



I CONGRESO
INTERNACIONAL
SOBRE LA TRAVESÍA
FERROVIARIA POR EL
PIRINEO CENTRAL

Ier CONGRÈS
INTERNATIONAL
SUR LA TRAVERSÉE
FERROVIAIRE DES
PYRÉNÉES CENTRALES

I INTERNATIONAL
CONGRESS
ON THE CENTRAL
PYRENEES RAILWAY
CROSSING

Évolution de la construction des tunnels en montagne *cas particulier des Pyrénées*

Olivier VION, Ingenieur Conseil, AFTES

Pierre DUFFAUT, Ingenieur Conseil, AFTES

Su cargo



Grandes Infraestructuras Europeas - Grandes Infraestructures Européennes - Large European Infrastructures

ZARAGOZA (España), 29/31 Octubre 2008 - SARAGOSSE (Espagne), 29/31 Octobre 2008 - ZARAGOZA (Spain), 29/31 October 2008



Évolution de la construction des tunnels en montagne

Introduction : des tunnels pour quoi faire ?

- **Les Pyrénées**, géographie des passages et succession de leurs aménagements
- **Grands tunnels**, alpins et pyrénéens
- **Les galeries hydroélectriques**, une expérience qui ne peut être négligée

Quelques conclusions pour des tunnels ***très longs et très profonds***

Introduction

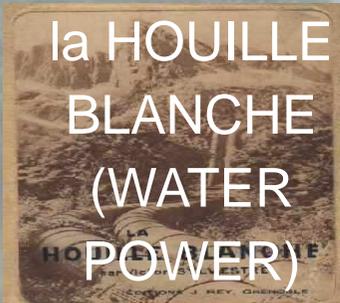
des tunnels pour quoi faire ?

l'eau, d'abord



consommation
agriculture
industrie
assainissement

l'énergie



la HOUILLE
BLANCHE
(WATER
POWER)

quelques autres usages dont maîtrise des crues, de l'érosion, et des glaciers

la circulation



la route (Napoli-Pozzuoli)
le rail (Terrenoire, Liverpool)
route moderne
grande vitesse sur rail

