

 INSTITUT GÉOMÉTRIQUE
NATIONAL

Les méthodes de géodésie terrestre : mesures d'angles, de distances, nivellement.

Michel KASSER
Chef du Service de Géodésie et
Nivellement
Directeur du LAREG, IGN



Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

 INSTITUT GÉOMÉTRIQUE
NATIONAL

Géodésie terrestre

- Historique des technologies employées
- La réfraction et son incidence sur les méthodes terrestres de géodésie.
- Les réseaux nationaux de triangulation
- Les réseaux nationaux de nivellement
- Emploi des réseaux nationaux traditionnels pour des études géophysiques

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

2 / 47



Les techniques de la géodésie

- Elles ont toujours été employées de façon opportuniste, par ré-emploi et appropriation de techniques ayant une autre destination,
- Elles ont toujours eu partie liée avec l'astronomie,
- Elles montrent de fortes ruptures de continuité, dues à certaines inventions : p. ex., travaux de Picard au XVII^{ème} siècle.



Le chorobate,
depuis
(au moins)
Vitruve

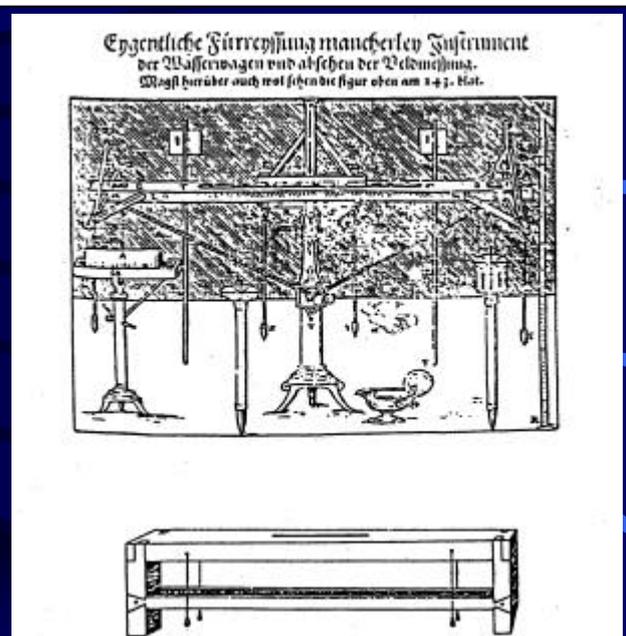


Fig. 5 — Le premier niveau automatique, celui conçu par Huygens (J. PICARD), *Traité du Nivellement*, Paris, 1684, fig. h.-t. p. 79). Centre Alexandre Koyré.

Fig. 6 — Niveaux automatiques conçus par Remer, en haut, et La Hire, en bas (J. PICARD), *Traité du Nivellement*, Paris, 1684, fig. h.-t. p. 90 et 96). Centre Alexandre Koyré.

5 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

Le niveau de haute précision de Picard

6 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



INSTITUT GEODÉSIE
FRANÇOIS NATIONAL

La réfraction en géodésie traditionnelle : un paramètre particulièrement important pour comprendre le passé.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

7 / 47



INSTITUT GEODÉSIE
FRANÇOIS NATIONAL

Réfraction : formules de base

- $c_0 = 299\,792\,458$ m/s dans le vide
- $n = c_0 / c$ est l'indice
- $N = (n - 1) \cdot 10^6$ est le co-indice
- La vitesse de groupe (modulation) est différente de la vitesse de phase :

$$N_g = N_f - \lambda \cdot dN_f/d\lambda$$
- Attention aux raies très fines !

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

8 / 47



Formules de base : Ondes lumineuses

$$N_{g0} = 287,6155 + \frac{4,886\ 60}{I^2} + \frac{0,068\ 0}{I^4}$$

pour $t = 0^\circ\text{C}$, $P_v = 0$, et une pression partielle de CO_2 de 375 ppm

$$N = \frac{273,15}{1013,25} \frac{P_a}{T} N_g - 11,27 \cdot \frac{P_v}{T}$$

9 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Ondes lumineuses

- $dN = -1.1 dT + 0.25 dP_a - 0.05 dP_v$
- Une erreur de 1 sur N ou de 1 ppm sur n est donc due, de façon équivalente, à une erreur de 1° ou de 4 mb.
- La pression de vapeur d'eau est pratiquement sans aucune incidence au niveau de 1 ppm

