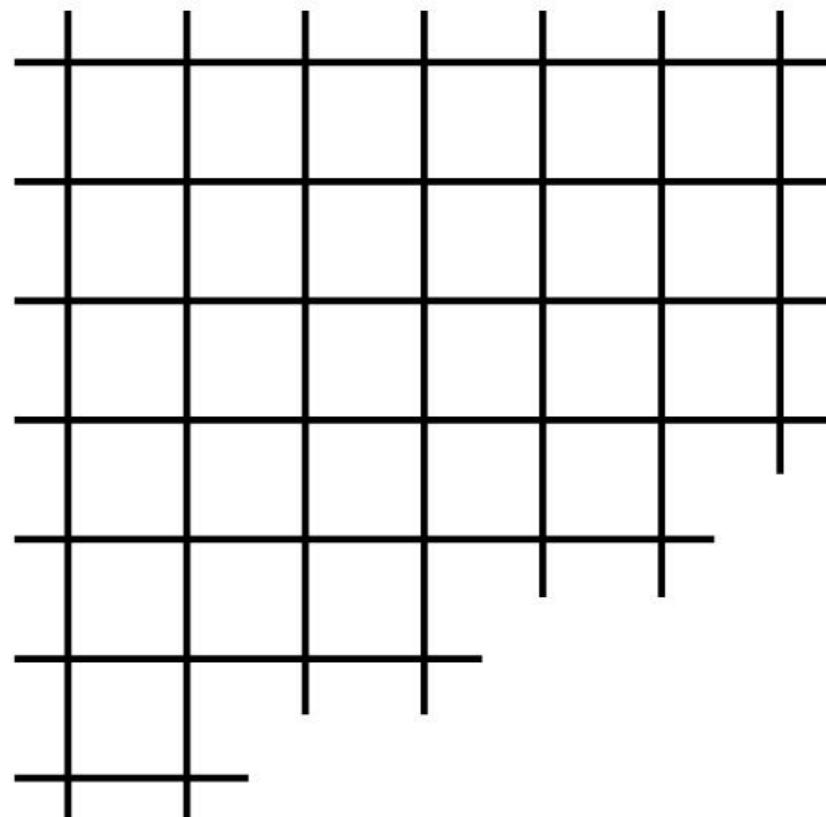


résolution

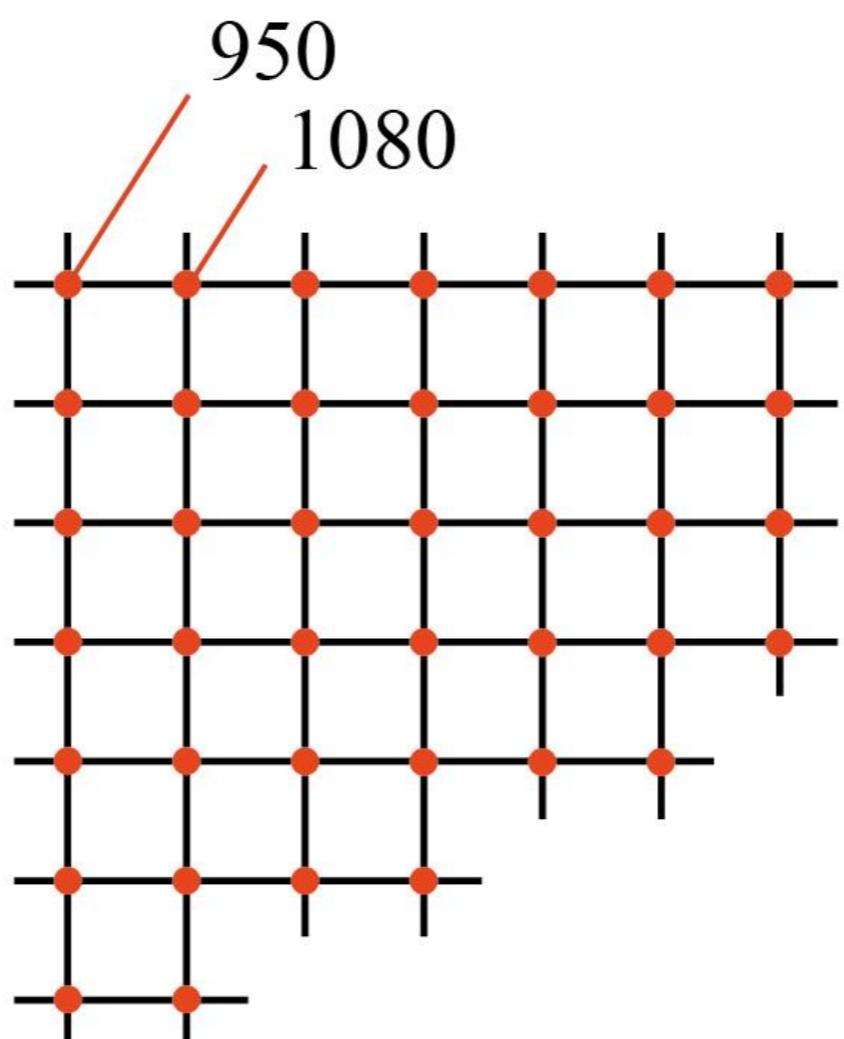
- Grille régulière
- Interpolation à partir des points irréguliers mesurés
- Résolution = taille du côté d'une cellule

Grille et points réguliers

Modèle spatial

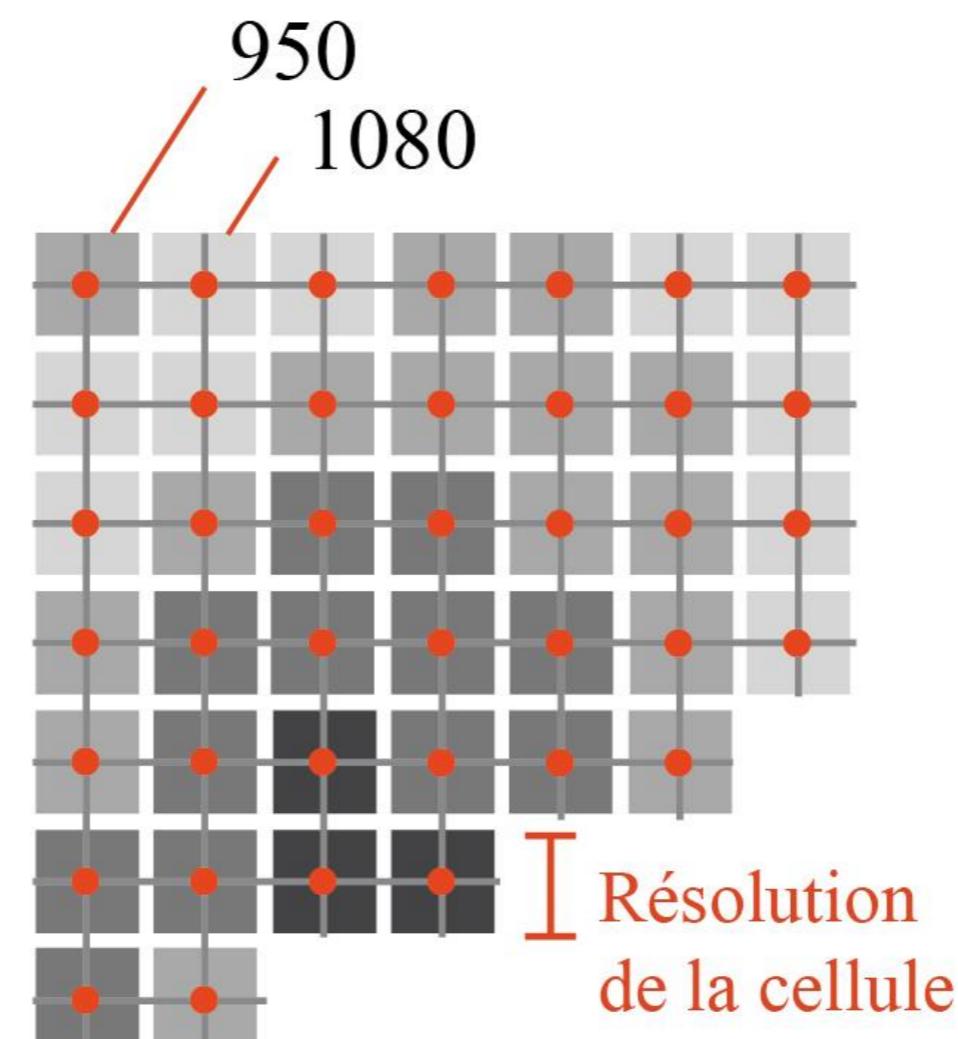


Grille régulière



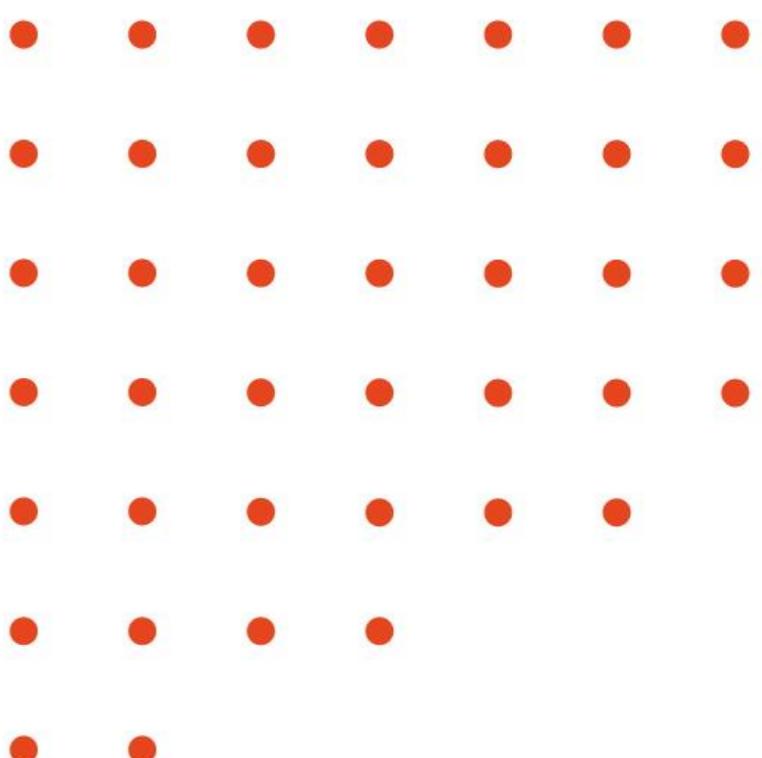
Noeuds de la grille

Modèle de représentation



Cellules

Modèle de calcul



Points

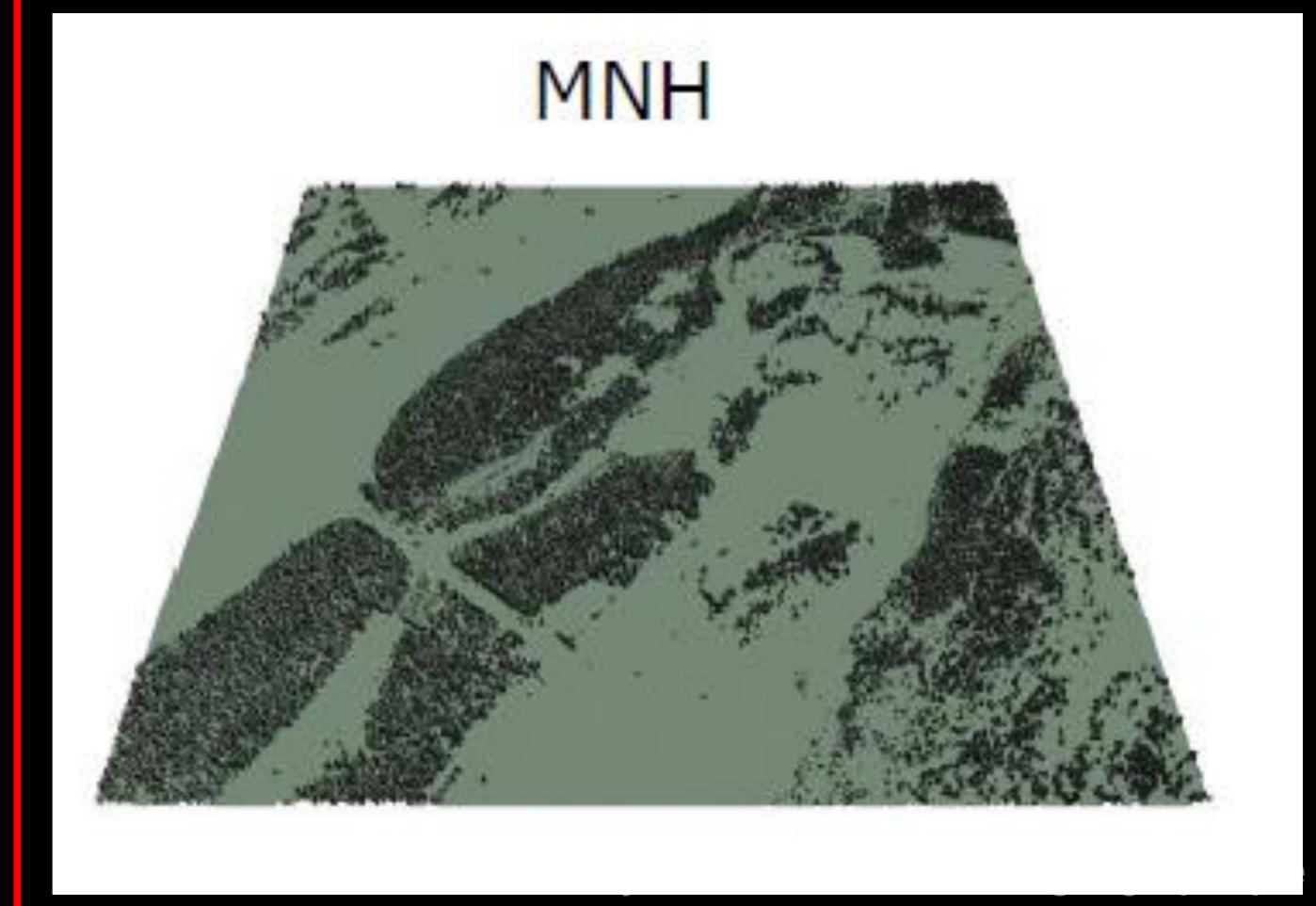
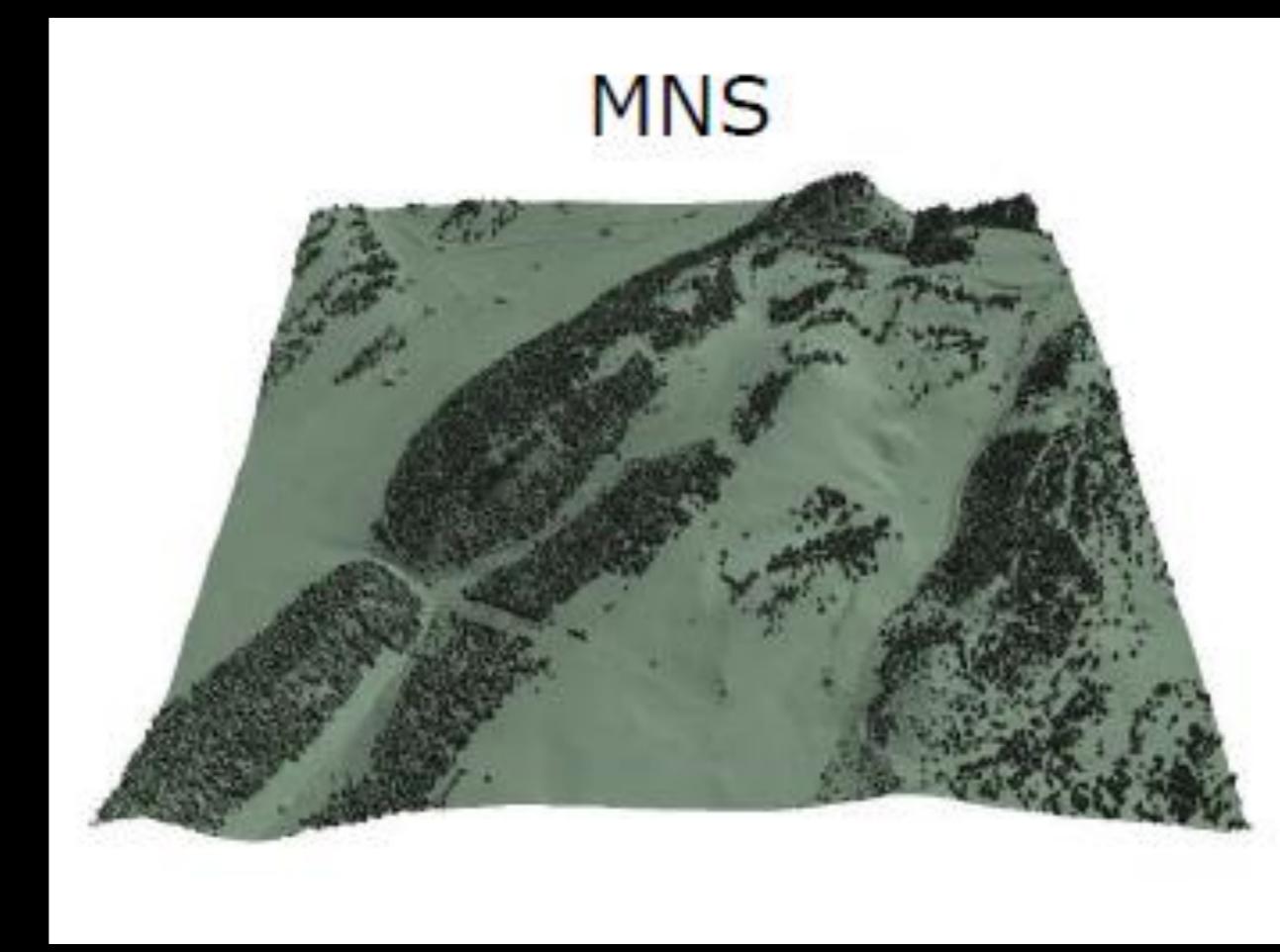
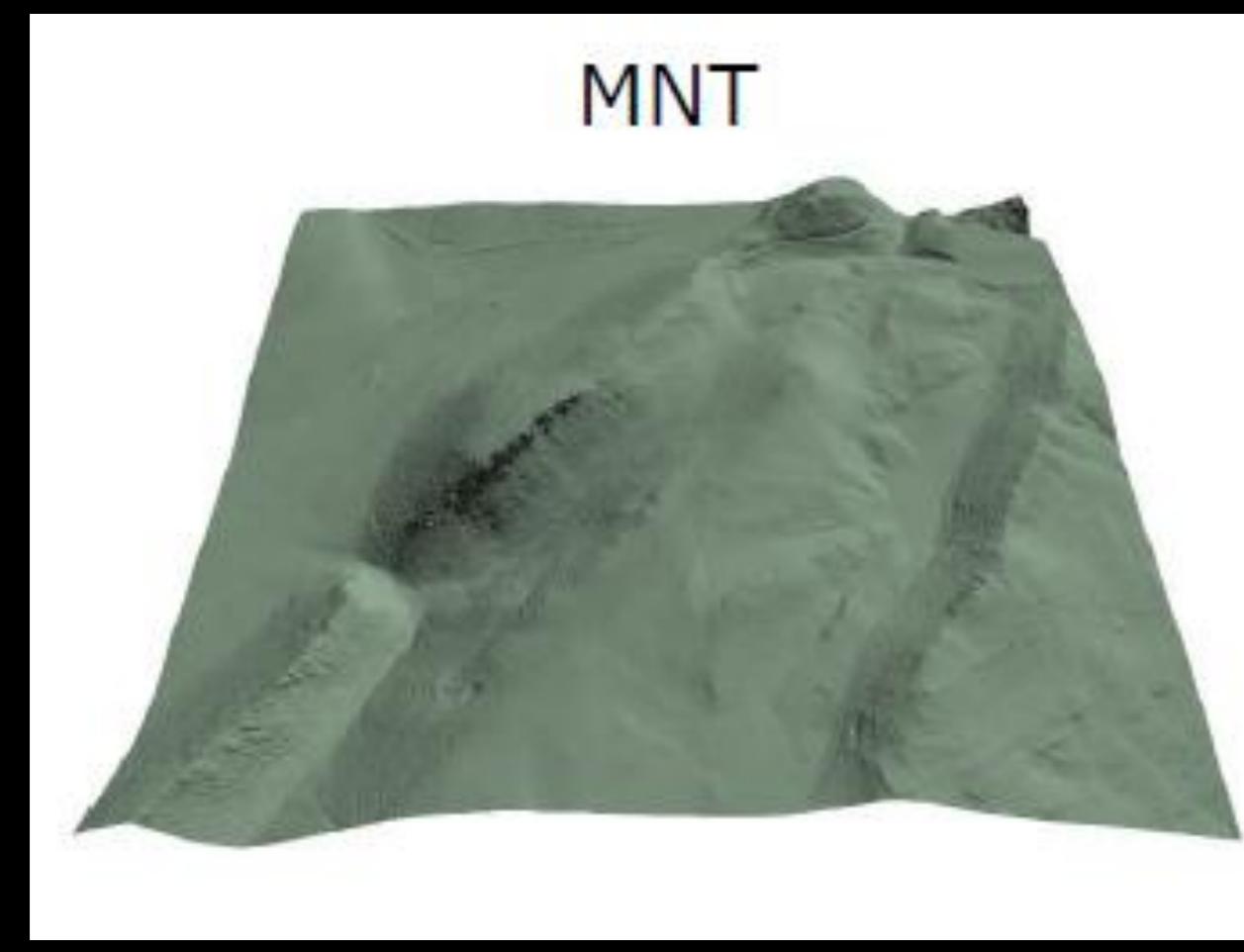
Modèles numériques d'altitude

