



# Mesurer et représenter le relief

# Plan du Cours

- Définition : la topographie
- Représentations de la topographie
- Mesures de topographie terrestre
- Mesures de topographie sous-marine





Qu'est-ce que la  
topographie ?

# Qu'est-ce que la topographie ?

- « *Technique qui consiste à lever la carte ou le plan d'un terrain, à une échelle réduite, en supposant la terre plane* »
- **Objectif** : déterminer la **position** et l'**altitude** de n'importe quel point situé dans une zone donnée.
  - Prise en compte des détails visibles sur le terrain, naturels (relief, hydrographie) ou artificiels (bâtiments, réseau routier)
  - importance de l'**échelle** pour définir la taille de la zone et le niveau de détail à représenter.



# Qu'est-ce que la topographie ?

- **Applications :**

- Aménagement, environnement, urbanisme, transports, énergie, patrimoine...  
... géosciences !

- **Métiers :**

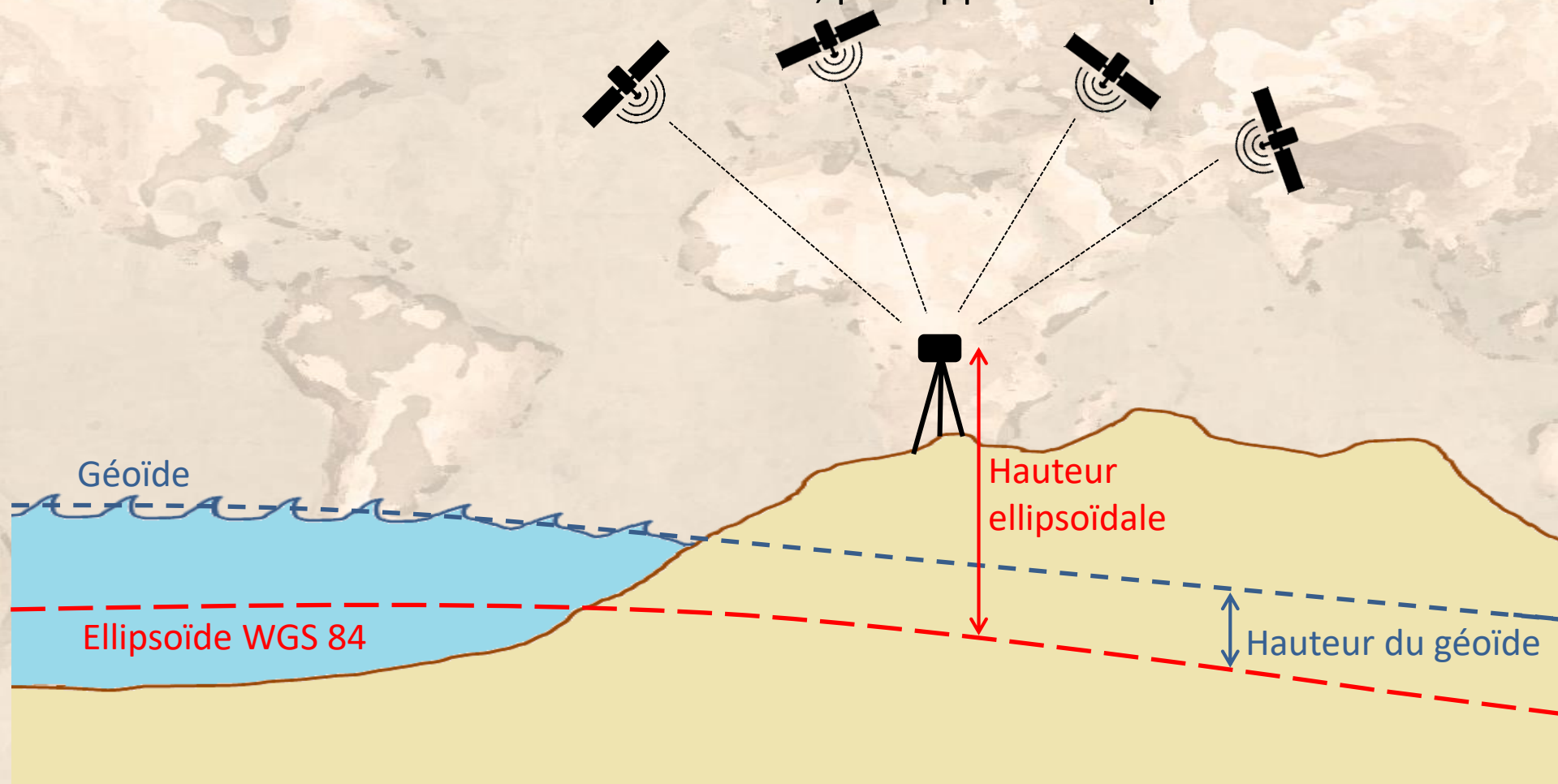
- Topographe, géomètre, cartographe...  
→ cf. Association Française de Topographie (AFT) : <http://www.aftopo.org/>

# Altitude, hauteur, profondeur...

## Quelle référence utiliser ?

### Hauteur ellipsoïdale

- Souvent issue d'une mesure GPS, par rapport à l'ellipsoïde WGS 84





# Altitude, hauteur, profondeur...

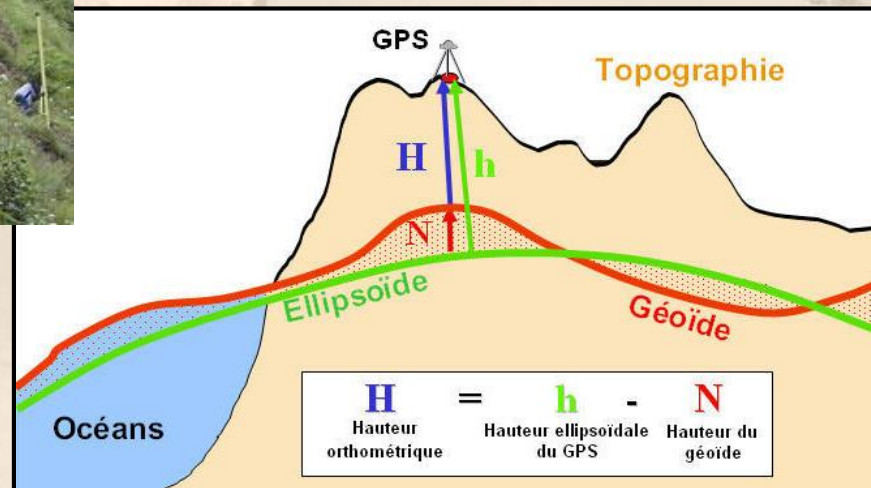
## Quelle référence utiliser ?

**Altitude → par rapport à une référence altimétrique terrestre**

- **Zéro IGN 69 :**
  - L'origine du nivellement français est donnée par le marégraphe du Fort St Jean à Marseille → **niveau moyen des mers** ⇔ géoïde.



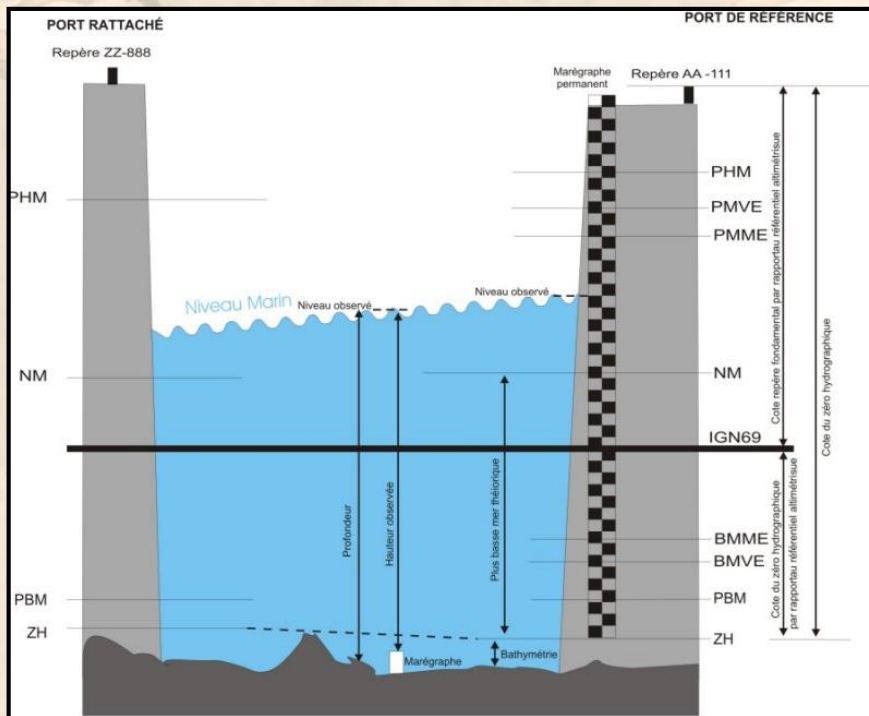
(Source IGN )



# Systèmes de référence et projections cartographiques

Profondeur → par rapport à une référence altimétrique marine

- Zéro hydrographique :
  - Niveau des plus basses mers (coeff. 120) pour un port de référence (local)
  - Repère fondamental à proximité du marégraphe



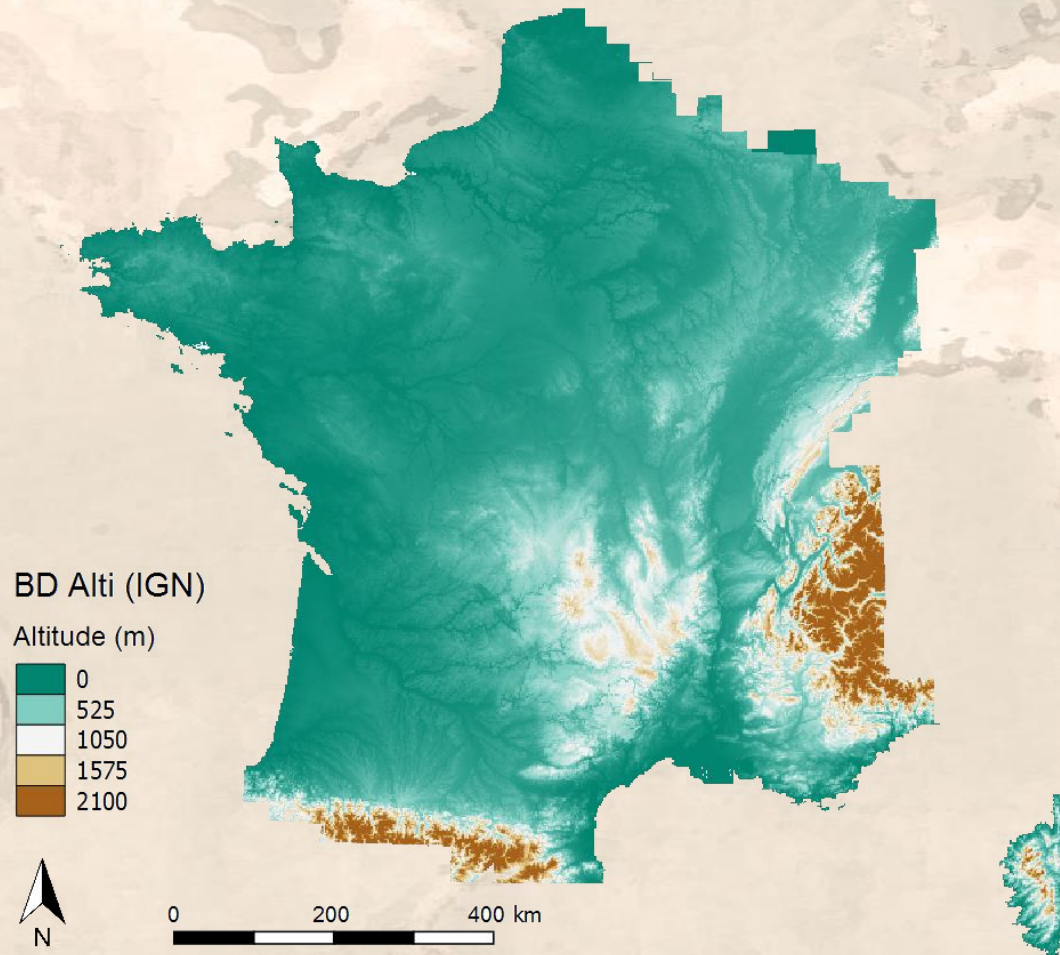




# Représentation de la topographie

# Représentation de la topographie

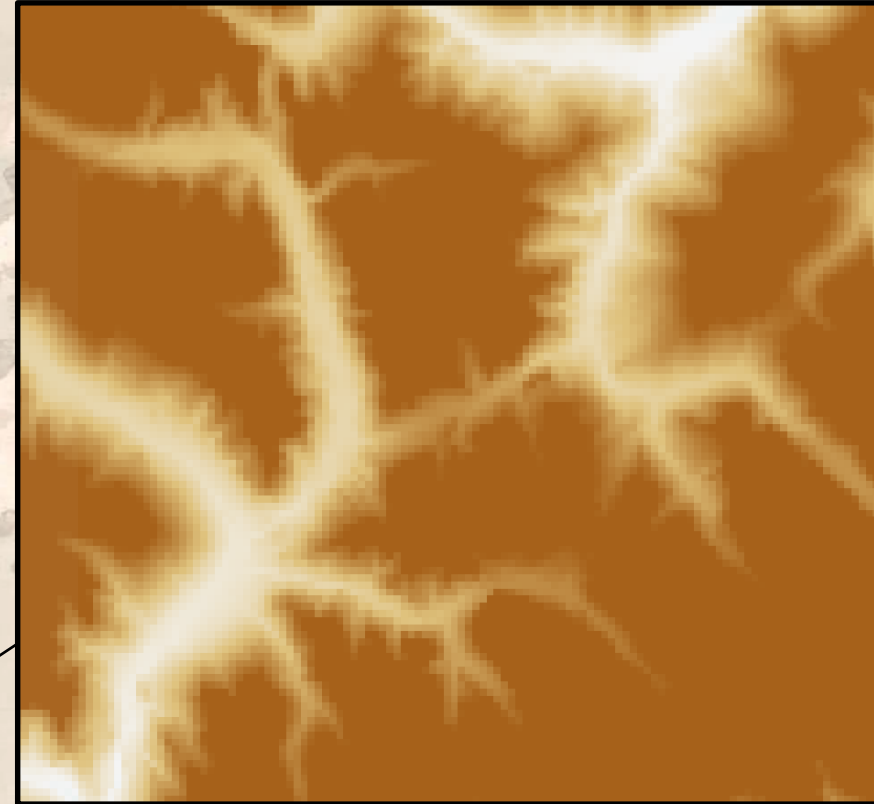
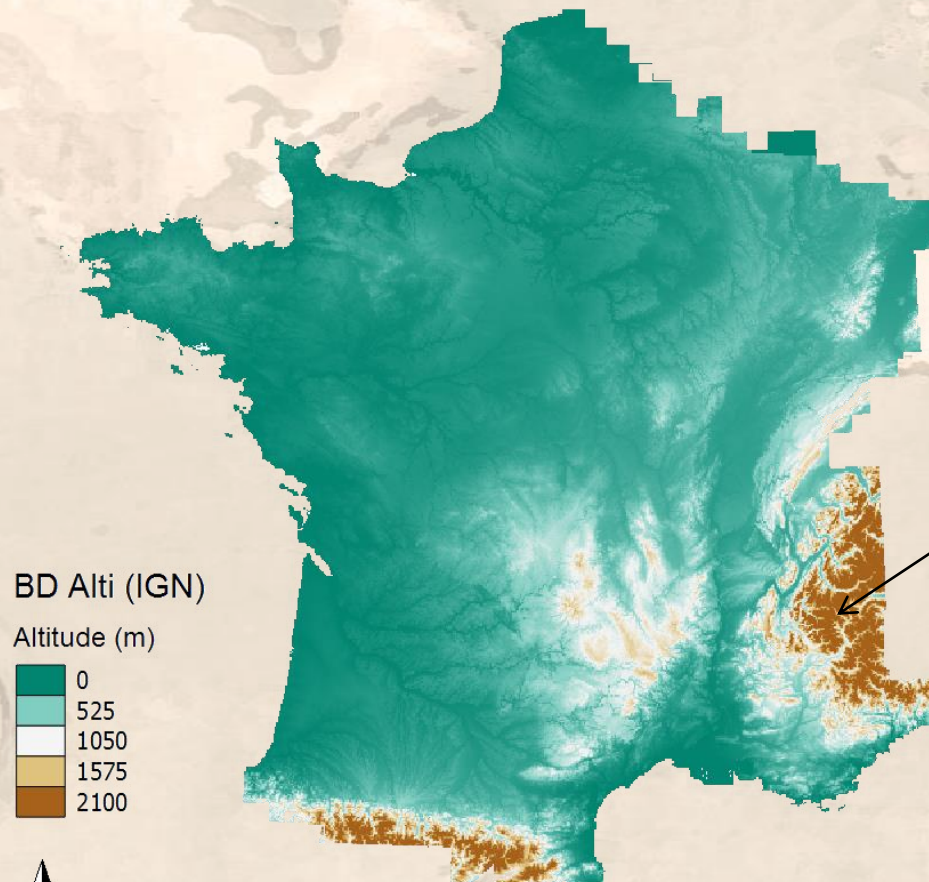
- Importance de l'échelle





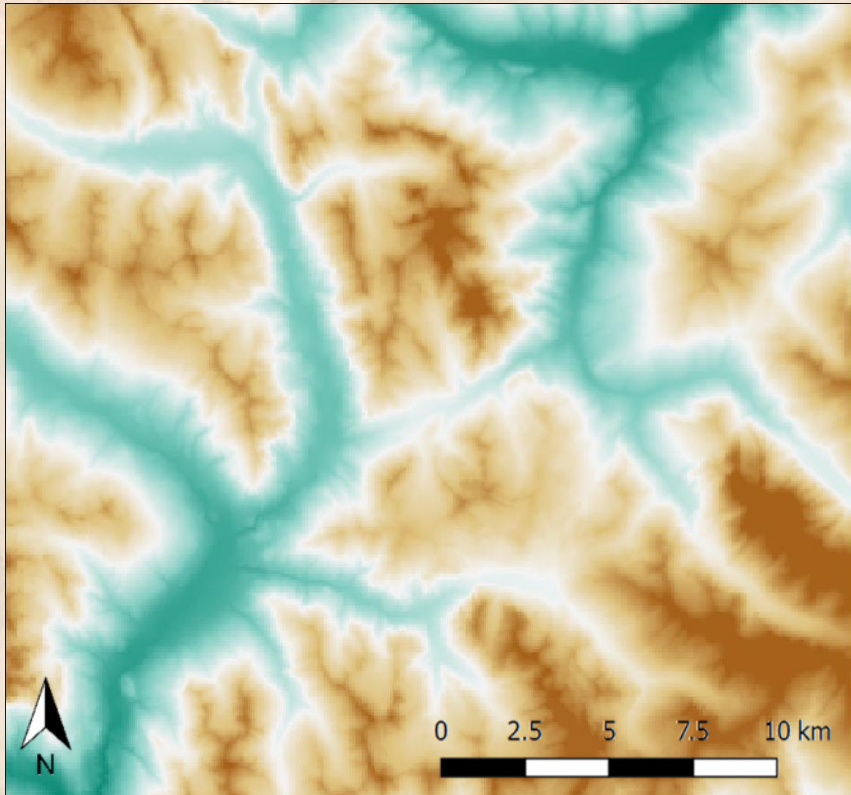
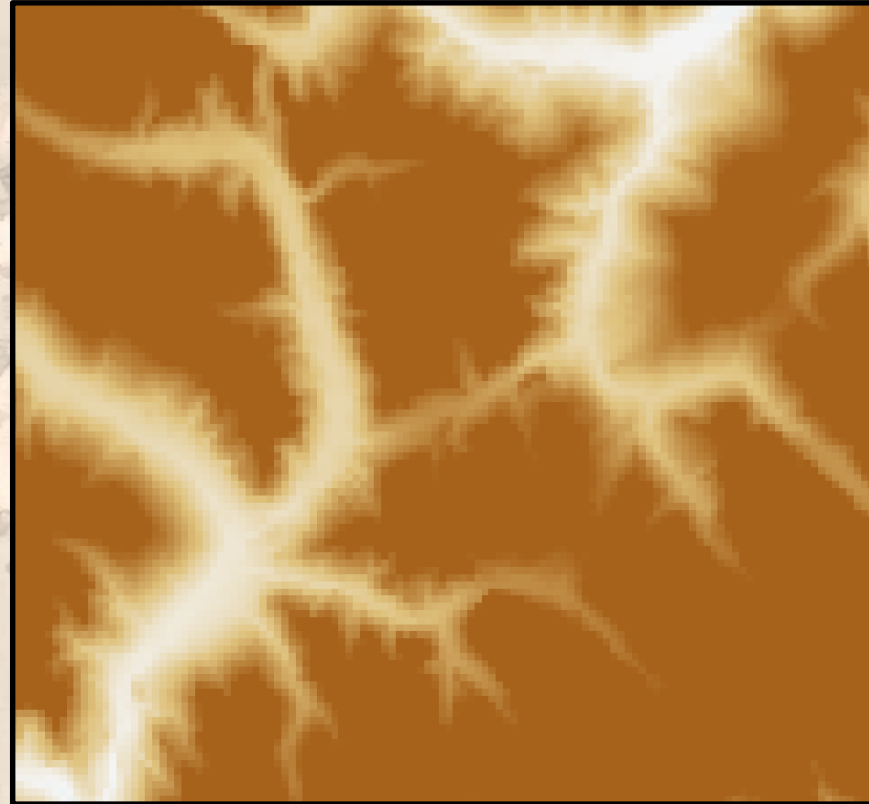
# Représentation de la topographie

- Importance de l'échelle



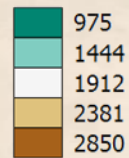
# Représentation de la topographie

En optimisant  
l'échelle...



BD Alti (IGN)

Altitude (m)





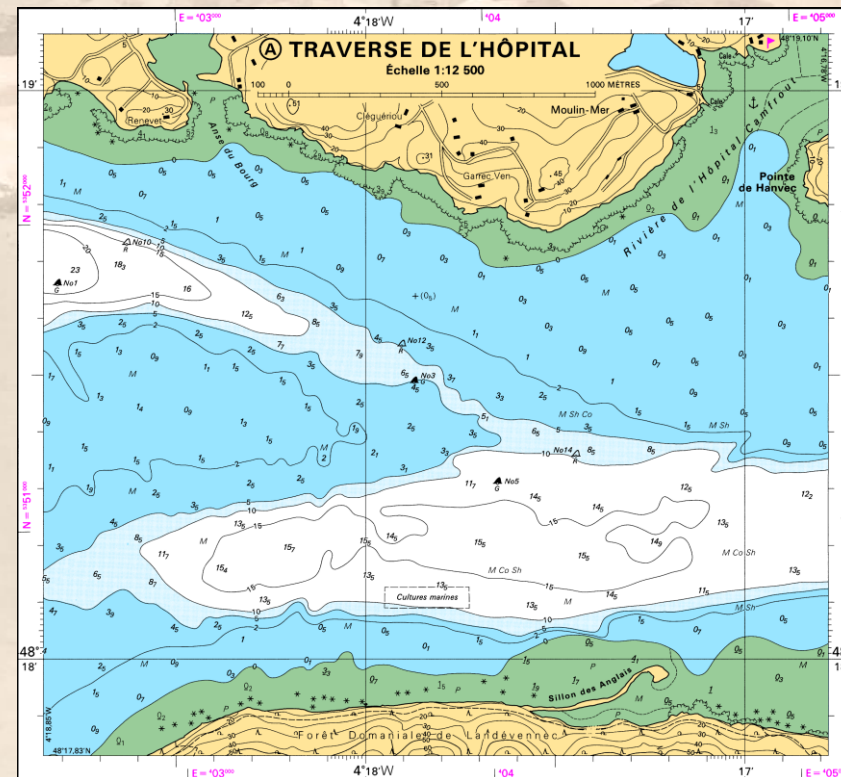
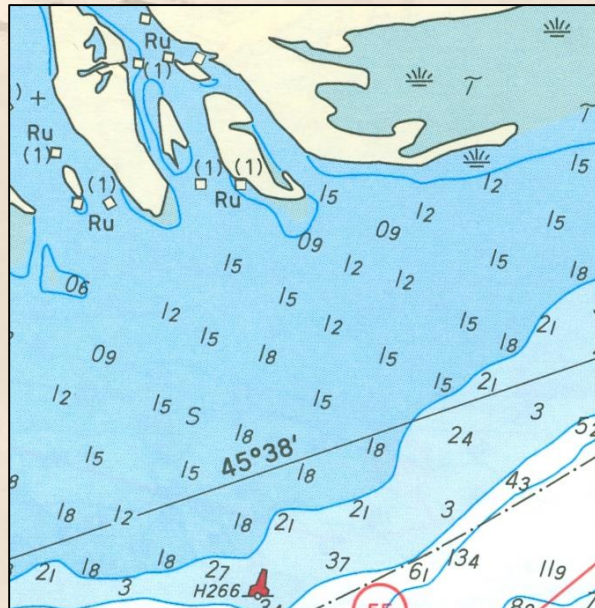
# Représentation de la topographie

- **Importance de l'échelle**

- Emprise spatiale de la zone (selon XY)
  - influence sur la résolution spatiale en XY (niveau de détails)
  - influence sur la précision
  - influence sur la technique de levé, le mode de représentation, le support, etc.
- Emprise verticale / dénivellation
  - influence sur l'échelle de couleurs

# Représentation de la topographie

- **Modes de représentation**
    - Plusieurs modes de représentation possibles selon l'échelle, le type de donnée, l'information à mettre en valeurs...
- Points cotés, points de sonde





# Représentation de la topographie

- **Modes de représentation**

- Plusieurs modes de représentation possibles selon l'échelle, le type de donnée, l'information à mettre en valeurs...