10 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Les formules de base

Ondes radio

$$N_f = N_g = 77,695 \frac{P_a}{T} + 71,97 \frac{P_v}{T} + 375406 \frac{P_v}{T^2}$$

$$dN = 1,4 dT + 0,3 dP_a + 6 dP_v$$

11 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Ondes radio

- $dN = 1,4 dT + 0,25 dP_a + 6 dP_v$
- Une erreur de 1 sur N ou de 1 ppm sur n est donc due, de façon équivalente, à une erreur de $0,7^\circ$ ou de 4 mb.
- La pression de vapeur d'eau a ici une importance majeure

12 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Échanges de chaleur Soleil-sol

- L'énergie venant du soleil (de l'ordre du kW par m²) provoque surtout deux phénomènes :
 - Évaporation de l'eau disponible
 - Réchauffement de l'air par convection
- Ceci explique la variabilité de T et de P_v près du sol. Notion de couche limite.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

13 / 47

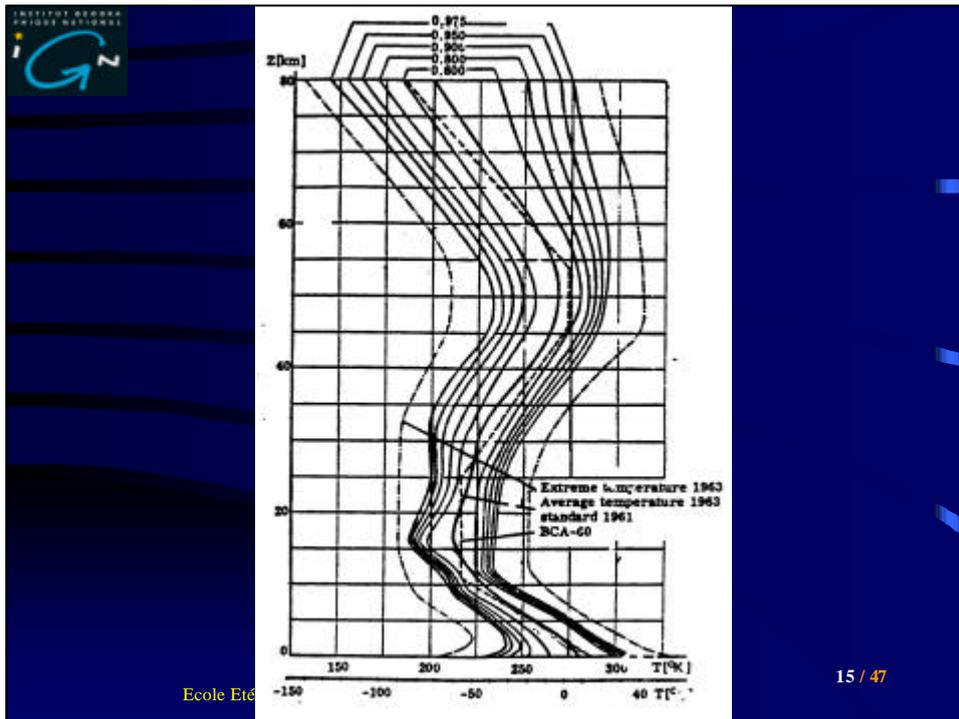


La température

- La température se comporte comme une variable aléatoire près du sol, et plus généralement dans la couche limite.
- Au delà de la couche limite, la température est une fonction beaucoup plus régulière de l'altitude (6° par km en moyenne jusqu'à 10 km).