- MNA : Modèle numérique d'altitude
- MNH : Modèle numérique de hauteur

- MNT : Modèle numérique de terrain (sol nu)
- MNS : Modèle numérique de surface (sol + sursol)

$$MNH = MNS - MNT$$

MNA



Systèmes d'Information Géographique

<https://go.epfl.ch/sig>

Modèles numériques d'altitude – Variables dérivées 1

Stéphane Joost, Gabriel Kathari (GEOME-LGB)

Modèles numériques d'altitude – Variables dérivées

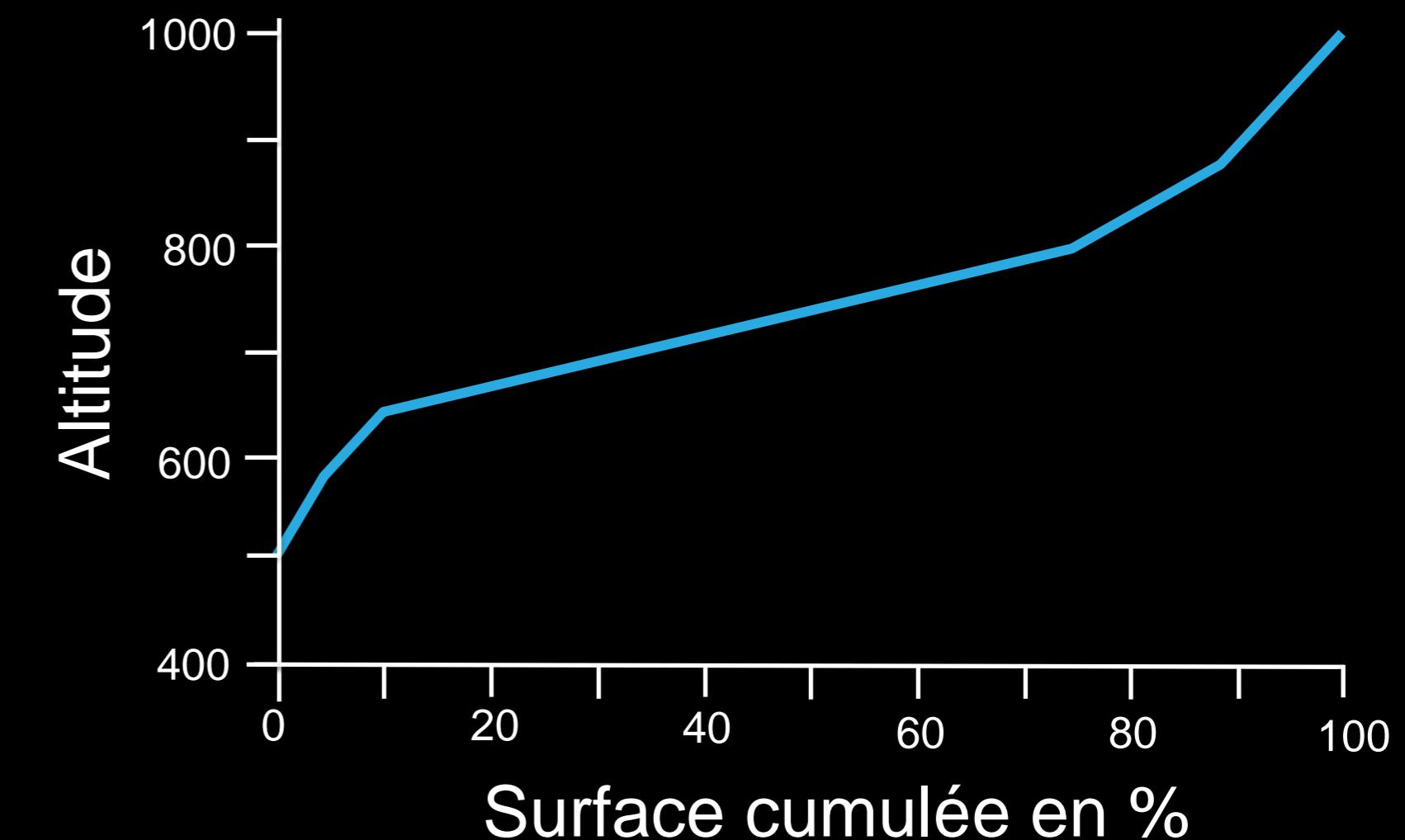
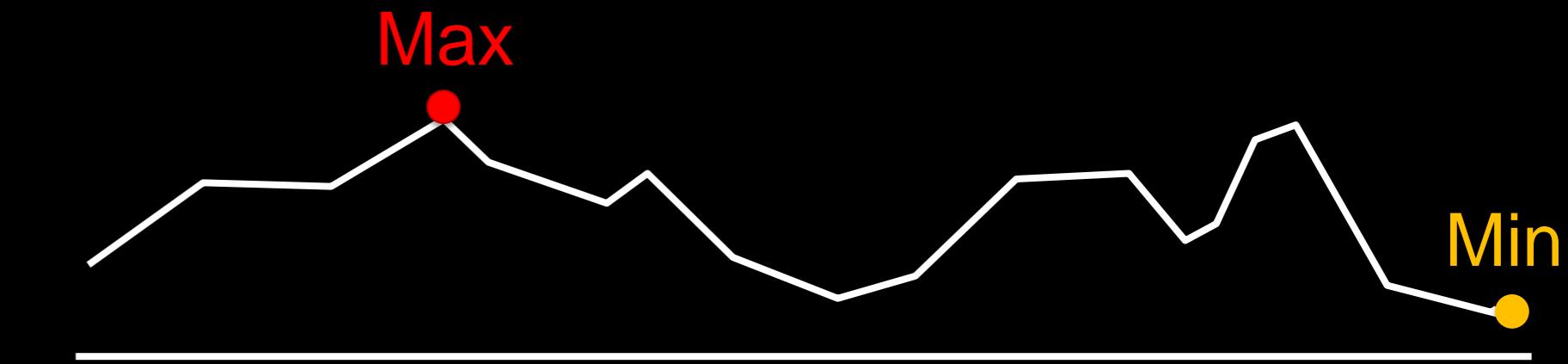
- Il est possible de produire d'autres informations à partir des modèles numériques d'altitude
- Géomorphométrie: déterminer des variables globales et locales qui caractérisent les formes du relief

Géomorphométrie

- Indicateurs globaux: zone d'étude considérée comme un ensemble
 - Indicateurs calculés sur des bases statistiques
 - Permet la comparaison de plusieurs régions
- Indicateurs locaux: calculés pour différents points du territoire

Indicateurs globaux

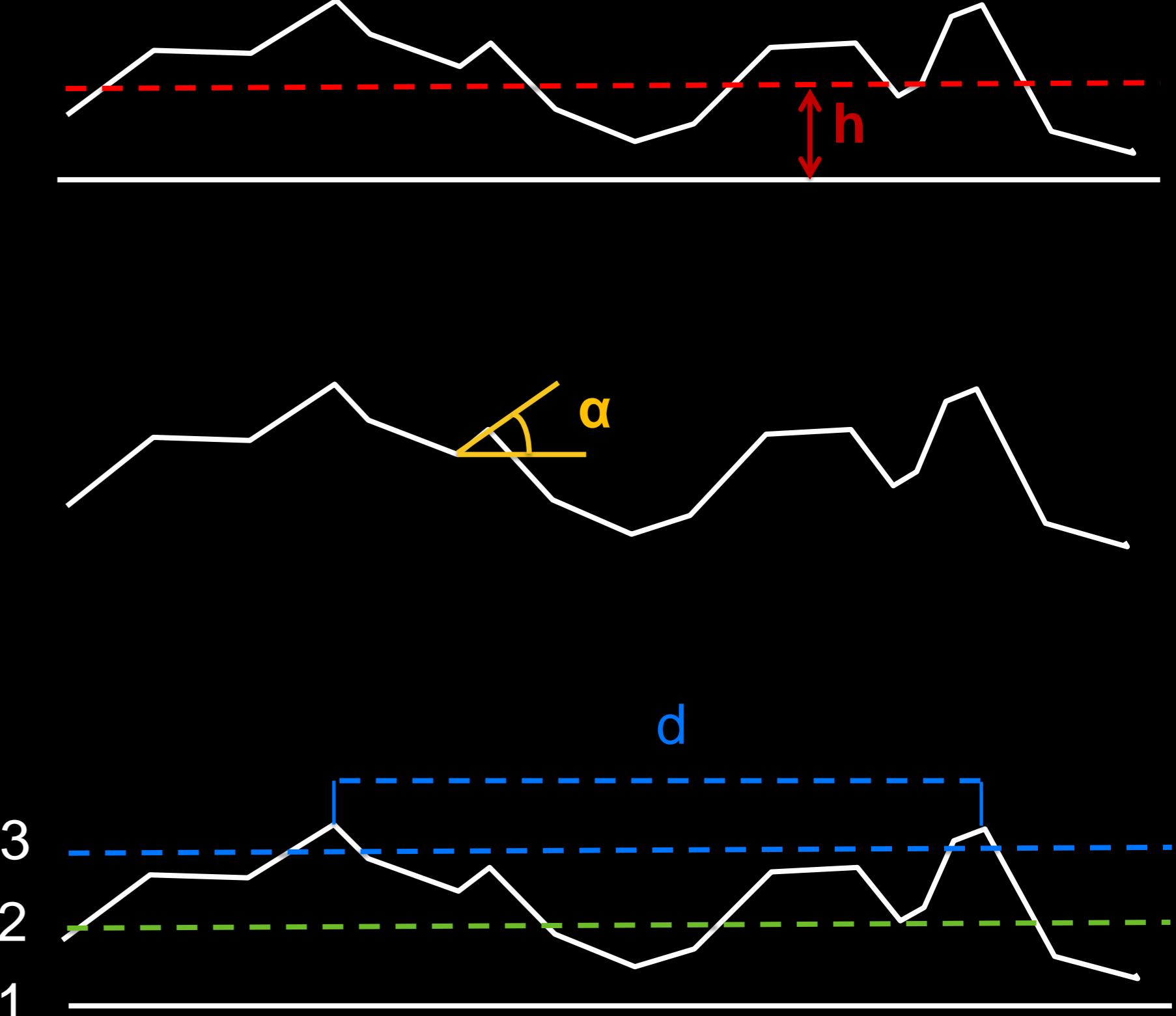
- Altitude minimale, maximale
- Courbe hypsométrique: répartition de la surface d'un bassin versant en fonction de l'altitude



Indicateurs globaux

- Altitude minimale, maximale
- Courbe hypsométrique: répartition de la surface d'un bassin versant en fonction de l'altitude
- **Altitude moyenne**
- **Pente moyenne**
- **Distance entre les sommets d'une même classe d'altitude**

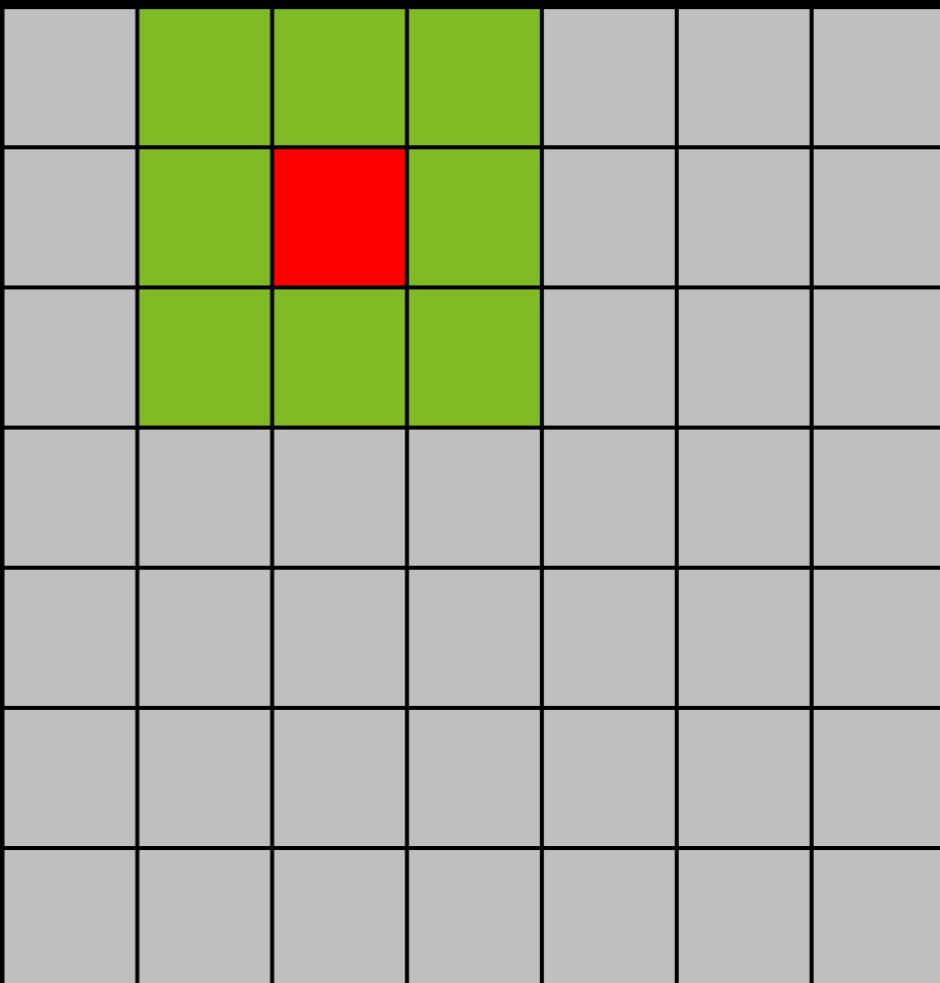
Rugosité



Indicateurs locaux – Fenêtres glissantes

Calculs par fenêtres glissantes

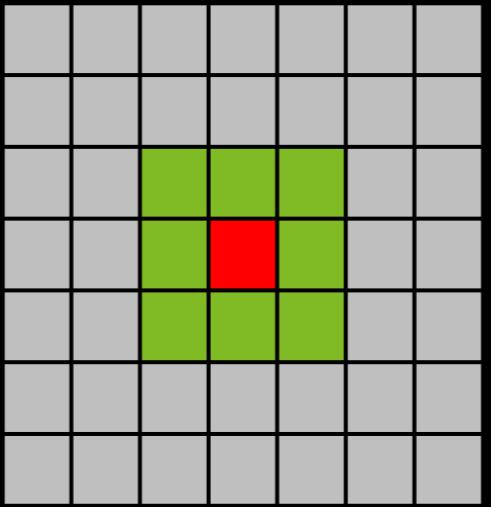
- Procédure de filtrage
- Fenêtre glissante centrée sur un pixel



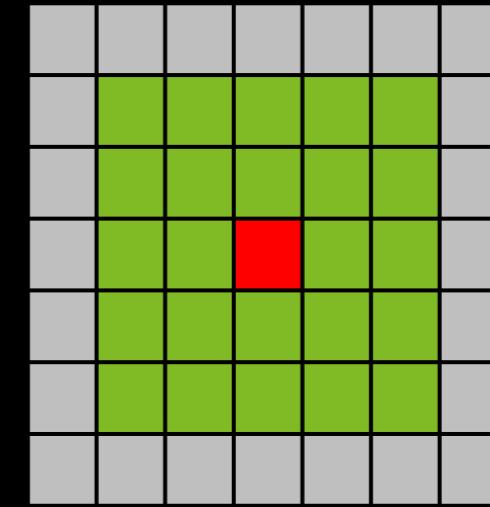
Indicateurs locaux – Fenêtres glissantes

Calculs par fenêtres glissantes

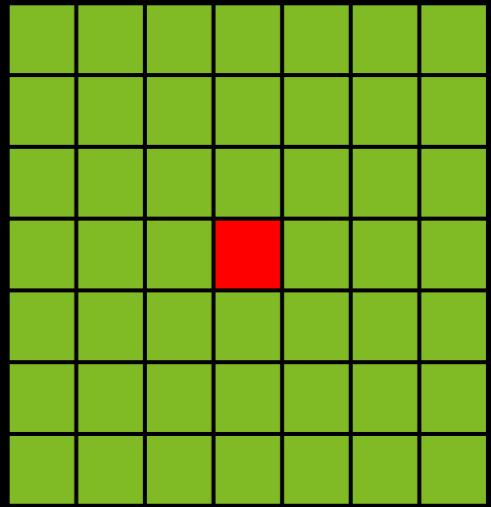
- Procédure de filtrage
- Fenêtre glissante centrée sur un pixel
- Variation de la taille de la fenêtre glissante
- Variation de la forme de la fenêtre
- Agrandissement de la fenêtre = lissage



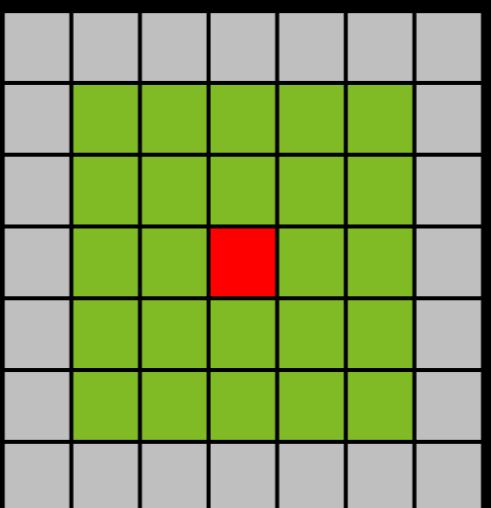
3x3



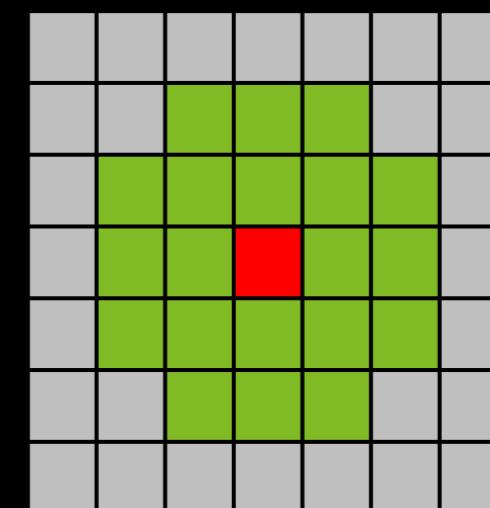
5x5



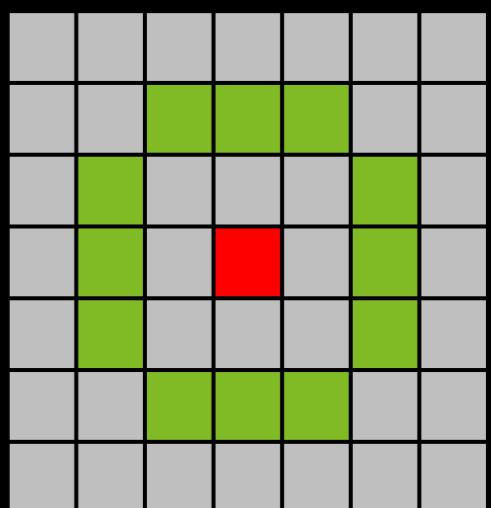
7x7



carré



disque

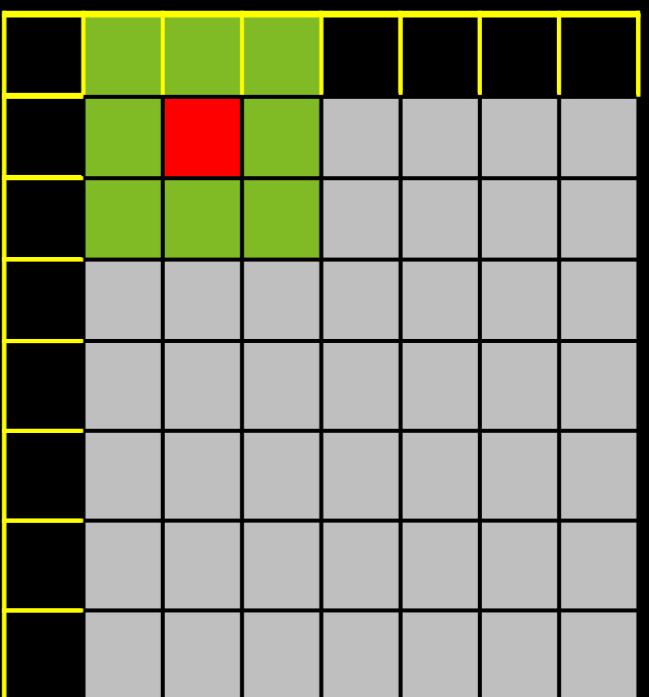
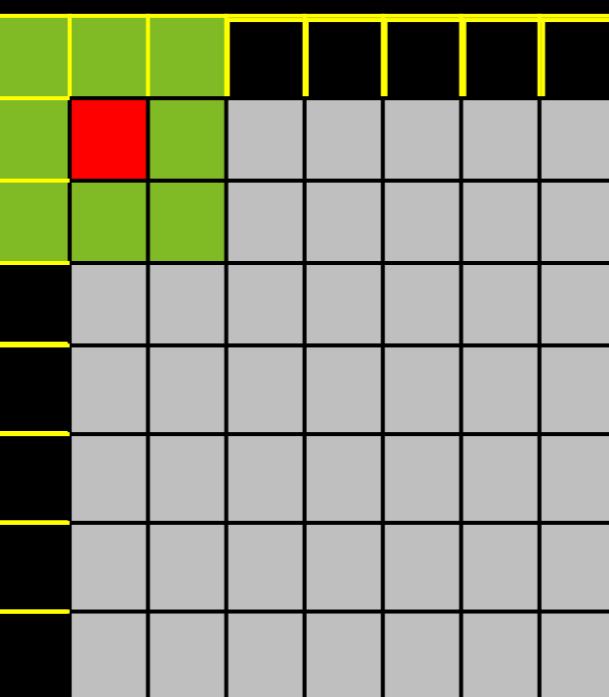
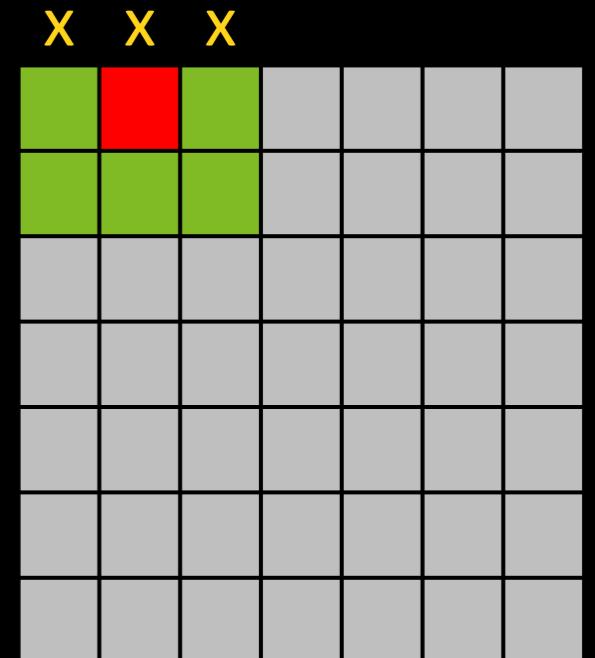
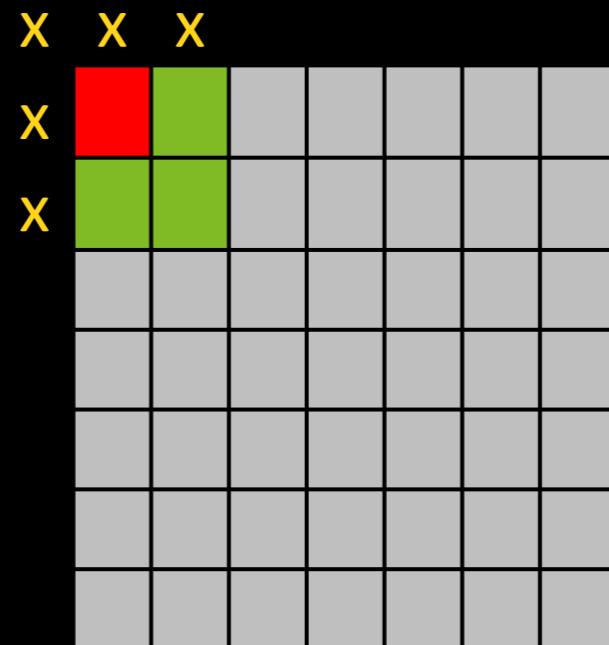