- Hachures (représentation radiale des lignes de plus grande pente)



*Carte d'état major (1820-1866)*

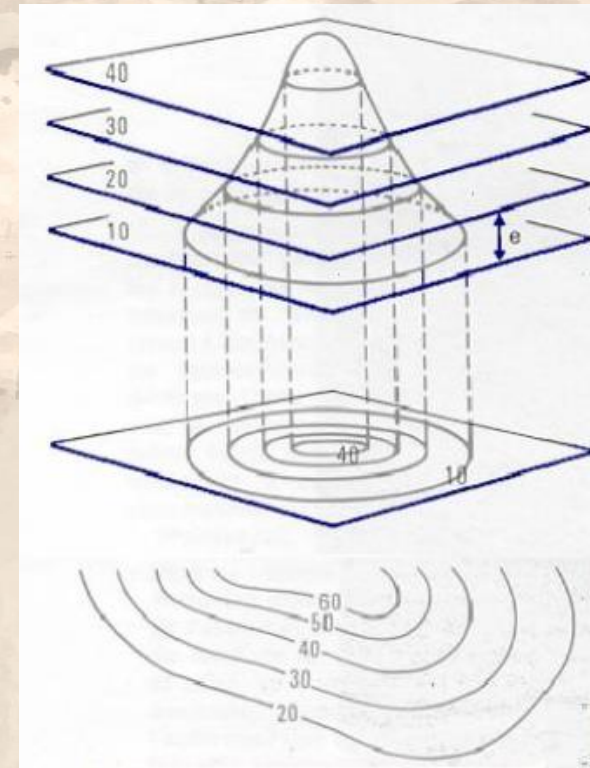
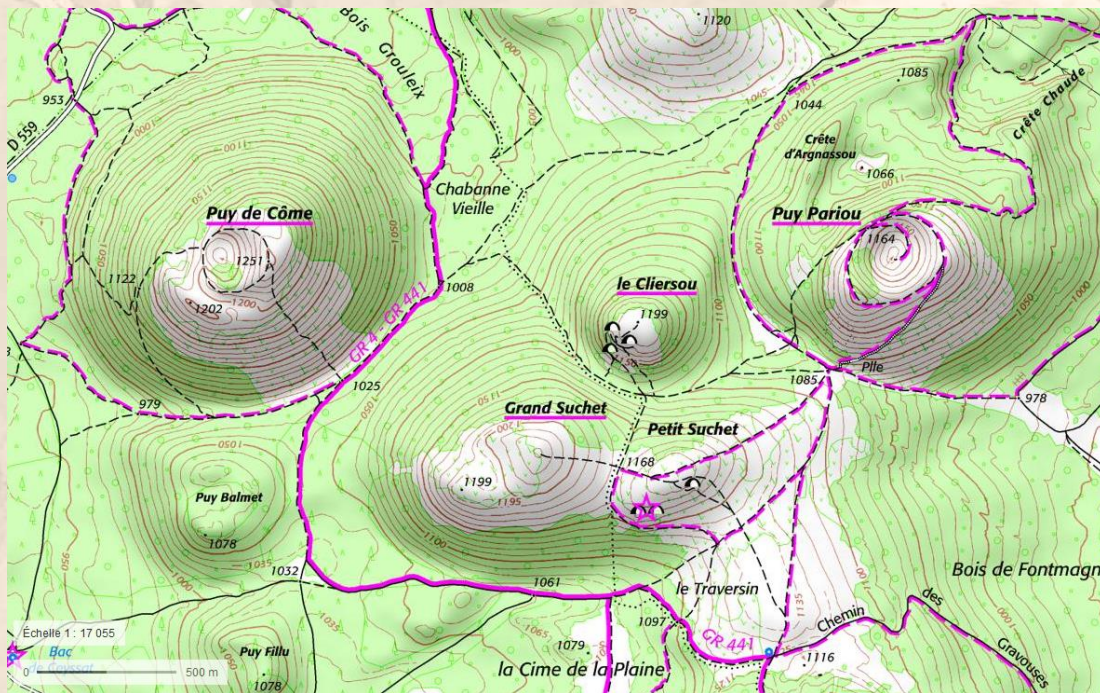


# Représentation de la topographie

- **Modes de représentation**

- Plusieurs modes de représentation possibles selon l'échelle, le type de donnée, l'information à mettre en valeurs...

→ Lignes de niveaux



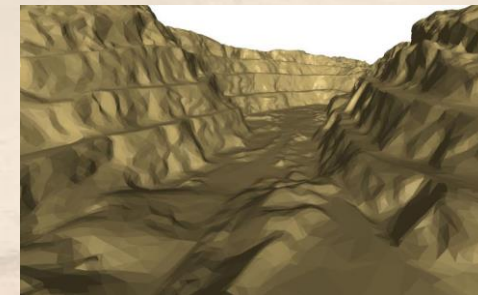
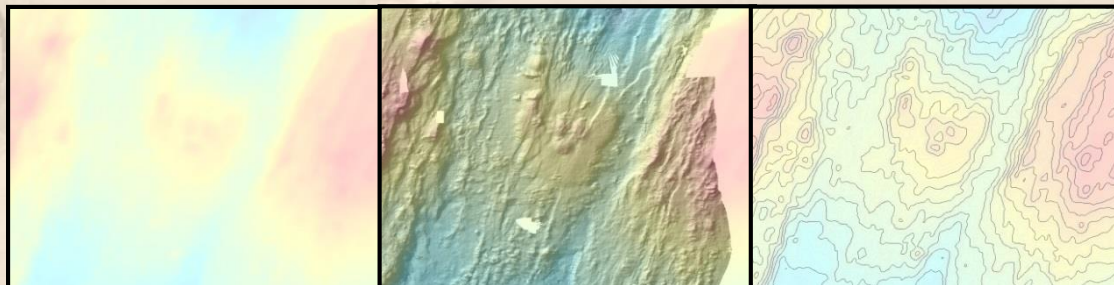
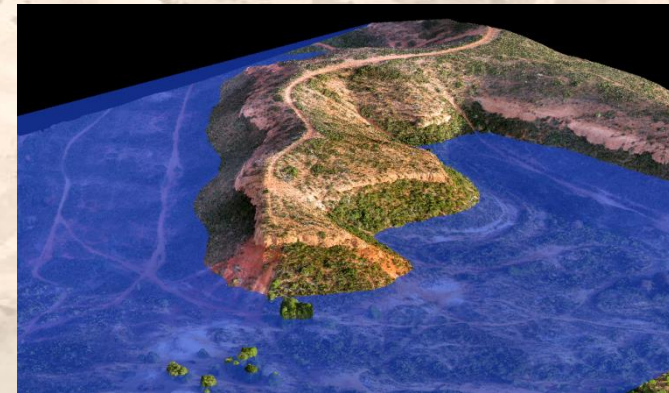
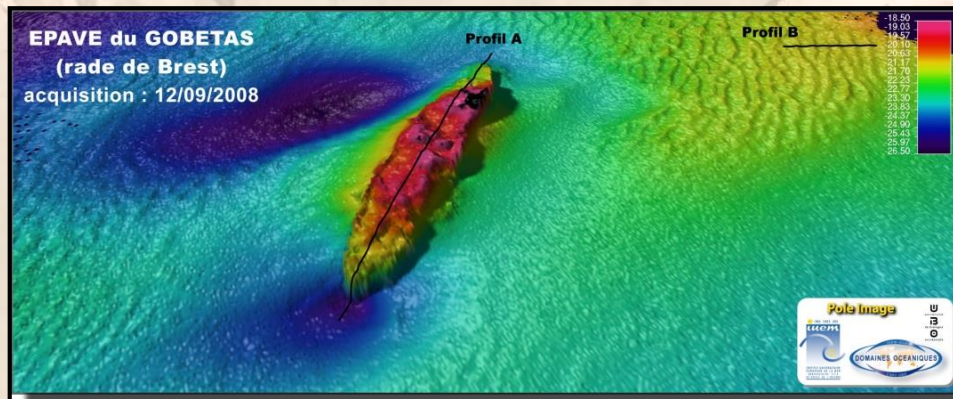


# Représentation de la topographie

- **Modes de représentation**

- Plusieurs modes de représentation possibles selon l'échelle, le type de donnée, l'information à mettre en valeurs...

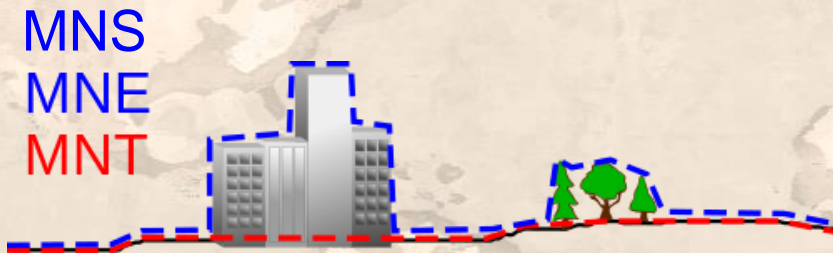
→ Plages de couleurs (avec/sans ombrage), surface 3D





# Représentation de la topographie

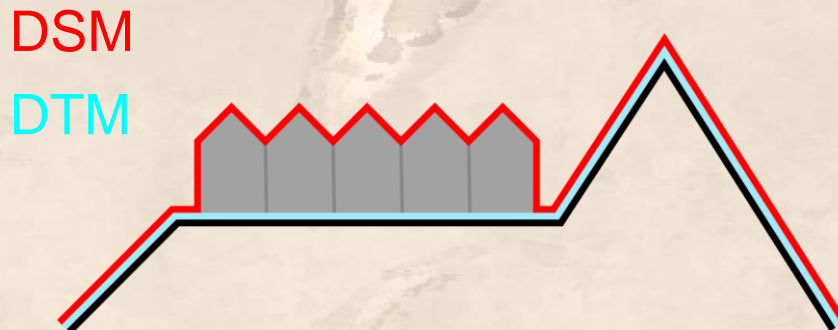
- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - Représentation mathématique 3D créée à partir de données d'altitude interpolées sur un maillage.



**MNT** : représentation du sol « nu »

**MNE / MNS** (Modèle Numérique d'Élévation / de Surface) : intégration du sursol

Et en anglais...



**DEM** : Digital Elevation Model

**DTM** : Digital Terrain Model

**DSM** : Digital Surface Model



# Représentation de la topographie

- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**

- Représentation numérique du relief

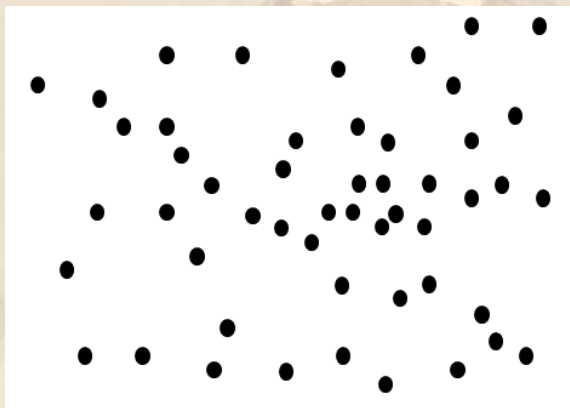
- Représentation généralement **surfactive** créée à partir de données d'altitude **interpolées\*** sur un **maillage**.

*\*Interpolation = construire une information **continue** à partir d'informations ponctuelles (échantillonnées à des positions connues)*

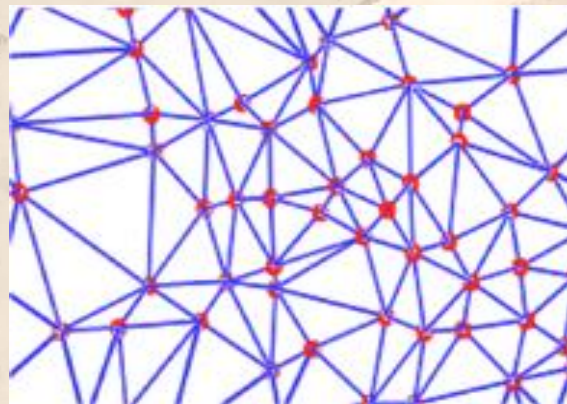
# Représentation de la topographie

- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - Différents types de maillage
    - Exemple : **Maillage irrégulier\*** à **maille triangulaire** (TIN : *Triangulated Irregular Network*)

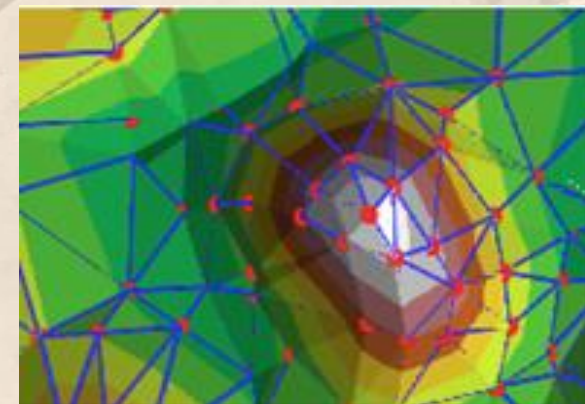
*Semi de points dont l'altitude est connue*



*Création d'un maillage*



*Interpolation des altitudes sur ce maillage*



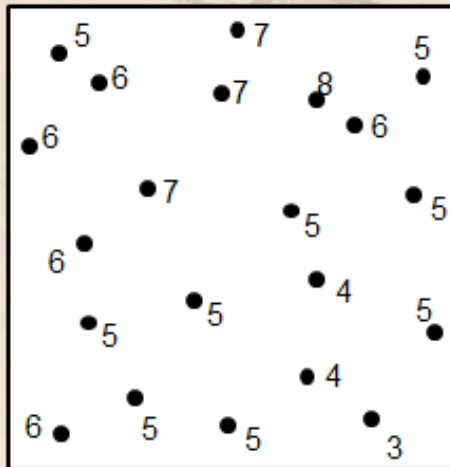
*\* = toutes les mailles n'ont pas la même surface*



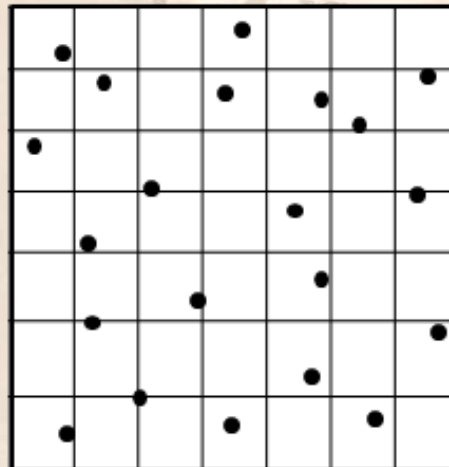
# Représentation de la topographie

- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - Différents types de **maillage**
    - Exemple : Maillage régulier à maille carrée → format « **raster\*** »

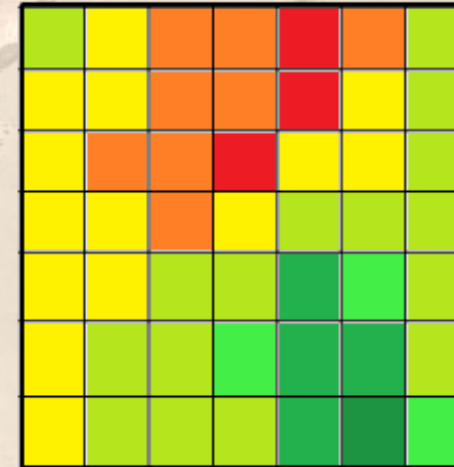
*Semi de points dont l'altitude est connue*



*Création d'un maillage*



*Interpolation des altitudes sur ce maillage*



*\* = matrice de valeurs numériques (1 valeur/pixel)*

# Représentation de la topographie

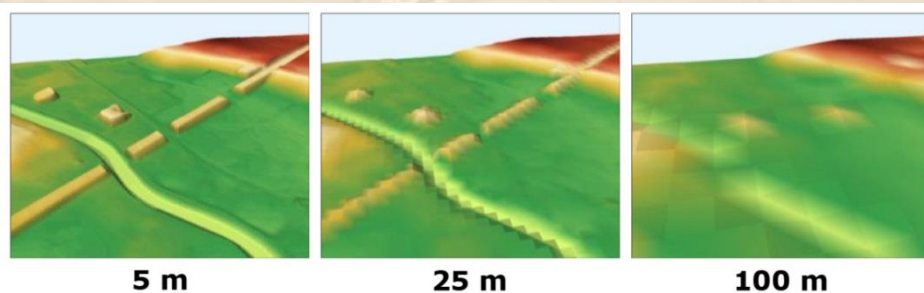
- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - Différentes méthodes d'interpolation
  - À choisir en fonction de l'échantillonnage et de la variabilité spatiale de l'information à représenter

	<b>Méthodes déterministes</b> Basées uniquement sur les propriétés géométriques (sans tenir compte du phénomène physique)	<b>Méthodes stochastiques</b> Basées sur une modélisation probabiliste du phénomène (géostatistique) + Prise en compte de la structuration spatiale des données
<b>Méthodes globales</b> Utilisation de tous les points d'échantillonnage disponibles pour générer des prévisions pour un point particulier	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interpolation polynomiale</li><li>- Polygones de Thiessen</li></ul>	
<b>Méthodes locales</b> Prédiction en un point sur la base des valeurs des points du voisinage	<ul style="list-style-type: none"><li>- Méthode du Plus Proche Voisin ou Voisin Naturel</li><li>- Méthodes barycentriques (interpolation bilinéaire; Inverse des distances (IDW))</li><li>- Surfaces de tendance, Spline</li><li>- triangulation de Delaunay; polygone de Thiessen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Méthodes de Krigeage</li></ul>



# Représentation de la topographie

- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - Caractérisation d'un MNT :
    - **Couverture spatiale**
    - **Résolution spatiale**
      - = finesse avec laquelle le terrain est décrit (pas d'échantillonnage)
    - **Résolution verticale/altimétrique**
      - = finesse avec laquelle les valeurs d'altitude sont données (en m, cm...)
    - **Précision**
      - = justesse de la représentation par rapport au terrain réel
    - **Date de mesure / période de revisite**



→ Les caractéristiques requises vont guider le choix de la méthode de mesure !



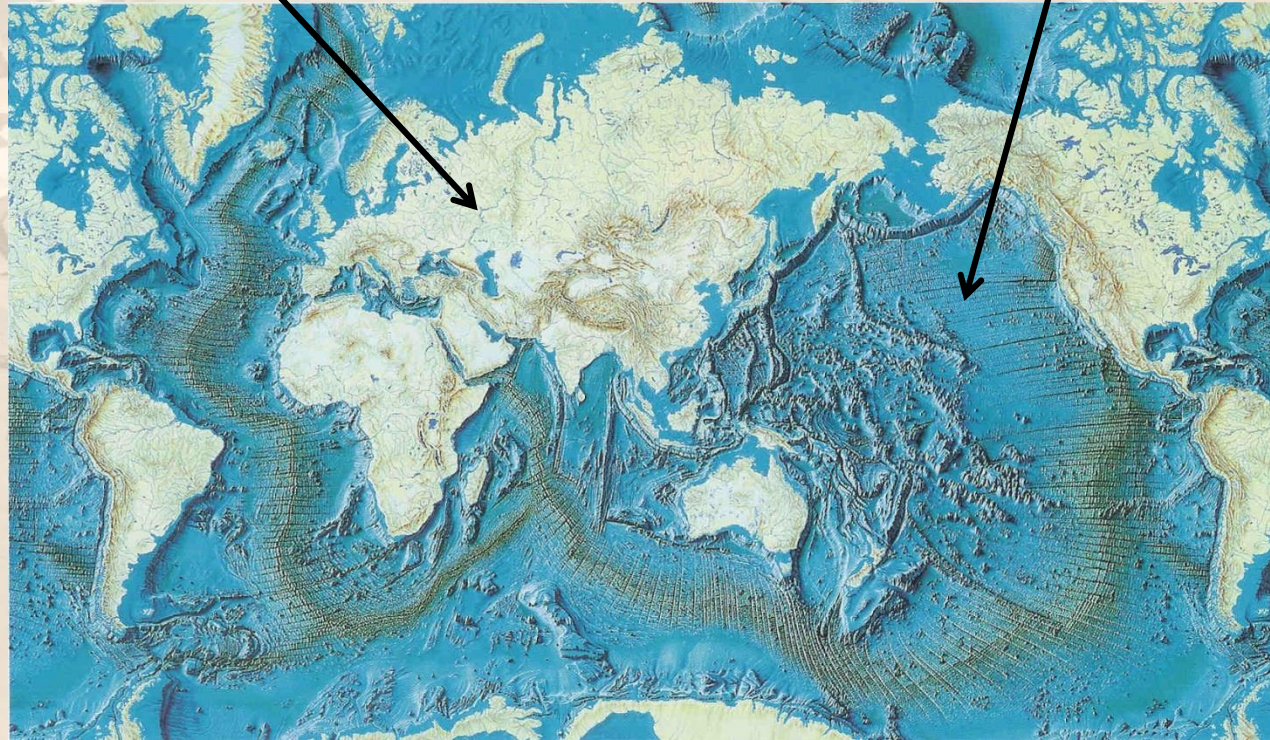
# Mesures de topographie



# Mesures de topographie

« **Hypsométrie** » pour  
les terres émergées

« **Bathymétrie** » pour  
les terres immergées



Par abus de langage, on oppose plutôt « topographie » pour les terres émergées et « bathymétrie » pour les terres immergées.



# Mesures de topographie terrestre

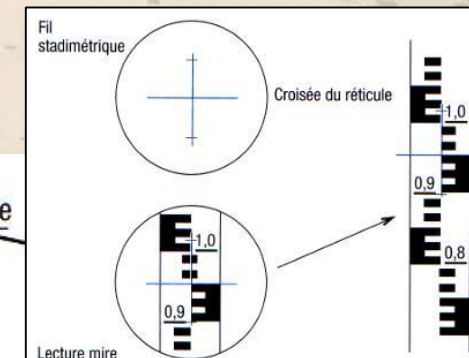
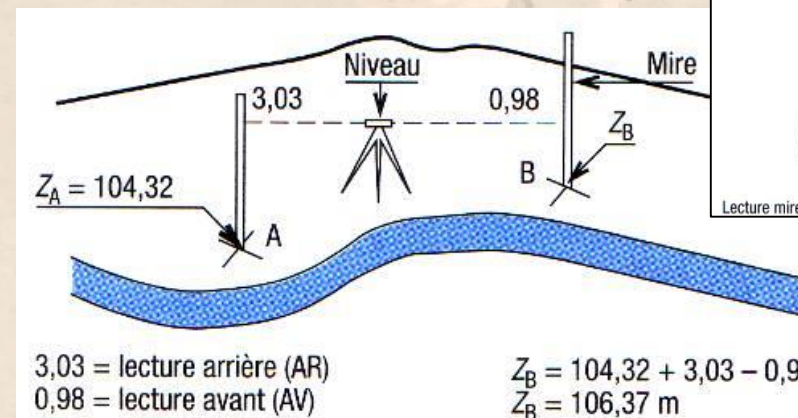
## Mesures optiques

- Tachéomètre, théodolite
  - 1 cercle horizontal, pour mesurer les angles horizontaux ;
  - 1 cercle vertical, pour mesurer les angles verticaux ;
  - 1 lunette pour viser les points cibles.

→ Un tachéomètre est un théodolite équipé d'un distance-mètre



- Lunette de nivellement / niveau

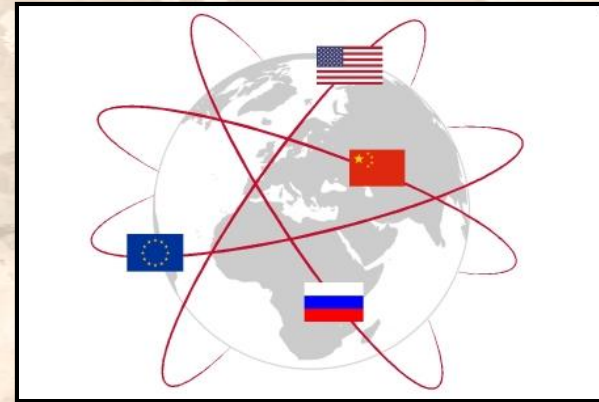




# Mesures de topographie terrestre

## Systèmes de navigation par satellite (GNSS)

- GPS
- GLONASS
- GALILEO
- COMPASS/Beidou
- IRNSS...



## Système GPS

- Segment spatial : 24 satellites (au moins 4 visibles n'importe où / quand) sur 6 orbites
- Segment de contrôle : stations au sol
- Segment utilisateur : mesure de pseudo-distance satellite / récepteur

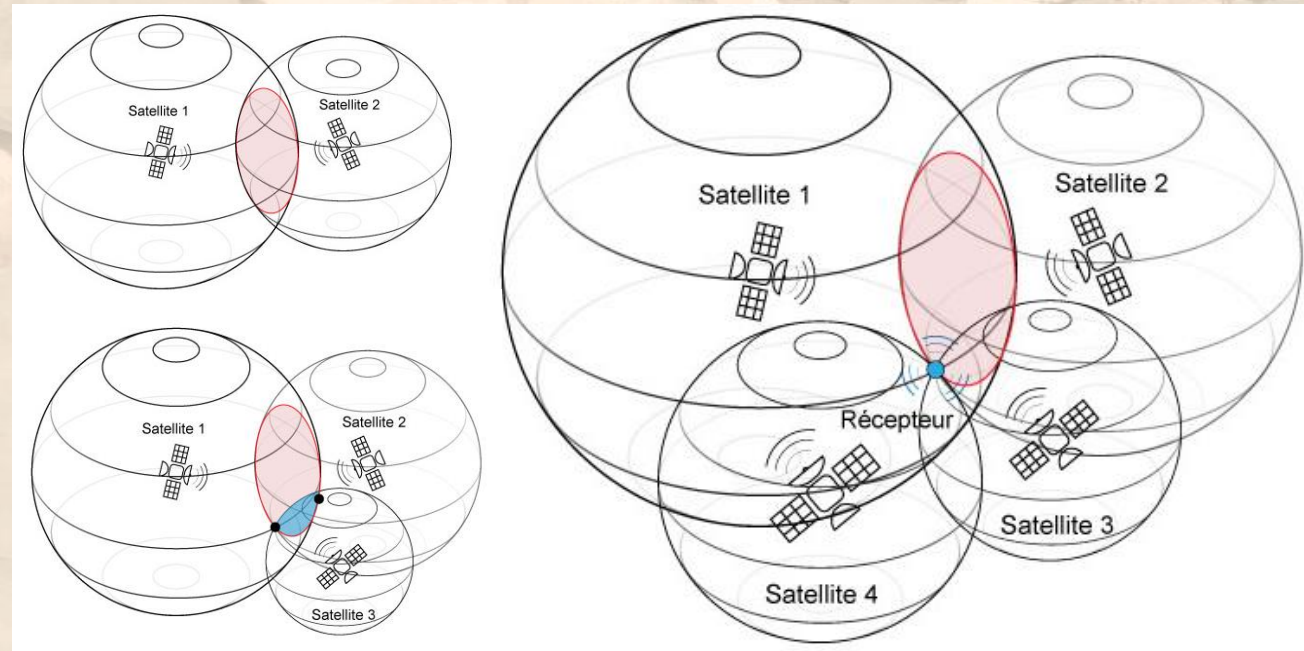
# Mesures de topographie terrestre

## Principe des systèmes de navigation par satellite (GNSS)

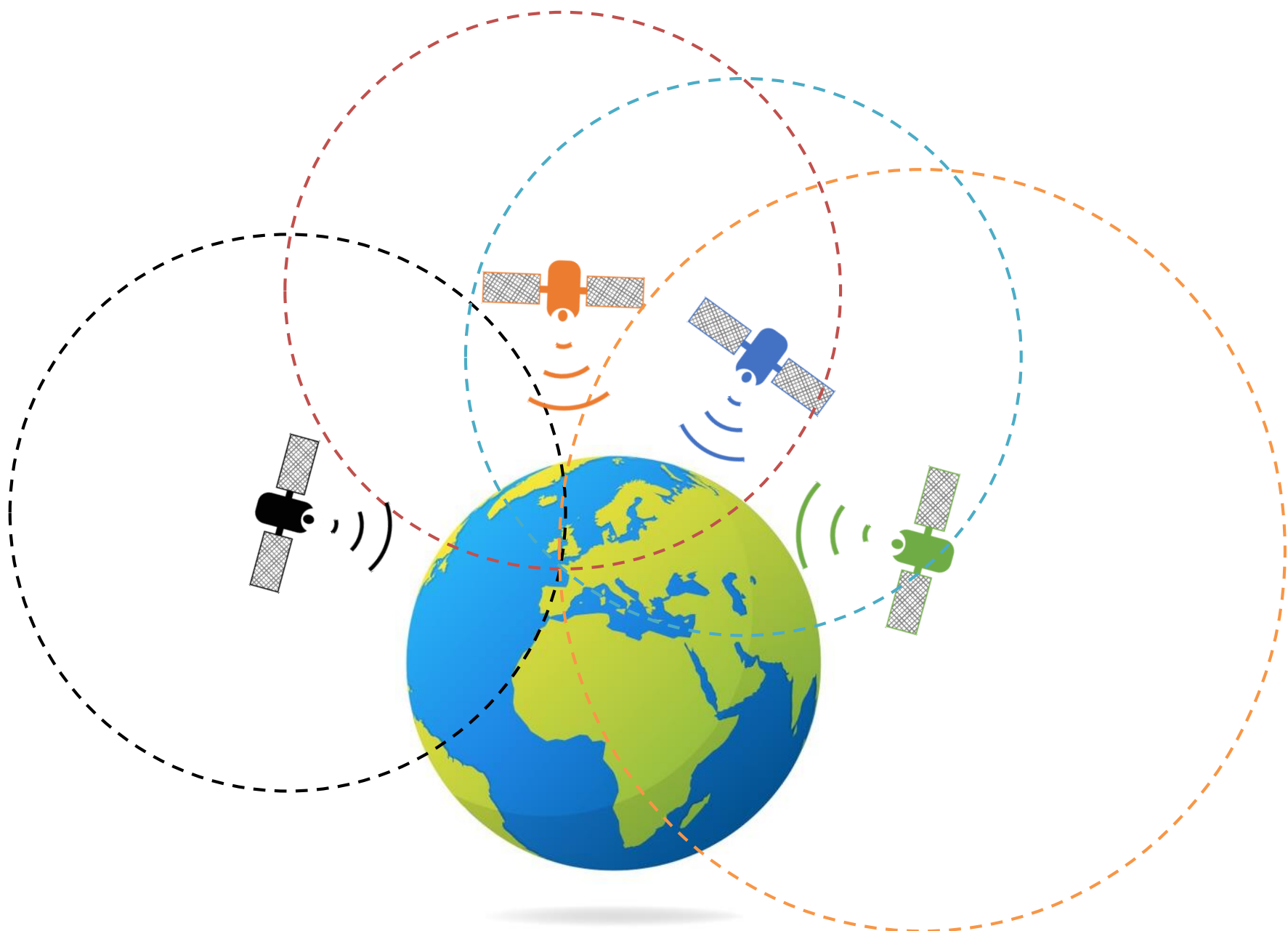
- Le récepteur compare son code propre daté avec le code (C/A ou P modulés sur la porteuse) généré par le satellite
- Décalage = temps de parcours du signal (attention aux ambiguïtés)
- Triangulation → 4 satellites minimum (x, y, z et temps)