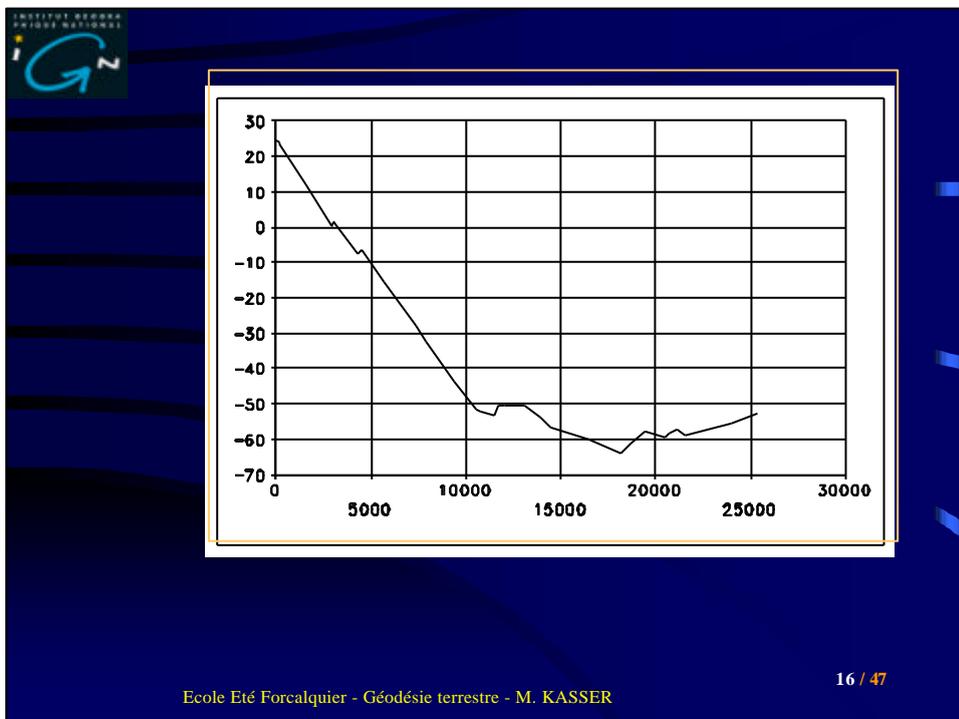
Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

14 / 47



Ecole Eté

15 / 47



Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

16 / 47

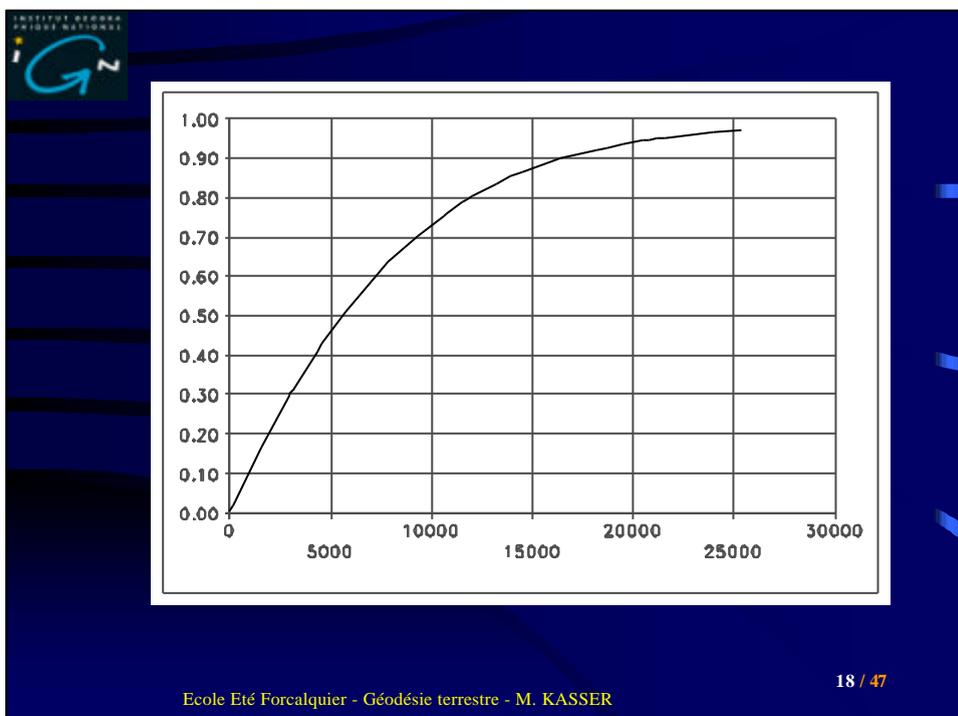
IGN
INSTITUT GÉOMÉTRIQUE
NATIONALE

La pression

- La pression se comporte comme une fonction très régulière de l'altitude
- En nivellement barométrique (pourtant en plein dans la couche limite) on atteignait aisément des précisions de 1m sur les dénivelées, sur de grandes distances : la pression est donc « régulière » au niveau de 0.1 mb sur 100 km en conditions courantes