couronne

Indicateurs locaux – Fenêtre mobiles

Calculs par fenêtres glissantes

- Procédure de filtrage
- Fenêtre glissante centrée sur un pixel
- Variation de la taille de la fenêtre glissante
- Variation de la forme de la fenêtre
- **Effets de bord**
 - Utiliser un MNA plus grand que la zone d'étude



Pente et Orientation

Pente: inclinaison d'une surface par rapport au plan horizontal

- Gradient de la surface
- Rapport entre la distance verticale et horizontale

Orientation: direction de l'inclinaison par rapport aux points cardinaux

- Direction du gradient

$$z = f(x, y)$$

$$\text{pente} = \text{grad}(z) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

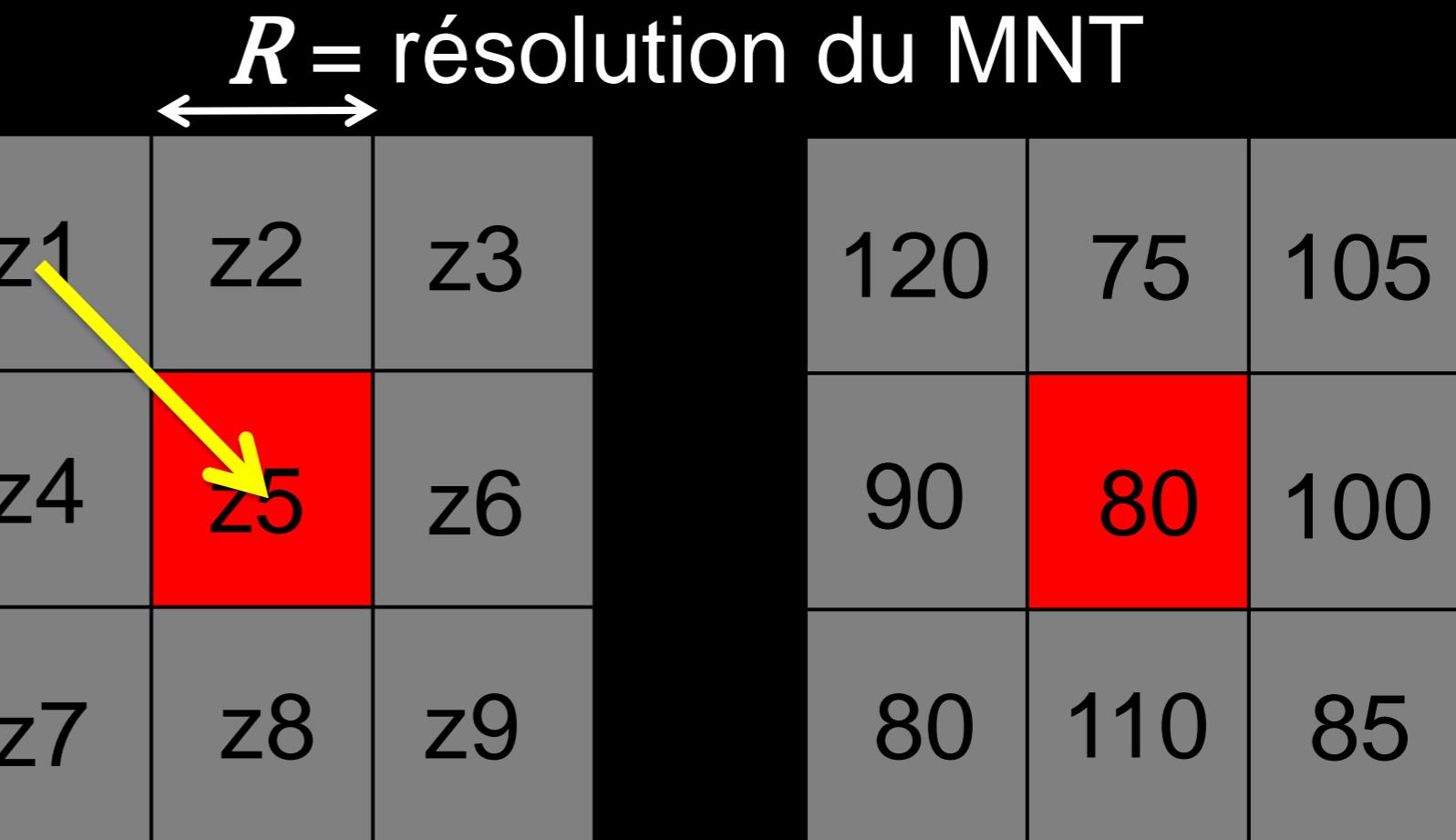
Du point de vue mathématique, la pente et l'orientation sont définies en un point par une fonction analytique qui représente le gradient de la surface

Ici le premier terme correspond à la dérivée seconde partielle de x, et le second à la dérivée seconde partielle de y

Pente et Orientation

Différents algorithmes de calculs selon le voisinage pris en compte:

- Fenêtre 3x3
- Différence maximale aux voisins



$$\begin{aligned} \text{pente, } z5(\text{rad}) &= \arctan \left(\max \left(\frac{\Delta z}{d} \right) \right) \\ &= \arctan \left(\frac{z1 - z5}{\sqrt{2}R} \right) \end{aligned}$$

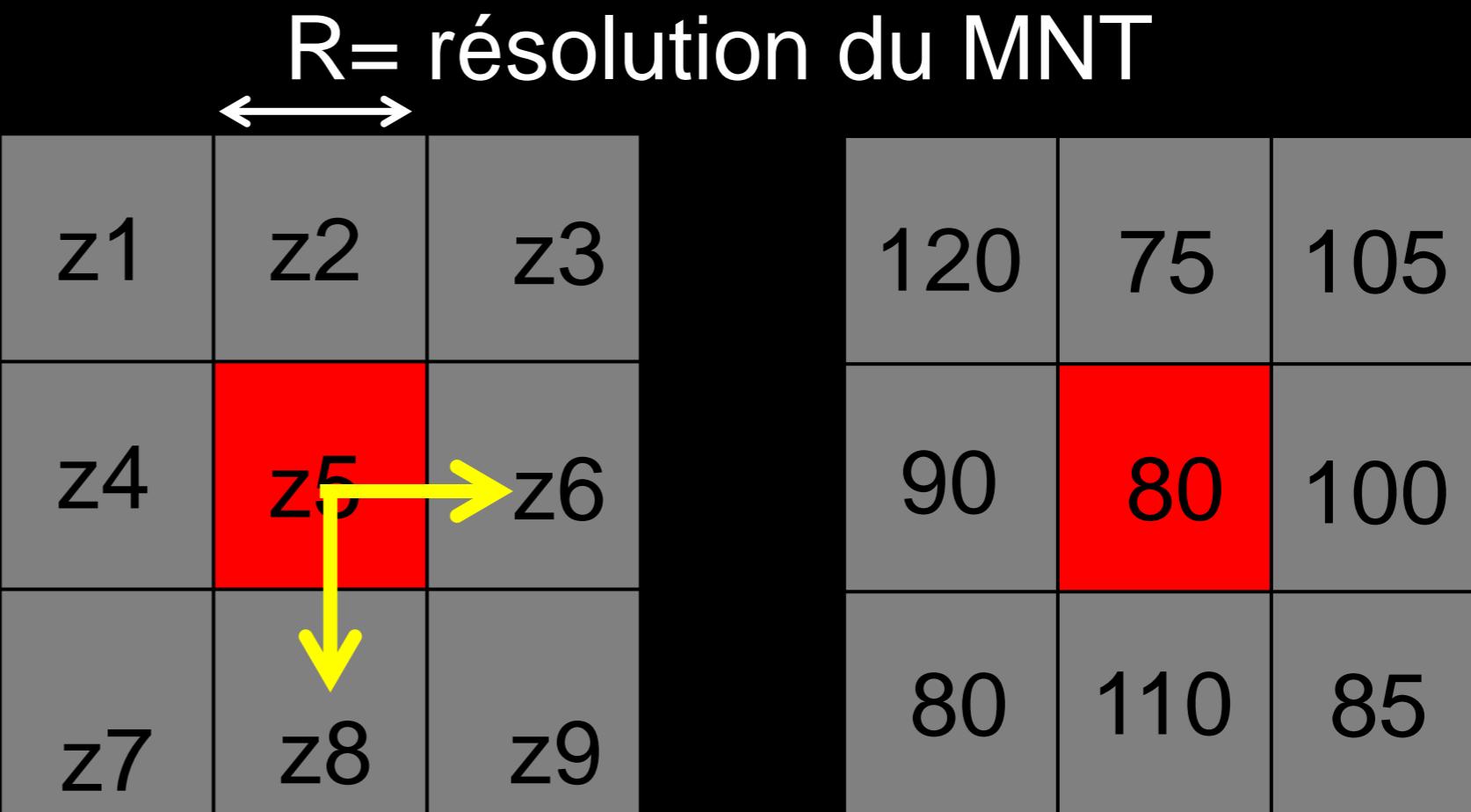
Angle recherché →

$$\theta = \arctan \left(\frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} \right)$$

Pente et Orientation

Différents algorithmes de calculs selon le voisinage pris en compte:

- Fenêtre 3x3
 - Différence maximale aux voisins
 - Gradient ligne (G) – colonne (H)



$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z5 - z6}{R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{z5 - z8}{R}$$

$$\text{pente, } z5(\text{rad}) = \arctan \left(\sqrt{G^2 + H^2} \right)$$

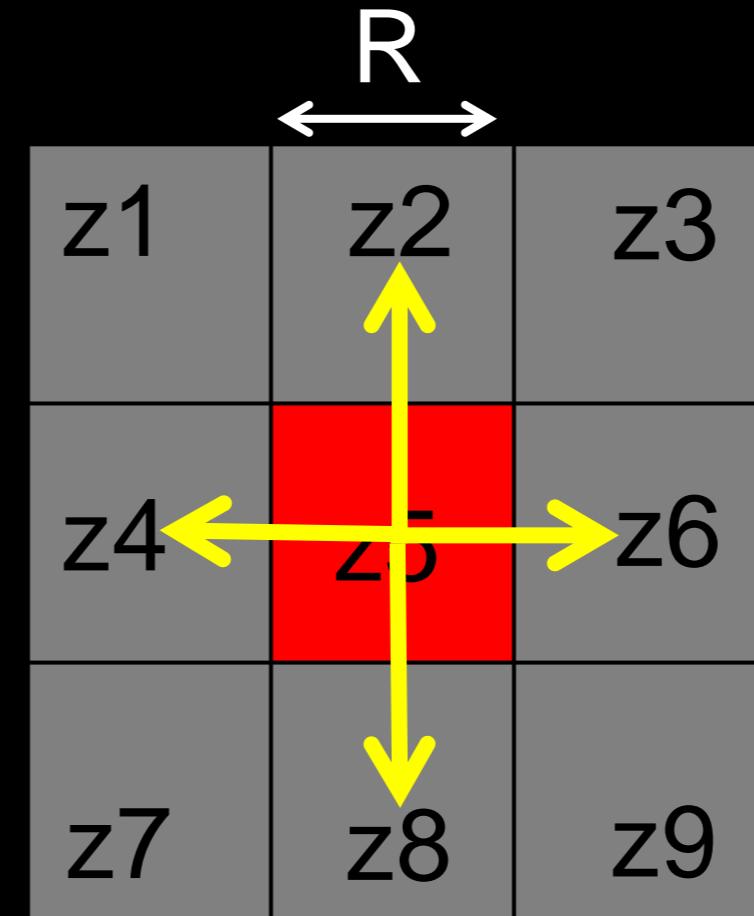
$$\text{orientation, } z5(\text{rad}) = \pi - \arctan \left(\frac{H}{G} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{G}{|G|} \right)$$

Pente et Orientation

Différents algorithmes de calculs selon le voisinage pris en compte:

- Fenêtre 3x3
 - Différence maximale aux voisins
 - Gradient maximal ligne – colonne
 - Modèle de Zevenbergen et Thorne (1987)

4 plus proches voisins



R = résolution du MNT

$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_6 - z_4}{2R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{z_2 - z_8}{2R}$$

$$\text{pente, } z_5(\text{rad}) = \arctan \left(\sqrt{G^2 + H^2} \right)$$

$$\text{orientation, } z_5(\text{rad}) = \pi - \arctan \left(\frac{H}{G} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{G}{|G|} \right)$$

Pente et Orientation

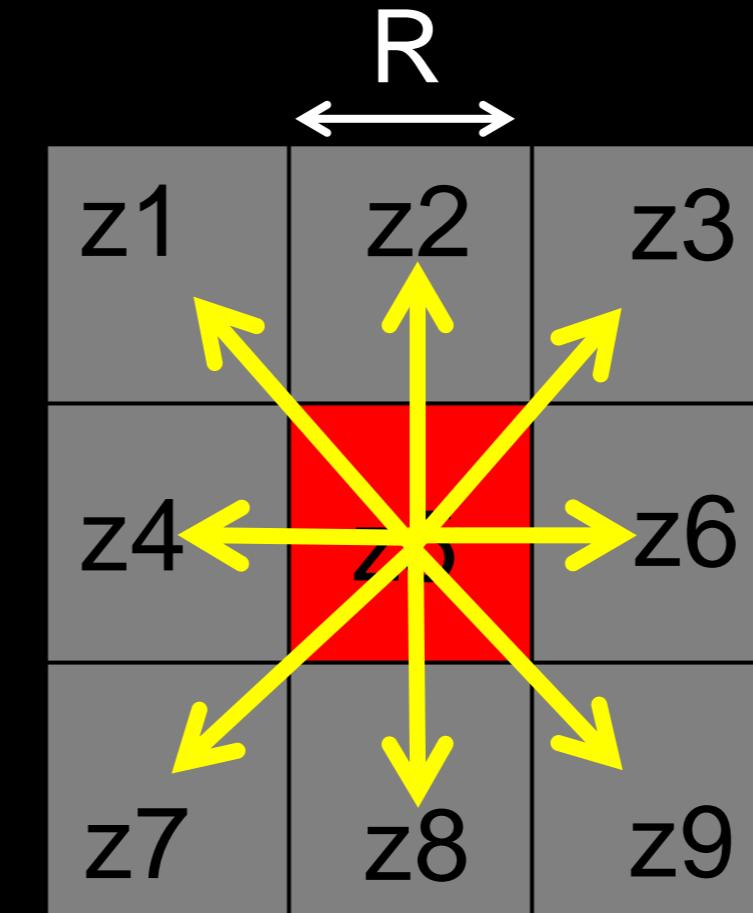
Différents algorithmes de calculs selon le voisinage pris en compte:

- Fenêtre 3x3
 - Différence maximale aux voisins
 - Gradient maximal ligne – colonne
 - Modèle de Zevenbergen et Thorne (1987)

4 plus proches voisins

- Modèle de Horn (1981)

8 plus proches voisins



R = résolution du MNT

$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{(z_1 + 2z_4 + z_7) - (z_3 + 2z_6 + z_9)}{8R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{(z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_8 + z_9)}{8R}$$

$$\text{pente, } z5(\text{rad}) = \arctan \left(\sqrt{G^2 + H^2} \right)$$

Pente et Orientation

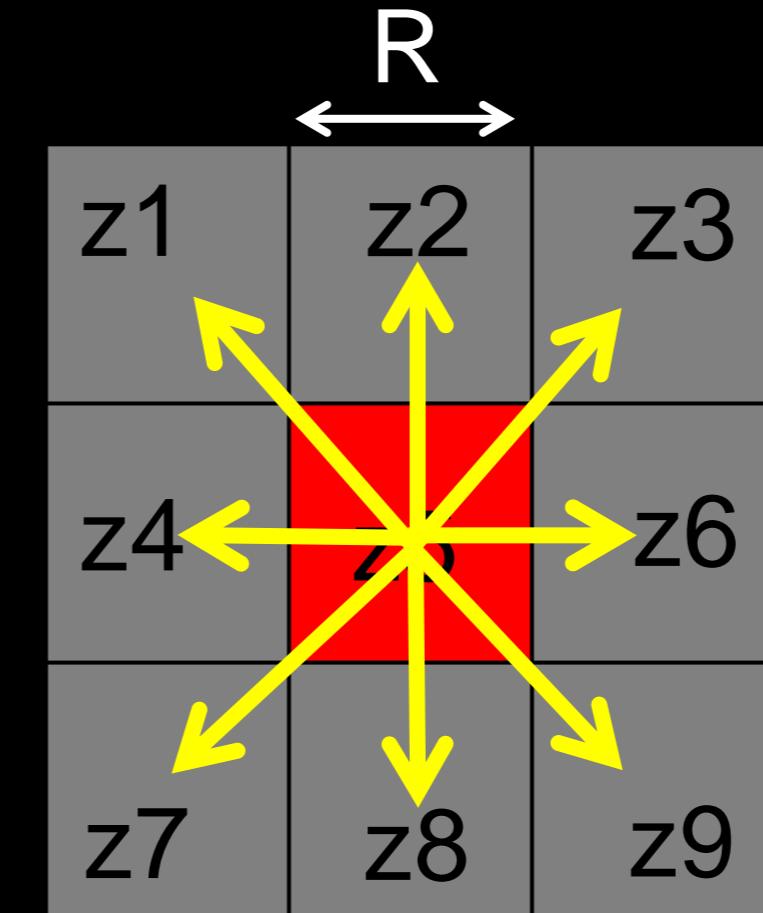
Différents algorithmes de calculs selon le voisinage pris en compte:

- Fenêtre 3x3
 - Différence maximale aux voisins
 - Gradient maximal ligne – colonne
 - Modèle de Zevenbergen et Thorne (1987)

4 plus proches voisins

- Modèle de Horn (1981)

8 plus proches voisins



R = résolution du MNT

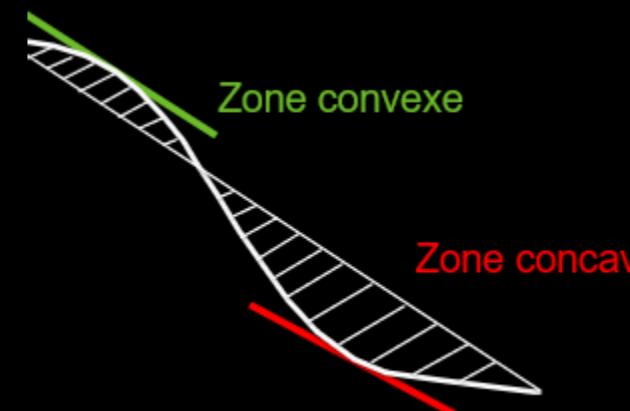
$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{(z_1 + 2z_4 + z_7) - (z_3 + 2z_6 + z_9)}{8R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{(z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_8 + z_9)}{8R}$$