### Signaux GPS émis :

- Porteuse L1 ( $\lambda_{L1} = 19 \text{ cm}$ )
- Porteuse L2 ( $\lambda_{L2} = 24.4 \text{ cm}$ )
- Code C/A ( $\lambda = 300 \text{ m}$ ) (civil)
- Code P ( $\lambda = 30 \text{ m}$ ) (militaire)
- Almanachs et éphémérides



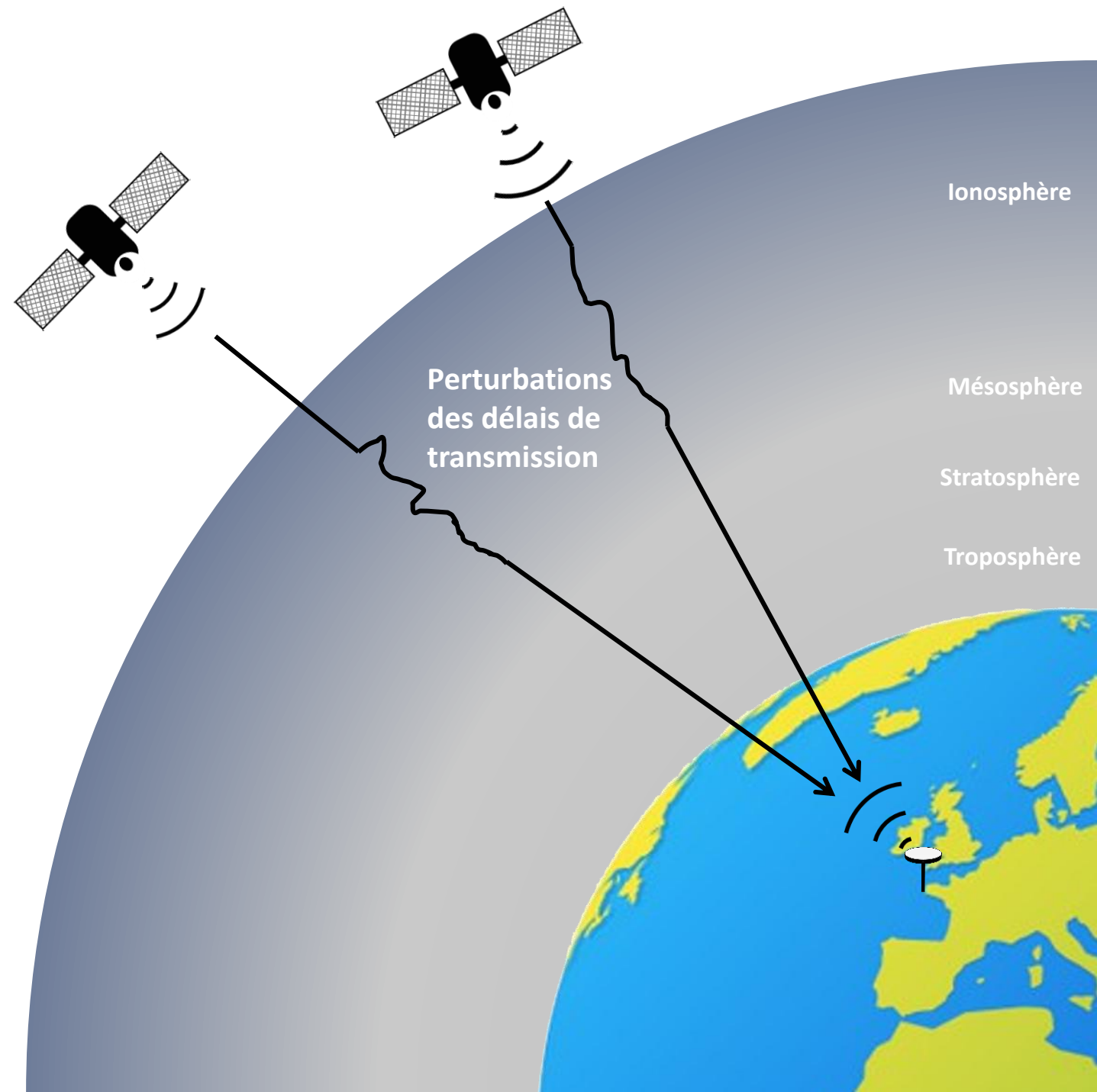




## Sources d'erreur des systèmes GNSS

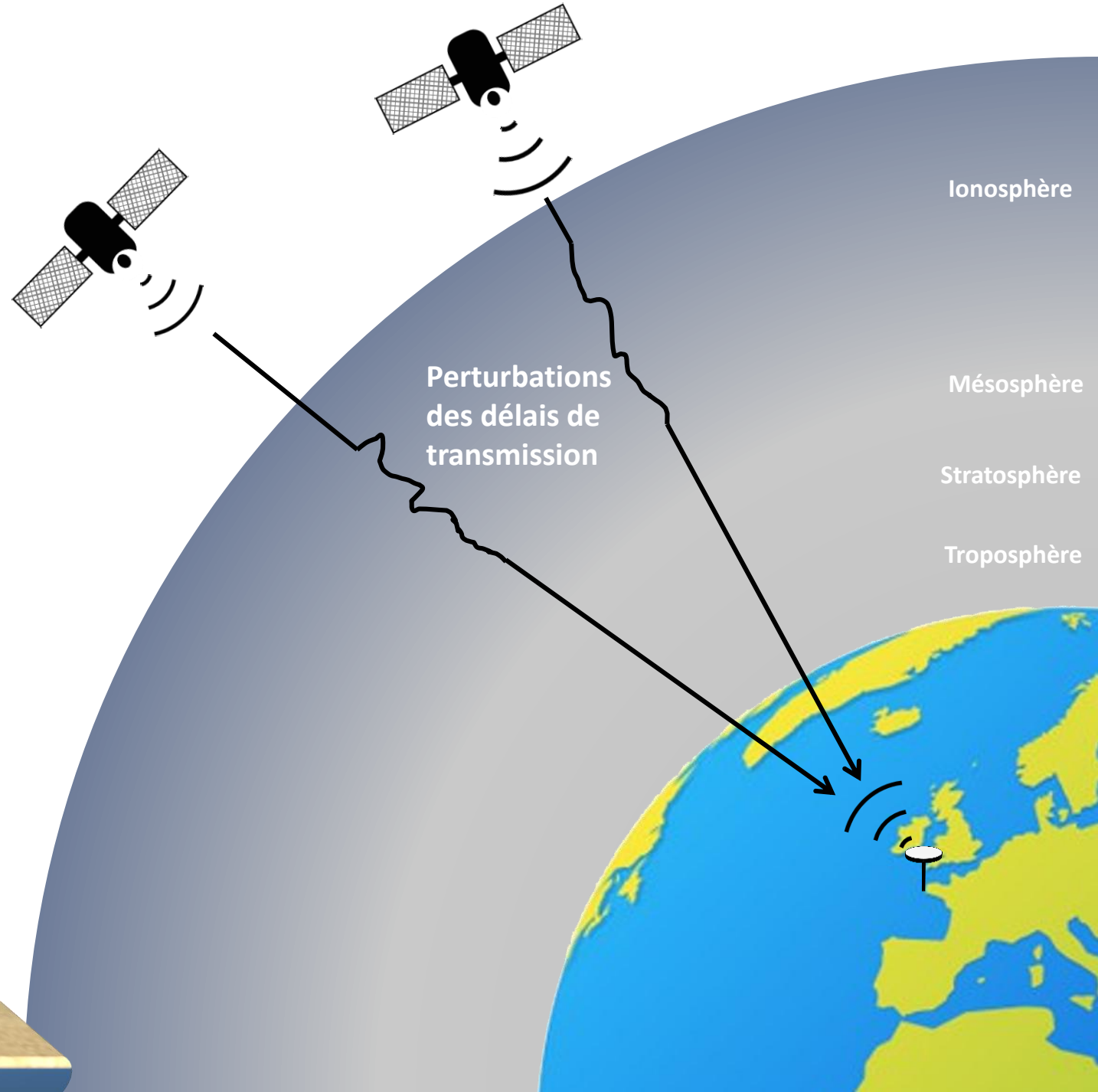
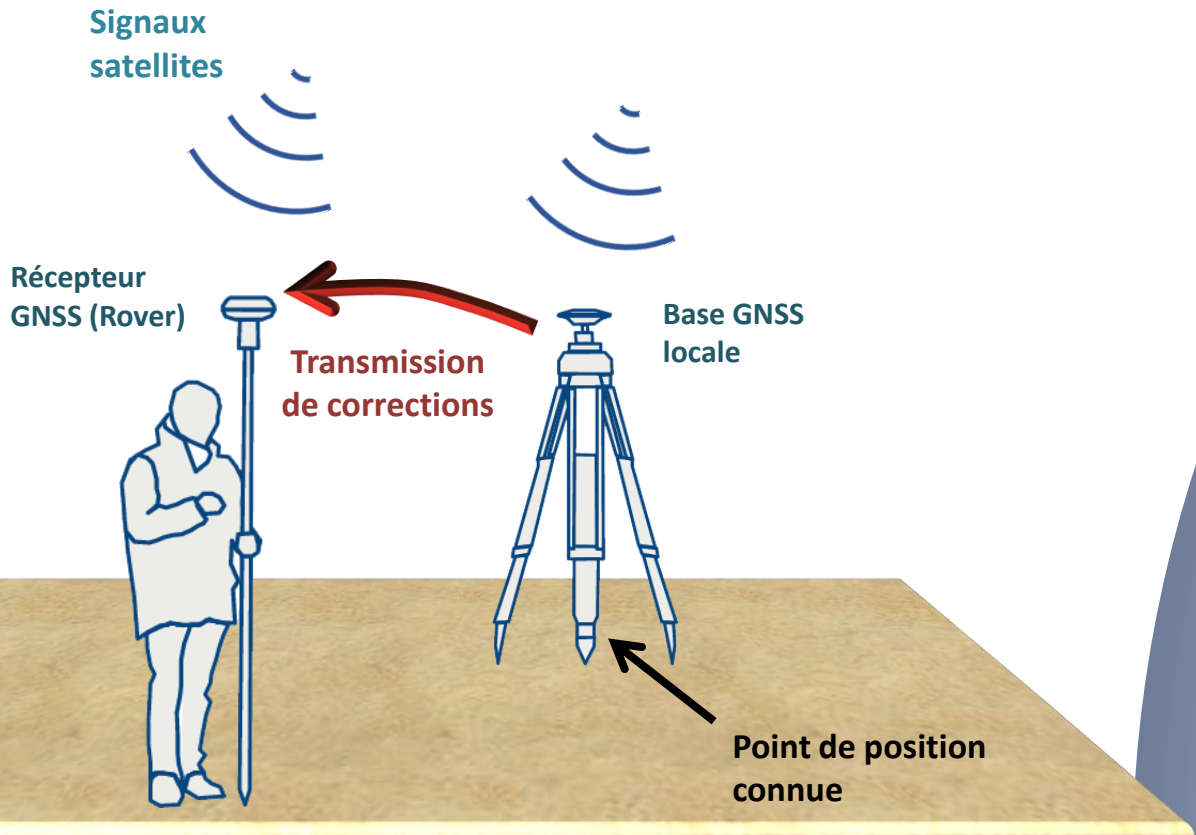
- Horloge satellite et éphémérides (dérives)
- Troposphère (humidité); masque
- Ionosphère (taches solaires et air ionisé)
- Multi-trajets (réflexion du signal)

Ionospheric effects	$\pm 5$ meters
Shifts in the satellite orbits	$\pm 2.5$ meter
Clock errors of the satellites' clocks	$\pm 2$ meter
Multipath effect	$\pm 1$ meter
Tropospheric effects	$\pm 0.5$ meter
Calculation- und rounding errors	$\pm 1$ meter





# GNSS RTK (Real Time Kinetmatic)



# Mesures de topographie terrestre

## GNSS RTK (Real Time Kinematic)

Développements de systèmes bas coût et de réseaux collaboratifs





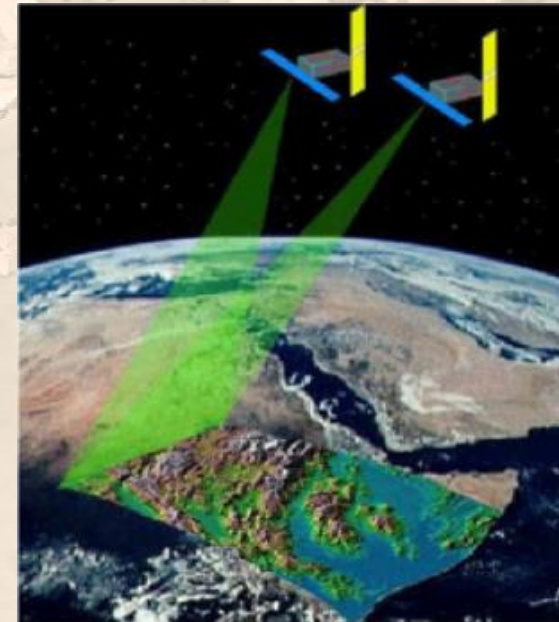
# Mesures de topographie terrestre

## Mesures Radar (satellites)

- **Radio Detection And Ranging**
- Technique de télédétection active
- $\lambda(\text{ondes radio}) \sim 1\text{m} \gg \lambda(\text{ondes lumineuses visibles/IR})$   
=> plus grande portée (embarquable sur satellite)

### Méthode par stéréoscopie Radar (ou radargrammétrie)

→ Similaire à la photogrammétrie

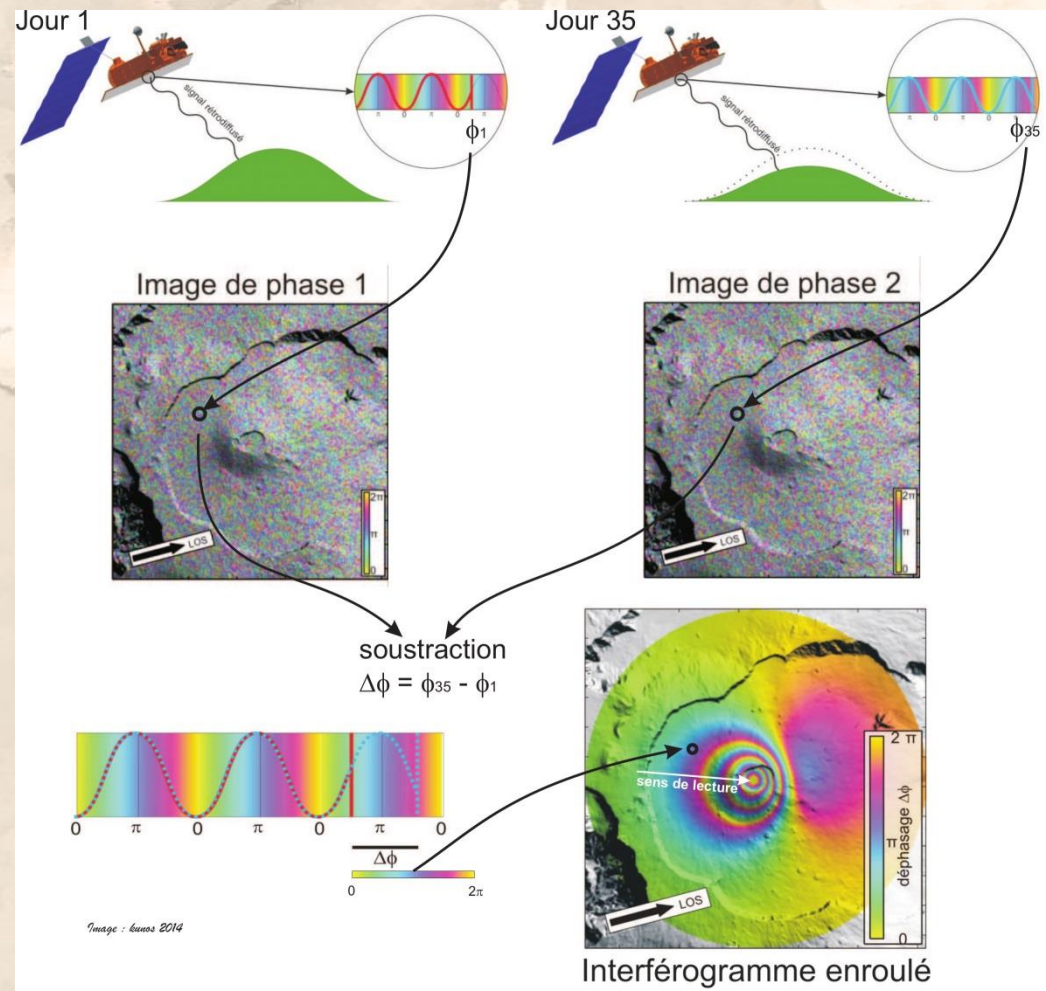


# Mesures de topographie terrestre

## Méthode par interférométrie Radar

→ exploite un décalage de phase entre 2 signaux.

Si les objets ou déformations à mesurer sont d'une taille inférieure à la longueur d'onde utilisée, le décalage de phase est directement lié à la hauteur de l'objet.

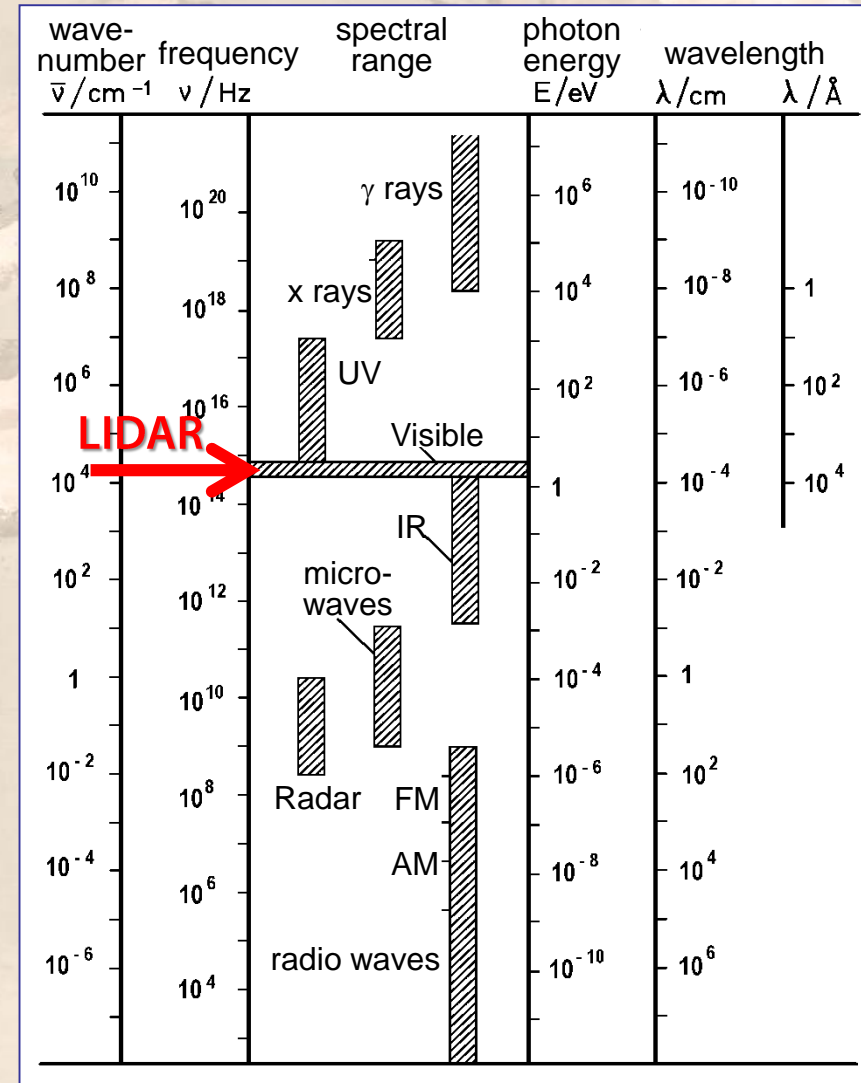




# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR

- Light Detection And Ranging
- Laser
  - très directif (peu divergent)
  - + spatialement et temporellement cohérent (lumière très directionnelle)
  - rayonnement d'une grande pureté (résolution spectrale)



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR

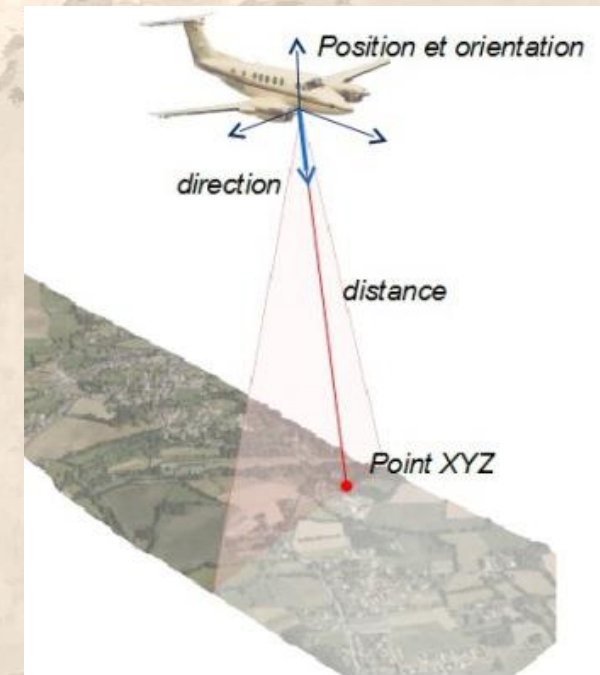
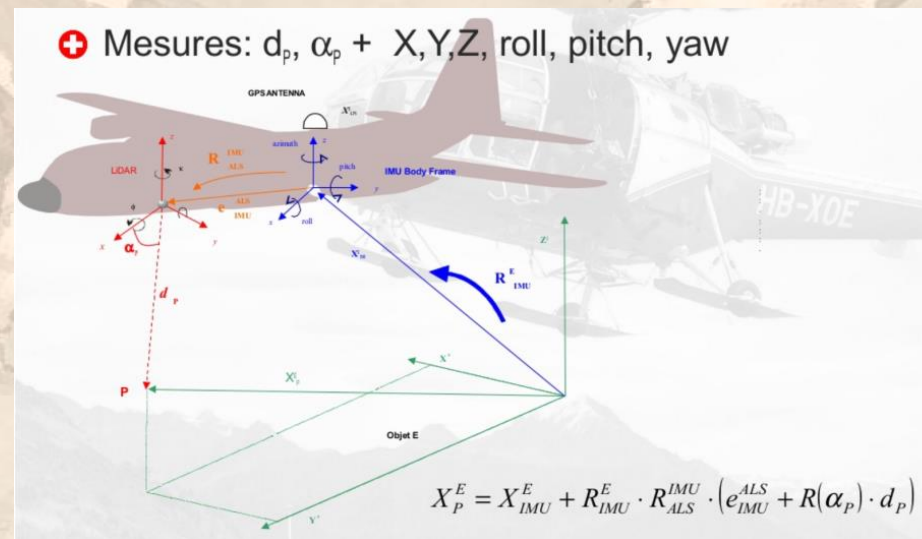
- Technique de télédétection active
- 2 méthodes de mesures par laser
  - « laser pulsé » ou « temps de vol » : basé sur la mesure du temps d'aller-retour
  - « différence / décalage de phase » : basée sur la modulation de fréquence



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR aéroporté

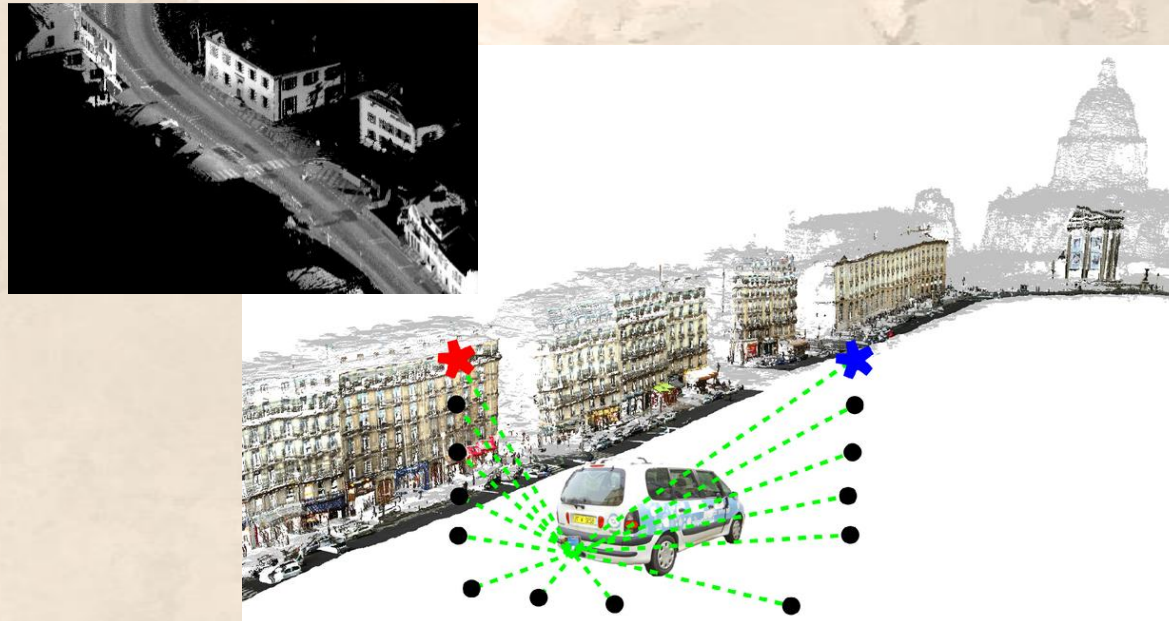
- Technique de télédétection mise au point par l'armée américaine dans les années 70.
- Depuis un avion
  - => émission d'impulsions laser à haute fréquences
  - => le faisceau laser balaie le sol transversalement
  - => le système enregistre le temps d'aller-retour
  - => système associé à un capteur de position et une centrale d'attitude → **géoréférencement direct**



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR terrestre mobile

- Embarqué sur une voiture, un train, un bateau
  - => Comme pour le LiDar aérien, le balayage est associé au déplacement de la plateforme
  - => système associé à un capteur de position et une centrale d'attitude
  - **géoréférencement direct**

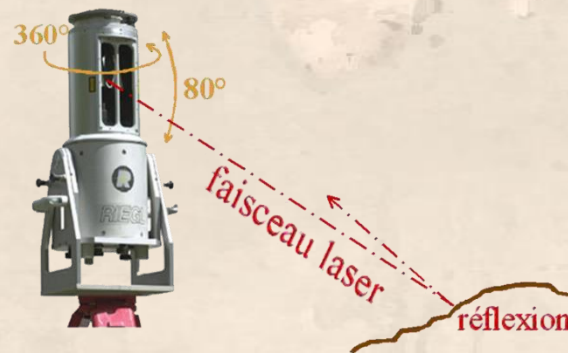




# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR terrestre fixe (TLS : Terrestrial Laser Scan)

- Depuis un trépied
  - => le faisceau laser balaie verticalement et horizontalement
  - => utilisation de cibles réfléchissantes mesurées par DGPS → **géoréférencement indirect**
  - => pour scanner toute la zone, plusieurs mises en station peuvent être nécessaires.