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

17 / 47





La pression de vapeur d'eau

- Comprendre le phénomène P_s
 - nuage stationnaire sur un relief
- Comment mesurer P_v ?
 - T_h est fonction seulement de P_v et de T
 - Psychromètres
 - Mesure du point de rosée : comprendre le phénomène de formation de la buée sur une vitre froide.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 19 / 47

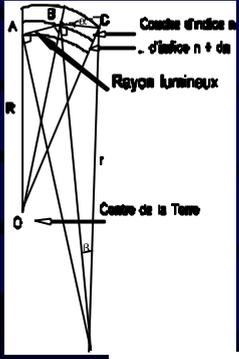


La pression de vapeur d'eau

- La pression de vapeur d'eau est une variable aléatoire, aussi bien dans que hors de la couche limite.
- Mais $P_v < P_s$, pression de vapeur saturante, et P_s est une fonction fortement croissante de la température.
- Donc en altitude, P_v est toujours très faible : les problèmes sont surtout dans les premiers kilomètres, et dans les climats chauds.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 20 / 47

La réfraction



- C'est l'étude des changements de directions des rayons dus aux gradients d'indice de réfraction
 - température et pression pour la lumière
 - en outre, P_v pour les ondes radio.
- On définit le coefficient de réfraction $k = R / r$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \sin a$$

$$\frac{1}{r} \approx \frac{dn}{dh}$$

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 23 / 47

La réfraction

$$k = \frac{R}{r} = R \cdot \frac{dn}{dh} = R \cdot 10^6 \cdot \frac{dN}{dh}$$

$$= R \cdot 10^6 \left(-1,1 \frac{dT}{dh} + 0,25 \frac{dP_a}{dh} - 0,05 \frac{dP_v}{dh} \right)$$

Les phénomènes sont donc complètement différents selon l'altitude :

- Dans la couche limite, les courbures sont majoritairement dues aux gradients thermiques: elles sont donc très fortes et irrégulières.
- Au delà de la couche limite, les courbures sont majoritairement dues au gradient de pression, qui est très régulier

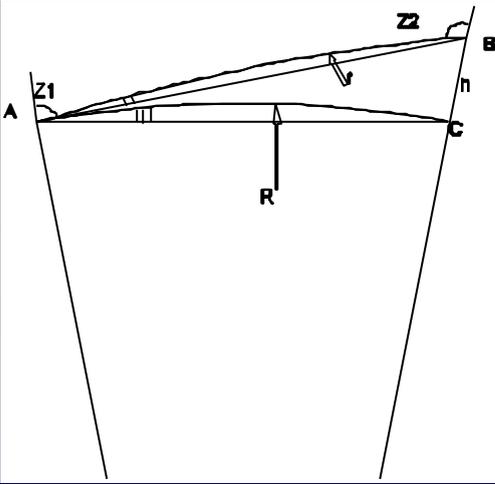
Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 24 / 47

La réfraction

- En haute atmosphère, $k = 0.12$ (lumière) ou 0.25 (ondes radio), valeurs moyennes et susceptibles d'assez fortes variations : réfraction « géodésique », bien documentée
- Près du sol k est aléatoire, et le phénomène est très mal documenté. La seule certitude d'ordre expérimental (Nivellement Trigonométrique Motorisé) est qu'un rayon lumineux sur quelques centaines de mètres est bien modélisé par un arc de cercle, même près du sol.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 25 / 47

La réfraction



$$h = D \frac{\sin \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2} \right)}{\cos \frac{D_0}{2R}} \approx D \sin \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2} \right)$$

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 26 / 47



La réfraction

- Le cas du nivellement par méthodes terrestres est exemplaire de la lutte des topographes contre la réfraction. Puisque l'effet de courbure est proportionnel au carré de la distance :
 - Nivellement direct : visées courtes, k inconnu,
 - Nivellement trigonométrique par zénithales réciproques et simultanées : on mesure k

27 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



La réfraction

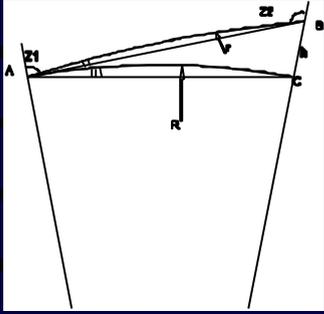
La situation est très variable en nivellement direct :

- Terrain plat, l'égalité des distances A_v-A_r élimine bien les effets de la réfraction
- Terrain en pente forte, la distance de visée est très courte, les effets différentiels de la réfraction entre A_v et A_r sont très modestes.
- Terrain en pente moyenne, les distances sont longues \rightarrow c'est là que les effets de réfraction sont les pires.