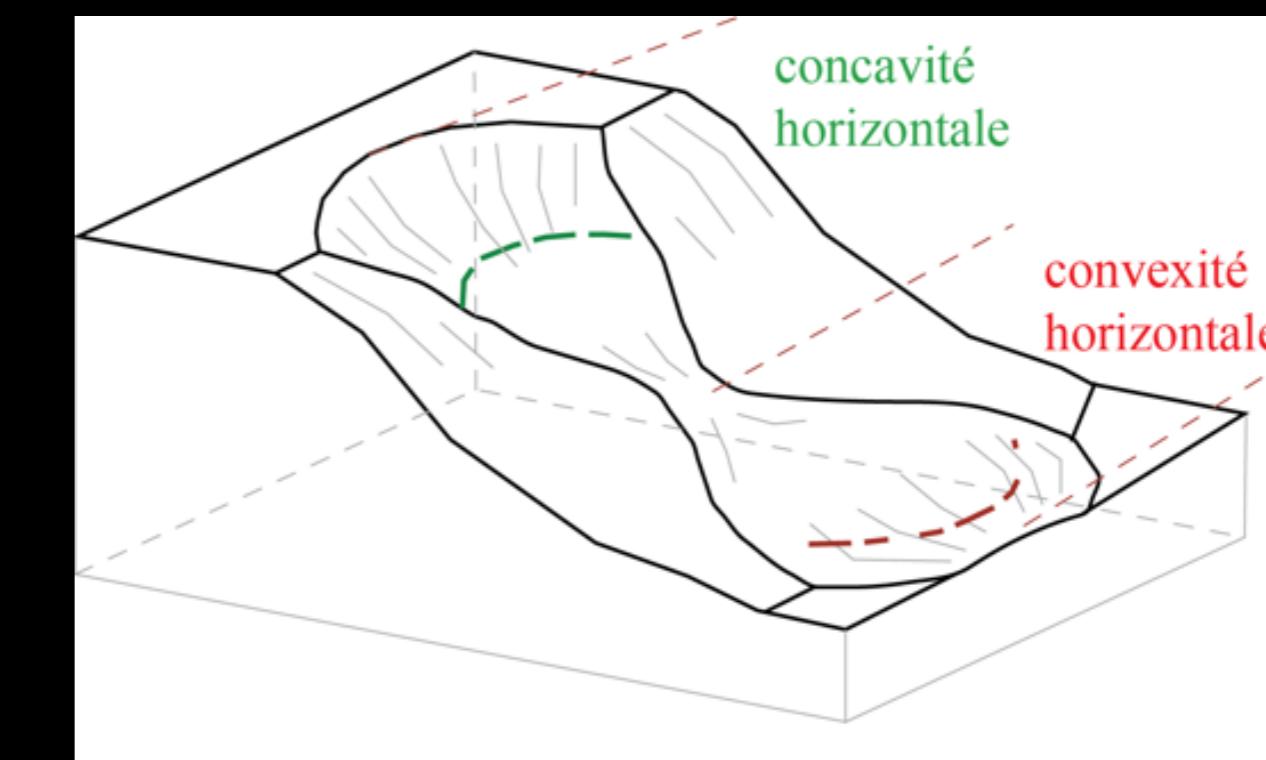
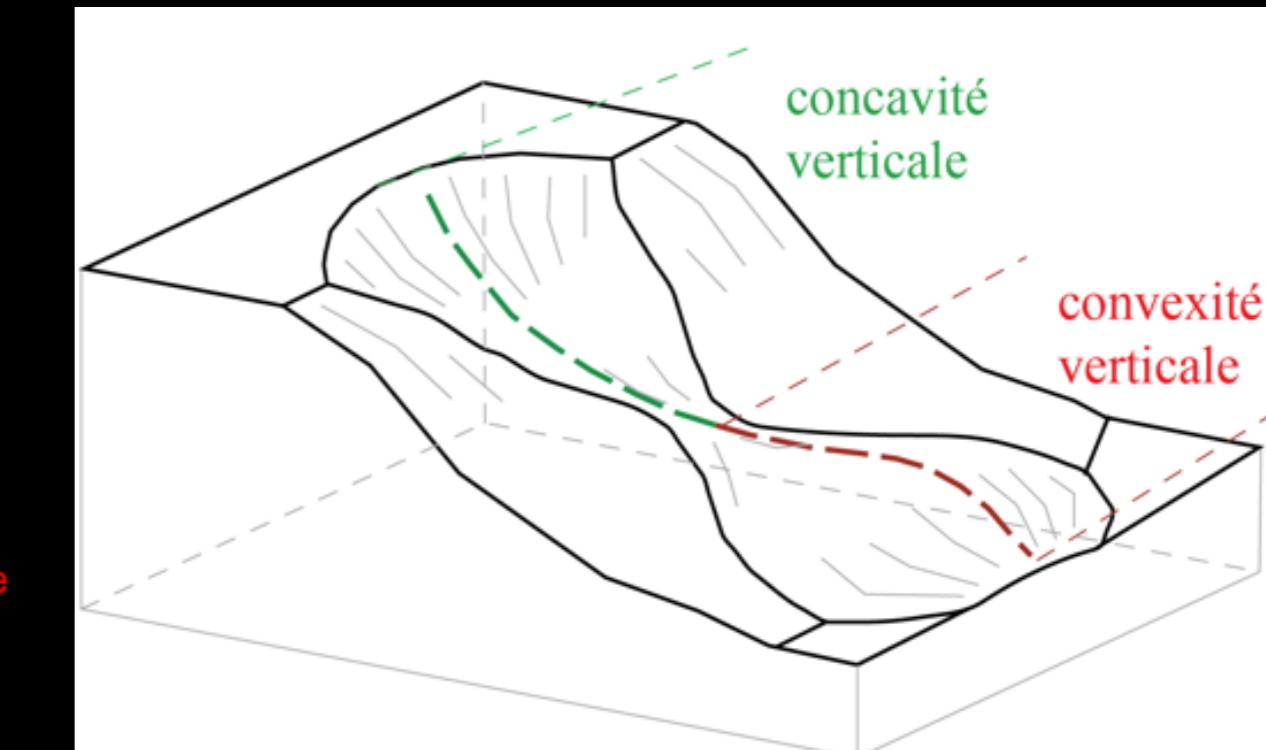
$$\text{orientation, } z_5(\text{rad}) = \pi - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{|G|}{|G|} \right)$$

Courbure

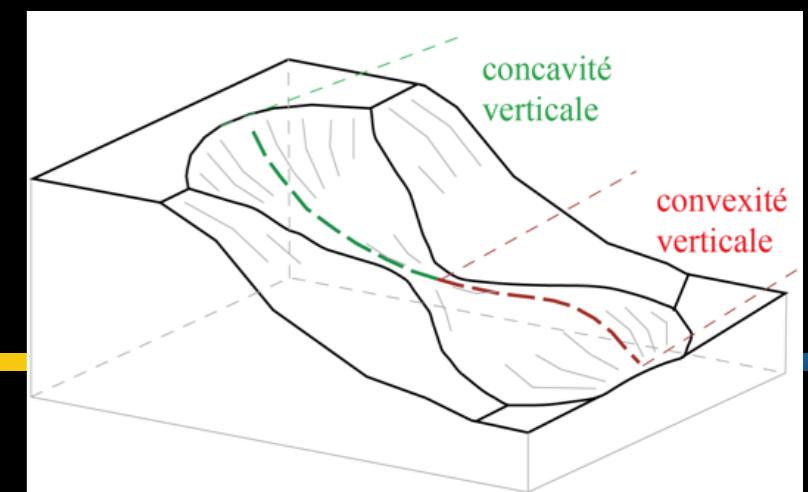
- Deux directions de courbure orthogonales
- L'une en direction de la pente (c'est la courbure verticale) avec un signe négatif



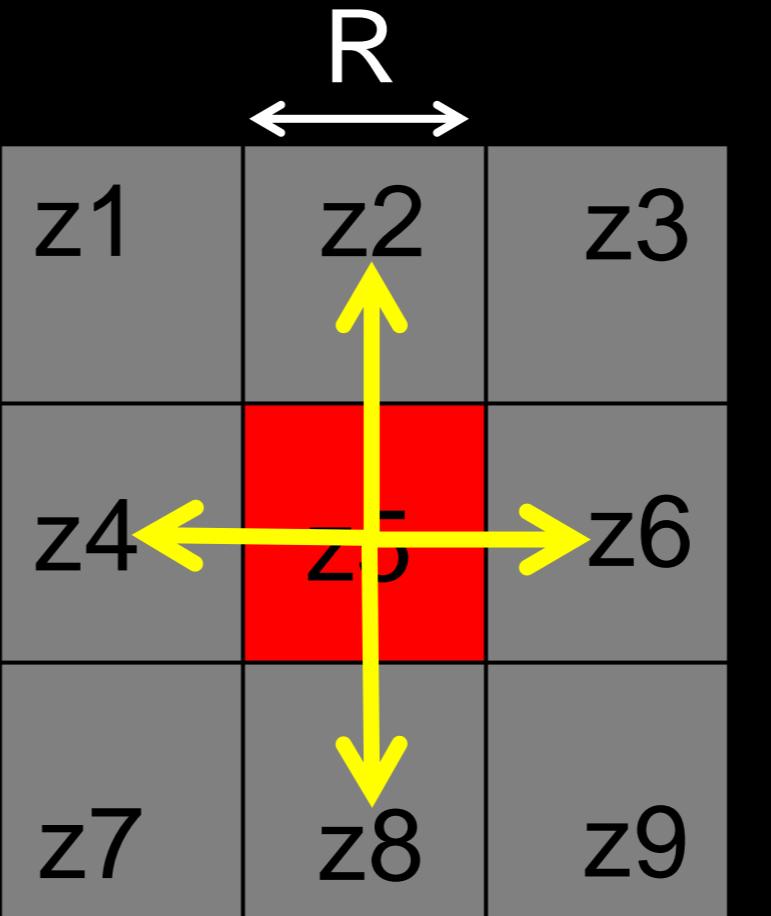
- L'autre transversale à la pente (c'est la courbure horizontale) avec un signe positif
- Toutes deux sont des dérivées secondes de Z



Courbure verticale



- Modèle de Zevenbergen et Thorne (1987)
- Les gradients de ligne G et de colonne H utilisés pour le calcul de la pente complétés par les paramètres D, E et F
- D = différence d'altitude entre pixel d'intérêt et moyenne de ses voisins de ligne z4 et z6
- E = différence d'altitude entre pixel d'intérêt et moyenne de ses voisins de colonne z2 et z8
- F permet de rendre compte des différences d'altitude entre les pixels situés aux extrémités des diagonales de la fenêtre mobile
- L'articulation de ces 5 paramètres permet d'obtenir la courbure verticale dont la formule est affichée ici



R = résolution du MNT

$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_6 - z_4}{2R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{z_2 - z_8}{2R}$$

$$D = \frac{1}{R^2} \left(\frac{z_4 + z_6}{2} - z_5 \right) \quad E = \frac{1}{R^2} \left(\frac{z_2 + z_8}{2} - z_5 \right)$$

$$F = \left(\frac{-z_1 + z_3 + z_7 - z_9}{4R^2} \right)$$

$$\text{Courbure, profil} = -2 \frac{DG^2 + EH^2 + FGH}{G^2 + H^2}$$

Courbure verticale

Interprétation du signe négatif

- Si la courbure verticale est positive, cela signifie que la surface est convexe (le terrain est bombé vers le haut : pente décroissante dans le sens de la pente)
- Si elle est négative, cela signifie que la surface est concave (vallonnée vers le bas : pente croissante)

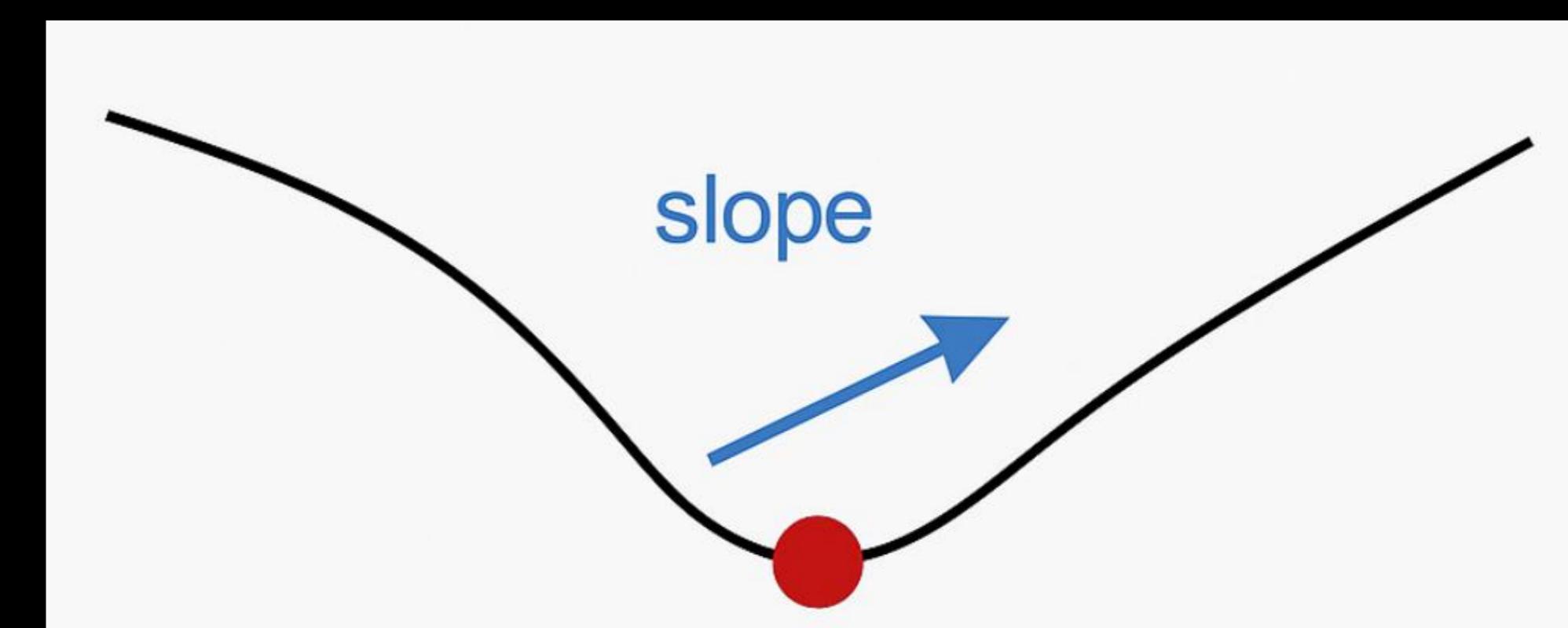
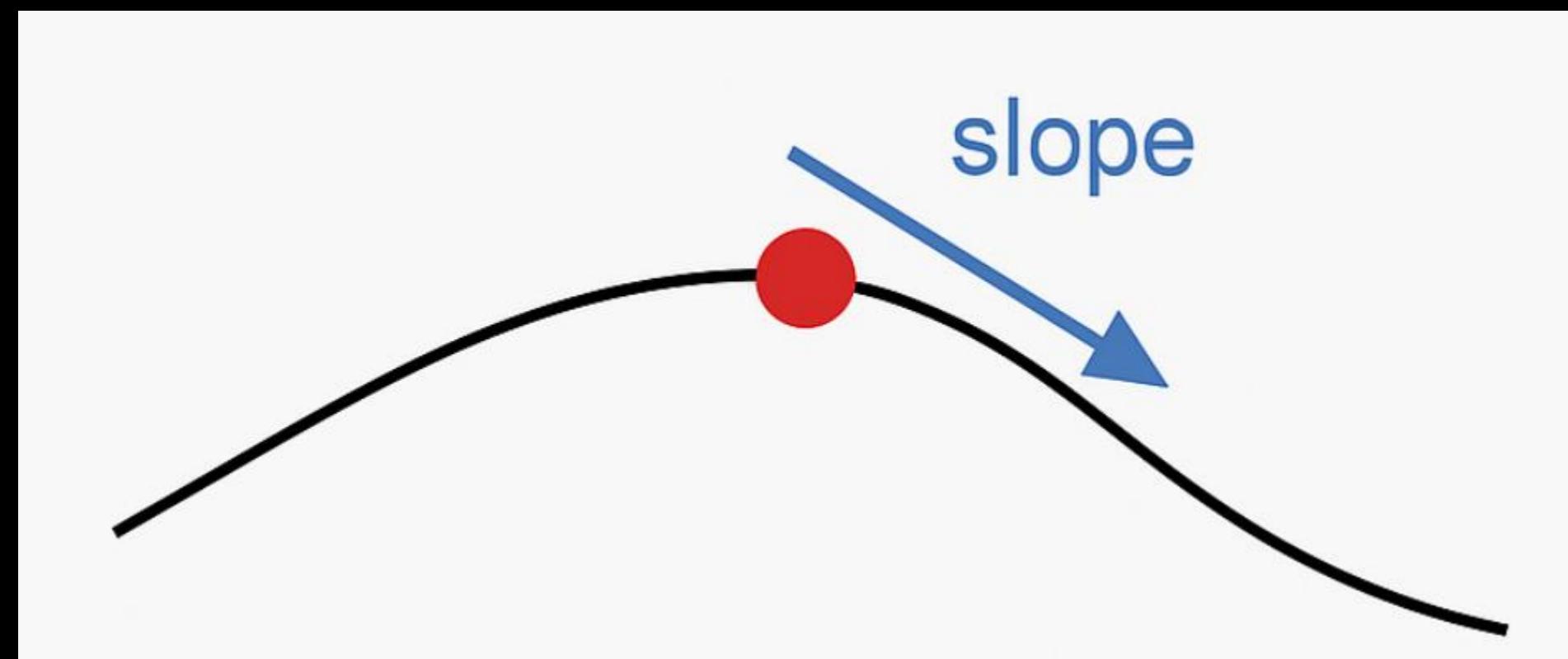
Le terme négatif dans la formule permet d'aligner cette convention avec les signes des dérivées secondes :

- Une dérivée seconde négative (terrain qui s'élève moins vite) doit donner une courbure verticale positive (convexité)
- Une dérivée seconde positive (terrain qui s'élève plus vite) doit conduire à une courbure verticale négative (concavité)

Bosses et creux

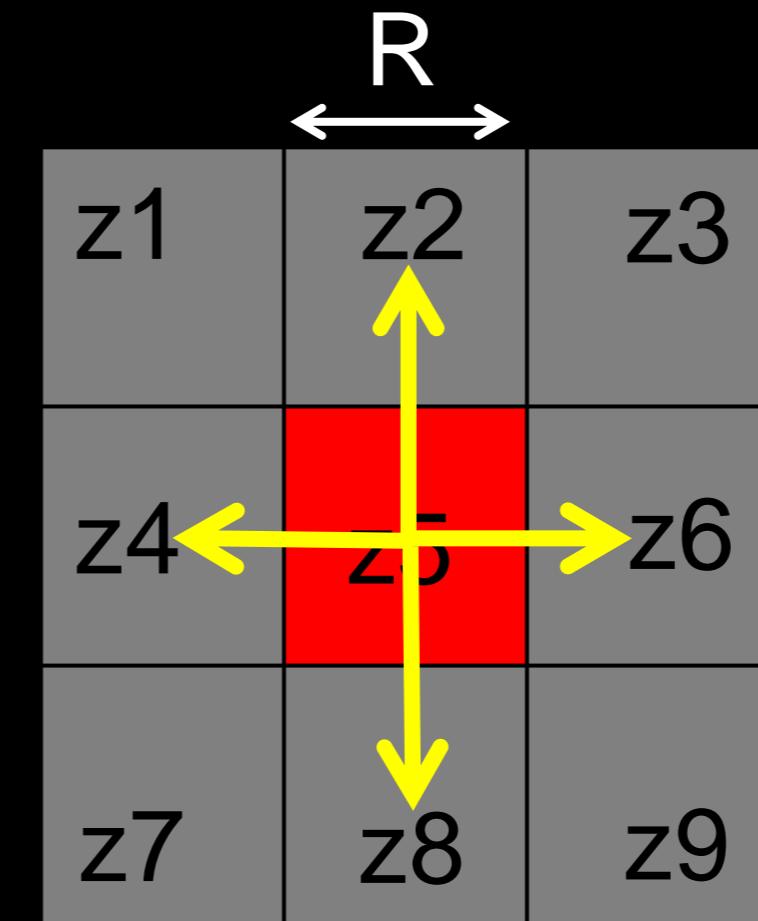
Le signe négatif dans la formule de la courbure verticale est là pour que :

- les bosses (convexes) aient une courbure positive,
- les creux (concaves) aient une courbure négative,



Courbure horizontale

- Modèle de Zevenbergen et Thorne (1987)