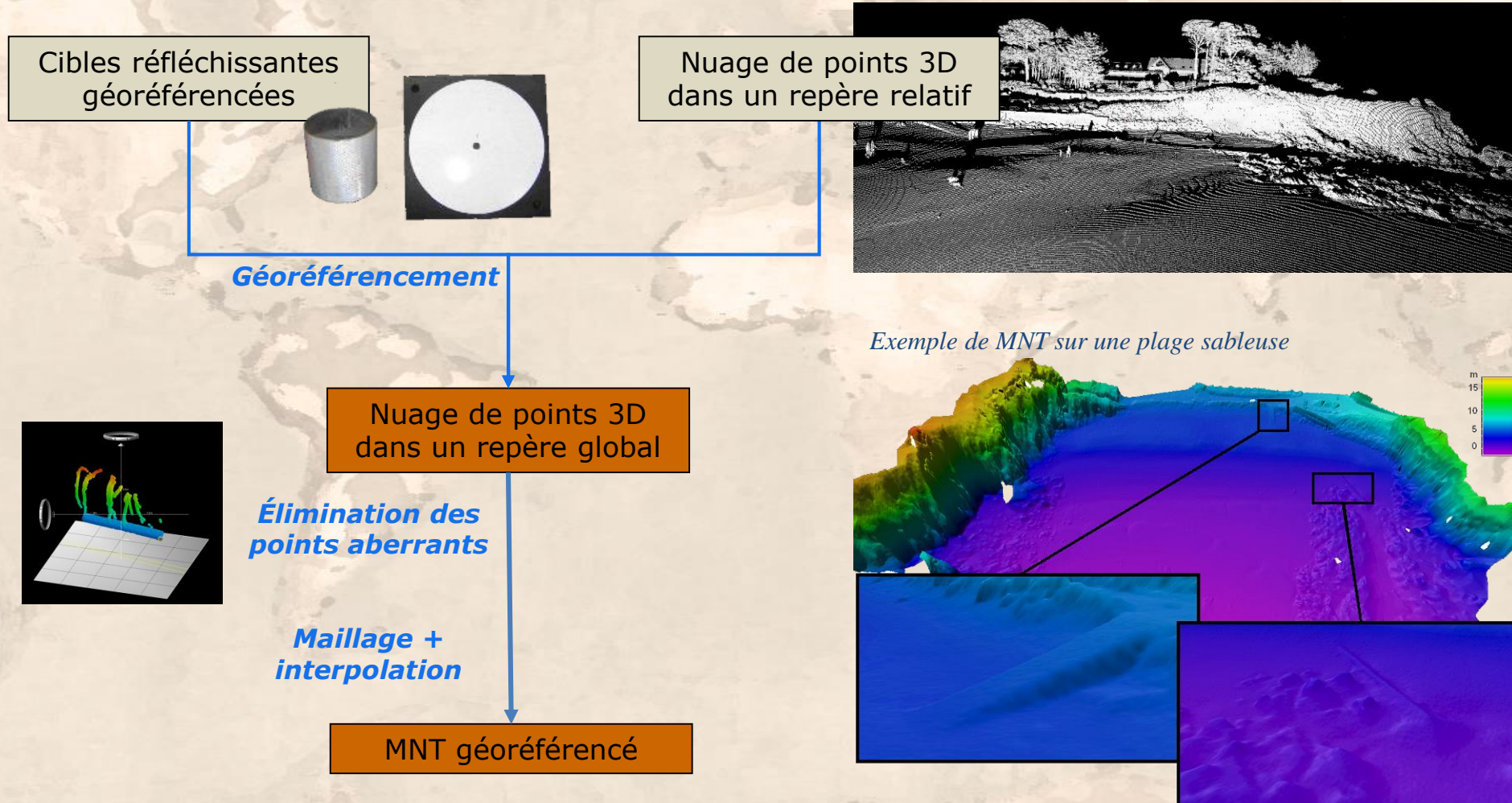


Principe de la minimisation des zones d'ombre par le choix judicieux des positions de mise en station [d'après Buckley, 2008].



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR terrestre (TLS : Terrestrial Laser Scan)





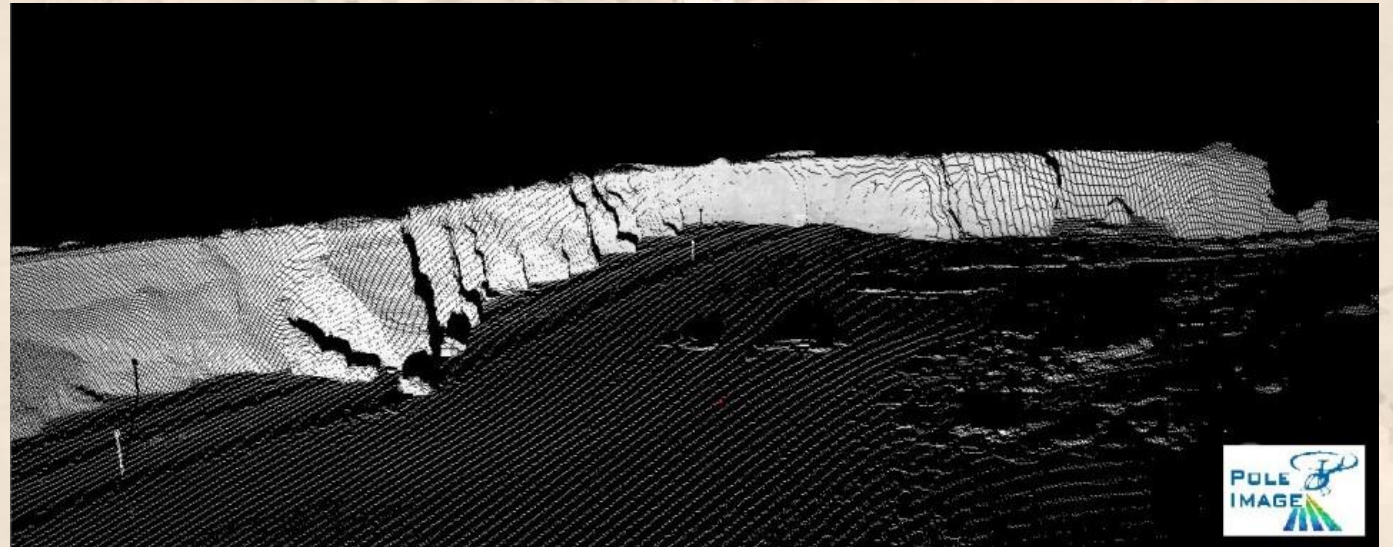
# Mesures de topographie terrestre

## Mesures LiDAR terrestre (TLS : Terrestrial Laser Scan)

- Point de vue terrestre plus adapté à l'observation d'objets verticaux  
=> falaises, dunes...



*Exemple de nuage de points sur des falaises de craie  
(Normandie)*

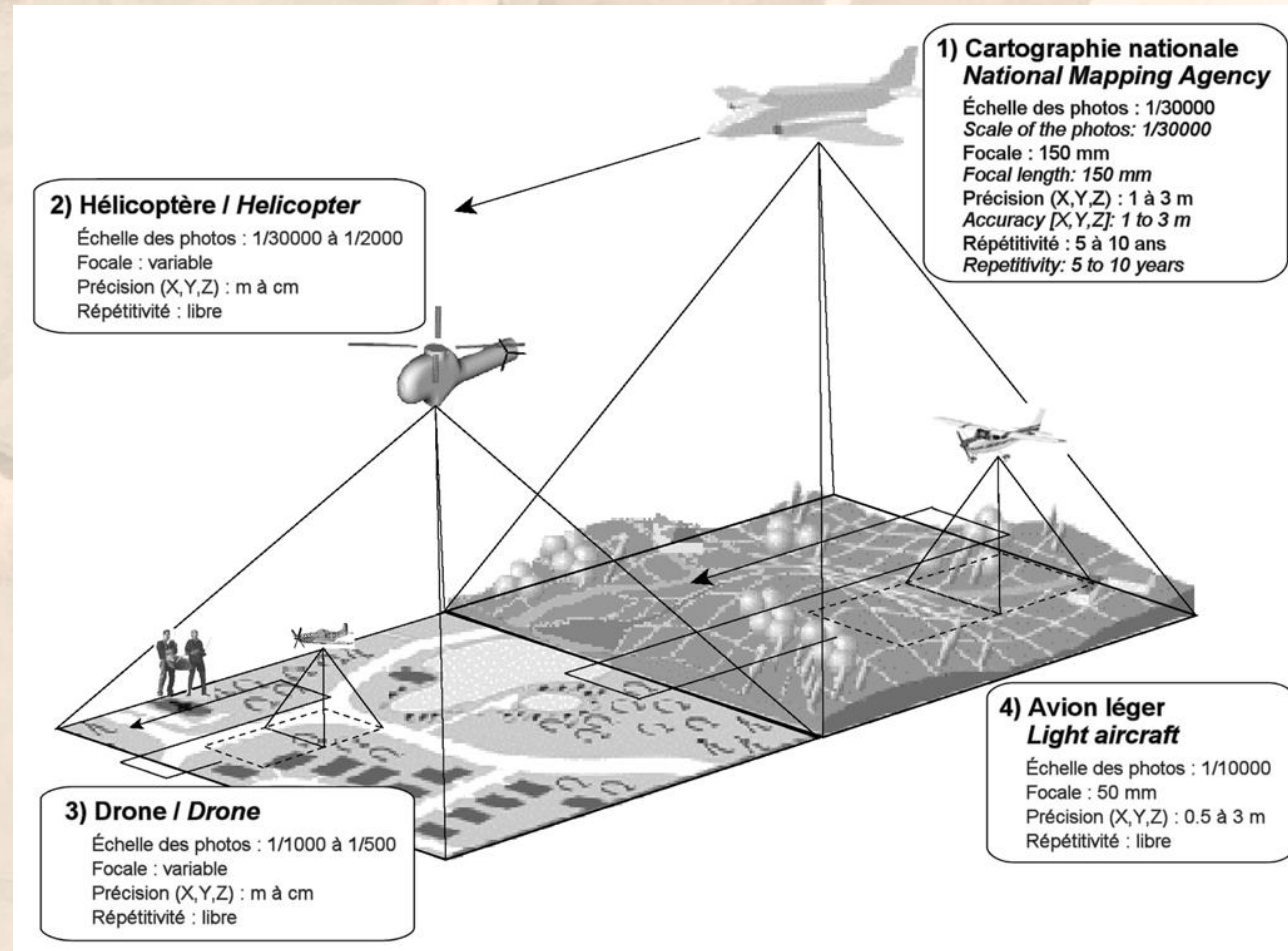


# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques - Plateformes



→ Choix de la plateforme  
en fonction des besoins  
en couverture et en  
résolution

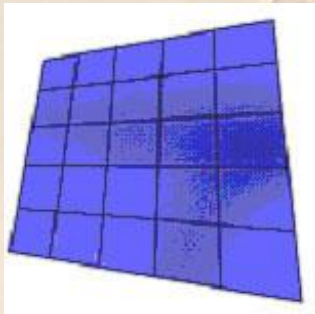
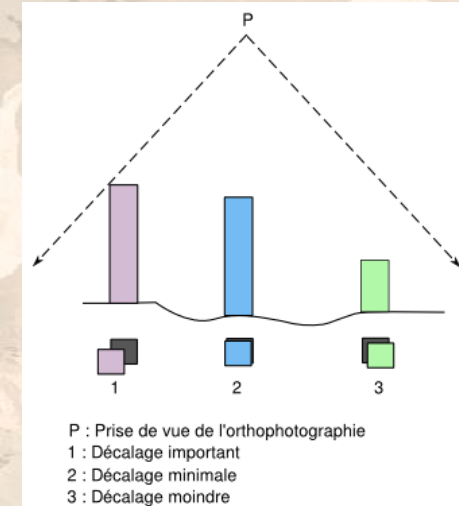




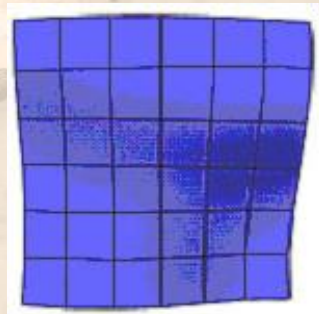
# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – Principe

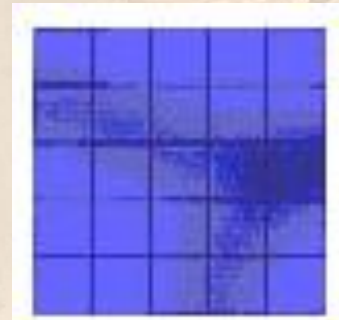
- Le relief crée un décalage sur l'image (fonction de la hauteur de l'objet et de sa position sur l'image)
  - corriger ce décalage pour créer des **orthophotographies** (= représentation planimétrique)
  - exploiter ce décalage pour calculer la topographie



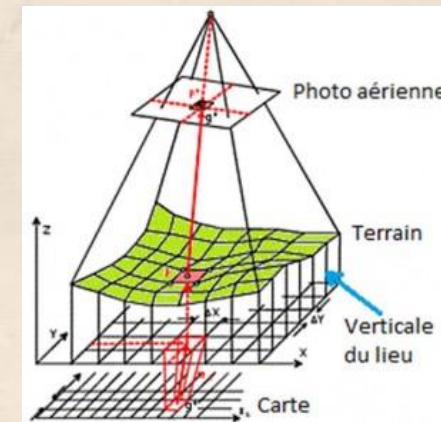
Prise de vue oblique  
(déformations dues à la perspective)



Prise de vue verticale  
(déformations dues au relief)



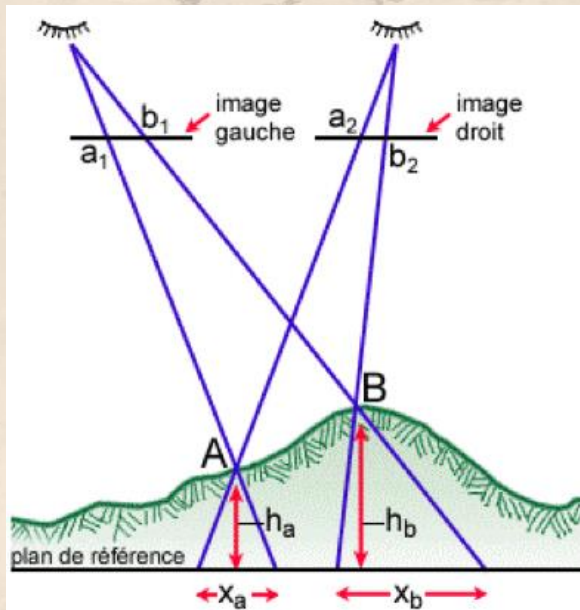
**Orthophotographie**



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – Principe

- Vision **stéréoscopique**
  - Perception du relief à partir de 2 images prises depuis 2 points de vue différents
    - Utilisation de 2 caméra sur une barre stéréoscopique
    - Exploitation du déplacement de la plateforme



→ Relation mathématique entre l'angle sous lequel est vu un même objet dans 2 images différentes et la profondeur de cet objet par rapport au point de prise de vue.

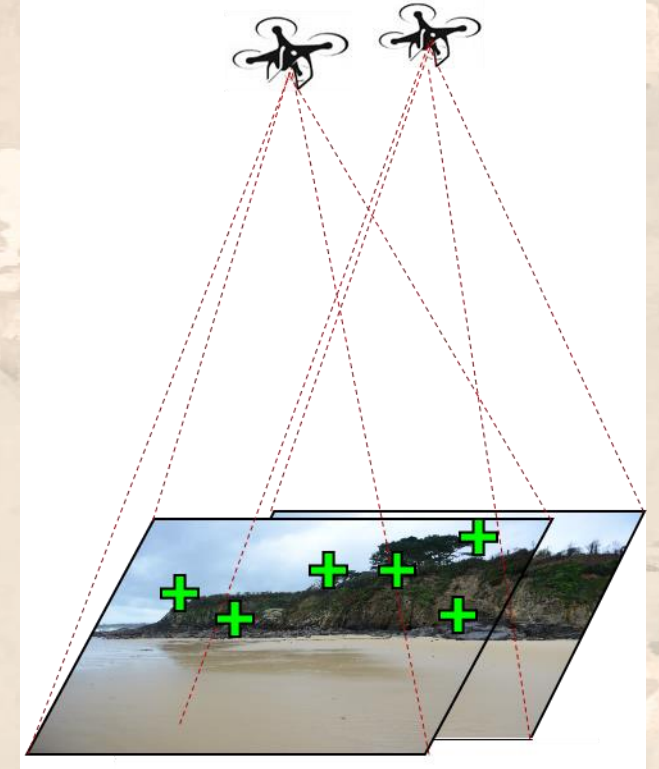
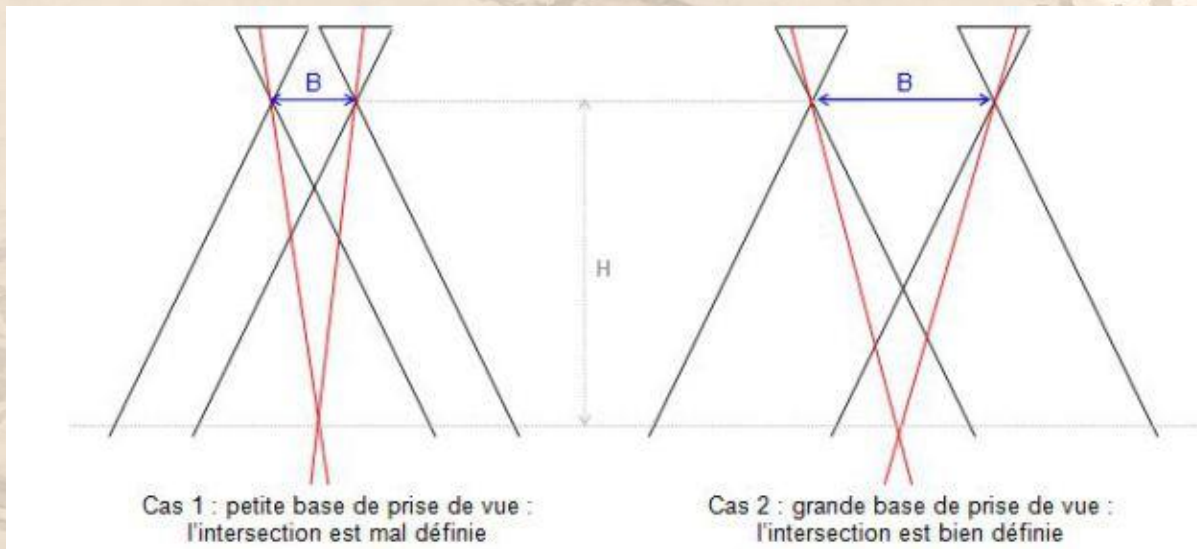
*Principe de la vision binoculaire, plan d'observation horizontal (source : cours ENSG)*



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – Acquisition

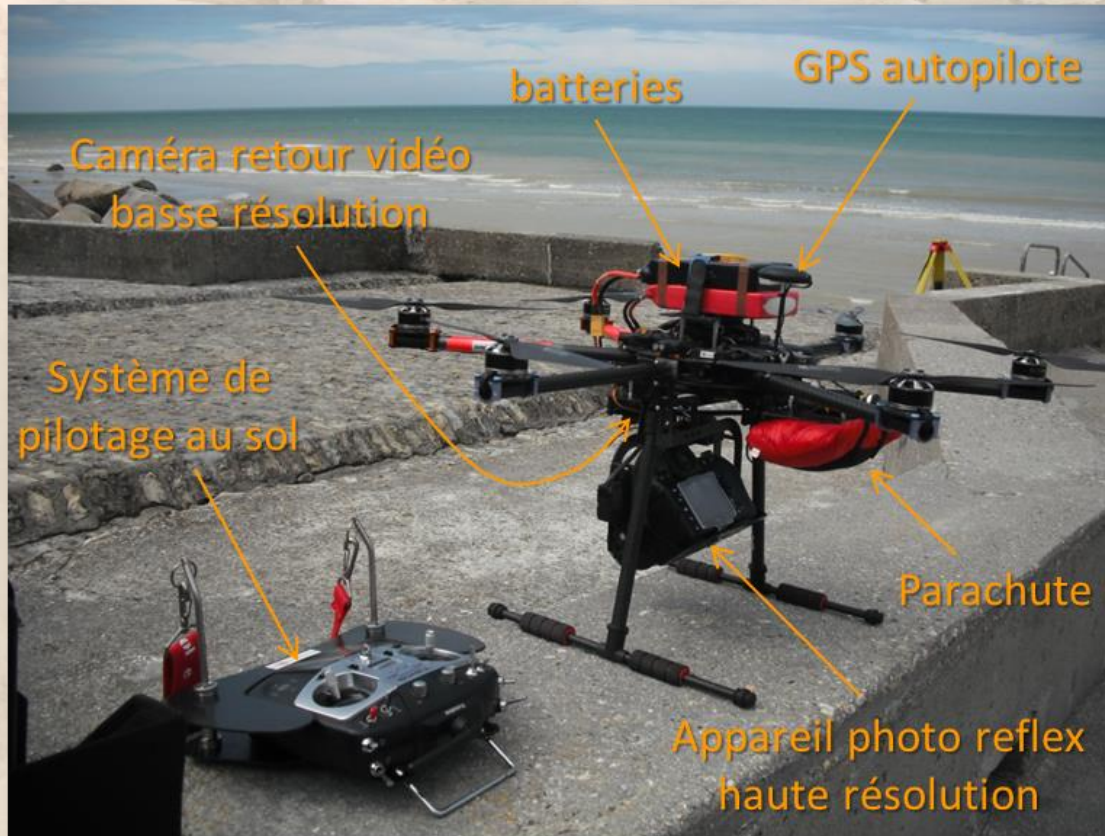
- Points de vue différents assurés par le déplacement de la plateforme
- Nécessité de recouvrement entre images
- Influence du rapport  $B/H$  sur la précision altimétrique



Le rapport  $B/H$  idéal dépend du format du capteur, du recouvrement longitudinal et de la focale.

# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – exemple : plateforme Drone



### DRELIO 10

Diam. 80 cm - Poids < 4 kg

Autonomie en vol : 20 min

Charge utile : 1.6 kg

Autopilote

Camera Reflex® 35 mm

(Nikon D700 ou D800)

→ 1 photo / 2 seconds



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – plateforme Drone

### - Planification et préparation du vol

#### → Définition des conditions de vol

Taille de la zone à couvrir  
Résolution requise

} → Altitude de vol

**Exemple** : vol à 100m d'altitude – Nikon D800 (35mm)

→ couverture au sol 102\*68m  
taille du pixel 1,4 cm

#### Direction de vol préférentielle

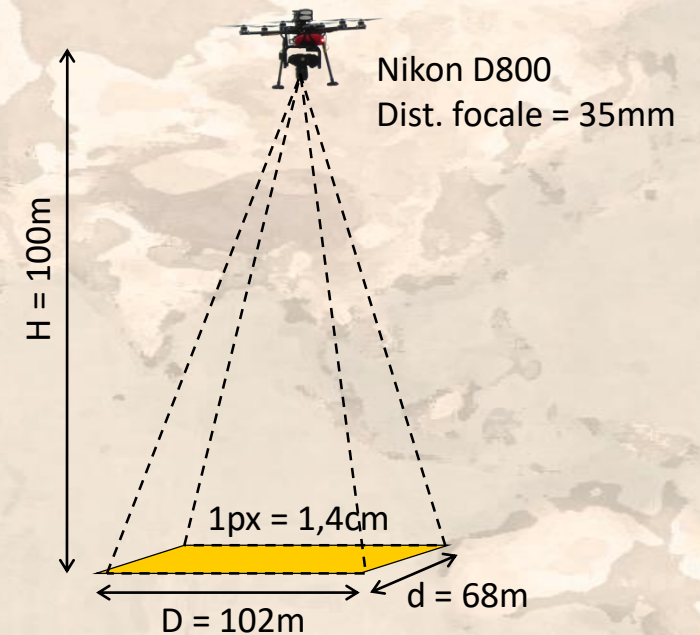
#### → Programmation auto-pilote

#### → Disposition des cibles (GCP : Ground Control Points)

#### → Vol

#### → Importation et archivage des données

**Exemple** : 1 vol → ≈ 200 photos, soit 1 à 4 Go







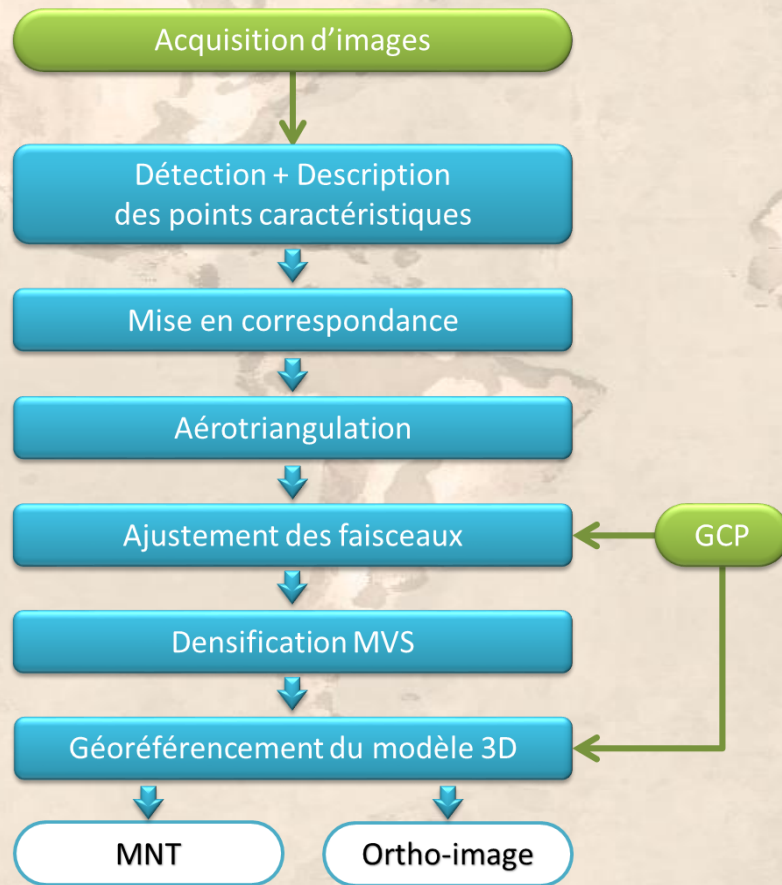
Photographie (32 Mpix) drone DRELIO – Porsmilin – Juin 2015



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – Traitements

- Méthodes de photogrammétrie SfM (Structure from Motion)

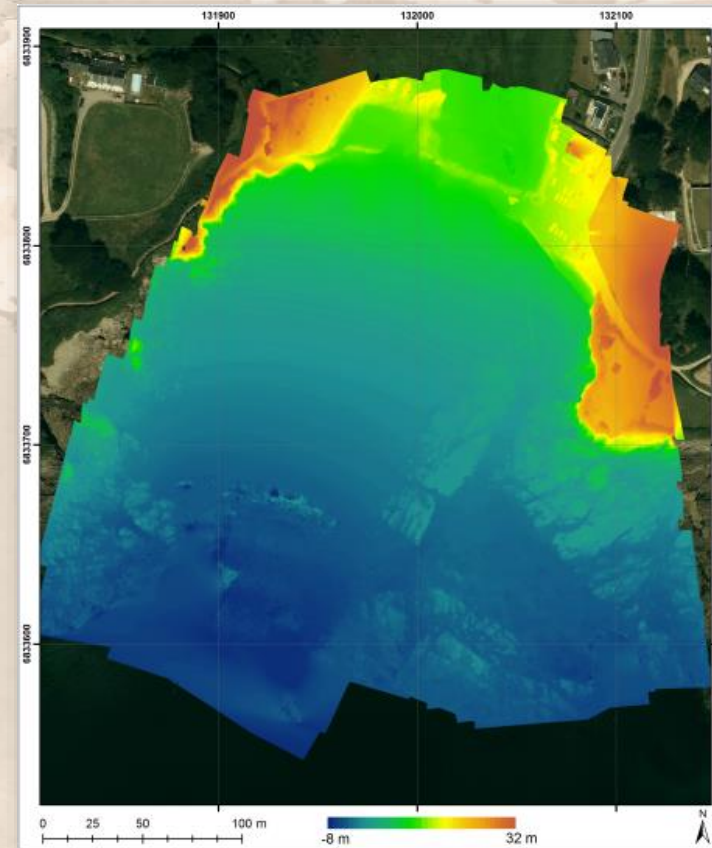


•Exemples de logiciels : Agisoft®  
PhotoScan®, IGN© MicMac®,  
VisualSfM, MeshLab...

# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques

### – Génération d'une orthophoto et d'un MNT

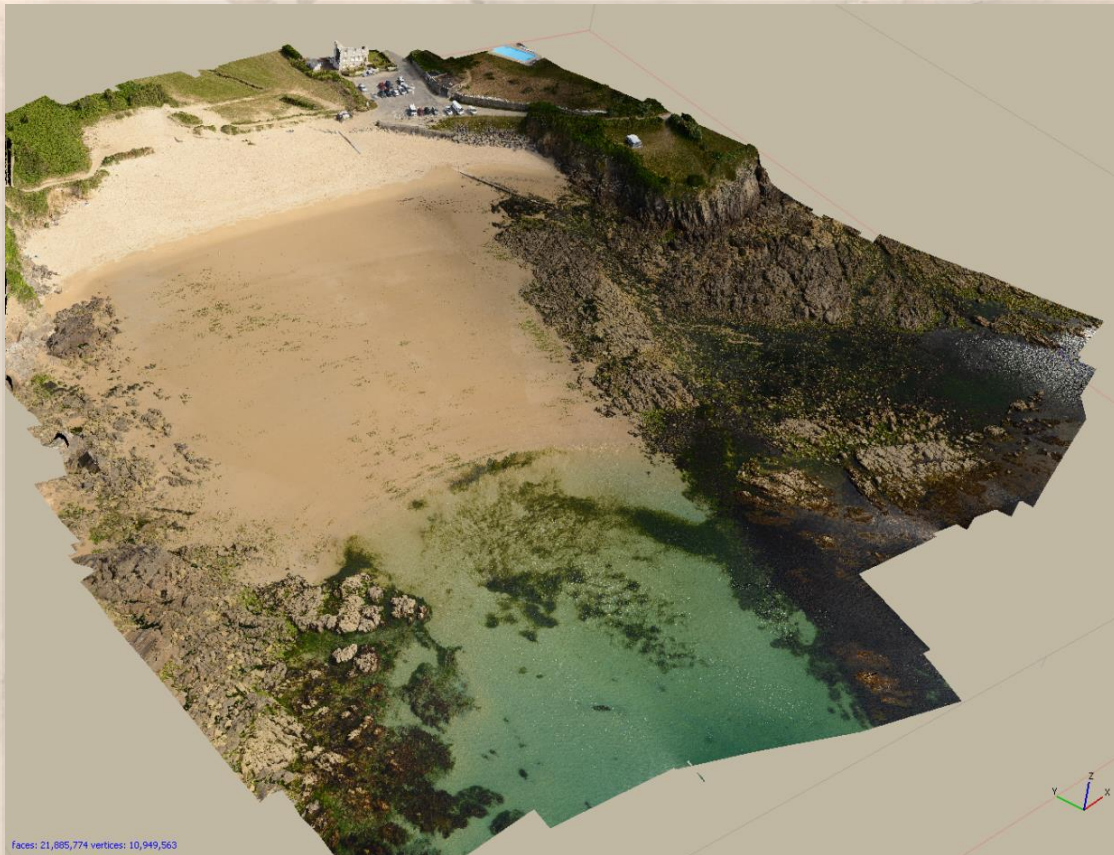




# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques

### – Génération d'une orthophoto et d'un MNT



→ Résolution MNT : 3 cm

→ Résolution ortho : 1,4 cm

→ Précision : 3 cm

- Point de vue aérien plus adapté à l'observation d'objets surfaciques  
=> plages, vasières, marais...



# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 17 km x 11 km
- Résolution : 15 m

→ Image satellite ASTER  
Ile d'Iwo-Jima (2005 - NASA©)



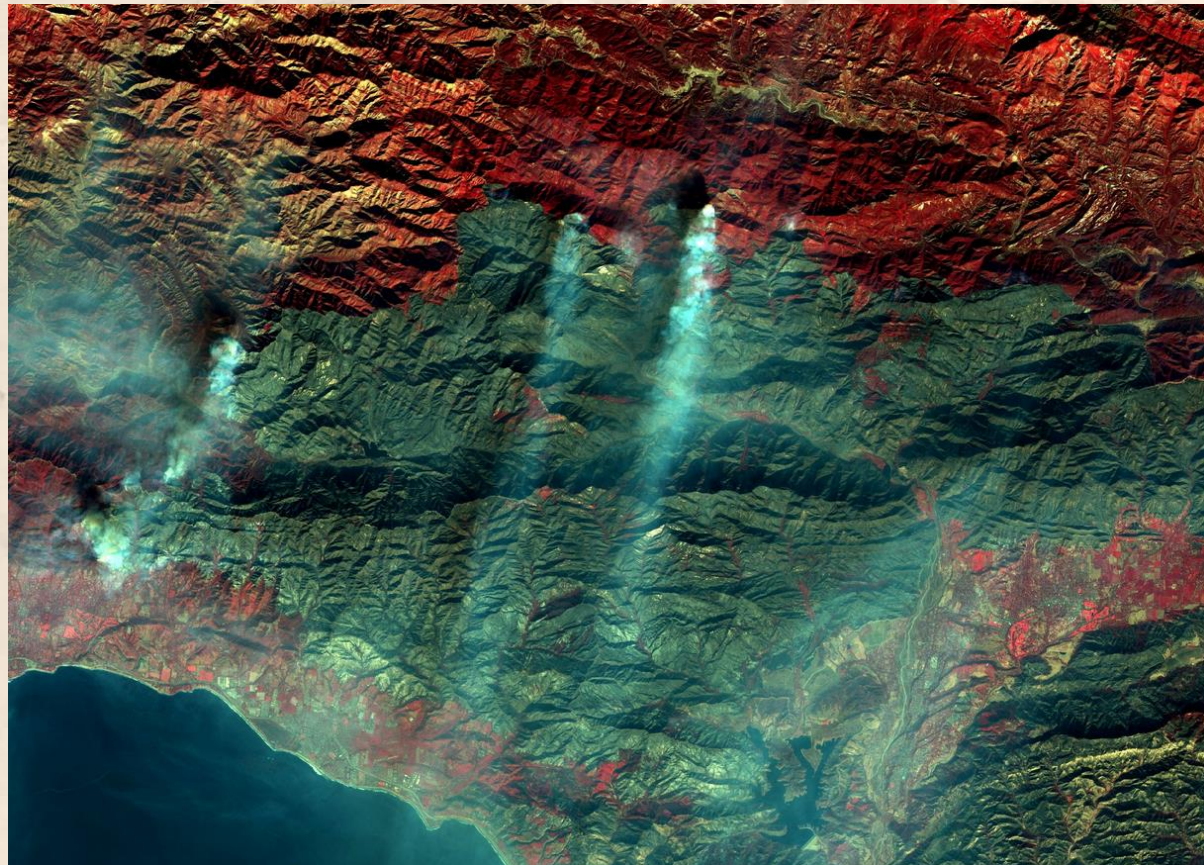


# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 40 km x 30 km
- Résolution : 10 m

→ Image en fausses couleurs - satellite Sentinel-2A - Incendie Thomas Fire en Californie (2017 – ESA / Copernicus©)





# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 4,8 km x 4,8 km
- Résolution : 90 cm

→ Image aérienne (1993 - IGN©)





# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 100 m x 70 m
- Résolution : 1,4 cm

→ Image drone  
(2016 – P2I IUEM®)

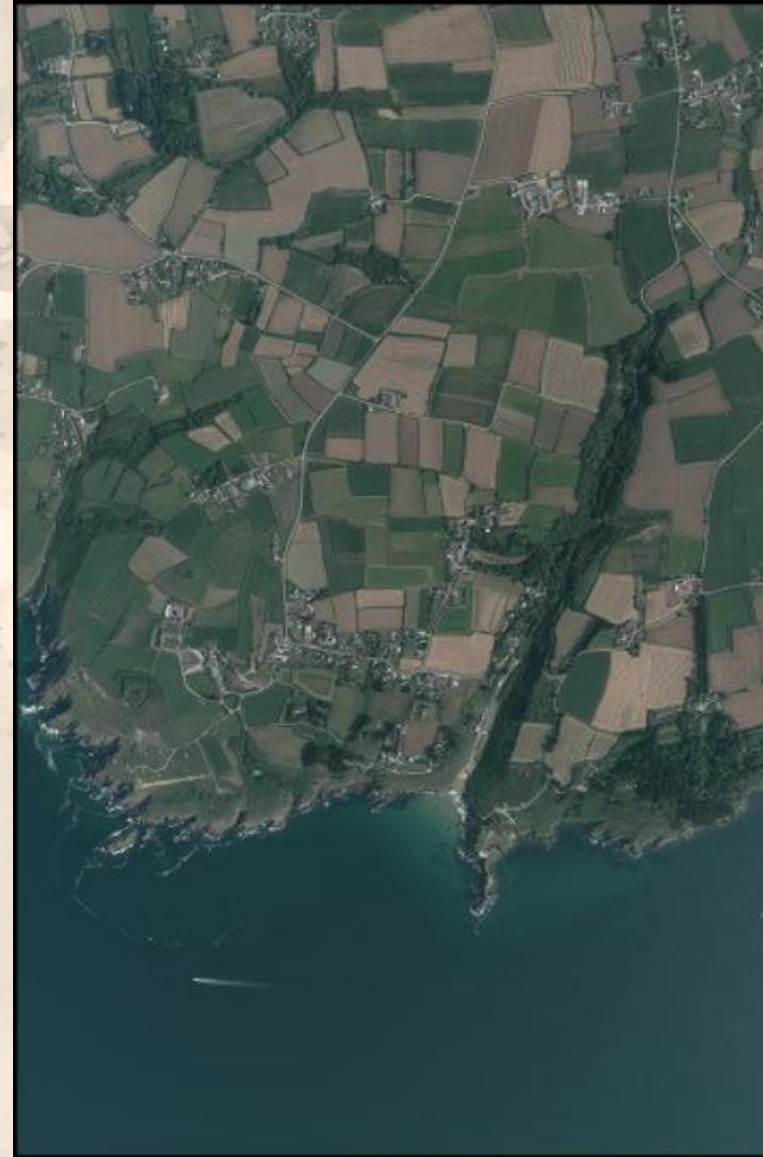


# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 2 km x 3,5 km
- Résolution : 20 cm

→ Image aérienne (2012 - IGN©)





# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 20 km x 20 km
- Résolution : 50 cm



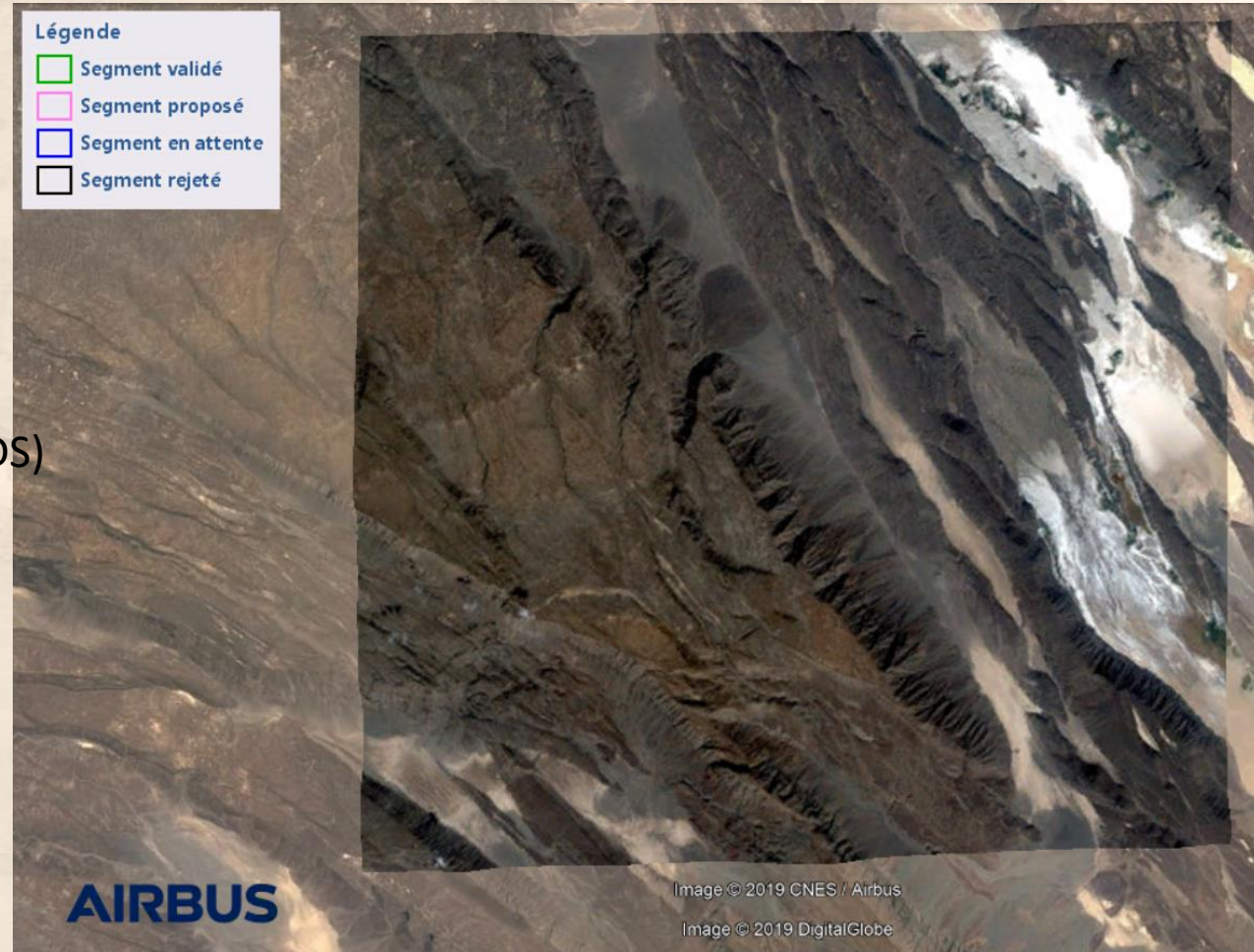


# Mesures de topographie terrestre

## ❖ Quelle plateforme ???

- Emprise : 20 km x 20 km
- Résolution : 50 cm

→ Image satellite Pléiades  
(2018 - © CNES / Airbus DS)

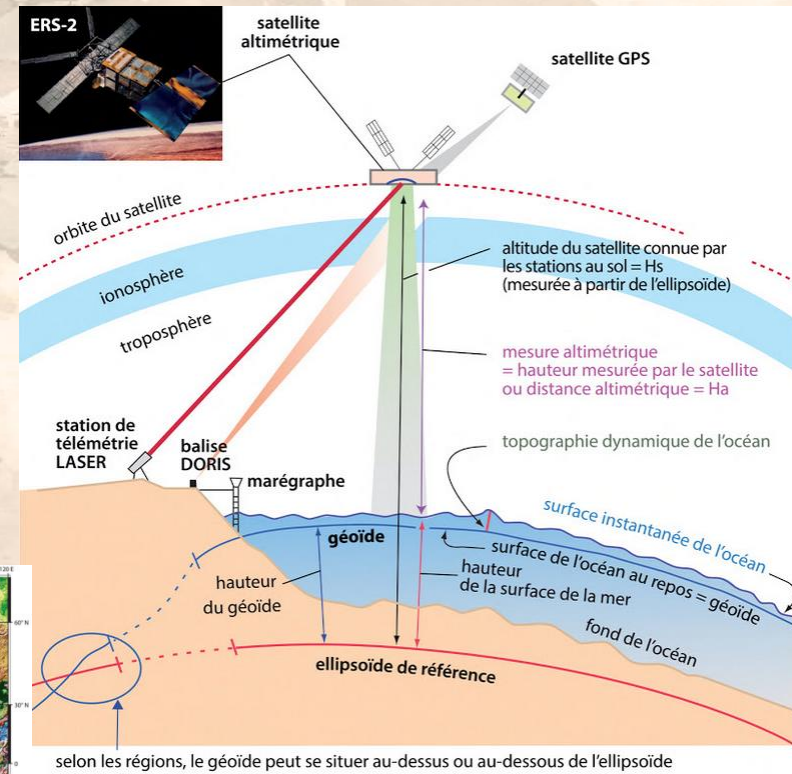
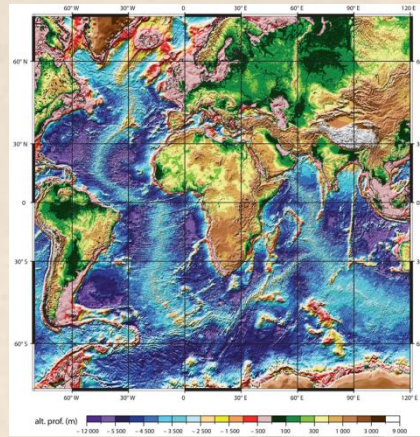




# Mesures de topographie marine

- **Mesures par altimétrie satellitaire**

- L'altimétrie satellitaire permet de mesurer les ondulations du géoïde
  - Par différence entre la distance satellite/ellipsoïde et la distance satellite/surface moyenne.
  - La bathymétrie est calculée en supposant que les variations de courtes longueurs d'onde du géoïde correspondent à des variations de profondeur.



(d'après 15ème Edition du « Pomerol »)

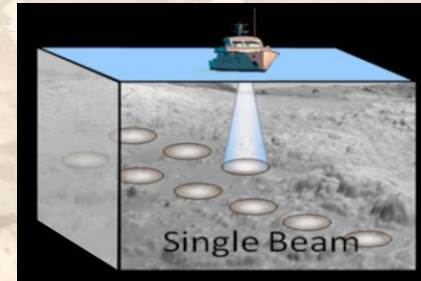
# Mesures de topographie marine

- **Mesures sondeur**

- Types de sondeurs

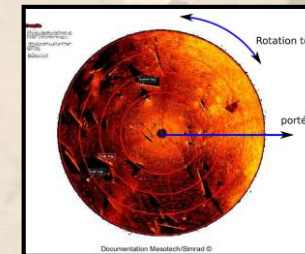
- Mono-faisceau

Émission d'un ping au travers d'un faisceau dirigé à l'aplomb du navire



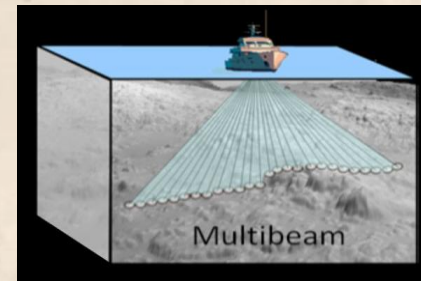
- Mono-faisceau à balayage

Antenne montée sur une platine tournante permettant de dépointer le faisceau



- Multi-faisceau (SMF)

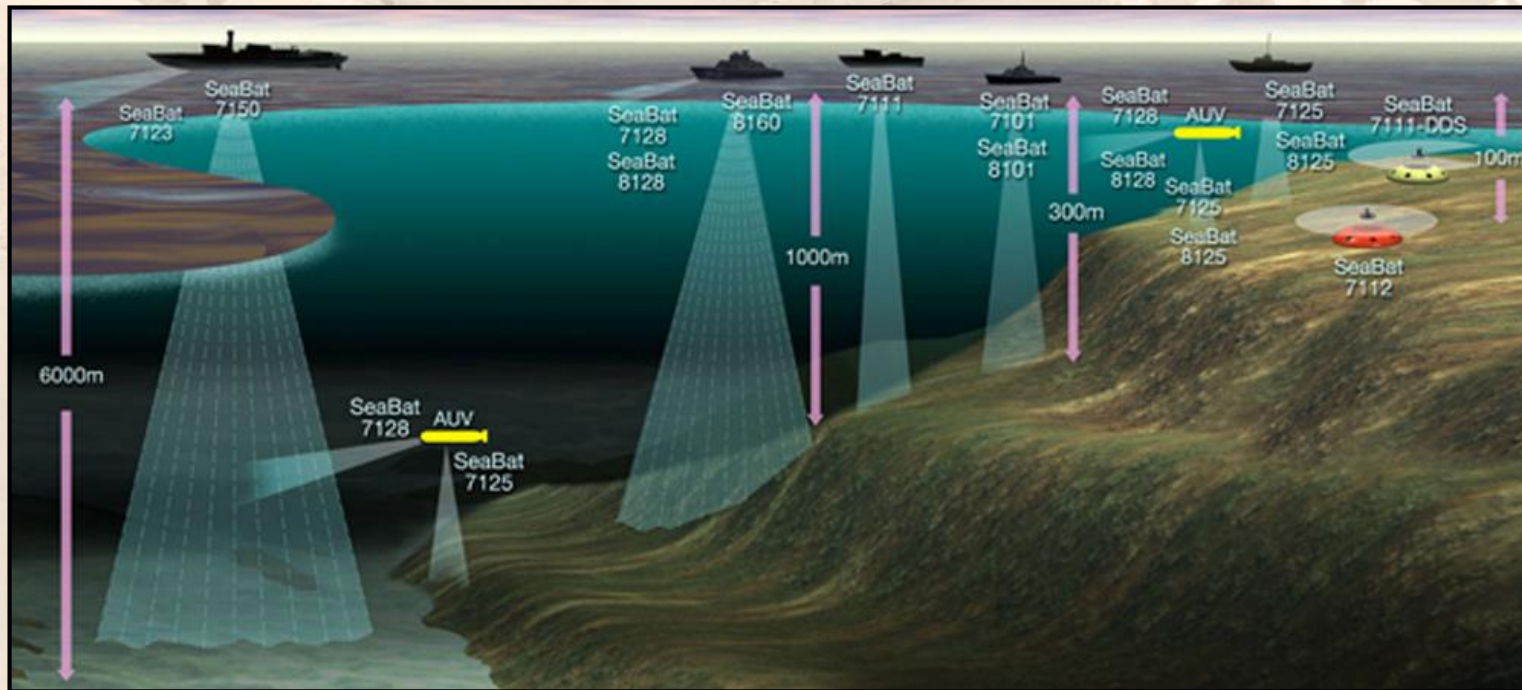
Mesure de la profondeur dans n directions par n faisceaux acoustiques  
→ **insonification** d'une large **fauchée**





# Mesures de topographie marine

- **Mesures sondeur**
  - Choix d'un système et d'une plateforme en fonction du site



Petits fonds	0 à 300 m	100 à 450 kHz
Fonds moyens	300 à 3000 m	30 à 100 kHz
Grands fonds	> 3000 m	12 à 18 kHz

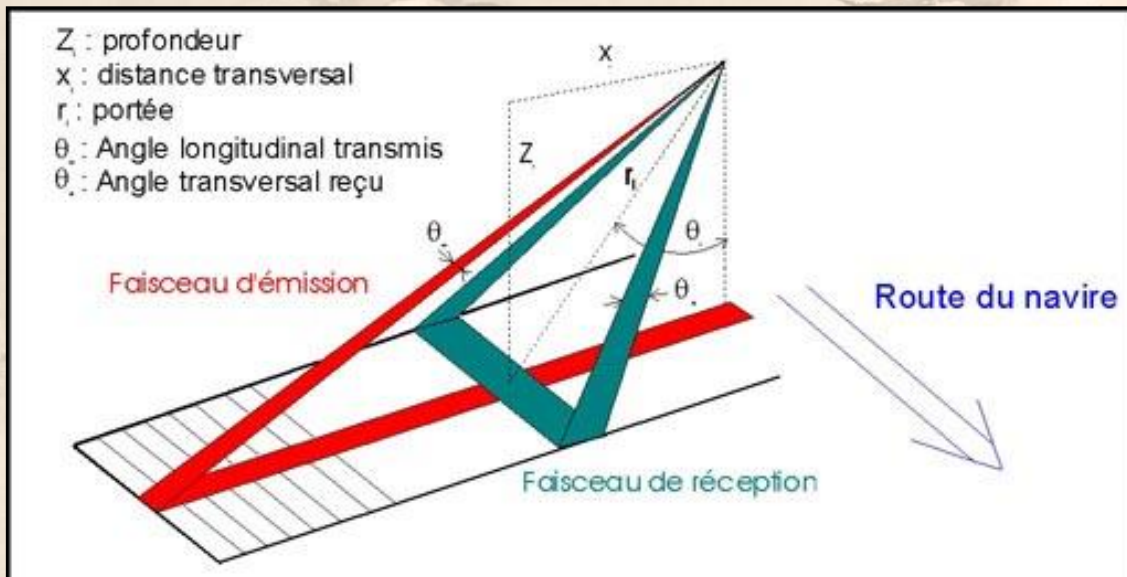
(Source RESON )

# Mesures de topographie marine

- **Mesures sondeur**

- Sondeur Multi-faisceau (SMF) → principe des faisceaux croisés

- **Emission** d'une impulsion sonore au travers d'un faisceau d'émission fin dans l'axe du navire ( $\sim 1^\circ - 5^\circ$ ) et large transversalement ( $\sim 150^\circ$ )
    - **Réception** du signal réfléchi par le fond selon n faisceaux de réception fin transversalement ( $\sim 1^\circ - 5^\circ$ ) et large longitudinalement ( $>20^\circ$ )