28 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

La réfraction



- En mesures géodésiques terrestres, notons encore que le coefficient k peut être mesuré de deux façons complètement différentes et indépendantes. On peut en tirer un premier niveau de validation des mesures utilisées.

$$k_1 = R \frac{n_1 - n_2}{h_1 - h_2}$$

$$k_2 = 1 + \frac{R}{D} (p - Z_1 - Z_2)$$

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 29 / 47

Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- Une traversée verticale = 8 atm.km
- Pour une mesure complète de l'atmosphère (géodésie spatiale), la correction due à la partie sèche offre un résultat inattendu : le seul paramètre important dans le résultat est la pression au sol

$$L_0 = \int_{s_0}^{s_1} n(s).ds$$

$$\Delta L = \int_{h_0}^{\infty} N(h).dh$$

?L = f(a) . ?L_{vertical}

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 30 / 47

 Institut Géographique National

Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- En régime stationnaire :
 - $P_a = \rho(h) \cdot R \cdot T(h)$
 - $dP(h) = -\rho(h) \cdot g(h) \cdot dh$

$$\Delta L_d = \int_{h_0}^{\infty} A \frac{P_a}{T} \cdot dh$$

$$\Delta L_d = \int_{h_0}^{\infty} \frac{dP(h)}{g(h)} \cdot A \cdot R$$

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 31 / 47

 Institut Géographique National

Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- Avec $g(h) = g_0 / (1 + 2 \cdot h/r_0)$,

$$\Delta L_d = \frac{A \cdot R \cdot P_0}{g_0} \left(1 + \frac{2 \cdot R \cdot b}{\frac{r_0}{T_0} \cdot b \cdot (g_0 + R \cdot b) - 2g_0} \right)$$

- (β est le gradient de T). Pour $P_0 = 1000$ mbar, $\Delta L_d = 2,3$ mètres

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 32 / 47



Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- Donc, *en régime stationnaire*, on trouve que la correction de vitesse pour une traversée verticale complète de l'atmosphère sèche ne dépend presque que de la pression au niveau du sol.
- Mais pour des visées basses sur l'horizon, les phénomènes de courbure, surtout pour des ondes radio, induisent d'autres sources d'erreurs qu'on ne peut pas ignorer

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

33 / 47



Les réseaux français de géodésie : NTF, RGF 93

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

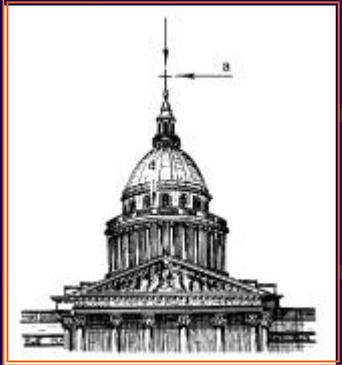
34 / 47

IGN Institut National de l'Information Géographique et Cadastre

Depuis un siècle : La « Nouvelle » Triangulation de la France

- Système de référence : NTF
 - Bidimensionnel
 - Point fondamental : Paris-Panthéon

Ellipsoïde : CLARKE 1880 IGN
 $a = 6\,378\,249.2$ m
 $b = 6\,356\,515.0$ m
 Méridien origine Paris-Observatoire
 ($2^{\circ}20'14.025''$ E de Greenwich)