R = résolution du MNT

$$G = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_6 - z_4}{2R}$$

$$H = \frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{z_2 - z_8}{2R}$$

$$D = \frac{1}{R^2} \left(\frac{z_4 + z_6}{2} - z_5 \right) \quad E = \frac{1}{R^2} \left(\frac{z_2 + z_8}{2} - z_5 \right)$$

$$F = \left(\frac{-z_1 + z_3 + z_7 - z_9}{4R^2} \right)$$

$$\text{Courbure, plan} = 2 \frac{DH^2 + EG^2 + FGH}{G^2 + H^2}$$

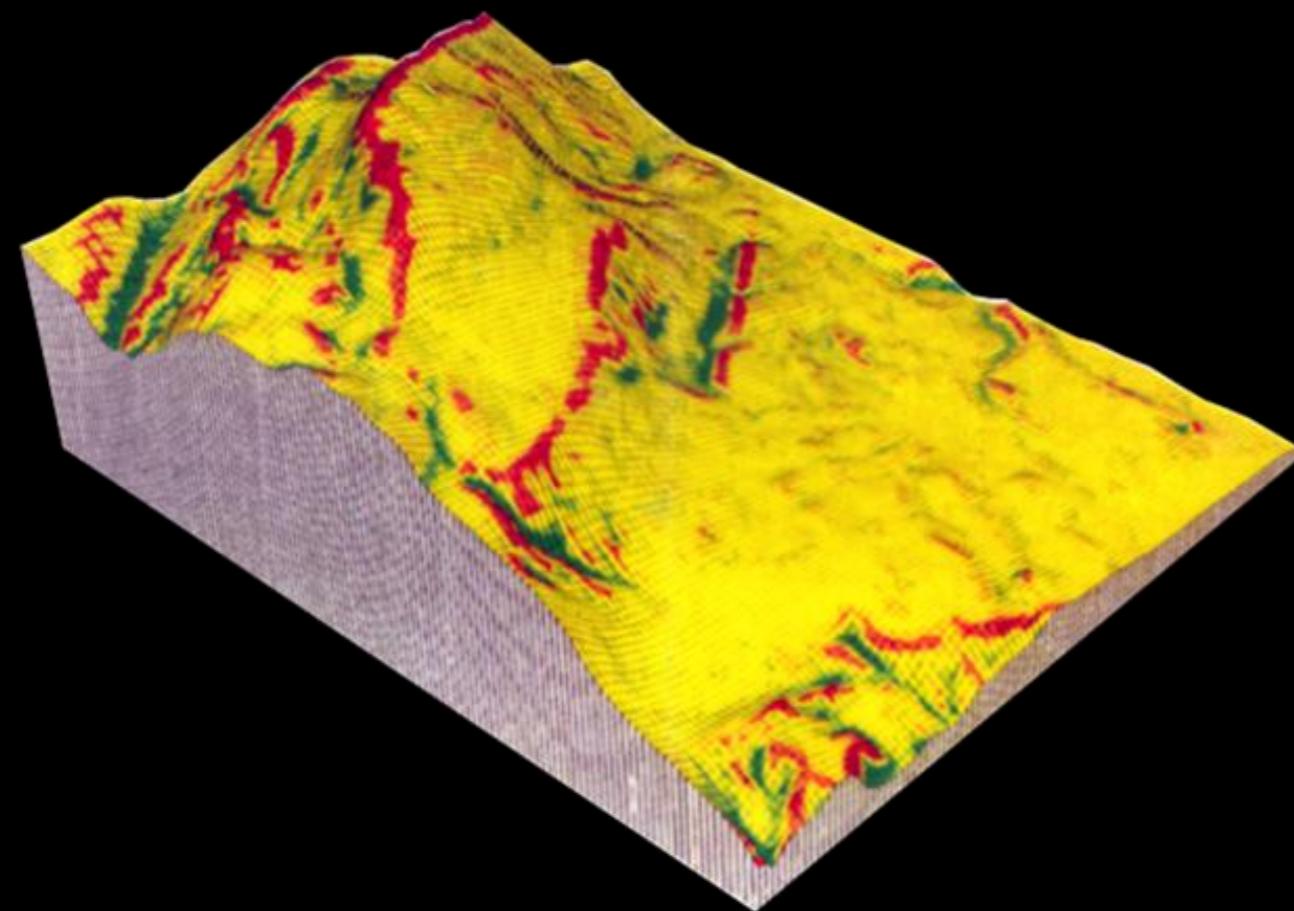
Courbure horizontale

Effet de la taille de la fenêtre

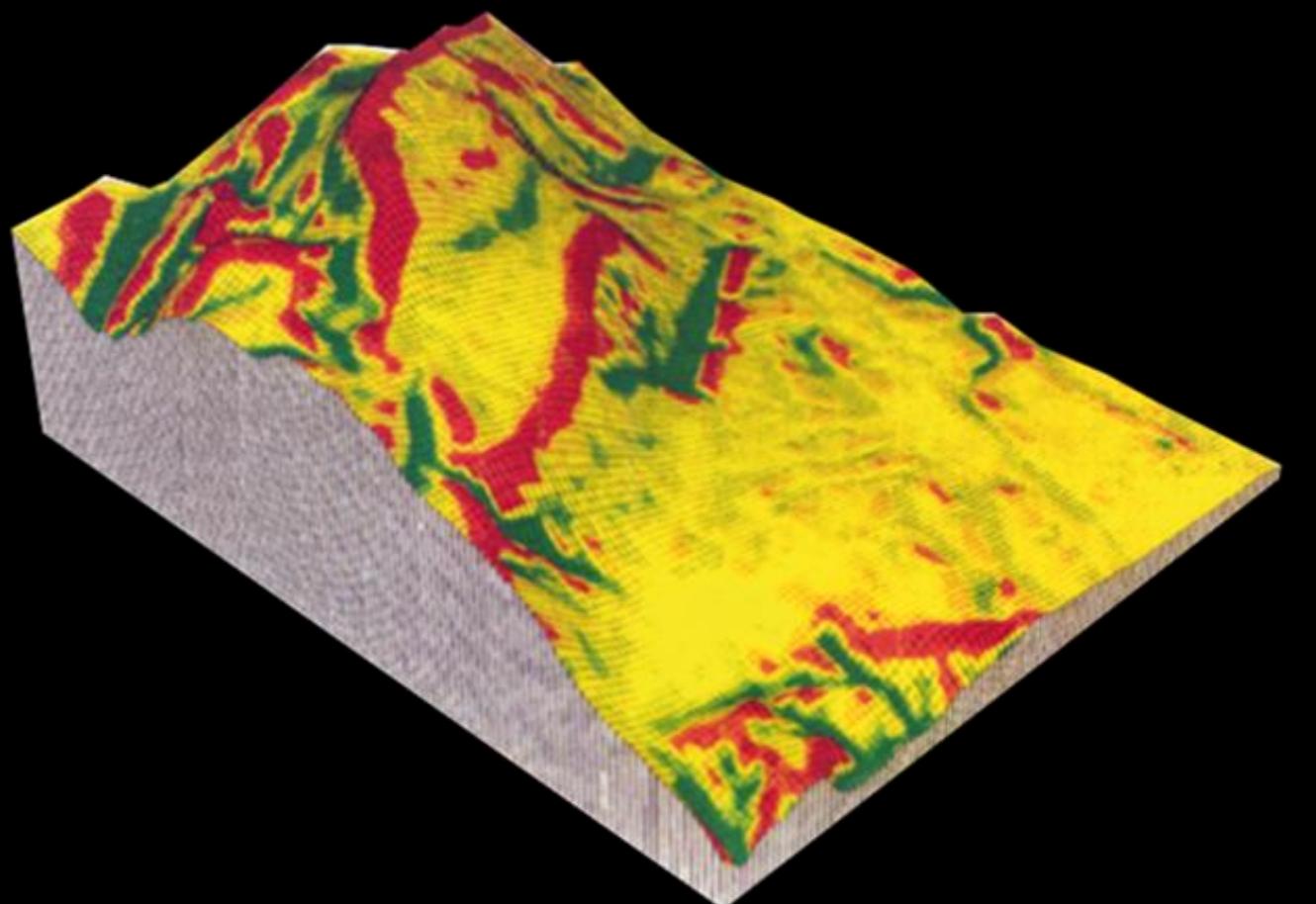
- La cartographie de la convexité et de la concavité est très sensible à la variation de la taille de la fenêtre mobile
- L'augmentation de la taille de la fenêtre produit un lissage de la pente ou de l'orientation
- En ce qui concerne la convexité et la concavité, l agrandissement de la fenêtre mobile produit un effet structurant, soit une mise en évidence des formes dominantes



3x3



5x5



Systèmes d'Information Géographique

<https://go.epfl.ch/sig>

Modèles numériques d'altitude – Variables dérivées 2

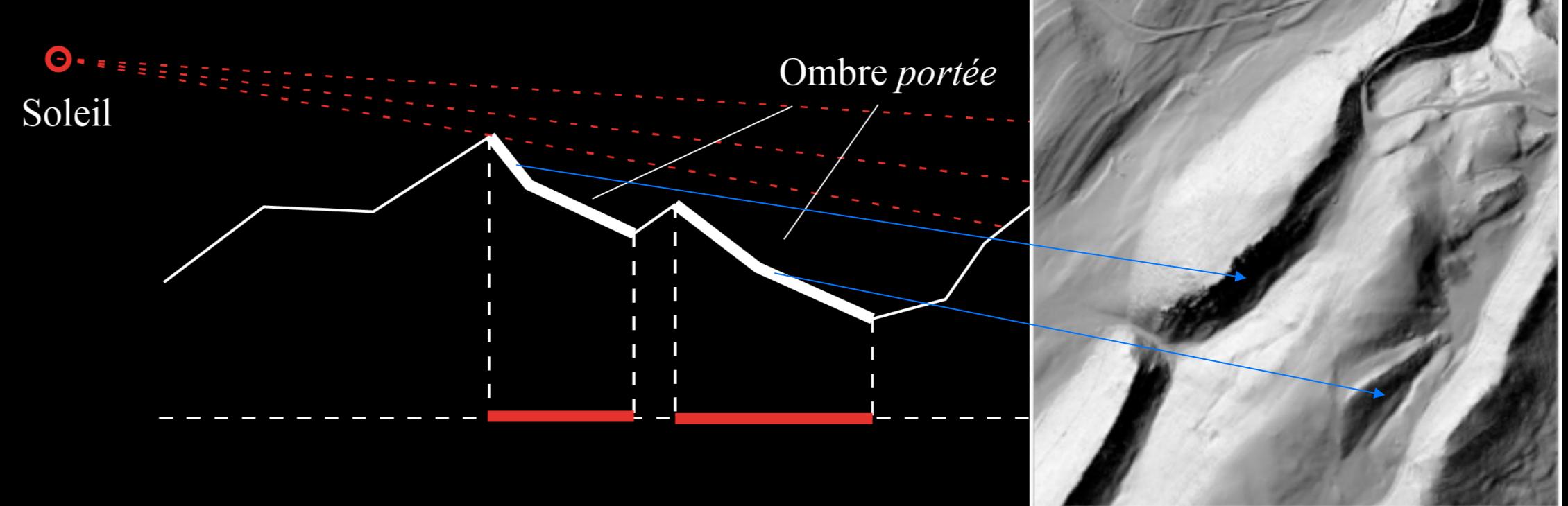
Stéphane Joost, Gabriel Kathari (GEOME-LGB)

Un modèle numérique d'altitude permet de calculer...

Ombre portée et ombre projetée

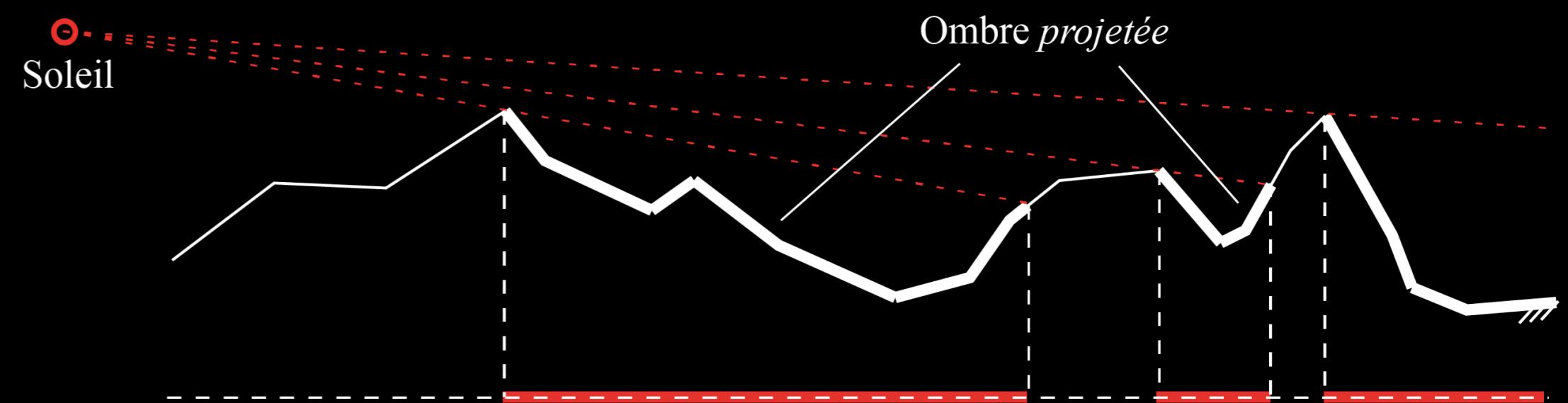
- **Ombre portée**

Griser les zones d'orientation opposées à celle de la source lumineuse **et** présentant une inclinaison supérieure à celle des rayons du soleil selon l'intensité de la pente



- **Ombre projetée**

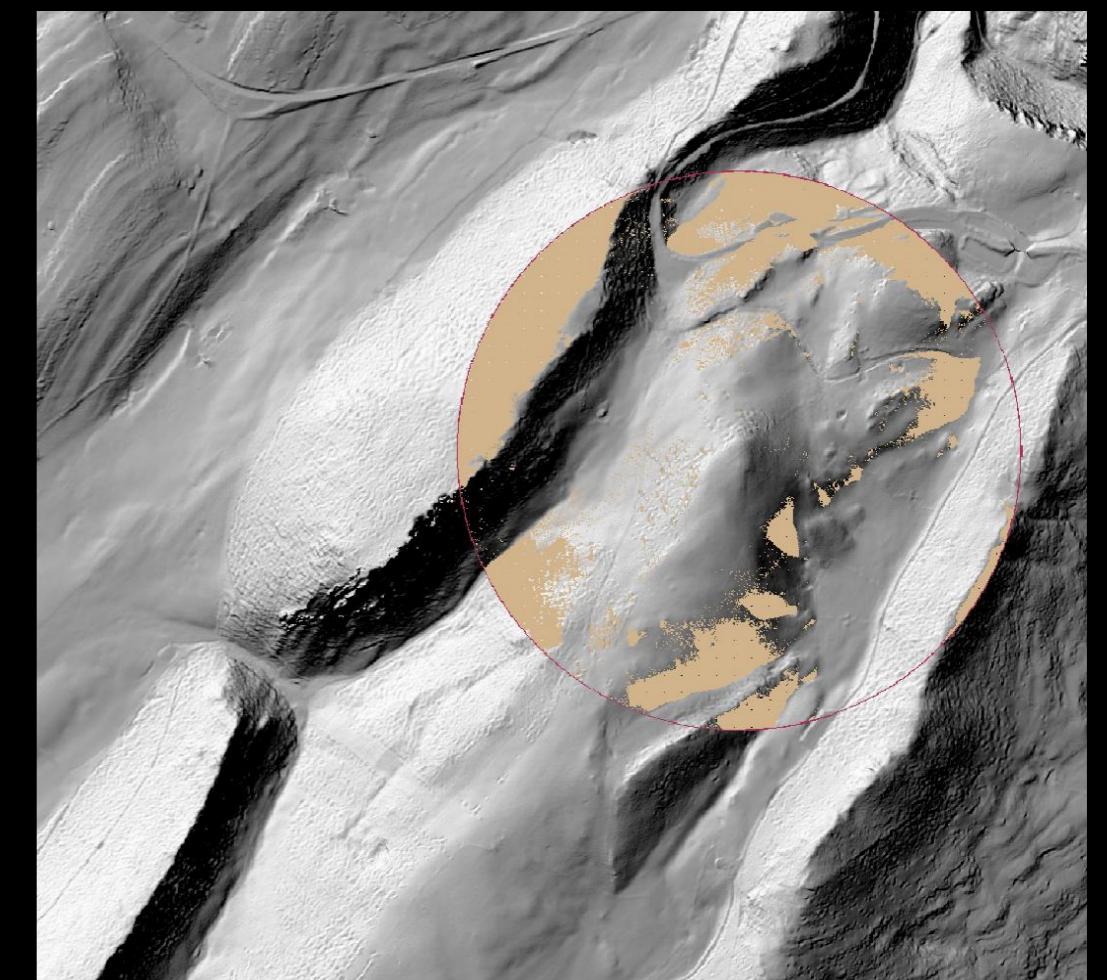
Ombre réelle produite par le relief faisant écran aux rayons du soleil



Aires de visibilité

Détermination des zones visibles depuis un point de vue donné

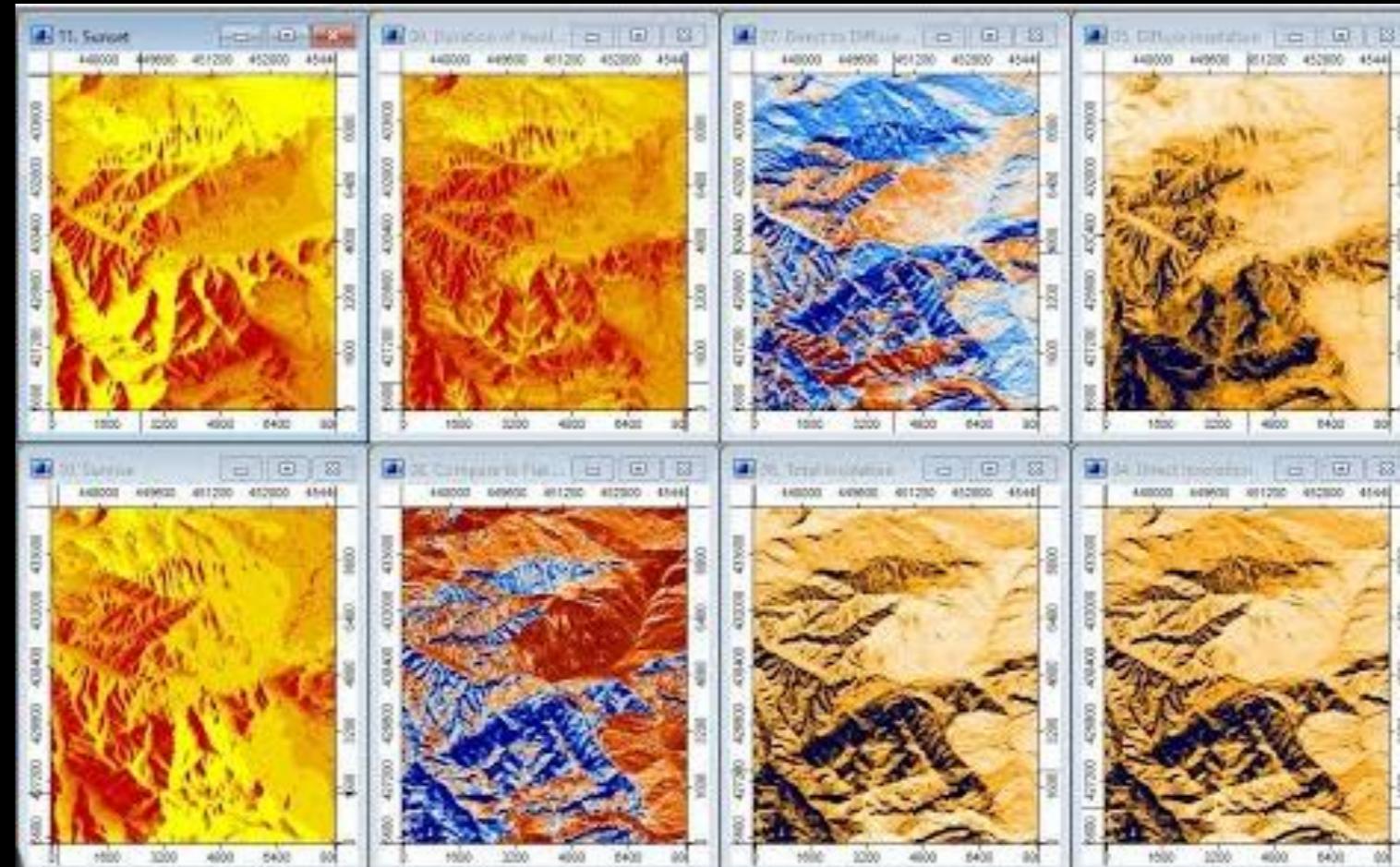
- Analyse des lignes de vue par rapport au relief
- Applications dans l'analyse du paysage:
 - De quelles zones une nouvelle construction sera-t-elle visible?
 - Quel est l'impact d'une éolienne sur le paysage ?
 - Quelle est la zone de visibilité d'une antenne de téléphonie mobile ?