la navigation



le Malpas, France, 1680
UK, nombreux tunnels
dont Harecastle, 1766-
77



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

4



30/10/2008

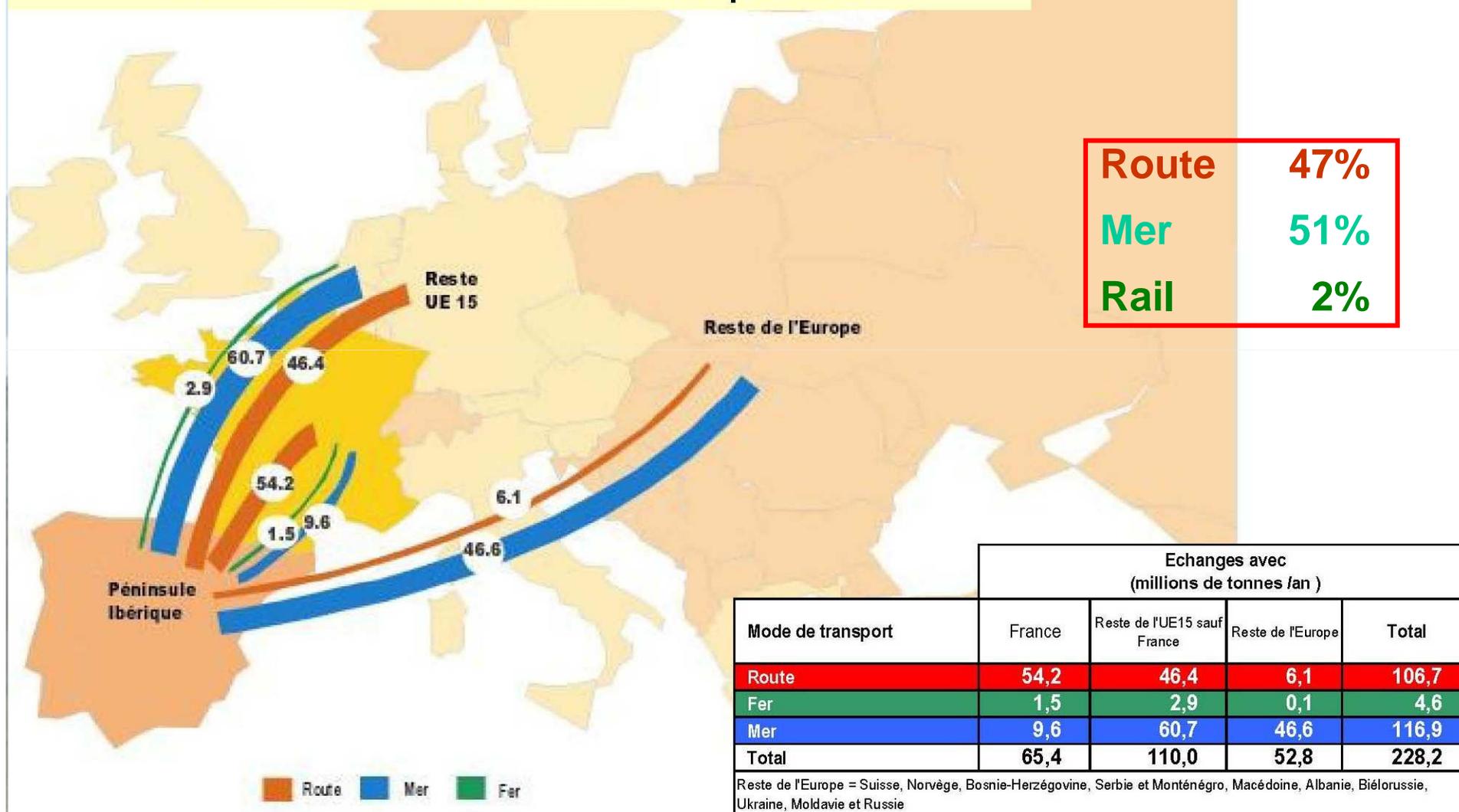
Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

5

Flux Péninsule ibérique – reste Europe

Distribution trafics marchandises 2004 par mode



Le tunnel de la Traversette

en 1480, afin de faciliter le passage de mulets, le **Marquis de Saluces** fait percer un "Pertuis" à travers la crête sommitale des Alpes, près du Mont Viso

tunnel non revêtu,
- longueur 75 m,
- largeur 2,5 m,
- hauteur 2 m.

à 2850 m d'altitude,
il est considéré comme
**le plus ancien tunnel
à travers les Alpes**