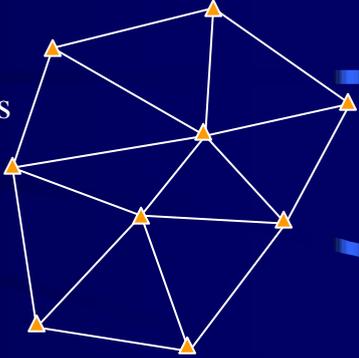


Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 35 / 47

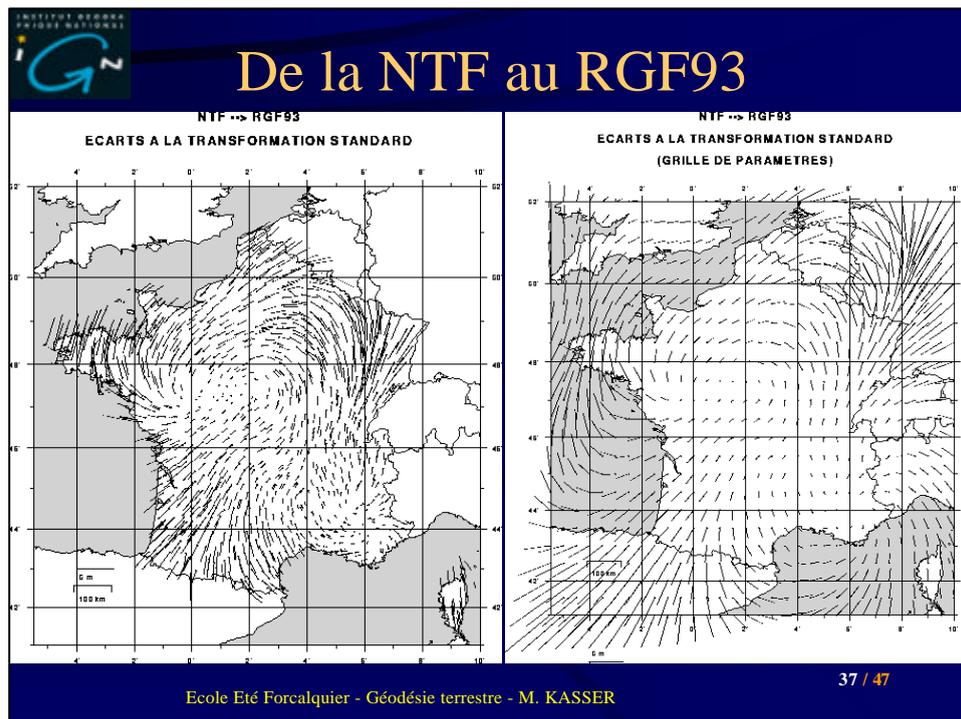
IGN Institut National de l'Information Géographique et Cadastre

La NTF

- Système de coordonnées
 - longitudes, latitudes en grades
 - Projection : X, Y
 - Lambert I, II, III et IV
 - Lambert II étendu
- Accès
 - Réseau de 80 000 points
 - En quatre ordres de précision équivalente
- **Précision : 10^{-5} (soit 1cm par km)**



Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER 36 / 47



**INSTITUT GÉOMÉTRIQUE
NATIONAL**

De la NTF au RGF93

- Un changement complet de modèle d'erreur du réseau = changement culturel complet pour les professionnels = extrême difficulté...
- Gros travail de vulgarisation nécessaire !
- Les textes officiels d'accompagnement prennent une grande importance. En France, arrêté de 2001, et reprise complète de l'arrêté de 80.

38 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



De la NTF au RGF93

- L'arrêté de janvier 2001 spécifie les cas d'obligation d'emploi du RGF 93 et Lambert 93. Il vise à faciliter la synergie entre données d'origines diverses.
- L'arrêté en préparation sur les précisions des levés supprime toute spécification de moyens, et précise les outils à employer pour spécifier des résultats.

39 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



3 accès à la référence officielle :

Ces accès sont tous cohérents :

- NTF recalculée : 80 000 sites, **emq = 5 cm**
- Réseau de Base Français (RBF) : 1032 sites, **emq = 2 cm**. Dans 5 ans, de l'ordre de 5 mm
- Réseau GPS permanent (RGP), **emq = 5 mm** voire mieux.

40 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



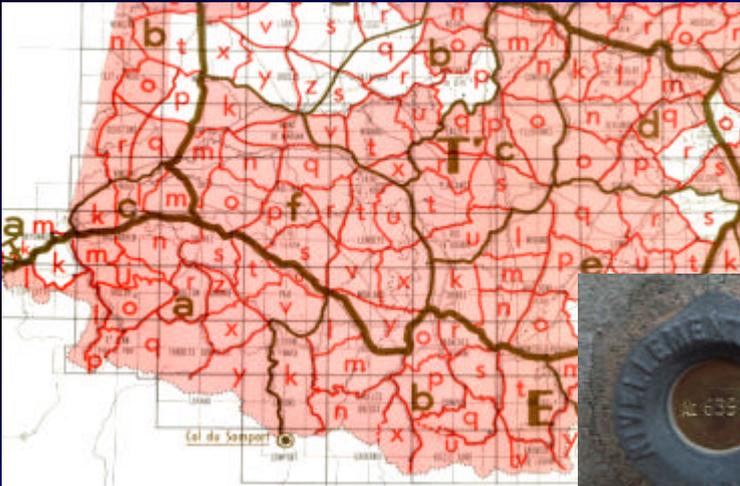
Le réseau français de nivellement : le NGF