Taux d'ensoleillement (1)

Analyse du rayonnement reçu, sans tenir compte d'une éventuelle couverture nuageuse (kWh/m²)

- Calculé à partir de :
 - La hauteur du soleil
 - La transparence de l'atmosphère
 - La pente et l'orientation
 - La ligne d'horizon



Using SAGA from QGIS

Taux d'ensoleillement (2)

- Analyse du rayonnement reçu, sans tenir compte d'une éventuelle couverture nuageuse (kWh/m^2)
- Applications diverses :
 - Zones favorables pour la pose de panneaux solaires
 - Etudes écologiques

MNT



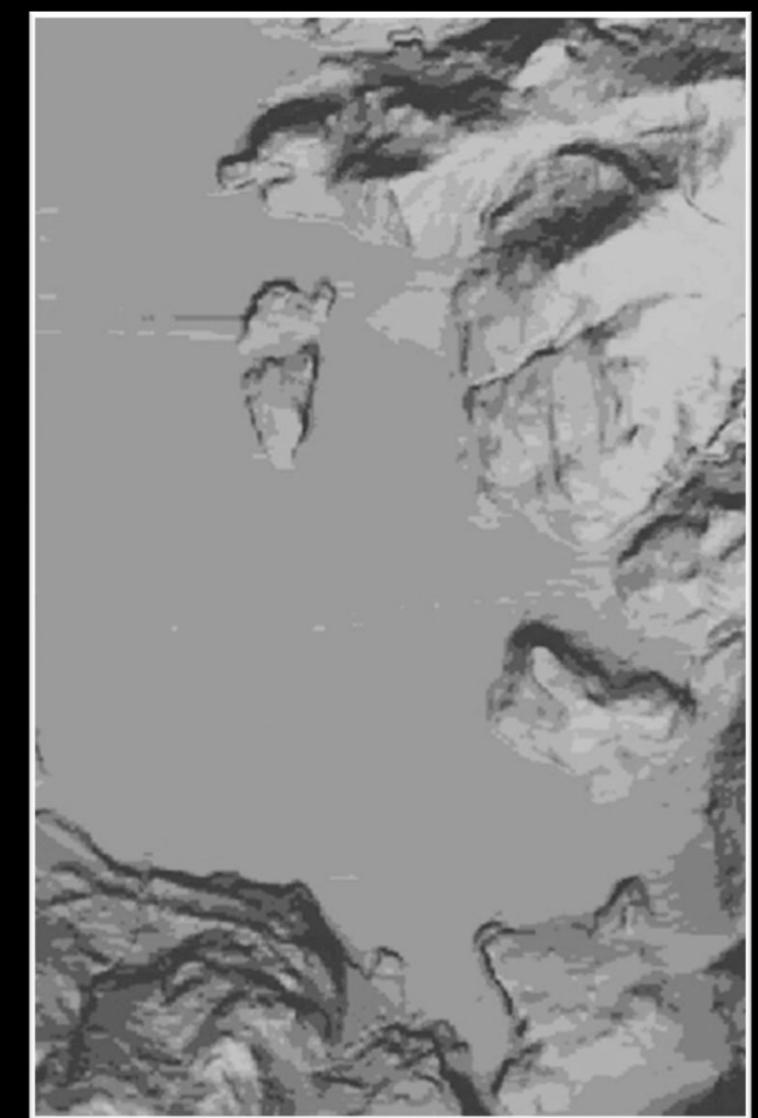
386 m

2015 m

200
 Wh/m^2

6500
 Wh/m^2

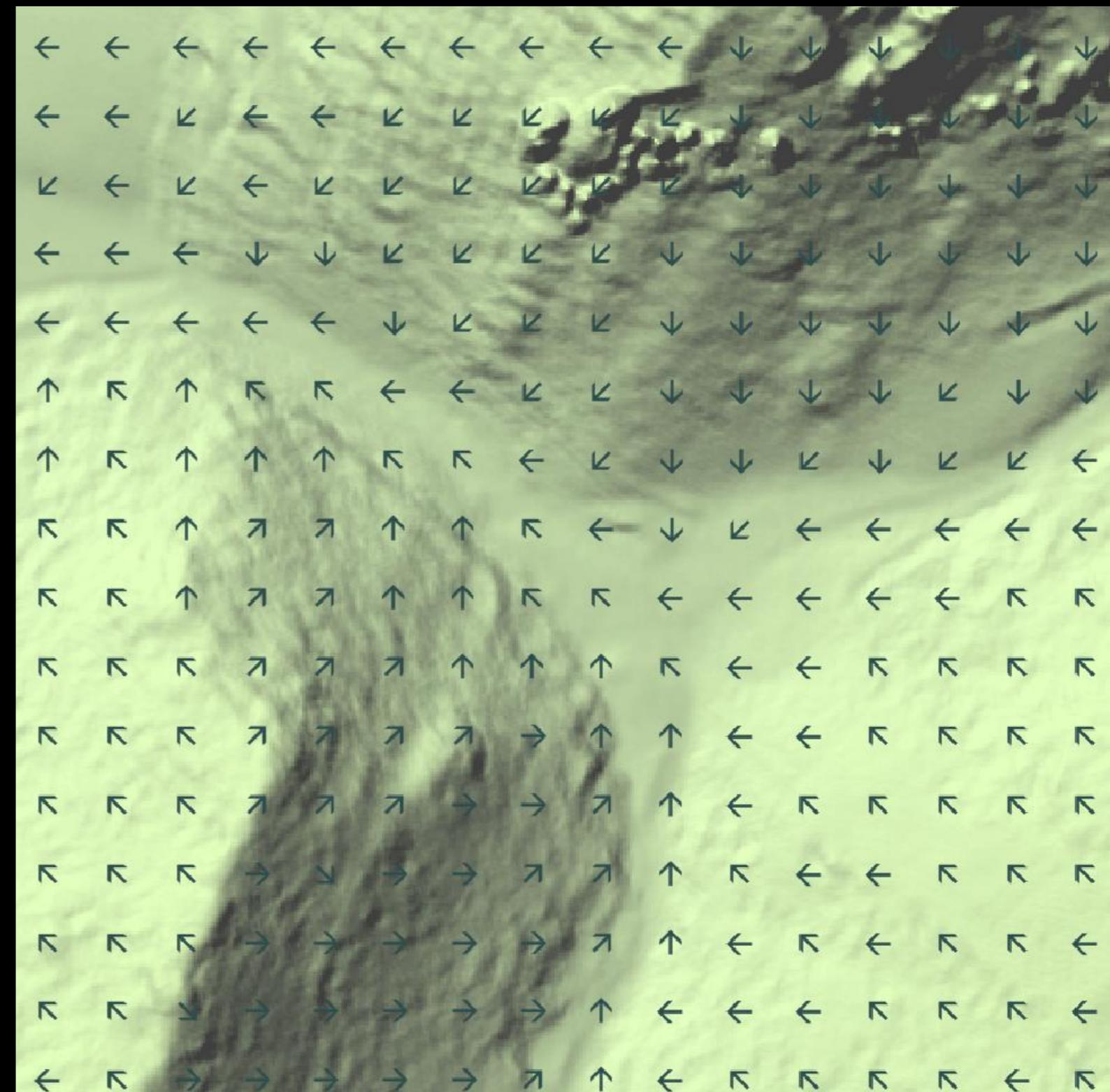
Energie solaire
cumulée en un jour



Lignes de drainage

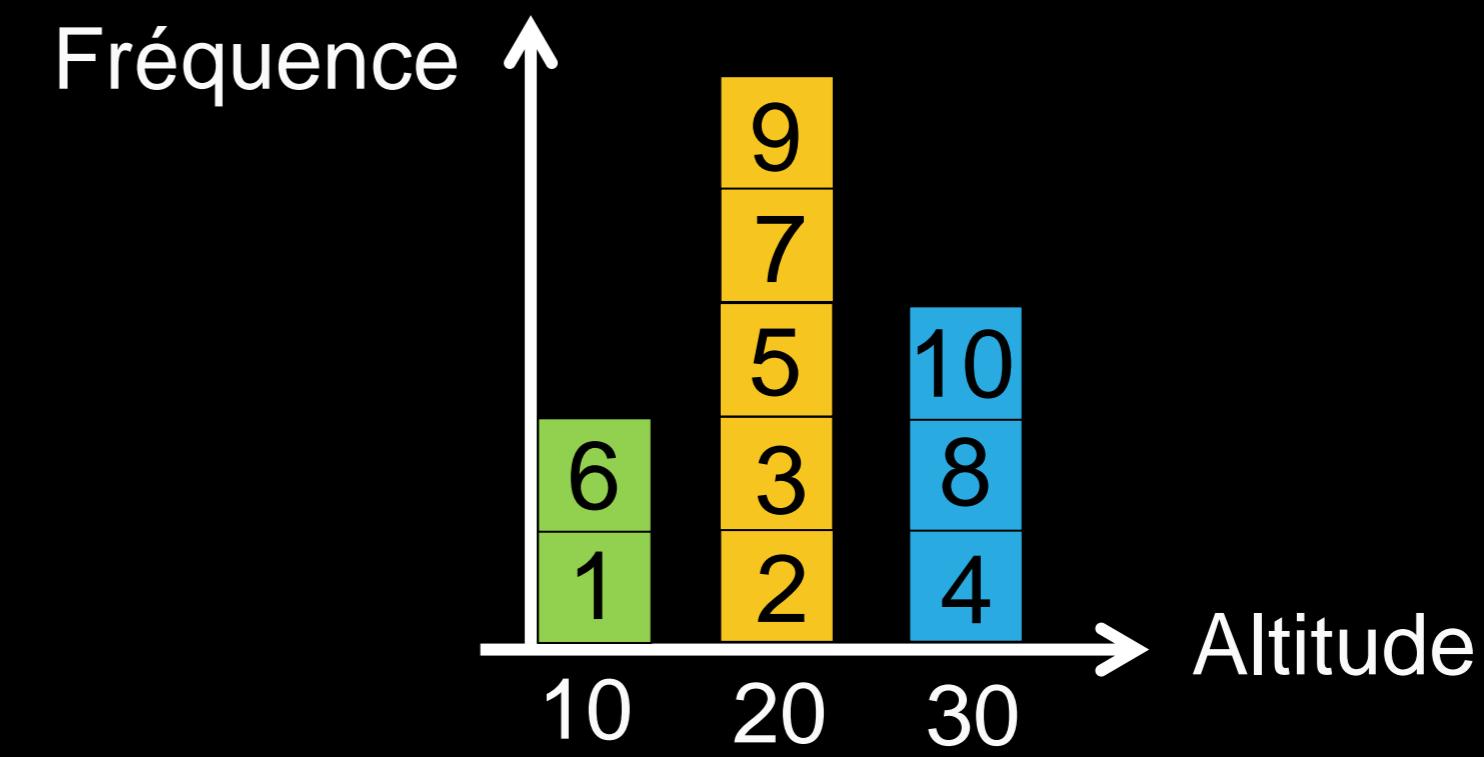
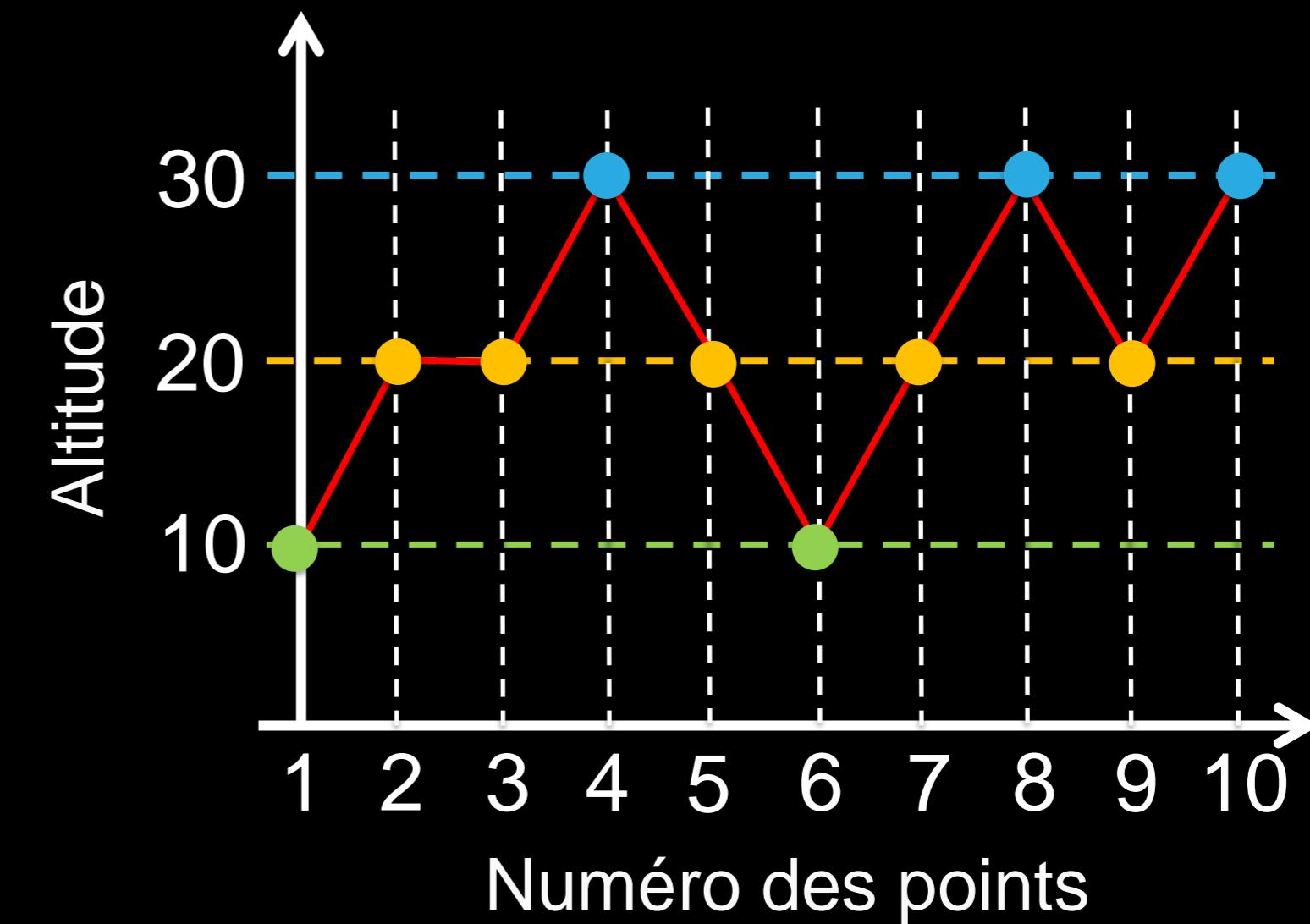
Chemin théorique qu'une goutte d'eau tombant sur le relief est censée parcourir jusqu'à l'exutoire du bassin versant

- Suppose une surface lisse et imperméable
- Calcul de la pente en chaque point
- Sélection des points hauts (ligne de crête)
- A partir de chaque point haut, définition des lignes d'écoulement de proche en proche en suivant la ligne de plus forte pente



Limites de bassins versant - Vincent et Soille

- Détermination des lignes de crêtes à partir d'un exutoire en suivant de proche en proche les lignes d'altitude les plus élevées
- Agrégation des points voisins les plus élevés à partir de l'exutoire

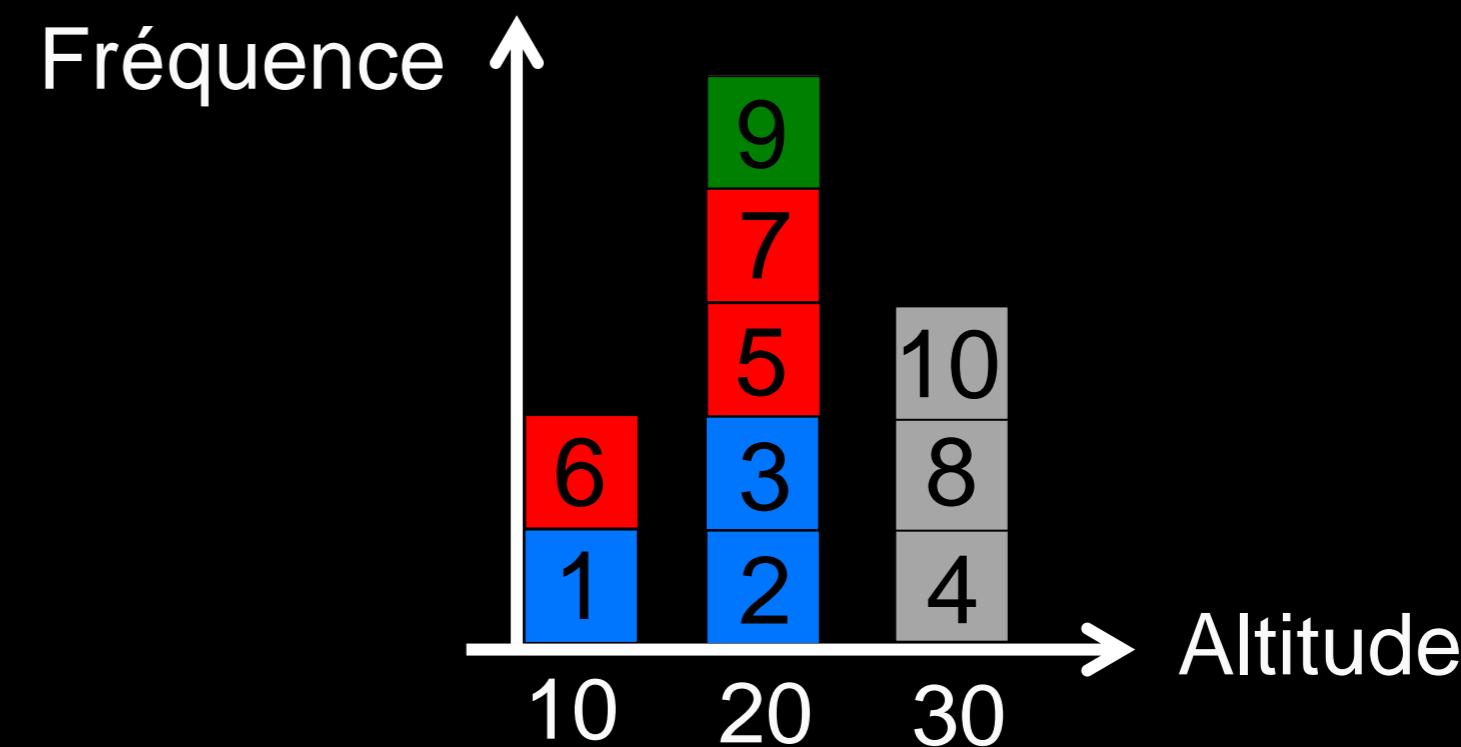
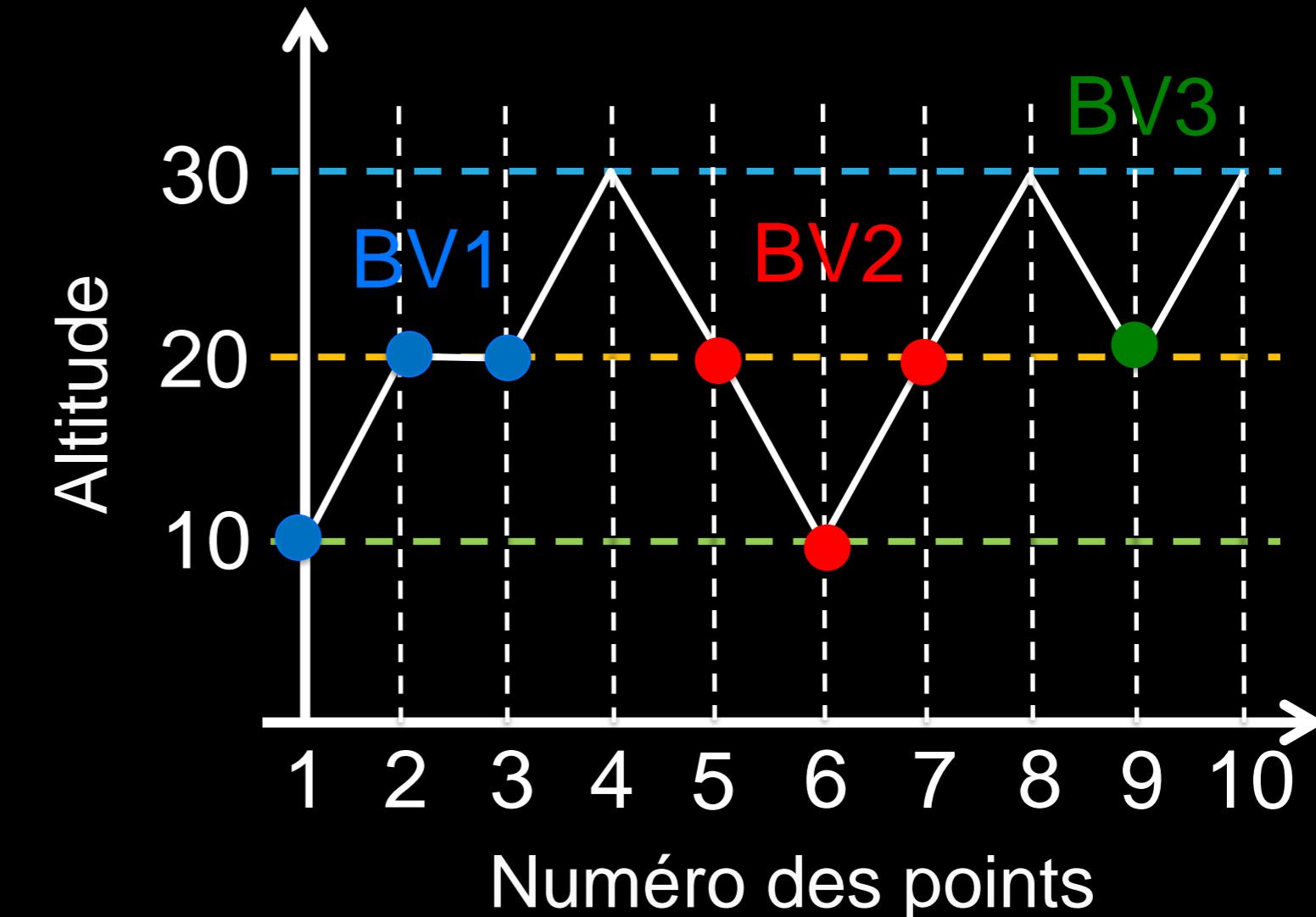


Limites de bassins versants – Vincent et Soille (1991)

- L'algorithme identifie pour commencer le ou les pixels avec l'altitude la plus basse. S'ils sont isolés, ils forment chacun le germe d'un bassin versant distinct.
- Dans notre exemple, le pixel 1 présente une valeur minimale. Il forme le premier point du bassin versant bleu.
- Le deuxième point bas – le numéro 6 – également de valeur minimale, est sélectionné ensuite. Comme il n'est pas adjacent au point 1, il forme le point de départ d'un deuxième bassin versant, le rouge.
- Si aucun autre pixel ne se trouve à la même altitude, on élève le niveau d'altitude jusqu'à ce que l'on rencontre un nouveau point.
- Comme le point 2 est adjacent à un pixel déjà affecté au bassin versant bleu, il y est affecté. On procède ainsi de suite, jusqu'à ce qu'à la fin du processus, tous les pixels soient affectés à un bassin versant.