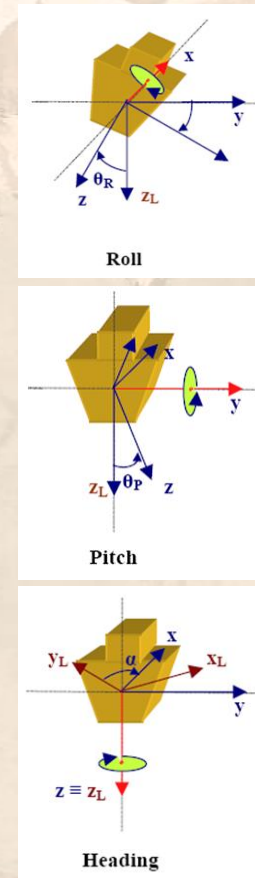
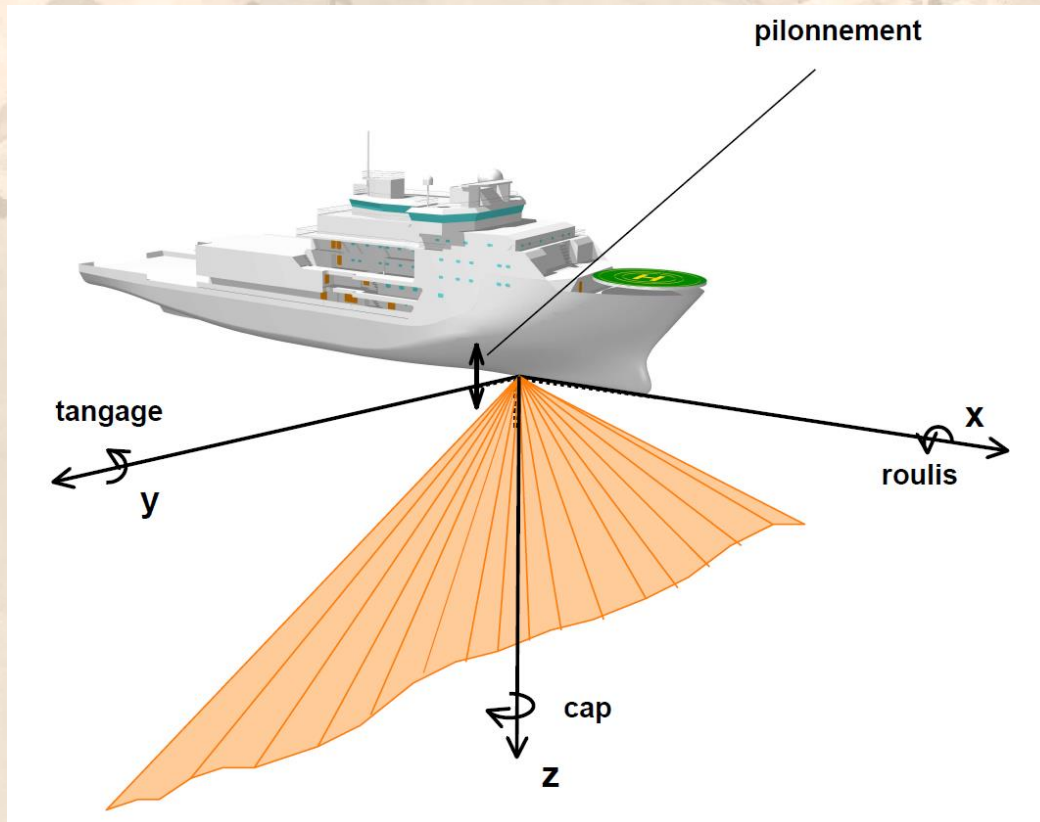


La zone du fond explorée ou « **tache d'insonification** » est l'intersection entre les faisceaux d'émission et de réception



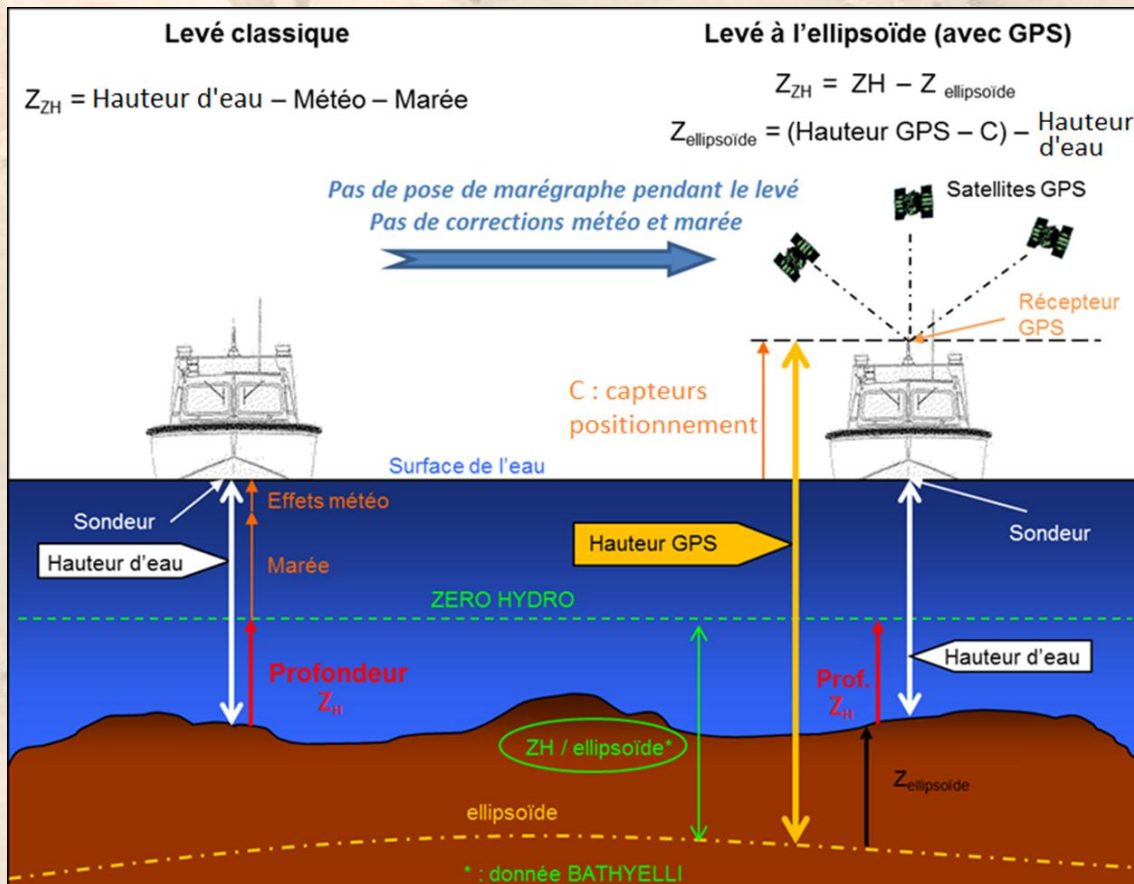
# Mesures de topographie marine

- **Mesures sondeur**
  - Mesures d'attitude → prise en compte des mouvements du navire



# Mesures de topographie marine

- **Mesures sondeur**
  - Réduction des sondages → raccordement à une référence altimétrique

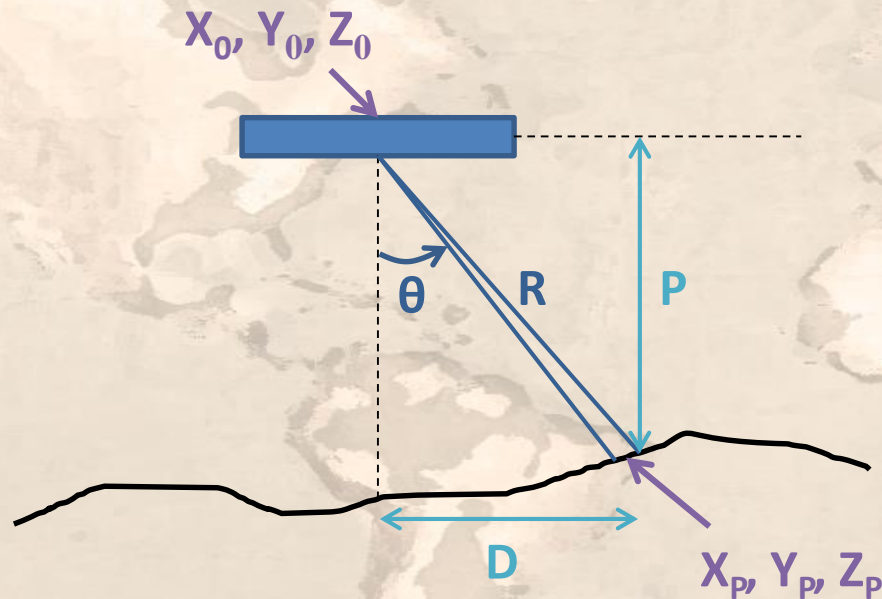


- Pause d'un marégraphe
- ou
- Levé à l'ellipsoïde

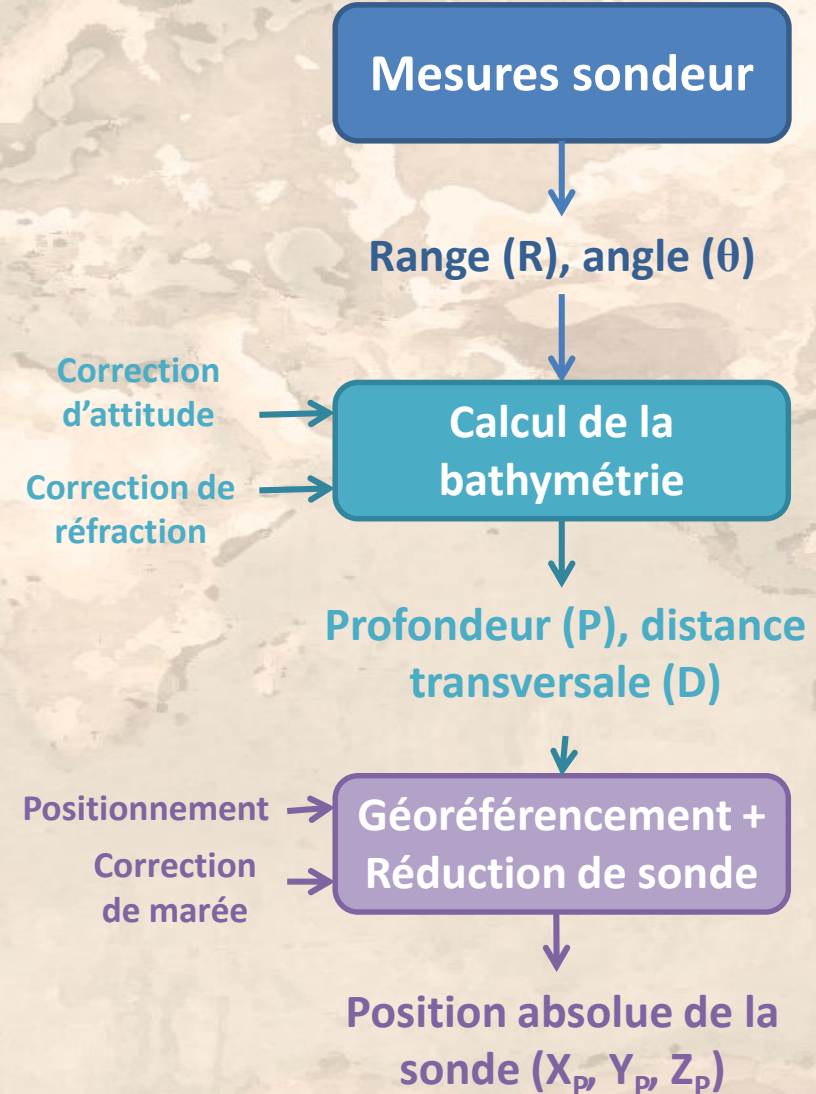


# Mesures de topographie marine

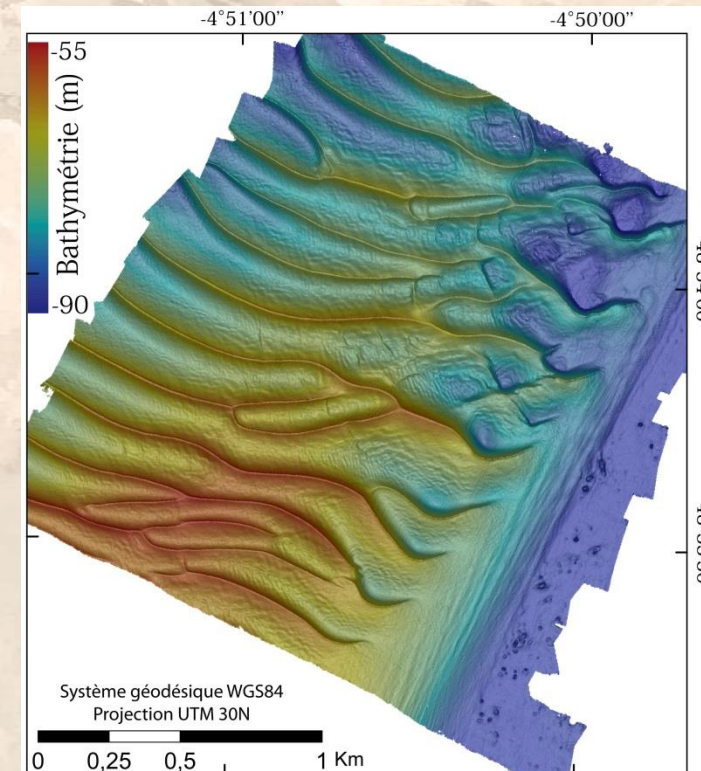
- Mesures sondeur



Les données sont géoréférencées en temps réel et enregistrées sur un ordinateur à bord du bateau.



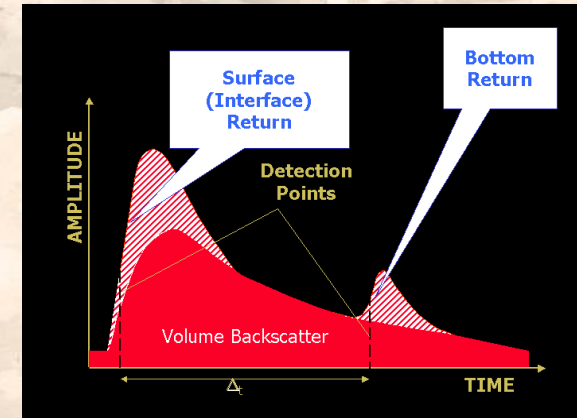
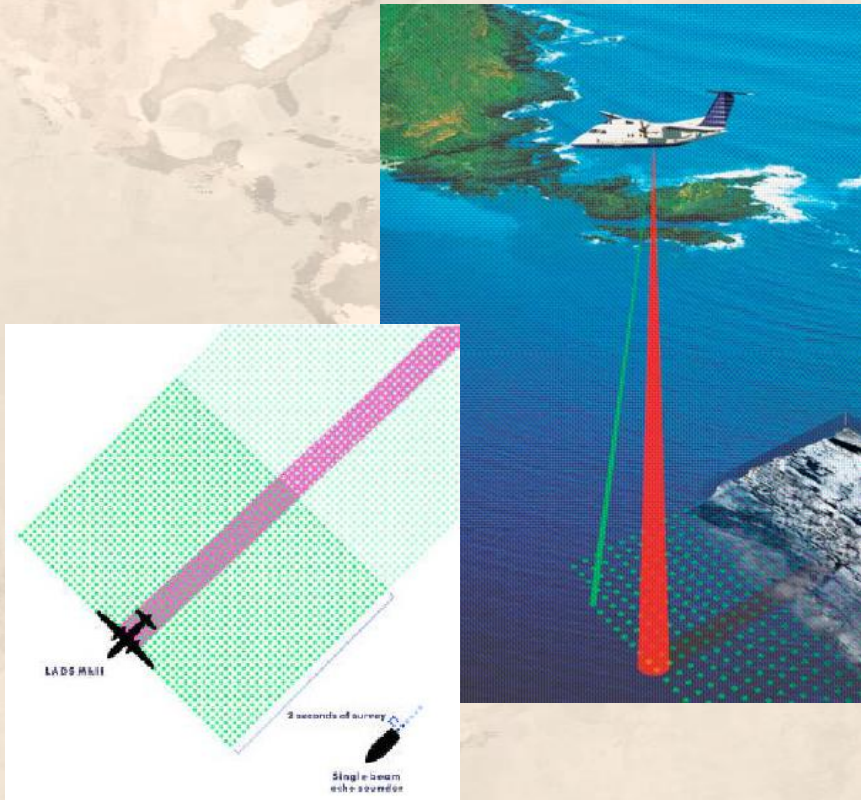
- ### Exemple de dunes sous-marines dans le banc du Four





# Mesures de topographie marine

- **Mesures LiDAR bathymétrique ou topo-bathymétrique**
  - 1 impulsion IR ( $\lambda=1064 \text{ nm}$ ) => réflexion sur la surface / zones émergées
  - 1 impulsion dans le vert ( $\lambda= 532 \text{ nm}$ ) => réflexion sur le fond



G. Guenther et al. (2000)

Le signal est impacté par :

- l'état de surface
- le type de fond
- la transmission dans la colonne d'eau

# Mesures de topographie marine

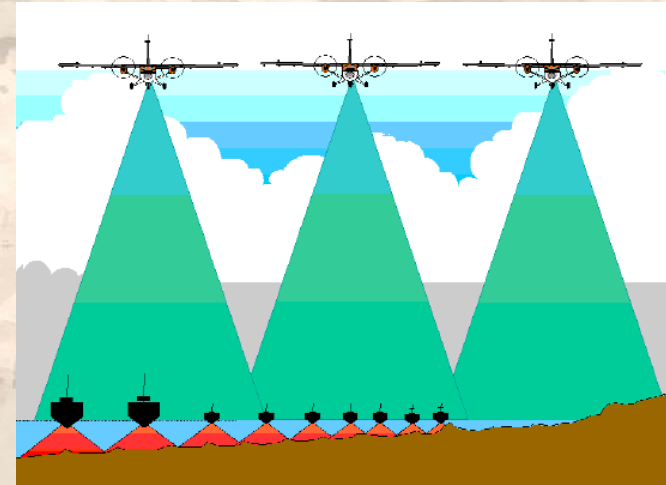
- **Mesures LiDAR bathymétrique ou topo-bathymétrique**

- **Avantages**

- Surfaces couvertes par unité de temps (rapport 100 par rapport au SMF)
    - Bien adapté à une zone non-connue et peu profonde
    - Coût ?

- **Limitations**

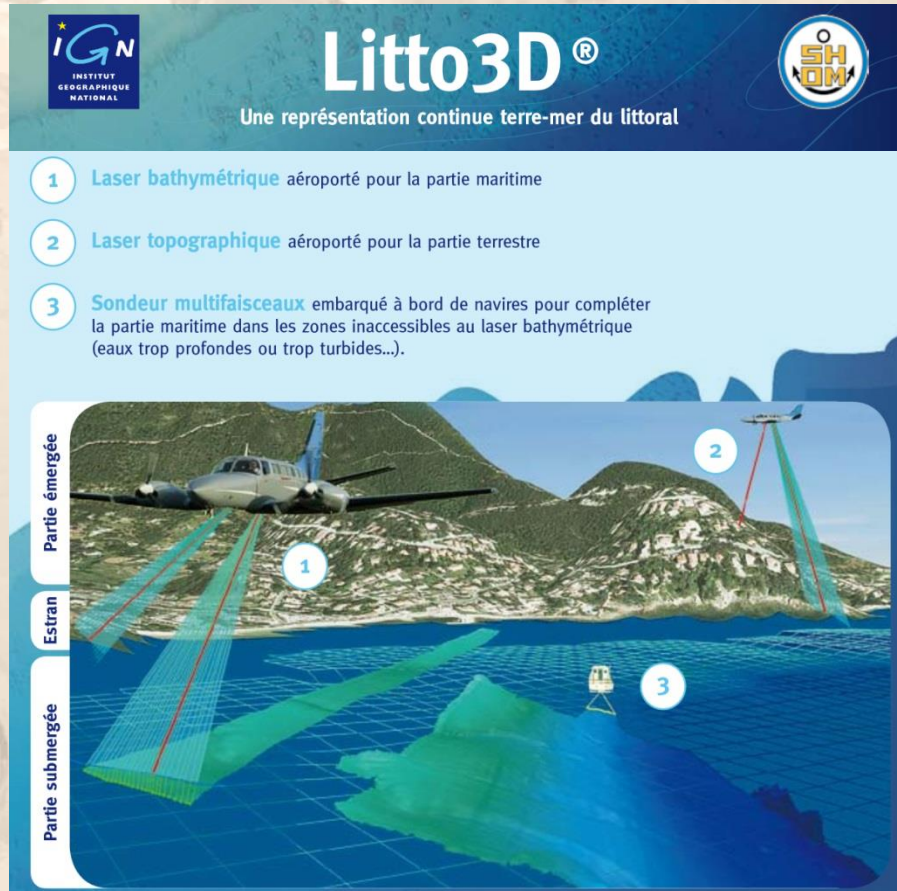
- Profondeur max. ~20-30 m
    - Conditions météo (état de mer, brume, pluie...)
    - Colonne d'eau (turbidité, MES, végétation,...)
    - Résolution moins bonne qu'un SMF petits fonds (qqm mètres vs. qqm décimètres)
    - Précision moins bonne qu'un SMF petits fonds (rapport 2)





# Mesures de topographie marine

- Mesures LiDAR bathymétrique ou topo-bathymétrique



Litto3D® (coédité par le SHOM et l'IGN) vise à produire un modèle numérique altimétrique de référence, continu terre-mer, sur la frange littorale du territoire français (métropole et DOM).

→ moyens de levés par lasers aéroportés (LIDAR bathymétrique) permettant de mesurer les profondeurs dans les zones d'estran difficilement accessibles, en complément des sondeurs multifaisceaux embarqués à bord des navires. Litto3D® décrit la bande littorale, jusqu'à l'isobathe 10 m et au plus jusqu'à 6 milles marins des côtes.

Disponible au téléchargement :  
<http://diffusion.shom.fr/produits/altimetrie-littorale.html>



# Mesures de topographie marine

- **Mesures radiométriques**

- A partir d'imagerie multi-spectrale RGB et de points d'étalonnage

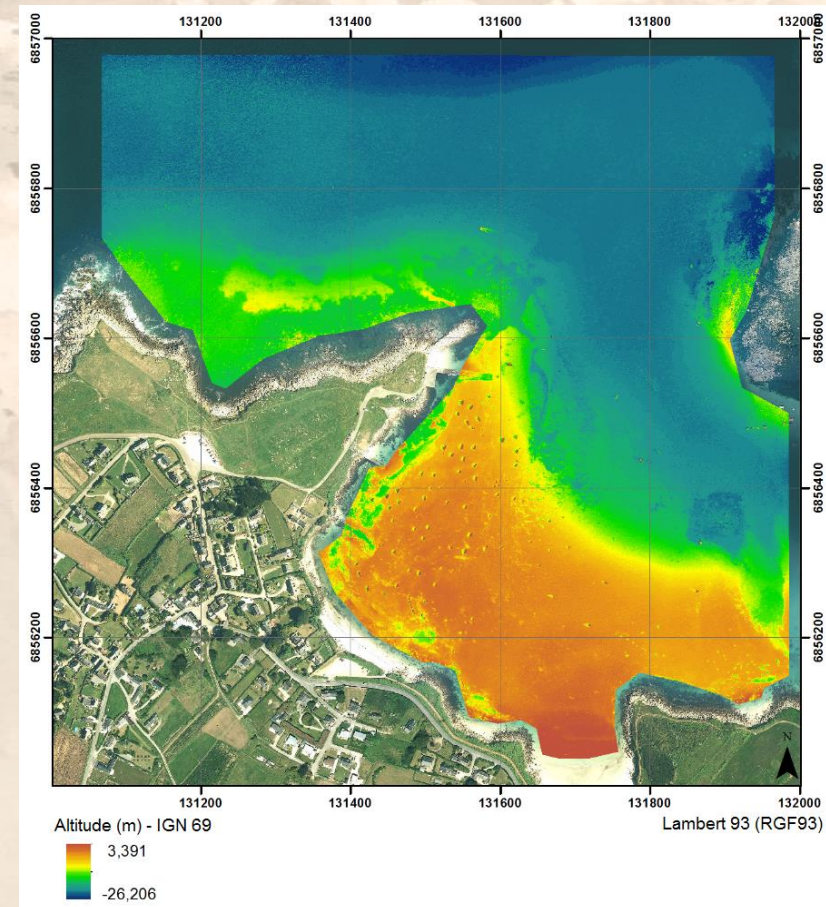


X	Y	Z
131731.28	6856042.94	2.67
131727.62	6856116.87	0.36
131560.47	6856562.42	0.03
131806.68	6856292.19	-1.52
131789.75	6856327.90	-1.64
131821.82	6856320.34	-1.66
131661.74	6856574.60	-2.63
131804.60	6856513.26	-2.68
131718.66	6856571.79	-3.04
131701.04	6856637.61	-3.19
131773.62	6856729.27	-4.22
131705.97	6856765.32	-4.76

*Exemple : algorithme linéaire (Lyzenga, 1978)*

→ la réflectance de l'image R est liée à la profondeur Z selon une formule du type :

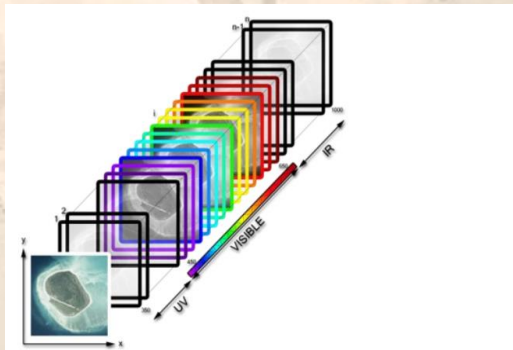
$$Z = b0 + b1 * \ln(R)$$



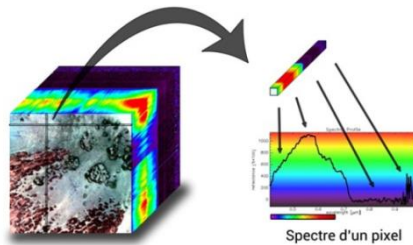


# Mesures de topographie marine

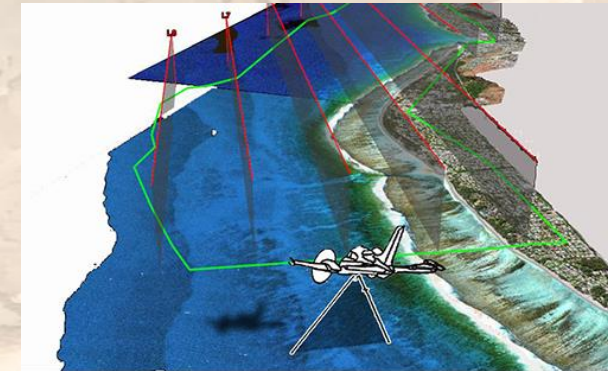
- **Mesures radiométriques**
  - A partir d'imagerie hyperspectrale



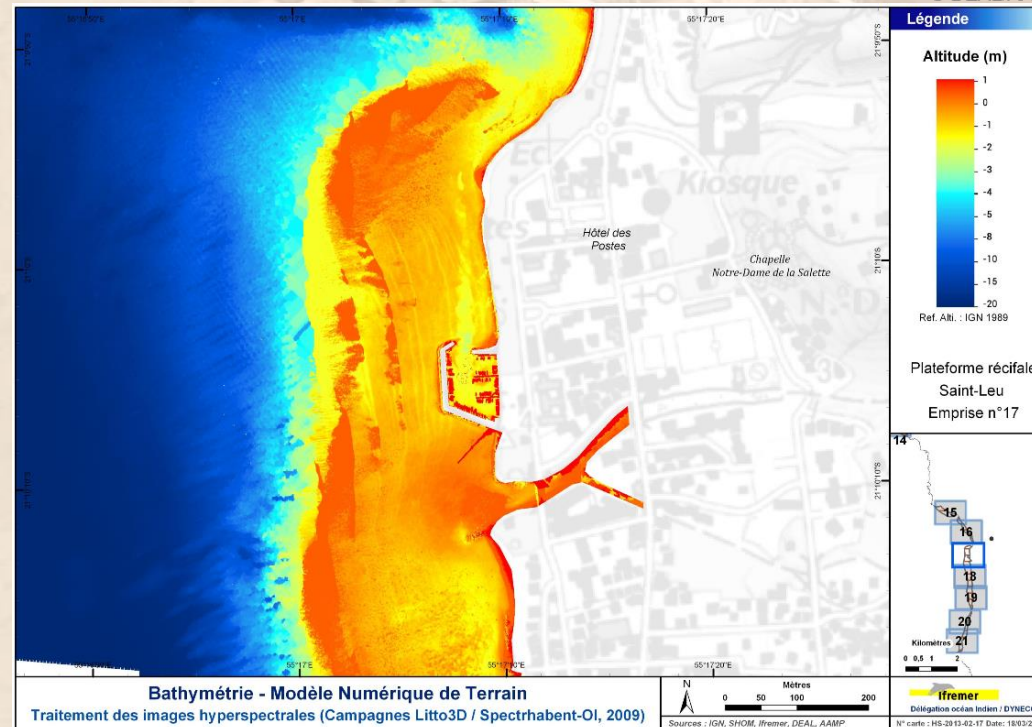
Représentation schématisée d'une image hyperspectrale en 3D (x,y, longueur d'onde). La couleur du cadre de chaque imagerie représente la longueur d'onde réelle "visible" de la bande acquise.