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

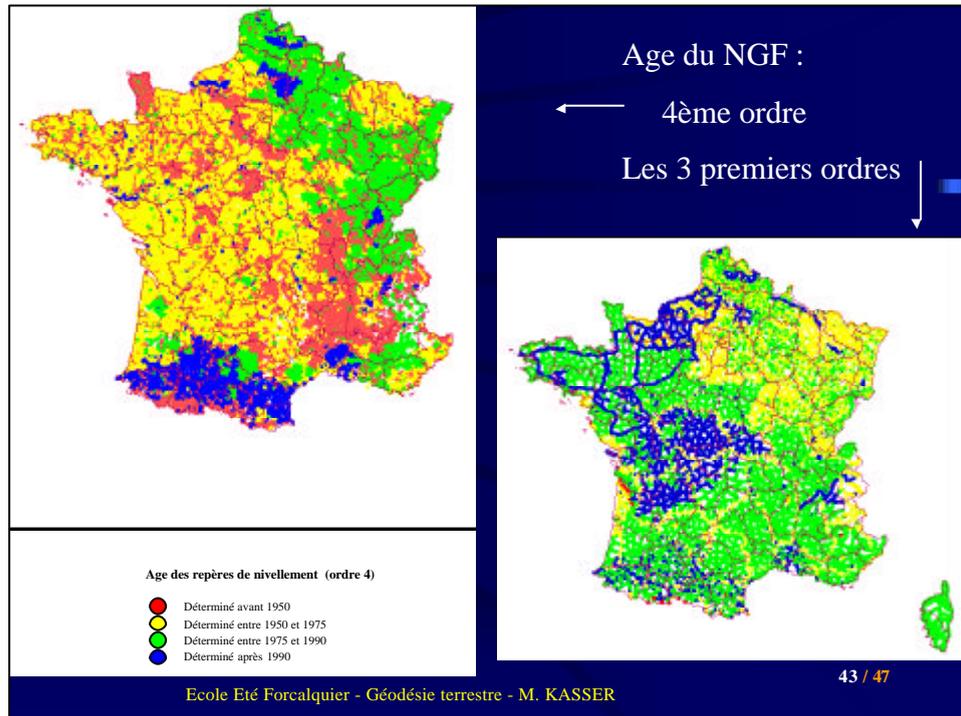
41 / 47



En France, le NGF : 450 000 repères avec une histoire de plus de 150 ans



Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



INSTITUT GÉOMÉTRIQUE
NATIONAL

IGN

Attentes des usagers pour le NGF

- 1/ Quels sont les usages actuels du NGF ?
 - Écoulements gravitaires des eaux,
 - Cadastres urbains 3D complexes,
 - Accompagnement légal de lois environnementales (eau, montagne, littoral, ...)

44 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Attentes des usagers du NGF

- 2/ Pourquoi le NGF est conçu ainsi ?
 - Processus d'observation ancien, qui requiert une densité régulière de repères, le long des voies.
 - Ordres successifs nécessités par les difficultés anciennes de compensations par moindres carrés.
 - Résultat : la surface d'altitude zéro (SAZ) est particulièrement complexe.

45 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Attentes des usagers pour le NGF

- 3/ Quelles seraient dans ces conditions les spécifications d'un NGF qu'on reprendrait de zéro aujourd'hui ?
 - Les observations devraient être bien moins onéreuses que le nivellement direct.
 - Permettrait des mesures GPS
 - Devrait suivre la densité de population
 - Aucun besoin d'être le long des routes

NIVAG : la réponse actuelle à ces attentes

46 / 47

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER



Emploi en géophysique

- Historiquement, dès la fin des années 60, premières mesures directes des mouvements tectoniques (p. ex. Djibouti, Mexique).
- Actuellement, les réseaux nationaux anciens sont comparativement peu précis, mais permettent d'embrasser une période de temps très importante (jusqu'à 150 ans). Et PVA depuis 60 ans.
- Il est donc nécessaire de bien connaître leurs modèles d'erreurs.

Ecole Eté Forcalquier - Géodésie terrestre - M. KASSER

47 / 47