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

7

Mont Cenis

11 septembre 1871

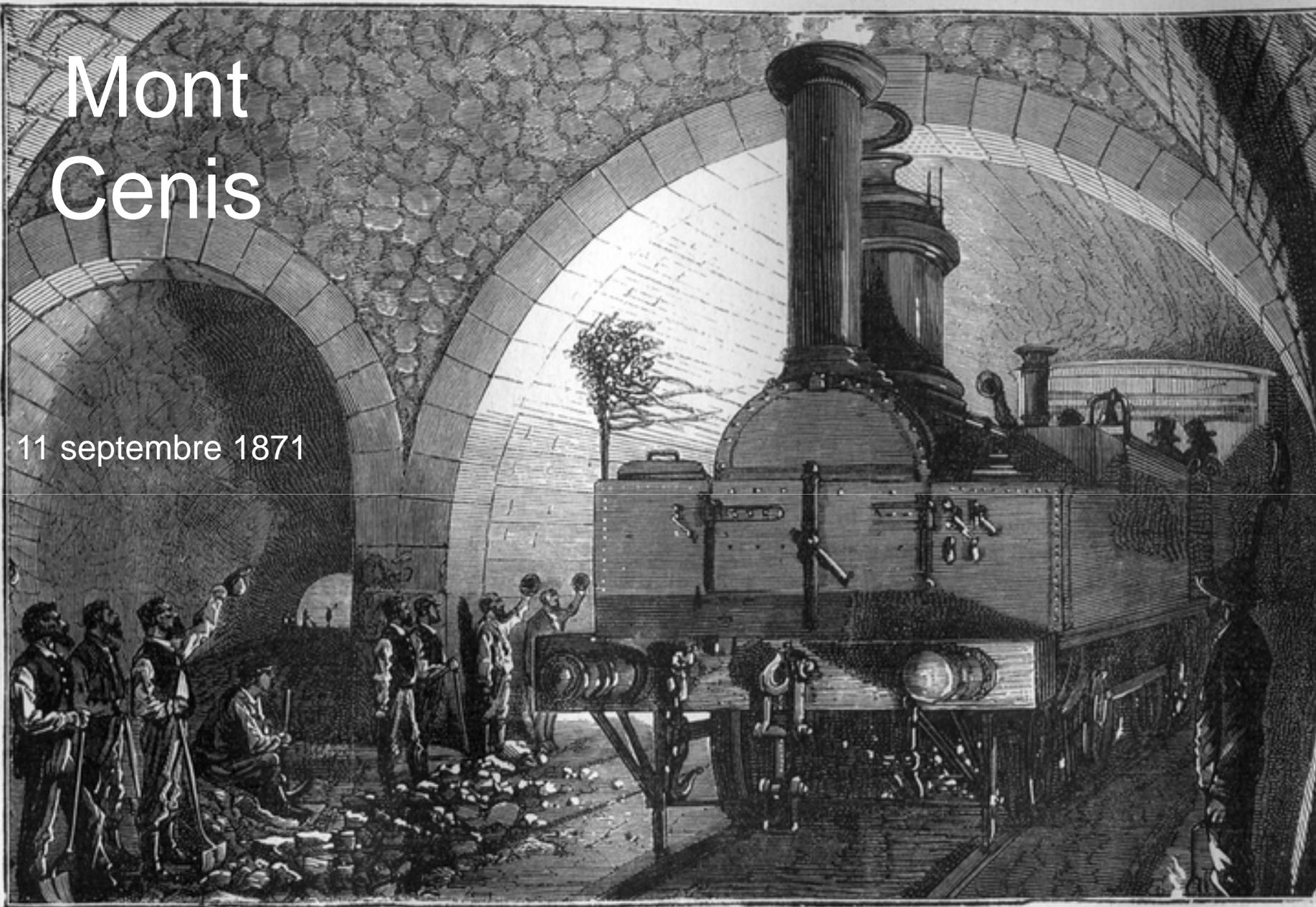