Le système fonctionne comme si le relief se remplissait progressivement d'eau par une nappe phréatique qui s'élève jusqu'à ce que l'ensemble se retrouve inondé.

Deux bassins qui se rejoignent forment la ligne de crête qui les sépare.

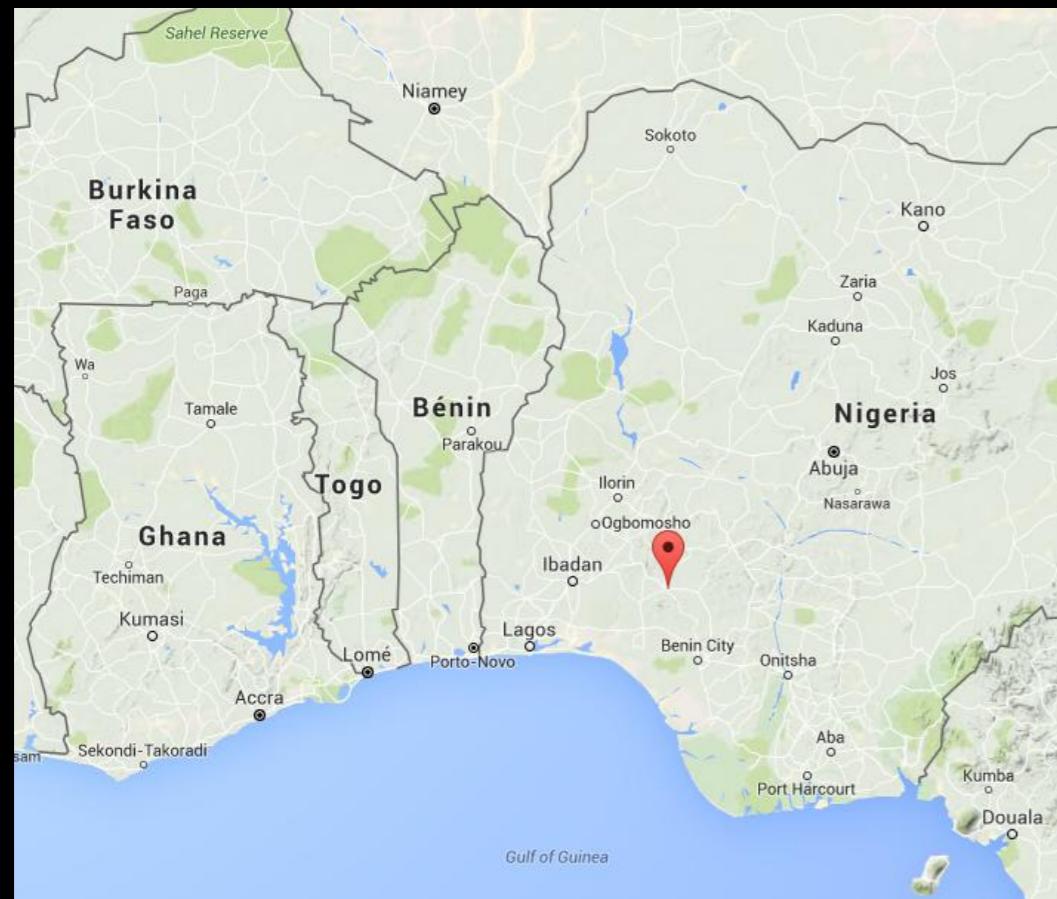


Applications: les MNA en pratique

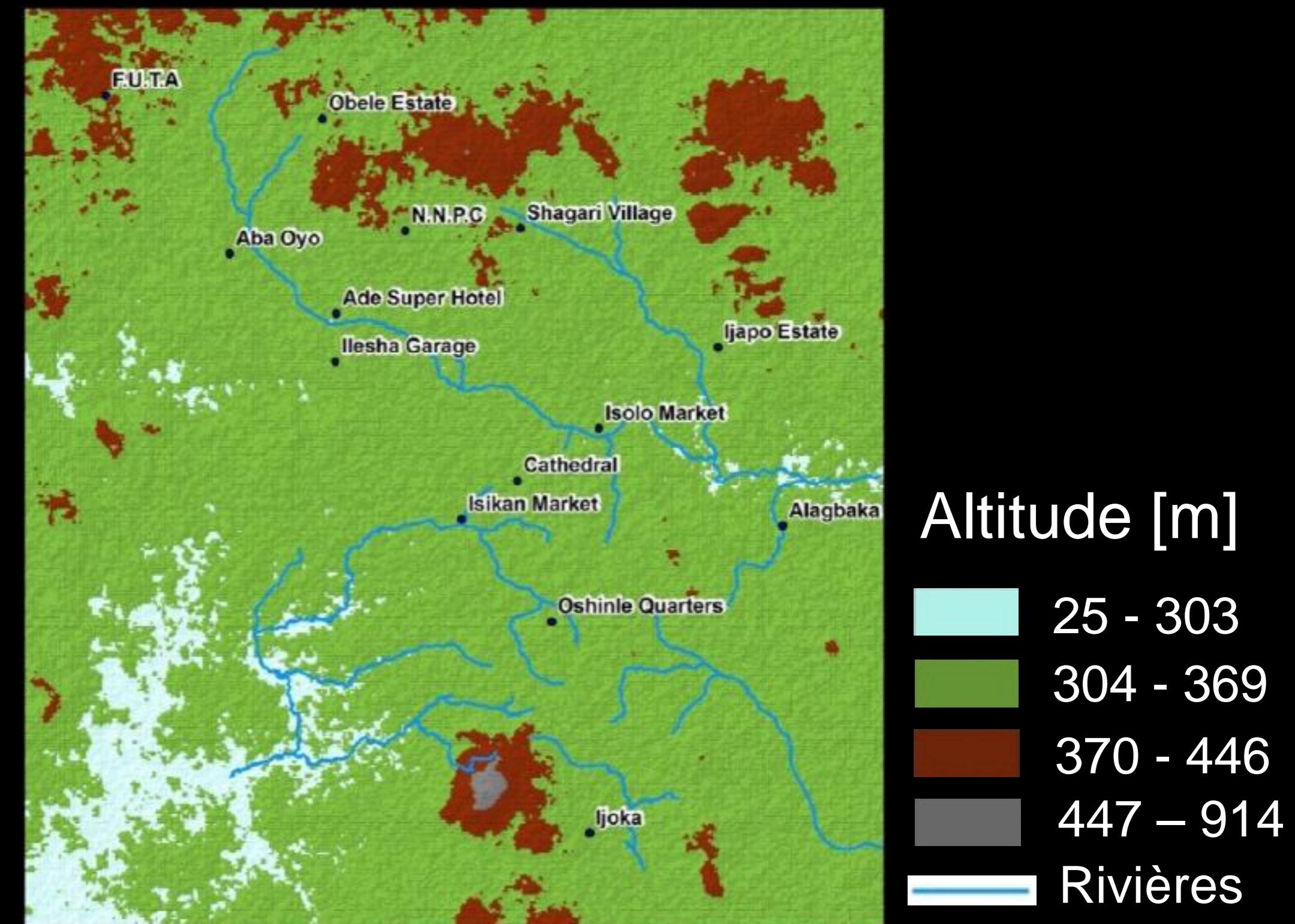
Zones inondables (1)

Délimitation des zones inondables à Akure, Nigeria

- Images satellites Landsat 1986, 2002, 2011: mise en évidence des changements dans l'utilisation du sol
- Modèle numérique de terrain



Modèle Numérique de Terrain



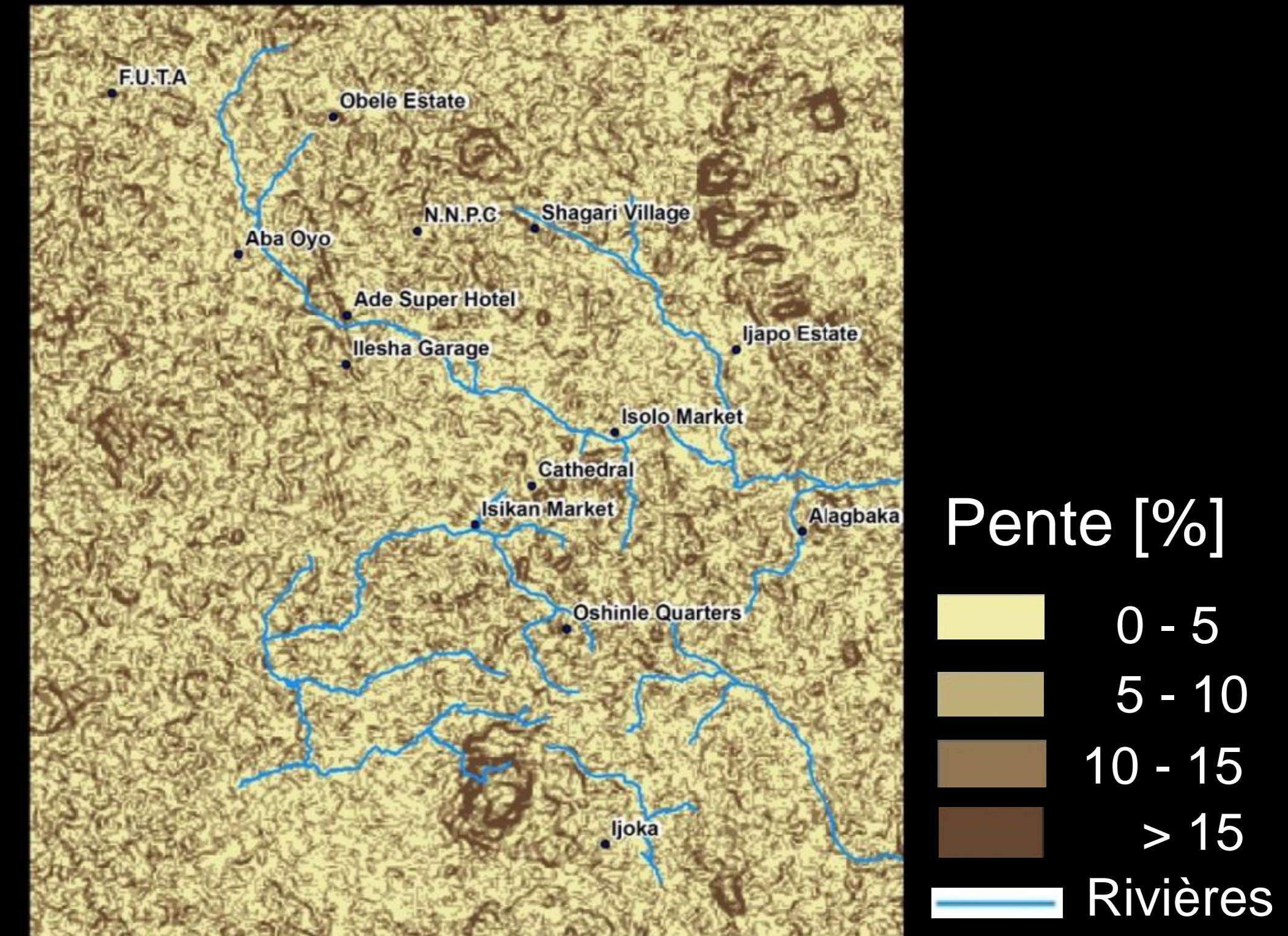
A. E. Olajuyigbe, S.A. Adegboyega, O.O. Popoola, O. A. Olalekan. 2015. Assessment of urban land use and environmental sensitive area degradation in Akure, Nigeria using remote sensing and GIS techniques. European Scientific Journal. Vol 11. No 29. 1857-7431.

Zones inondables (2)

Délimitation des zones inondables à Akure, Nigeria

- Images satellites Landsat 1986, 2002, 2011: mise en évidence des changements dans l'utilisation du sol
- Modèle numérique de terrain
- Calcul de la pente
- Intégration de données de précipitations

Pente



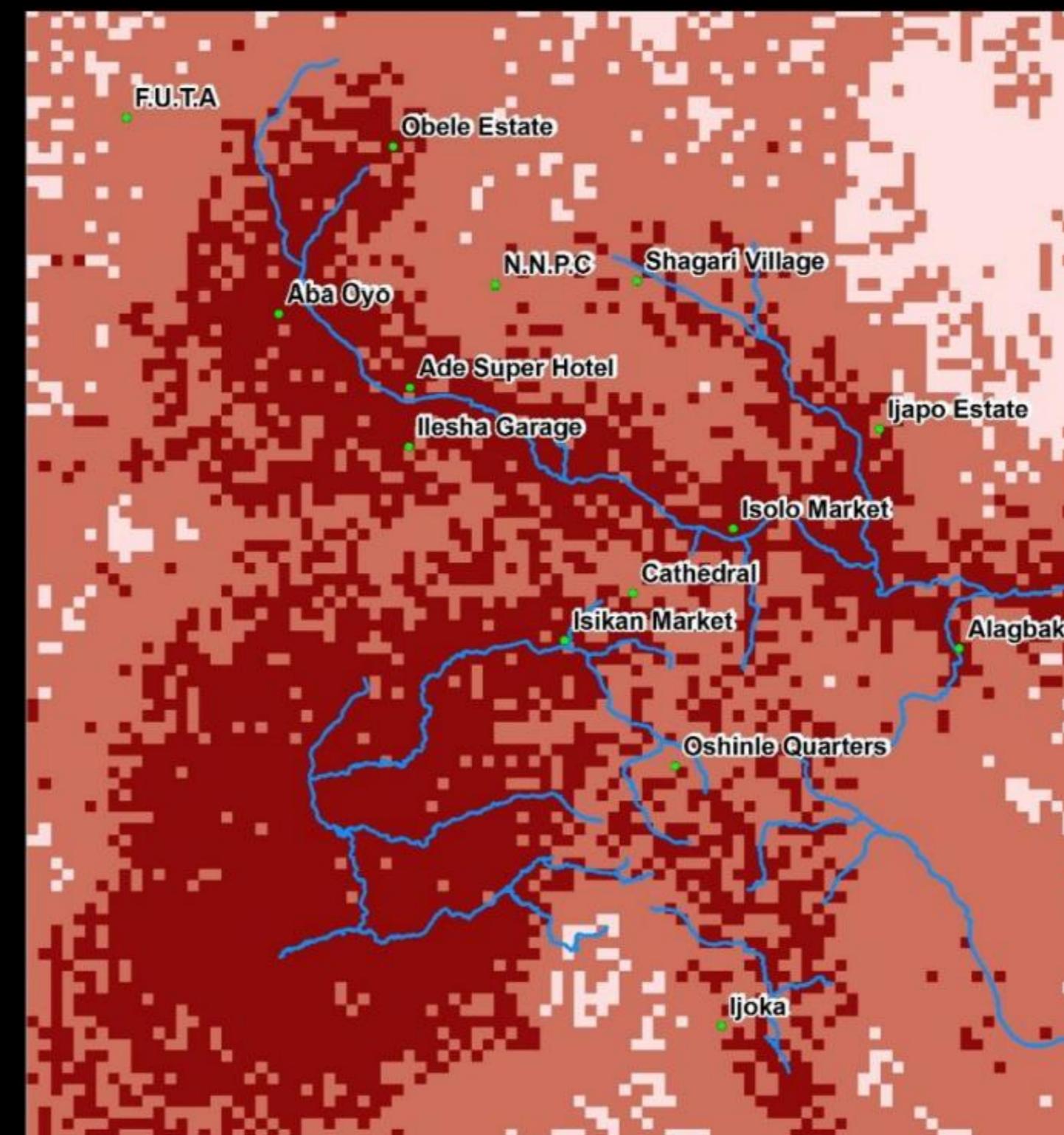
A. E. Olajuyigbe, S.A. Adegboyega, O.O. Popoola, O. A. Olalekan. 2015. *Assessment of urban land use and environmental sensitive area degradation in Akure, Nigeria using remote sensing and GIS techniques*. European Scientific Journal. Vol 11. No 29. 1857-7431.

Zones inondables (3)

Délimitation des zones inondables à Akure, Nigeria

- Images satellites Landsat 1986, 2002, 2011: mise en évidence des changements dans l'utilisation du sol
- Modèle numérique de terrain
- Calcul de la pente
- Intégration de données de précipitations
- Cartes de zones à risque d'inondation en trois intensités

Zones à risque



Vulnérabilité

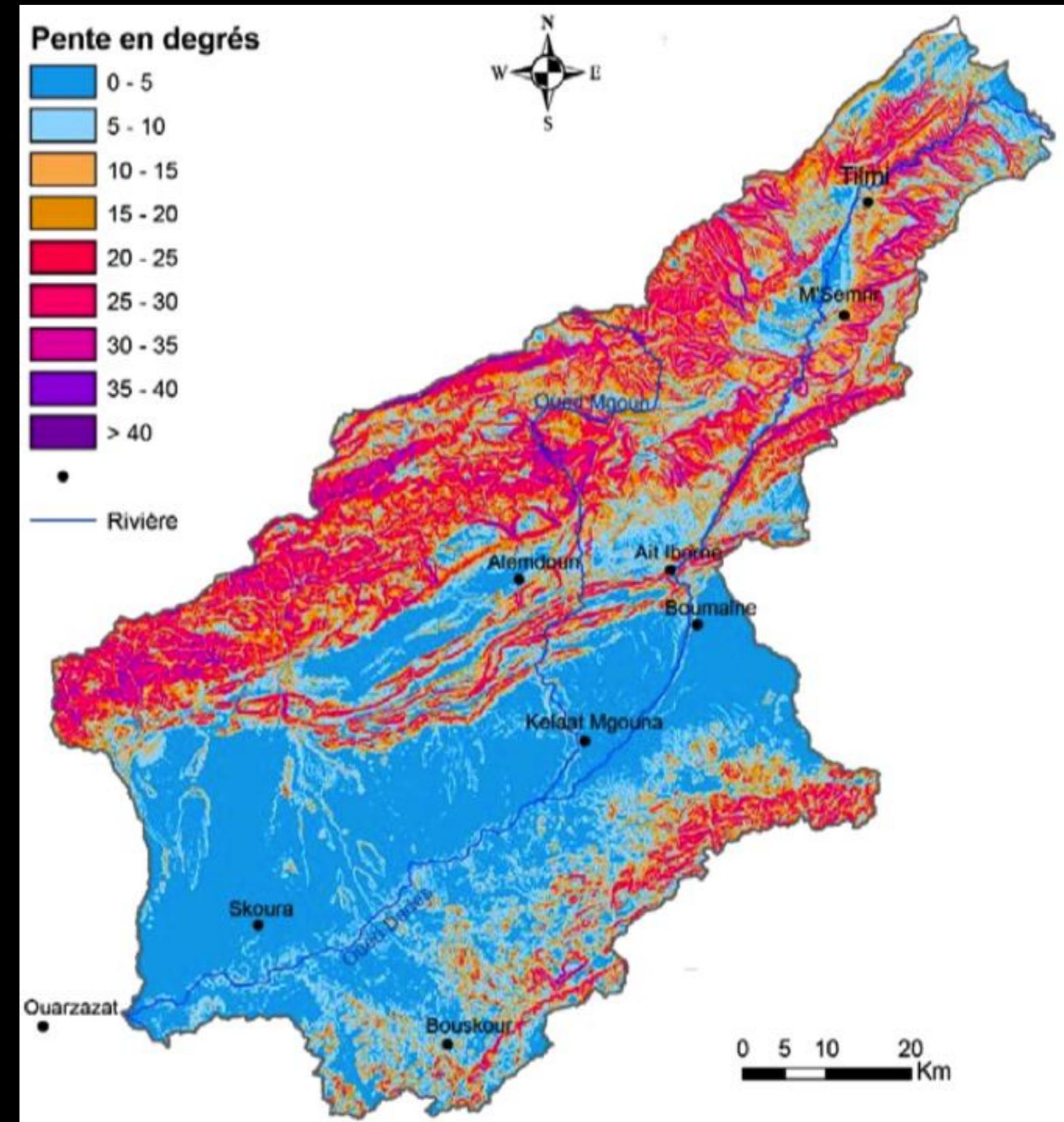
Moyenne
Haute
Forte
Rivières

A. E. Olajuyigbe, S.A. Adegboyega, O.O. Popoola, O. A. Olalekan. 2015. *Assessment of urban land use and environmental sensitive area degradation in Akure, Nigeria using remote sensing and GIS techniques*. European Scientific Journal. Vol 11. No 29. 1857-7431.

Eboulements rocheux (1)

Cartographie de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades, Maroc.