Cube hyperspectral montrant selon l'axe en perspective les spectres de réflectance des pixels de bordure. La gamme de couleurs ne représente ici plus la longueur d'onde mais l'intensité du signal mesuré (du noir pour les faibles valeurs au rouge pour les plus fortes).



© DEAL/AAMP/IFREMER





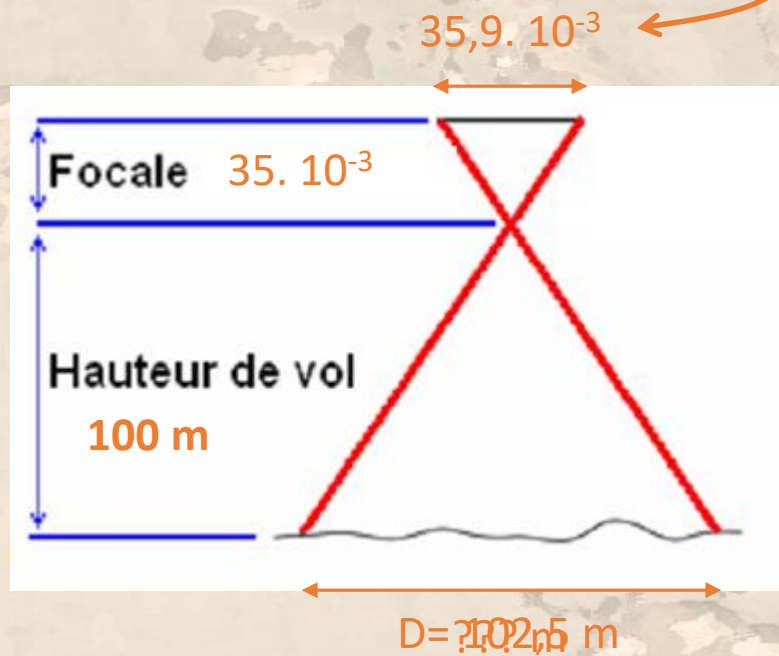


# Exercice

Proposer un scénario de vol permettant de suivre une zone de 1 km x 180 m de linéaire côtier avec une résolution permettant de détecter au moins des objets de 5 cm, sachant que votre drone a une autonomie de 15 min, que la réglementation limite l'altitude de vol à 150 m, que le recouvrement entre images doit être au minimum de 60%, que votre caméra a une focale de 35 mm, une cadence d'acquisition d'1 photo toutes les 2 s et un capteur de 35,9 x 24 mm avec 3184 x 2120 pixels.



❖ focale de 35 mm et un capteur de 35,9 x 24 mm avec 3184 x 2120 pixels.

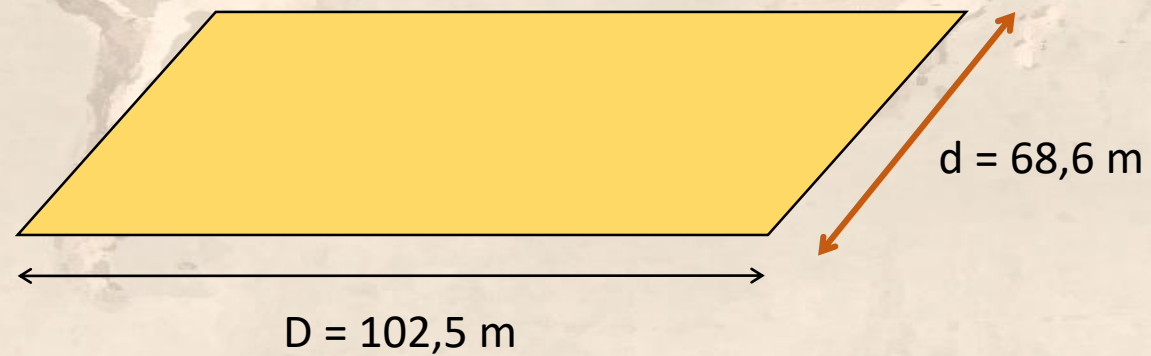
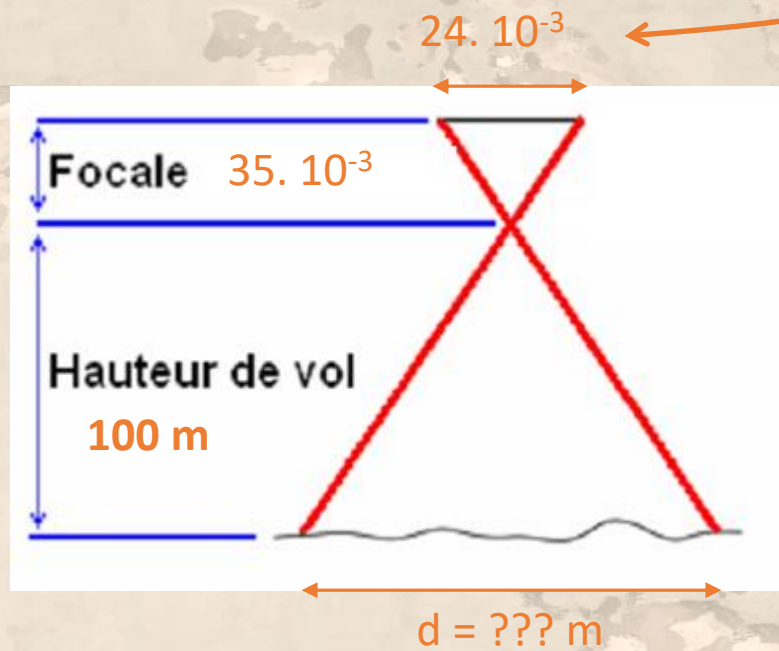


Théorème de Thalès :  
 $35 \cdot 10^{-3} / 100 = 35,9 \cdot 10^{-3} / ???$

→ 1 pixel =  $102,5 / 3184 = 0,032$  m = 3,2 cm < 5 cm



❖ focale de 35 mm et un capteur de 35,9 x 24 mm avec 3184 x 2120 pixels.



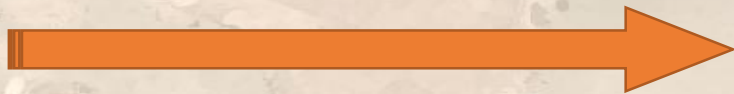




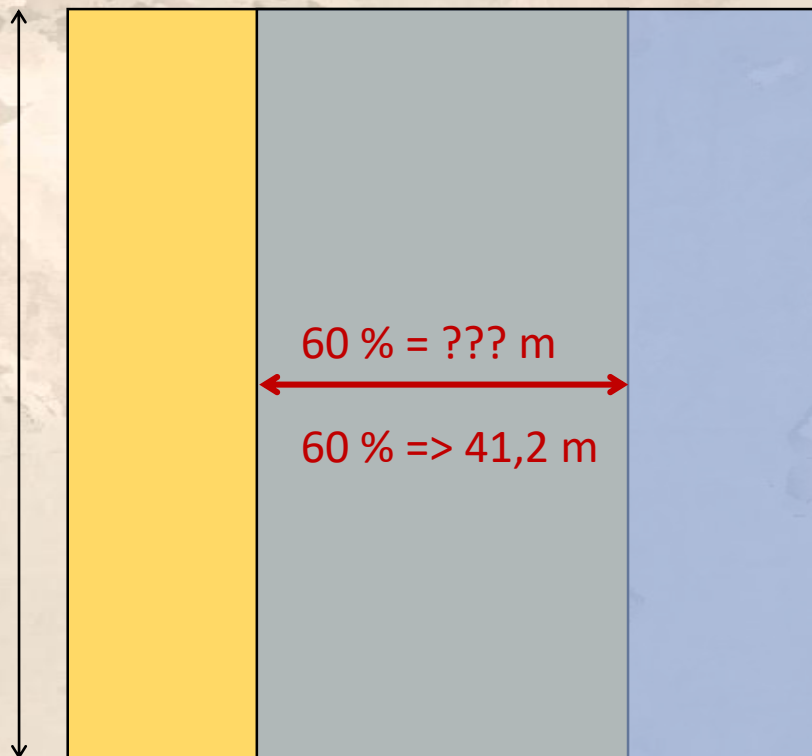
# Exercice

Proposer un scénario de vol permettant de suivre une zone de 1 km x 180 m de linéaire côtier avec une résolution permettant de détecter au moins des objets de 5 cm, sachant que votre drone a une autonomie de 15 min, que la réglementation limite l'altitude de vol à 150 m, que le **recouvrement entre images doit être au minimum de 60%**, que votre caméra a une focale de 35 mm, une cadence d'acquisition d'1 photo toutes les 2 s et un capteur de 35,9 x 24 mm avec 3184 x 2120 pixels.

Avance du drone



D = 102,5 m



60 % = ??? m

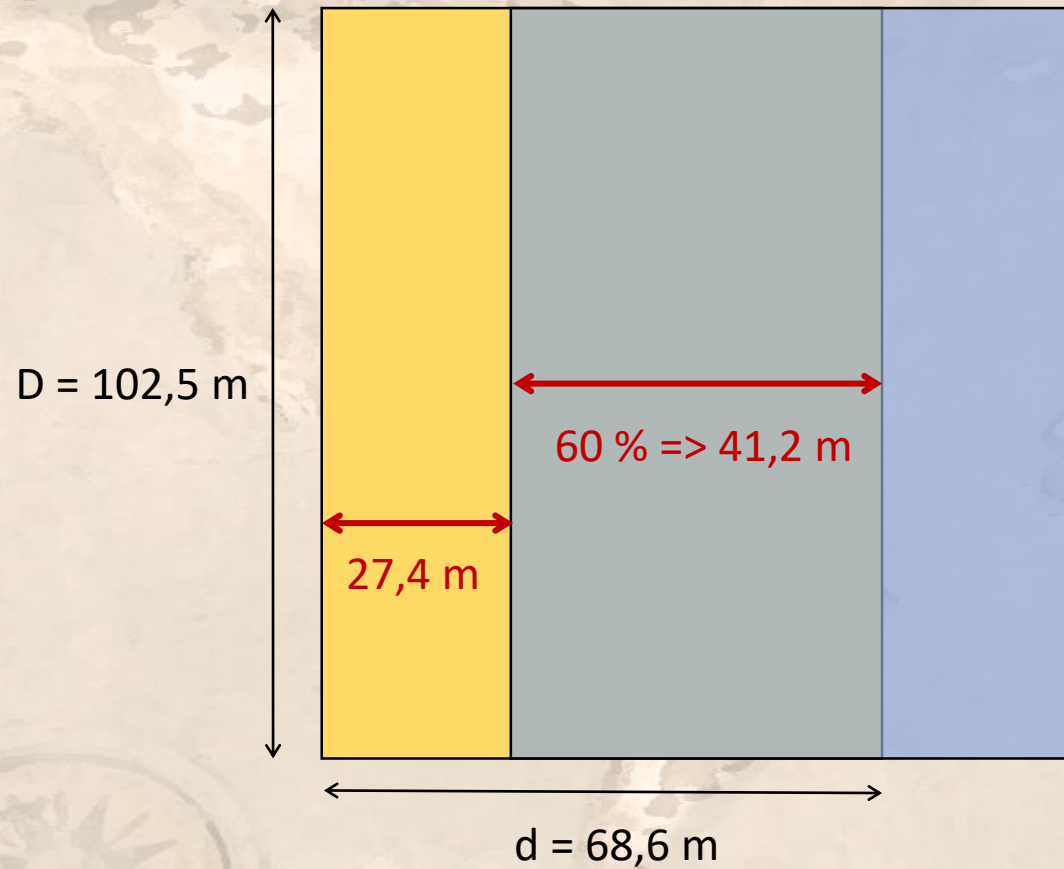
60 % => 41,2 m

d = 68,6 m



Avance du drone

ses doit être au minimum de 6  
on d'1 photo toutes les 2 s et u



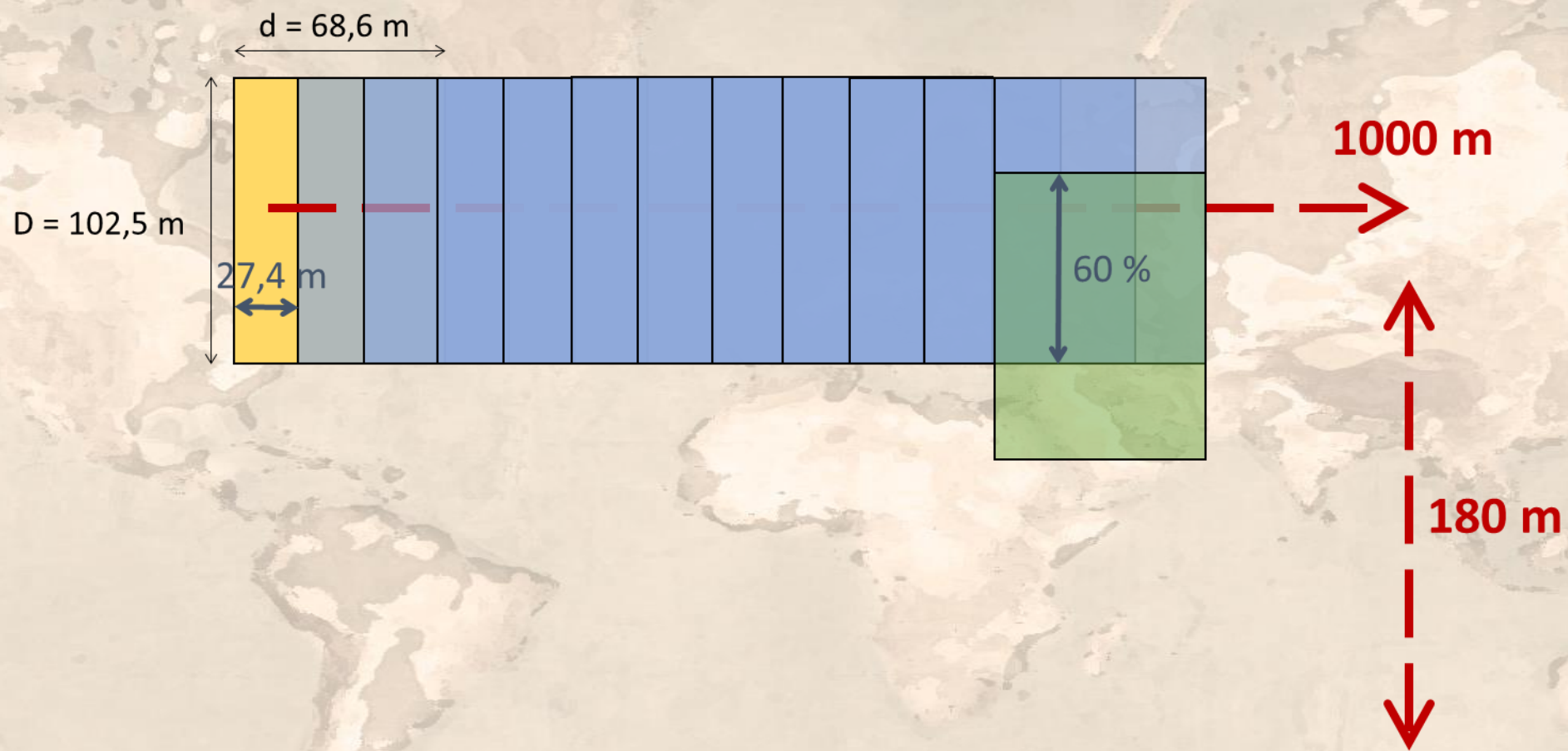
$$V_{\text{drone}} = 27,4 \text{ m} / 2 \text{ s} = 13,7 \text{ m/s} \approx 50 \text{ km/h}$$



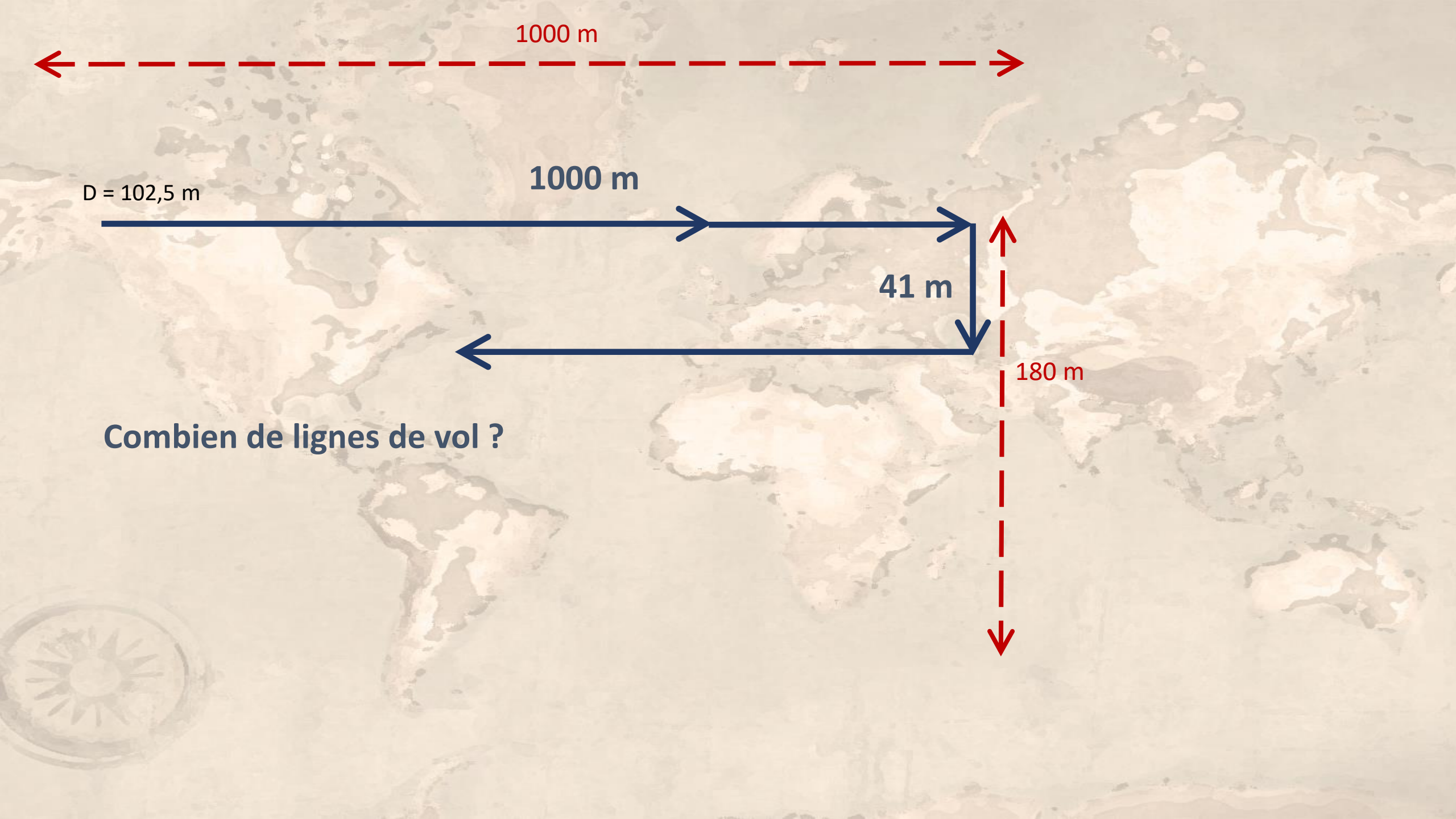
# Exercice

Proposer un scénario de vol permettant de suivre une zone de 1 km x 180 m de linéaire côtier avec une résolution permettant de détecter au moins des objets de 5 cm, sachant que votre drone a une autonomie de 15 min, que la réglementation limite l'altitude de vol à 150 m, que le recouvrement entre images doit être au minimum de 60%, que votre caméra a une focale de 35 mm, une cadence d'acquisition d'1 photo toutes les 2 s et un capteur de 35,9 x 24 mm avec 3184 x 2120 pixels.



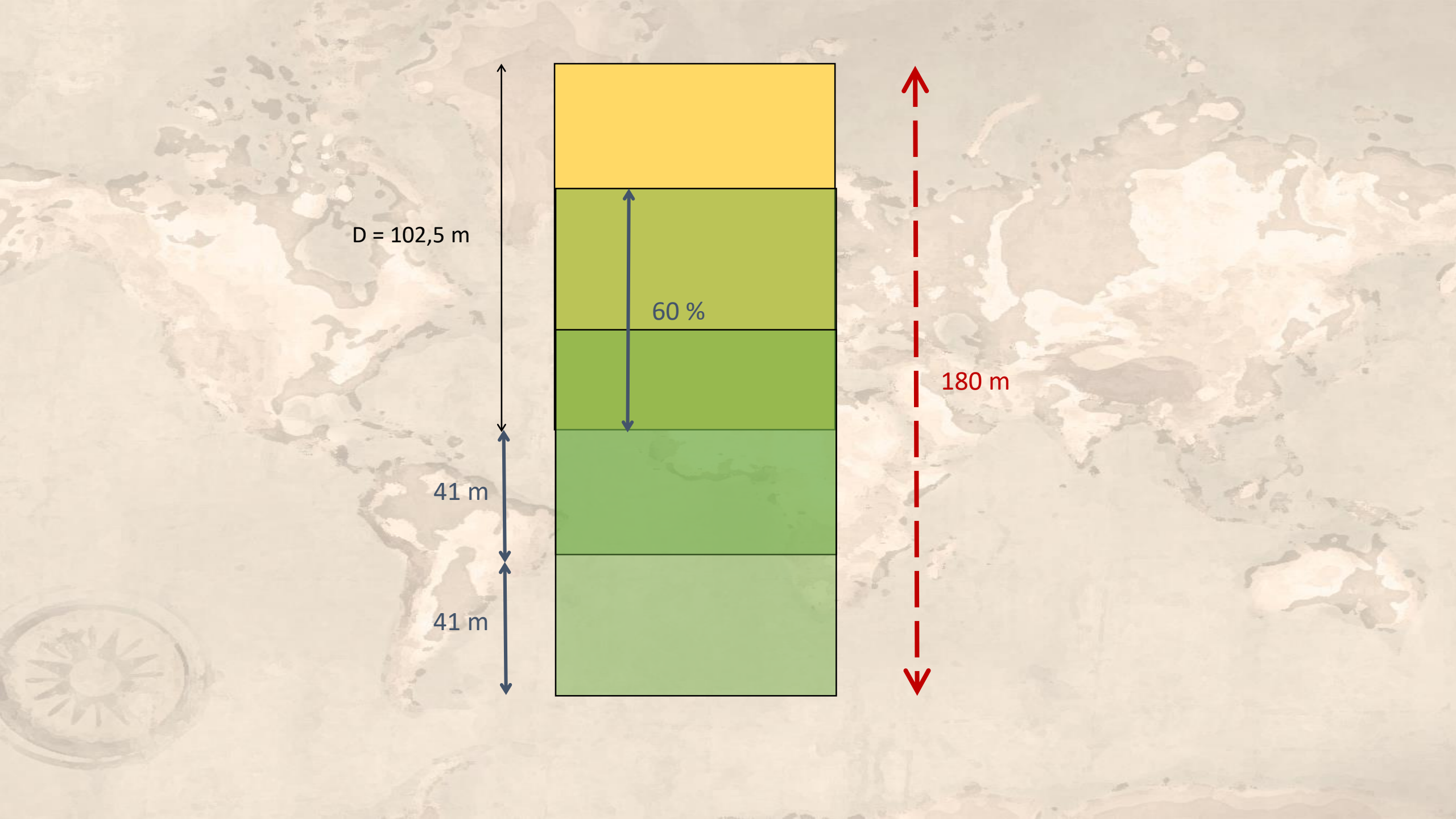


→  $\text{Espacement}_{\text{lignes\_vol}} = 102,5 - 0,6 \cdot 102,5 = 41 \text{ m}$



Combien de lignes de vol ?