FIG. 56. — ARRIVÉE A MODANE DE LA LOCOMOTIVE AMENANT LES INVITÉS DU GOUVERNEMENT ITALIEN (17 SEPTEMBRE 1871),

Mont Cenis

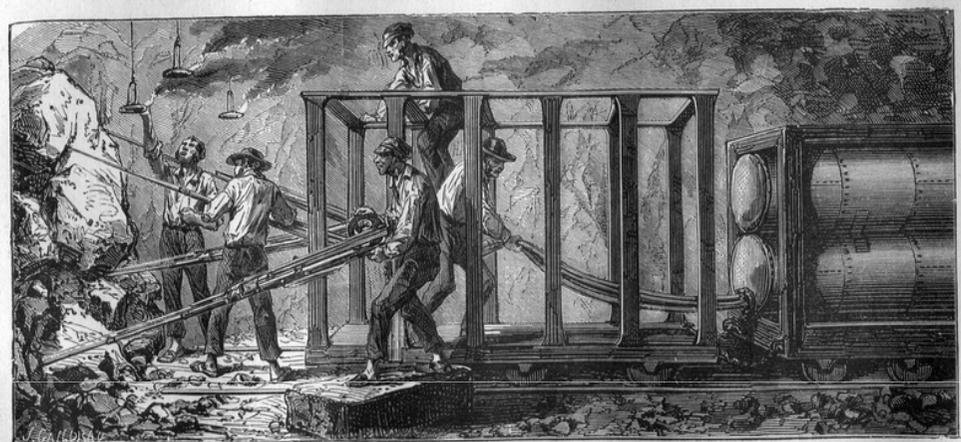
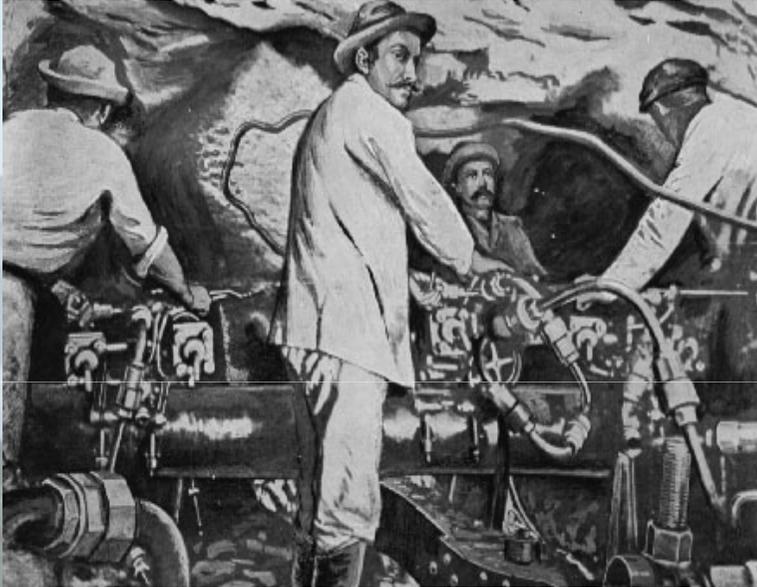