- Topographie
 - Modèle numérique de terrain
 - Calcul de la pente

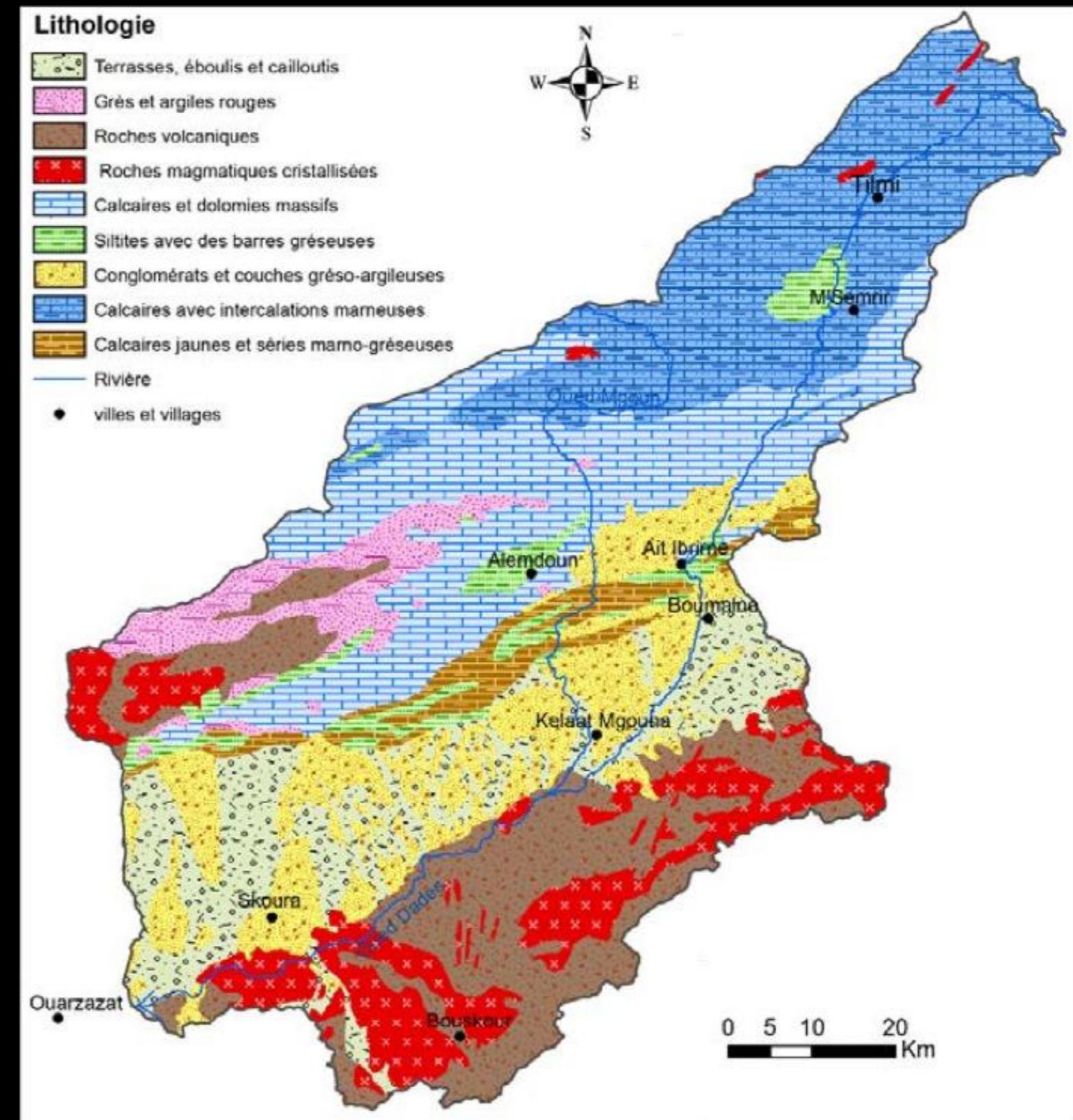


N. El Aaggad, A. Algouti, A. Algouti, A. Amaya. (2015). *Cartographie par SIG de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades (Haut Atlas Central), Maroc*. European Scientific Journal. Vol 11. No 18. 1857-7431.

Eboulements rocheux [2]

Cartographie de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades, Maroc.

- Topographie
 - Modèle numérique de terrain
 - Calcul de la pente
- Lithologie
 - Digitatlisation des cartes géologiques
 - Relevés de terrain

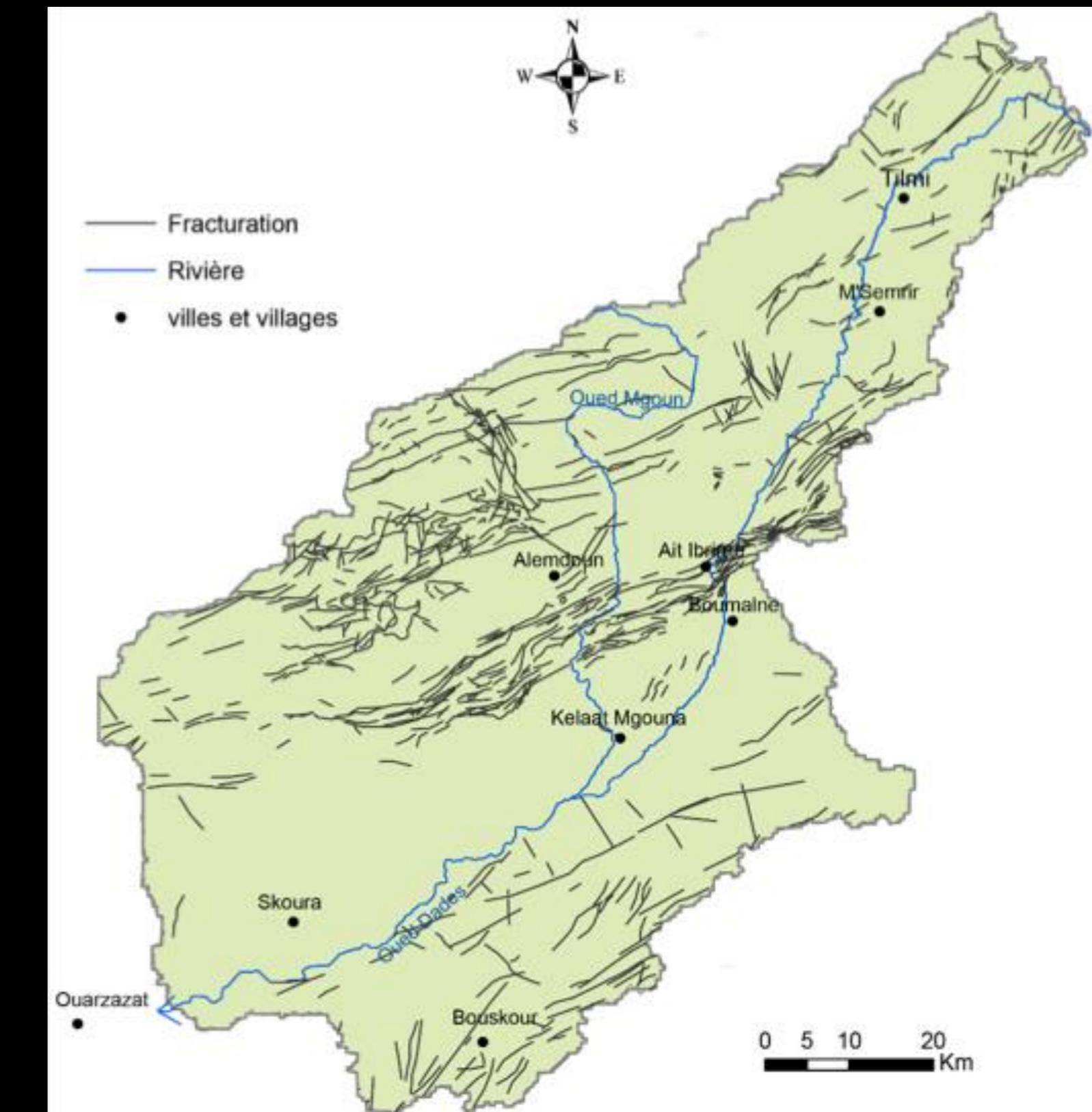


N. El Aaggad, A. Algouti, A. Algouti, A. Amaya. (2015). Cartographie par SIG de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades (Haut Atlas Central), Maroc. European Scientific Journal. Vol 11. No 18. 1857-7431.

Eboulements rocheux [3]

Cartographie de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades, Maroc.

- Topographie
 - Modèle numérique de terrain
 - Calcul de la pente
- Lithologie
 - Digitatlisation des cartes géologiques
 - Relevés de terrain
- Fracturation
 - Relevés de terrain
 - Traitement d'images satellites

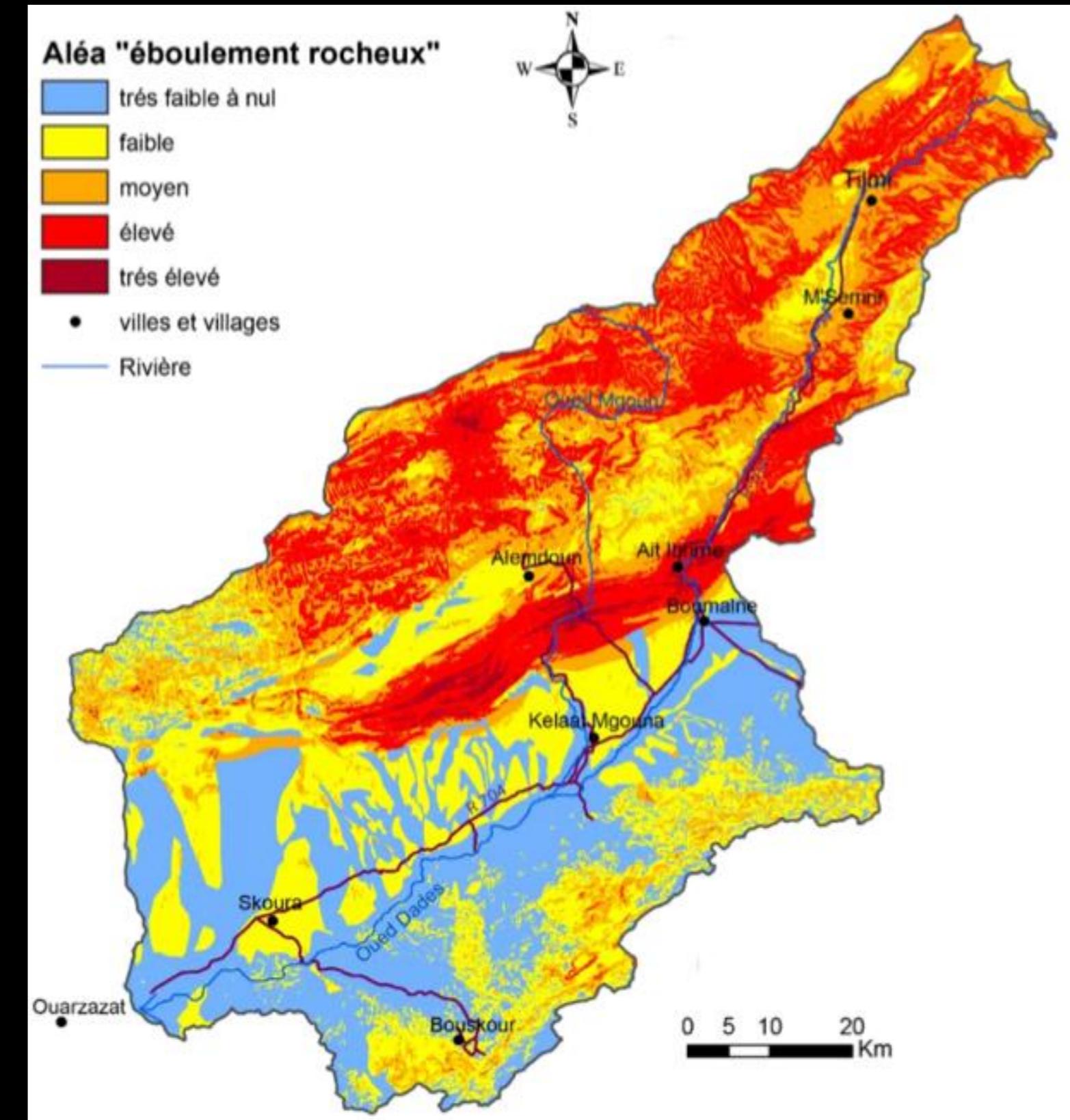


N. El Aaggad, A. Algouti, A. Algouti, A. Amaya. (2015). *Cartographie par SIG de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades (Haut Atlas Central), Maroc*. European Scientific Journal. Vol 11. No 18. 1857-7431.

Eboulements rocheux (4)

Cartographie de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades, Maroc.

- Topographie
 - Modèle numérique de terrain
 - Calcul de la pente
- Lithologie
 - Digitatlisation des cartes géologiques
 - Relevés de terrain
- Fracturation
 - Relevés de terrain
 - Traitement d'images satellites
- Carte d'aléa

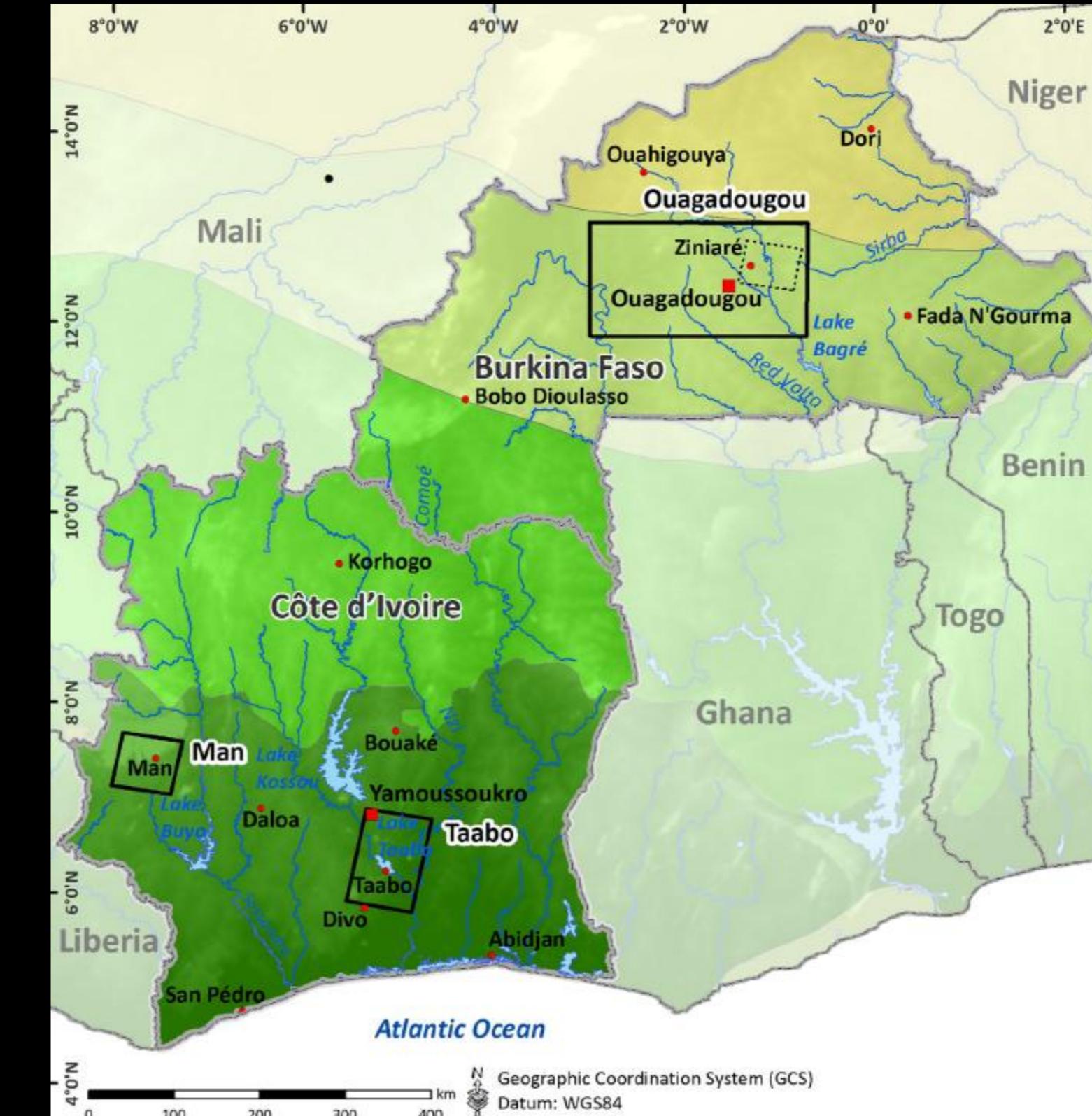


N. El Aaggad, A. Algouti, A. Algouti, A. Amaya. (2015). *Cartographie par SIG de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades (Haut Atlas Central), Maroc*. European Scientific Journal. Vol 11. No 18. 1857-7431.

Santé publique

Délimitation des zones à risque de transmission de la Schistosomiase au Burkina Faso

- Images satellites
 - Persistance de l'eau
 - Température de l'eau
 - Végétation (NDVI)
- Modèle numérique de terrain (ASTER, 30m)
 - Vitesse du courant
 - Profondeur de l'eau

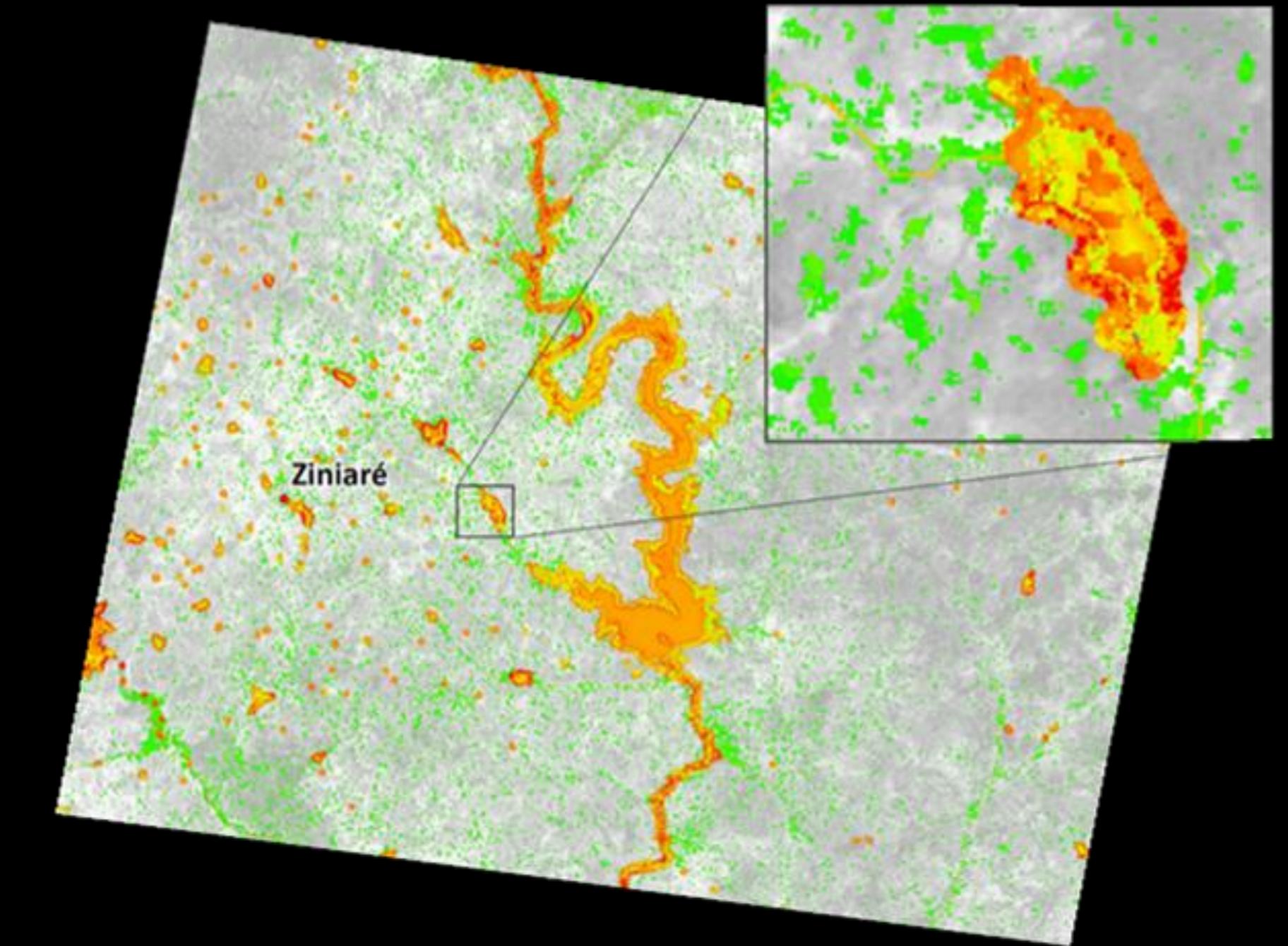


Y. Walz, M. Wegmann, S. Dech, P. Vounatsou, J-N. Poda, E. K. N'Goran, et al. 2015. *Modeling and Validation of Environmental Suitability for Schistosomiasis Transmission Using Remote Sensing*. PLoS Negl Trop Dis 9(11).

Santé publique

- Elaboration de la carte des zones de risque
- Fonction multicritère additive a permis de pondérer et de combiner les variables environnementales
- Pour élaborer un indice d'habitat potentiel

Zones de transmission potentielle de la Schistosomiase



Indice de la valeur d'habitat pour le vecteur (2010)

Faible

Forte

Y. Walz, M. Wegmann, S. Dech, P. Vounatsou, J-N. Poda, E. K. N'Goran, et al. 2015. *Modeling and Validation of Environmental Suitability for Schistosomiasis Transmission Using Remote Sensing*. PLoS Negl Trop Dis 9(11).

- MNA
- Descripteur très simple du territoire
- Potentiel analytique immense
- Rôle très important en ingénierie urbaine et pour la gestion des milieux naturels grâce aux technologies d'acquisition du signal récentes

Merci pour votre attention!