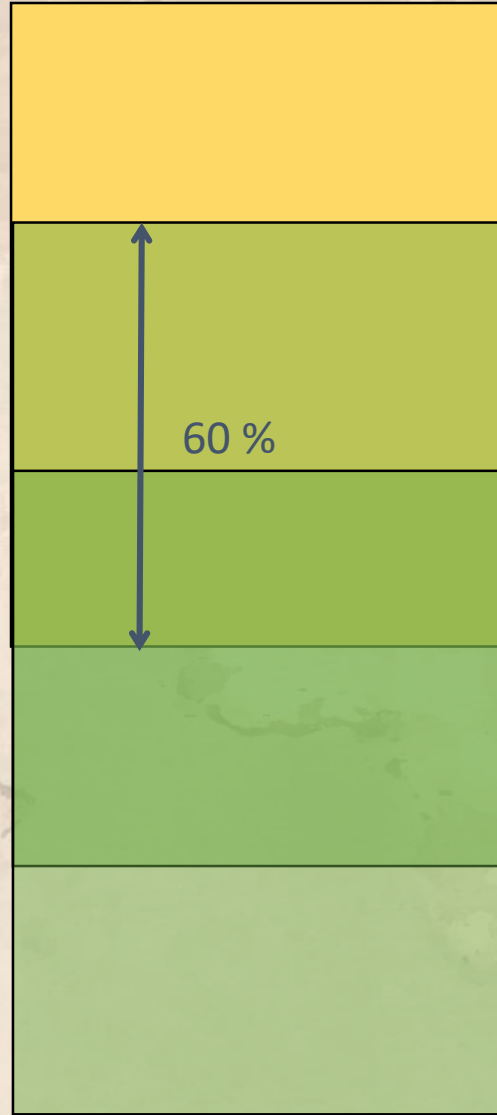
D = 102,5 m

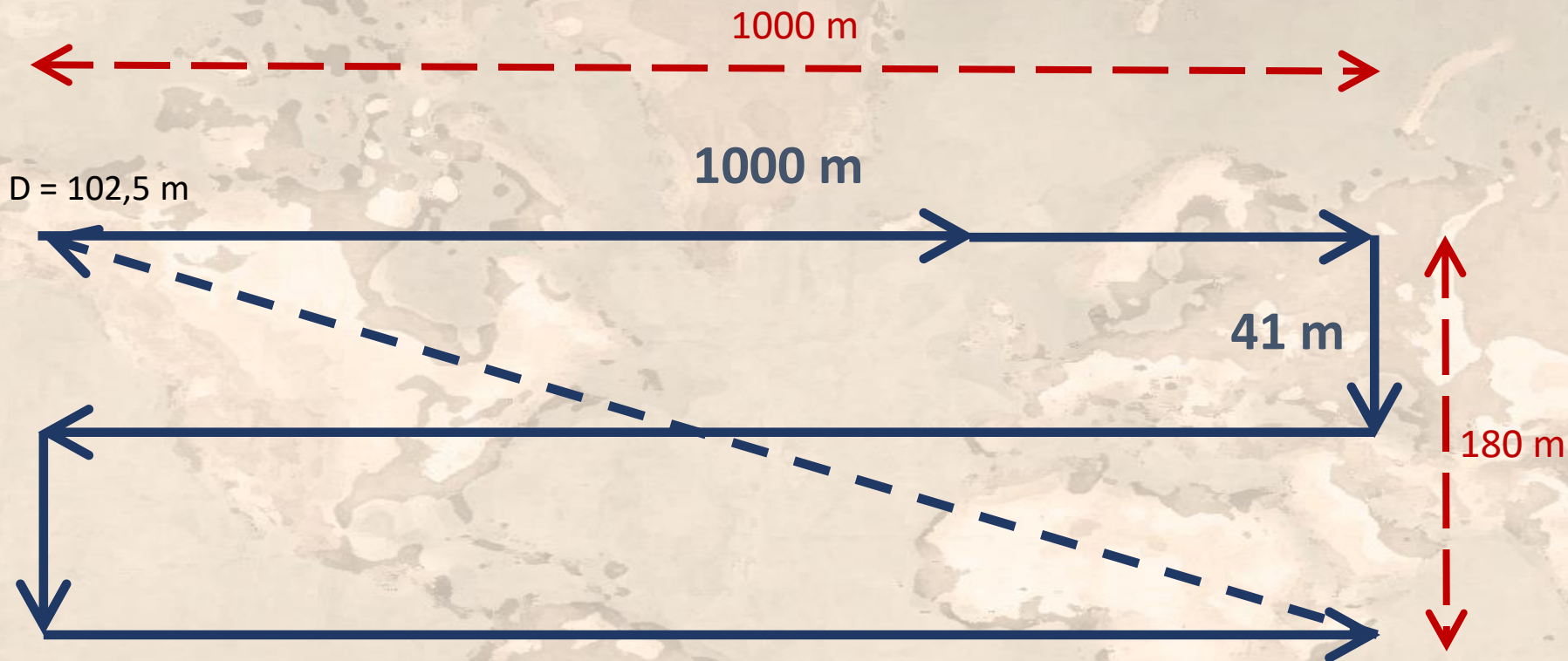
60 %

180 m

41 m

41 m

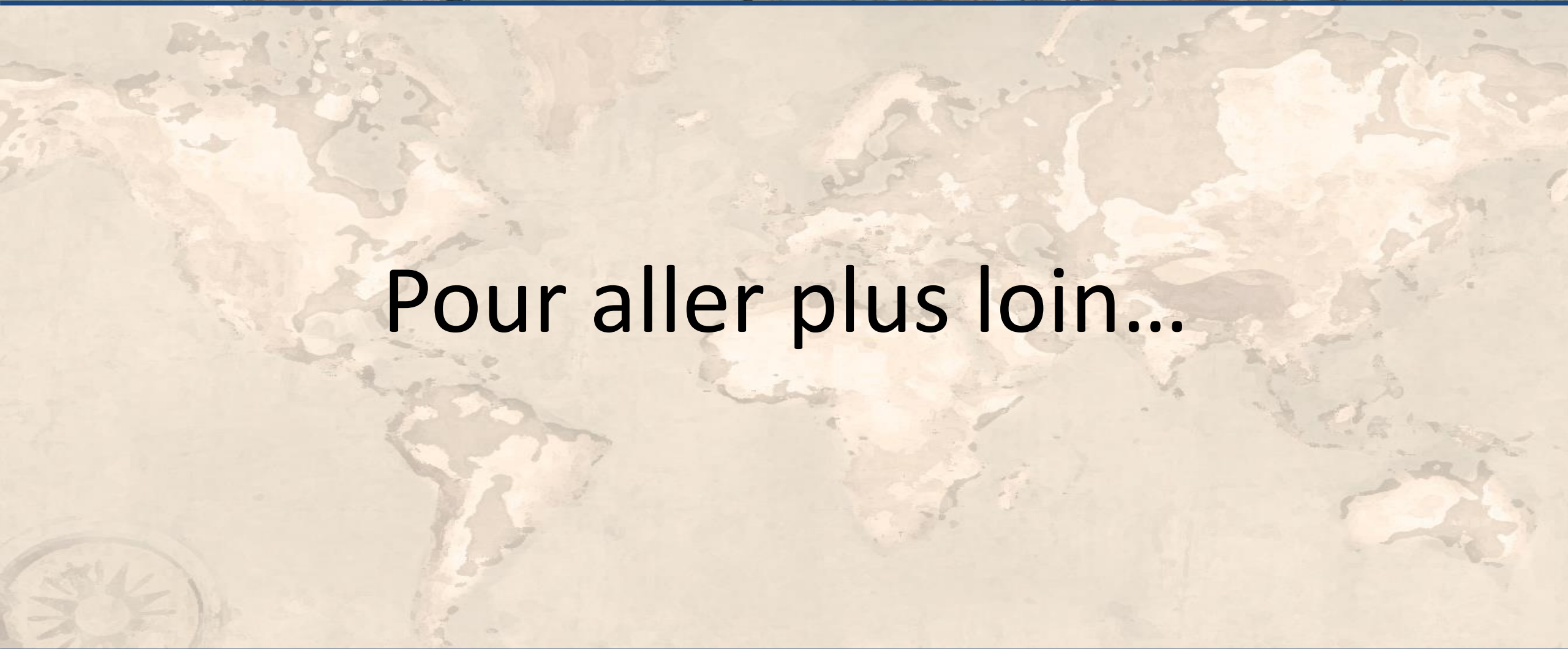




**Distance parcourue =  $3 \times 1000 \text{ m} + 2 \times 41 \text{ m} \dots + 1003 \text{ m} = 4085 \text{ m}$**

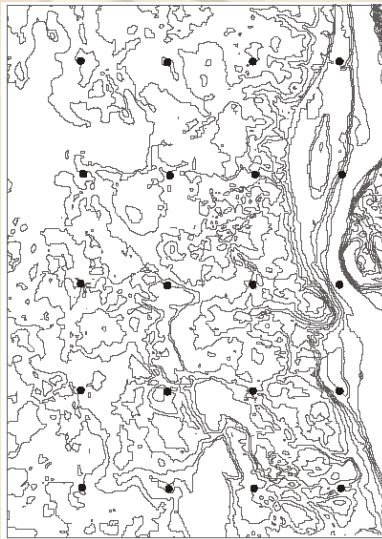
**Durée parcours =  $4085 \text{ m} / 13,7 \text{ m/s} = 298 \text{ s} \sim 5 \text{ min}$**



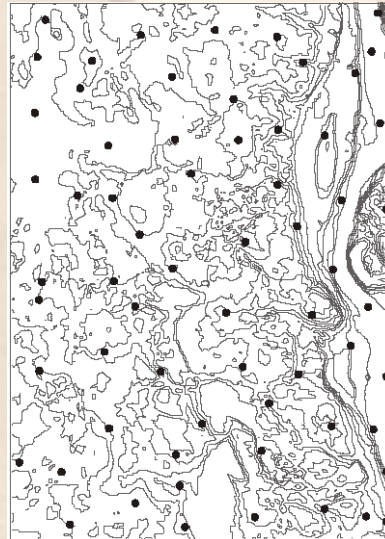


# Représentation de la topographie

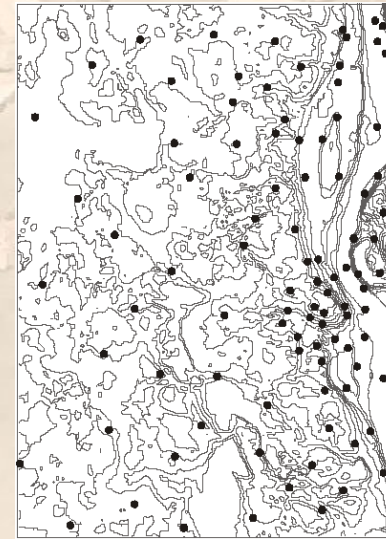
- **Modèles Numériques de Terrains (MNT)**
  - **Interpolation** = construire une information **continue** à partir d'informations ponctuelles (échantillonnées à des positions connues)
  - importance de la représentativité de l'**échantillonnage** par rapport à la variabilité spatiale de l'information à représenter



*Echantillonnage régulier*



*Echantillonnage aléatoire*



*Echantillonnage adaptatif*  
→ requiert une connaissance a priori de l'information mesurée



# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation**

→ Des méthodes d'interpolation différentes appliquées sur les mêmes données peuvent produire des résultats différents.

→ Il n'existe pas une « méthode idéale » !

→ La précision du résultat est estimée par comparaison à des mesures non utilisées dans l'interpolation (ie. n'ayant pas influencé le résultat).

# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation**

- Méthodes **déterministes**

- Basées uniquement sur les propriétés géométriques (sans tenir compte du phénomène physique)

- Méthodes **stochastiques**

- Basées sur une modélisation probabiliste du phénomène (géostatistique)  
Prise en compte de la structuration spatiale des données

- Méthodes **globales**

- Utilisation de tous les points d'échantillonnage disponibles pour générer des prévisions pour un point particulier

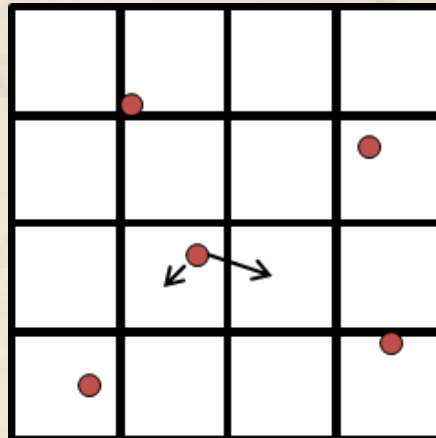
- Méthodes **locales**

- Prédiction en un point sur la base des valeurs des points du voisinage.



# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Méthode du Plus Proche Voisin ou Voisin Naturel
    - On attribue à chaque maille la valeur de l'échantillon le plus proche.
    - Méthode déterministe locale
    - Les hauteurs interpolées sont forcément à l'intérieur de la plage de valeurs utilisées
    - Sensibilité au bruit
    - Effet de « crénelage »



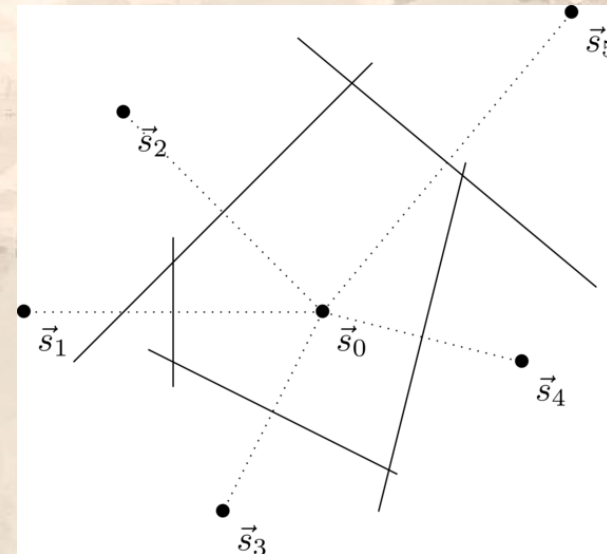
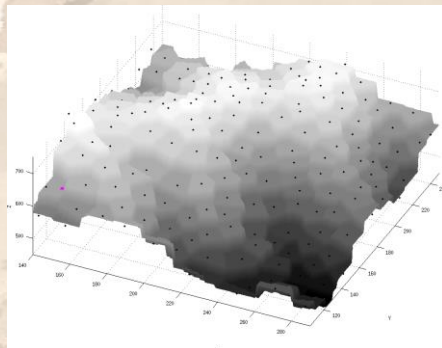
• Points d'échantillonnage

# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**

- Méthode de Thiessen

- On crée une famille de polygones convexes, appelés polygones de Thiessen (ou polygone de Voronoï ou cellules de Dirichlet) tels que chaque point du polygone est plus proche du point d'observation que de tout autre site.
    - On affecte à l'ensemble des points d'un polygone donné la valeur de la variable régionalisée correspondante
    - Effet de crénelage

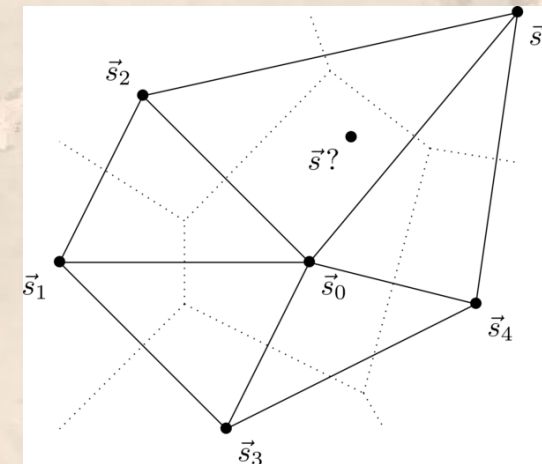


*Construction des polygones de Thiessen par tracé des médiatrices entre les échantillons (source : cours ENSG)*



# Représentation de la topographie

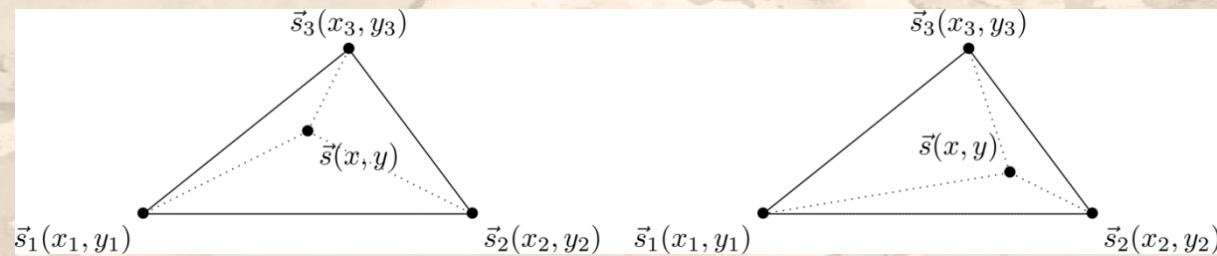
- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Interpolation à partir d'une triangulation : **triangulation de Delaunay**
    - Les sommets de chaque triangle sont les positions des échantillons tels que les polygones de Thiessen associés ont un côté commun
      - Les cercles circonscrits à chacun des triangles ne contiennent pas d'autres positions d'échantillonnage
      - Tous les points sont reliés à leur plus proche voisin
      - On opère uniquement dans l'enveloppe convexe des sites (pas d'extrapolation)



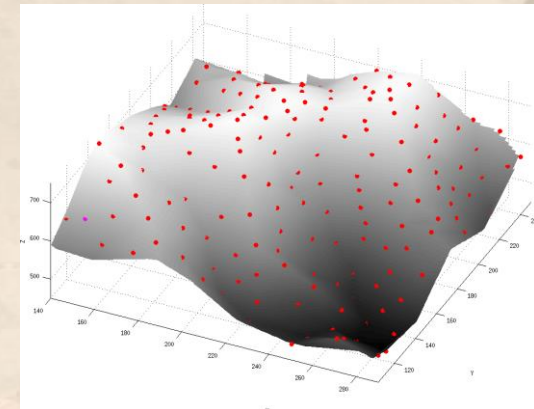
*Construction de la triangulation de Delaunay  
(source : cours ENSG)*

# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Interpolation à partir d'une triangulation : **triangulation de Delaunay**
    - Interpolation linéaire : la valeur en chaque point d'intérêt  $s(x,y)$  est le résultat d'une combinaison linéaire des valeurs des sommets
      - C'est la somme pondérée des aires des triangles formés par  $s, s_1, s_2, s_3$ .



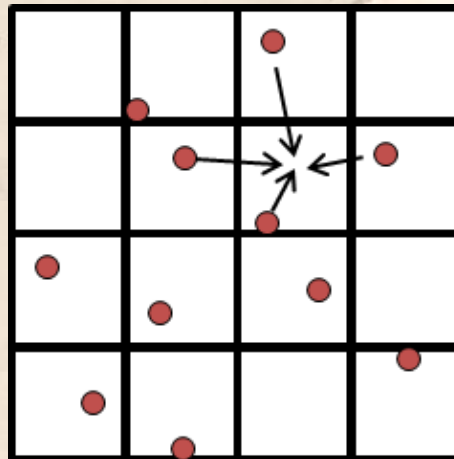
→ Estimation unique pour une triangulation donnée





# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Méthode d'interpolation bilinéaire
    - On attribue à chaque maille la valeur de la moyenne pondérée (par l'inverse de la distance) des 4 échantillons les plus proches.
    - Pas d'effet de « crénelage »
    - Fort lissage



• Points d'échantillonnage

# Représentation de la topographie

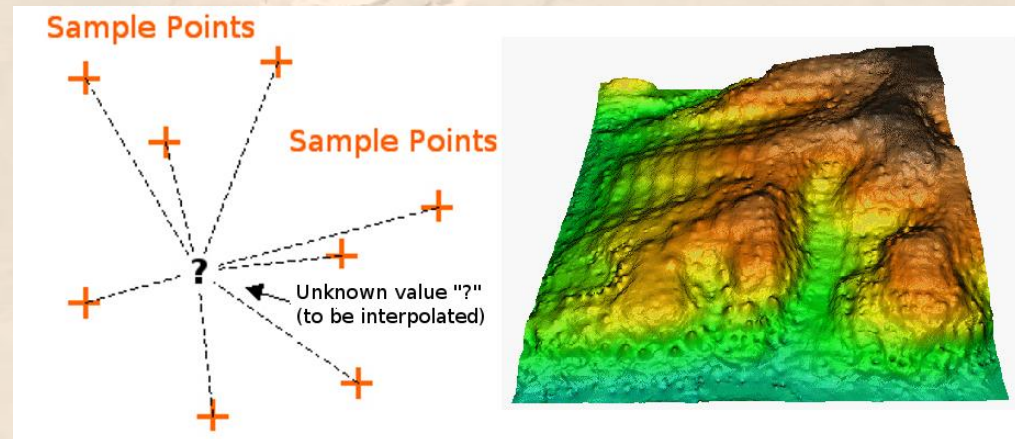
- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**

- Méthode barycentrique : Inverse des distances (**IDW**)

- Attribution d'un poids inversement proportionnel à la distance entre les échantillons et la maille à estimer.

$$\hat{z}(\vec{s}) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(\vec{s}_i)}{\|\vec{s}_i - \vec{s}\|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|\vec{s}_i - \vec{s}\|^p}}$$

- Proche de l'interpolation bilinéaire
    - Tendance à « surpondérer » les données groupées (alors qu'elles sont redondantes) => effets « d'œil de bœuf »...





# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**

- Méthodes d'ajustement par moindres carrés

- Inversion par moindres carrés → on cherche le paramétrage du modèle qui permet de minimiser la distance entre les valeurs aux points d'échantillonnage et les valeurs du modèle.

- La surface modélisée est de la forme :

- Où  $p$  : degré du polynôme ou « ordre » de la surface

- $\alpha_{i,j}$  : paramètres obtenus par minimisation de :

$$\hat{z}(\vec{s}) = \hat{z}(x, y) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^{p-i} \alpha_{ij} x^i y^j$$

$$\sum_{i=1}^n [\hat{z}(\vec{s}_i) - z(\vec{s}_i)]^2$$

- Le degré max. du polynôme dépend du nombre d'échantillons  $\frac{1}{2}(p+1)(p+2) \leq n$

# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Méthodes d'ajustement par moindres-carrés
    - Ecriture sous forme matricielle :

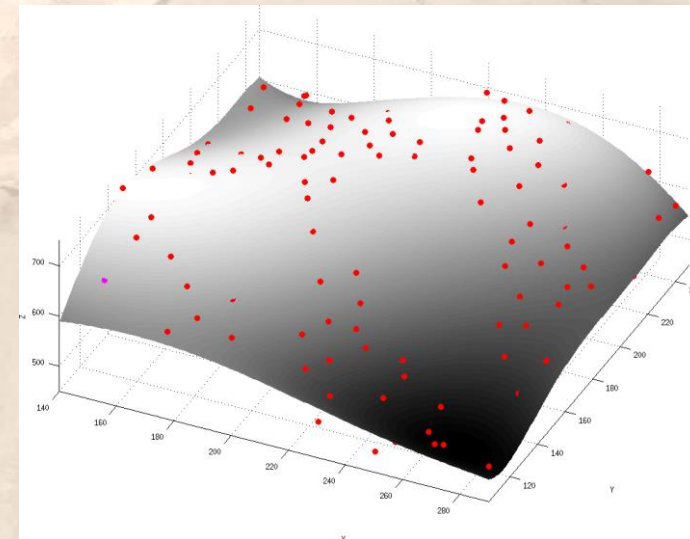
$$\begin{pmatrix} x_1^0 y_1^0 & \dots & x_1^0 y_1^p & x_1^1 y_1^0 & \dots & x_1^1 y_1^{p-1} & \dots & x_1^p y_1^0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_n^0 y_n^0 & \dots & x_n^0 y_n^p & x_n^1 y_n^0 & \dots & x_n^1 y_n^{p-1} & \dots & x_n^p y_n^0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_{0,0} \\ \vdots \\ \alpha_{0,p} \\ \alpha_{1,0} \\ \vdots \\ \alpha_{1,p-1} \\ \vdots \\ \alpha_{p,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}$$

Où

$n$  : nombre de points d'échantillonnage

$p$  : degré du polynôme ou « ordre » de la surface

$\alpha_{i,j}$  : paramètres obtenus par minimisation

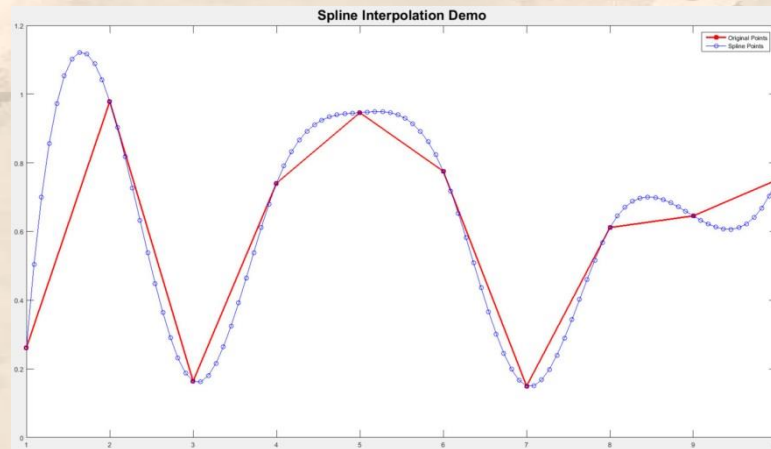


*Interpolation par une surface de tendance d'ordre 5*



# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation déterministes locales**
  - Méthode par Spline
    - Représentation de la surface par une « plaque mince et flexible »
    - Splines d'interpolation → passent exactement par les points d'observation
    - Splines de lissage → passent à proximité
  - Risque de distorsions de la surface (en particulier en l'absence de suffisamment de points d'observation)



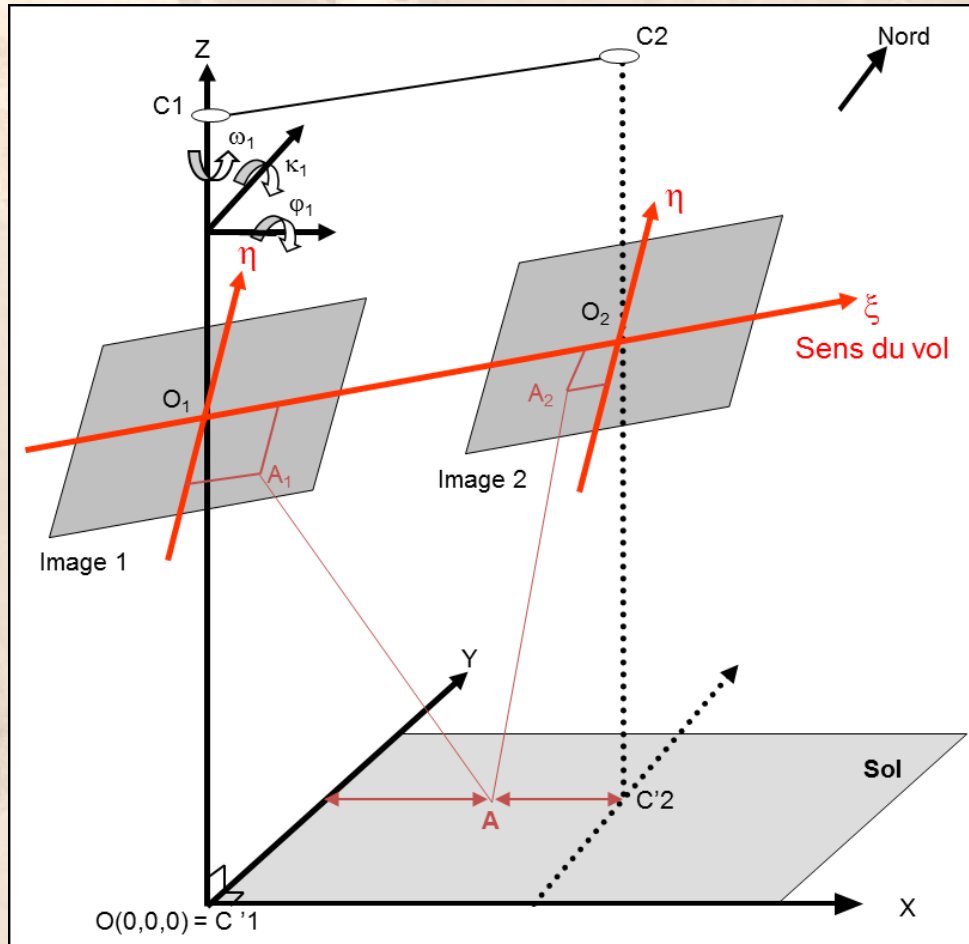
# Représentation de la topographie

- **Méthodes d'interpolation stochastiques**
  - Méthode de Krigeage
    - Méthode géostatistique qui utilise la structure spatiale du jeu de données pour déterminer des poids d'interpolation
    - 3 étapes:
      - Description des variations spatiales dans le jeu de données
      - Modélisation de **variogrammes** (analyse de la variabilité des données en fonction de la distance qui les sépare)
      - Utilisation de ce modèle pour déterminer des poids d'interpolation lors du calcul en chaque point de la surface interpolée.
  - On peut obtenir en un point d'échantillonnage une valeur différente de la valeur de la mesure.



# Mesures de topographie terrestre

## Mesures photogrammétriques – Principe



- Equations de la photogrammétrie

$$\begin{cases} x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$

$f$  : focale

$(x_0; y_0)$  : coord. images du point principal

$(X_0; Y_0)$  : coord. du centre de projection

$R = (r_{i,j})$  : matrice de rotation