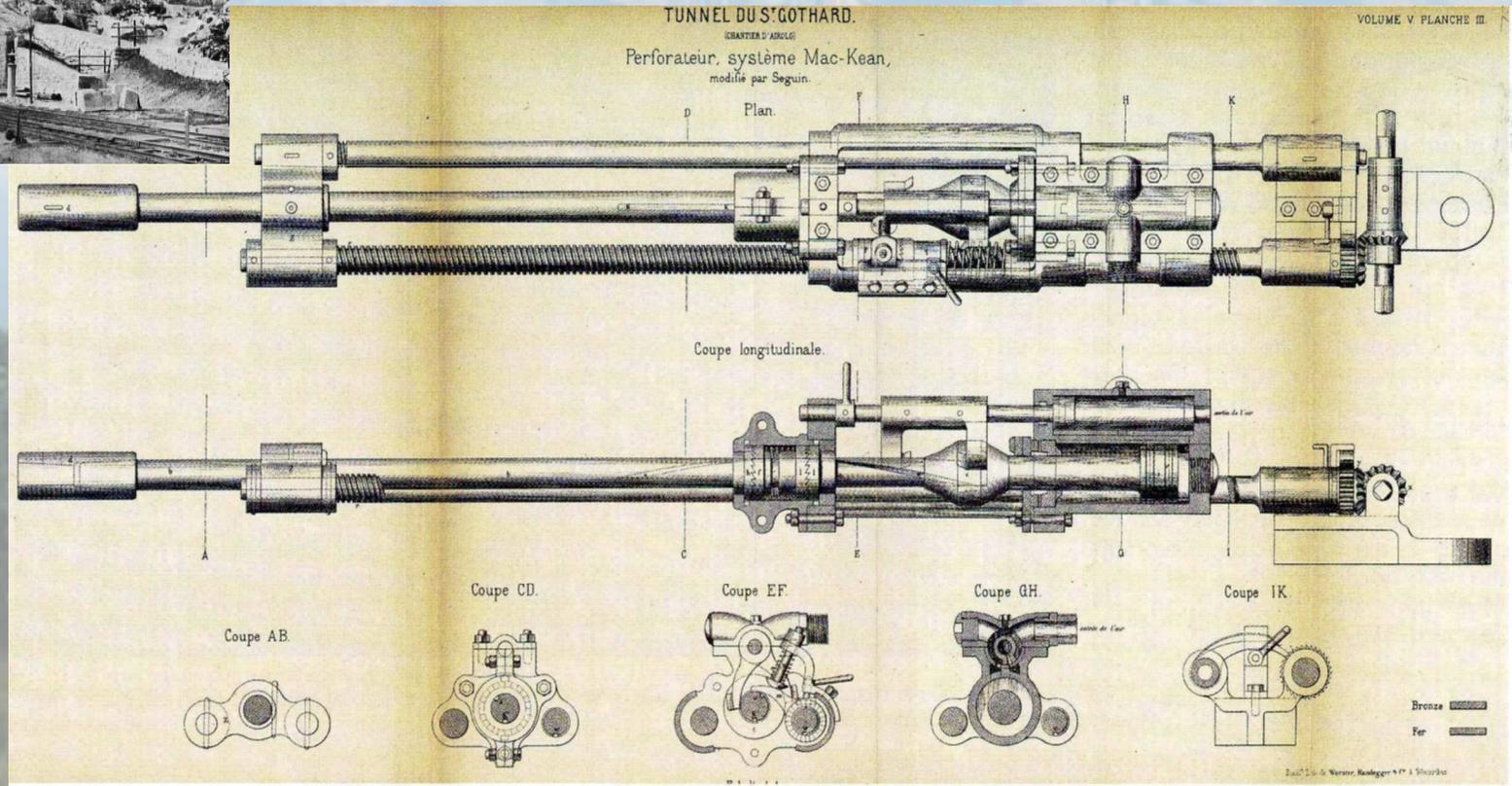
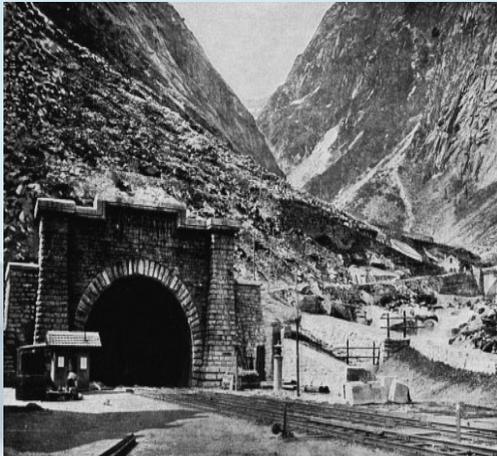
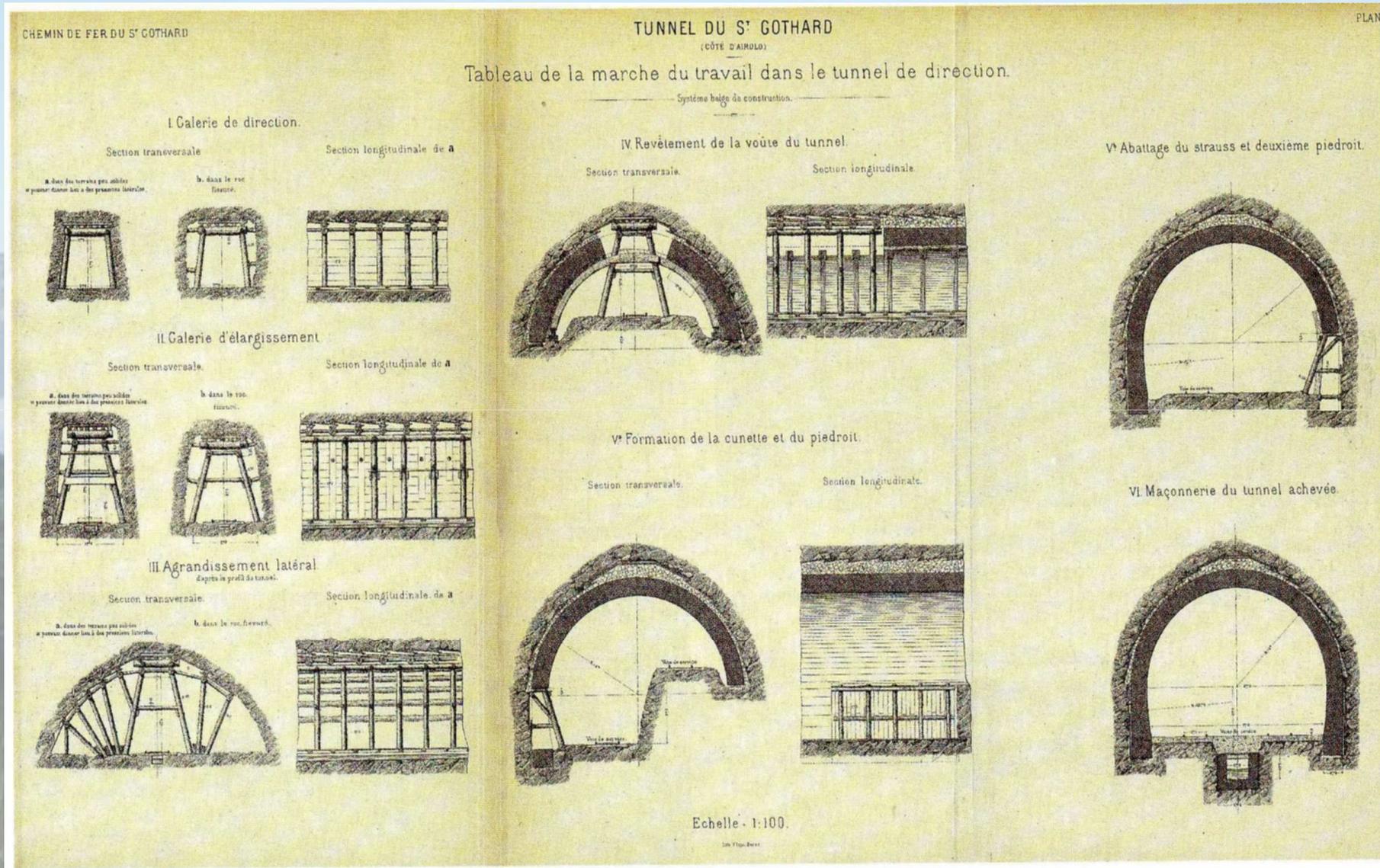


FIG. 36. — LA MACHINE PERFORATRICE DE GERMAIN SOMMEILLER ET LES RÉSERVOIRS D'EAU COMPRIMÉ, SERVANT À NETTOYER LES TROUS CREUSÉS PAR LES FLEURETS

Le Gothard ferroviaire



Le Gothard ferroviaire



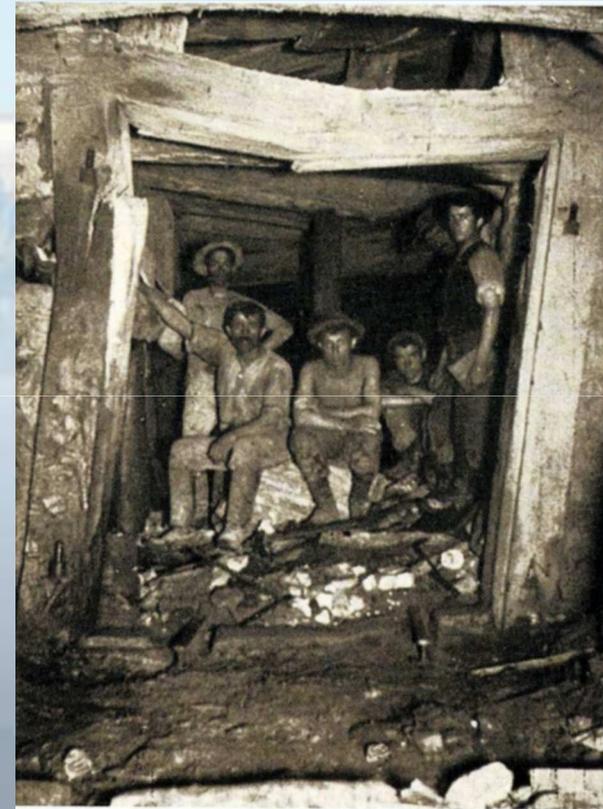
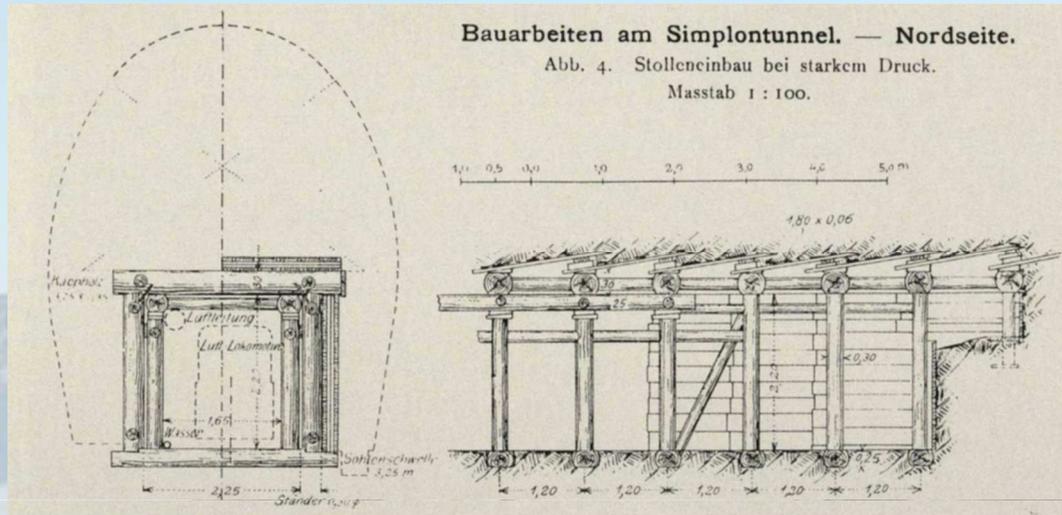
30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

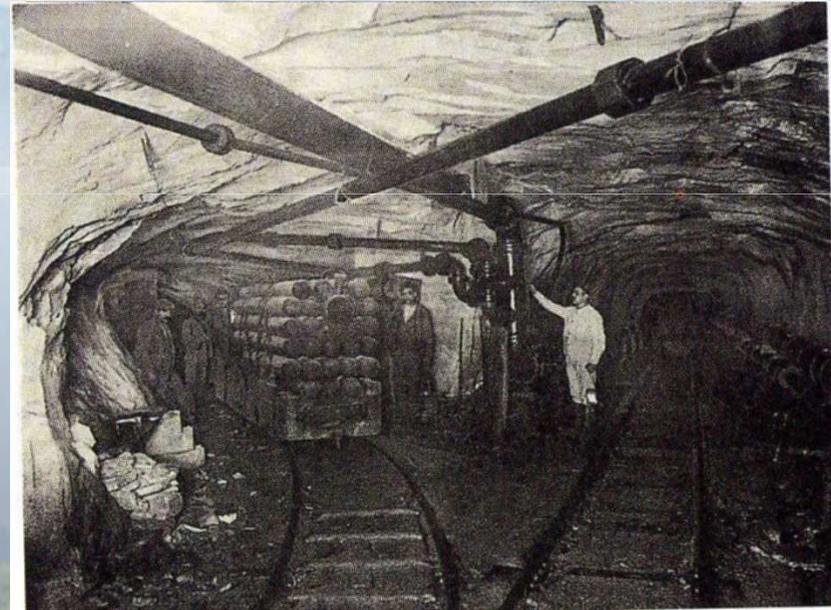
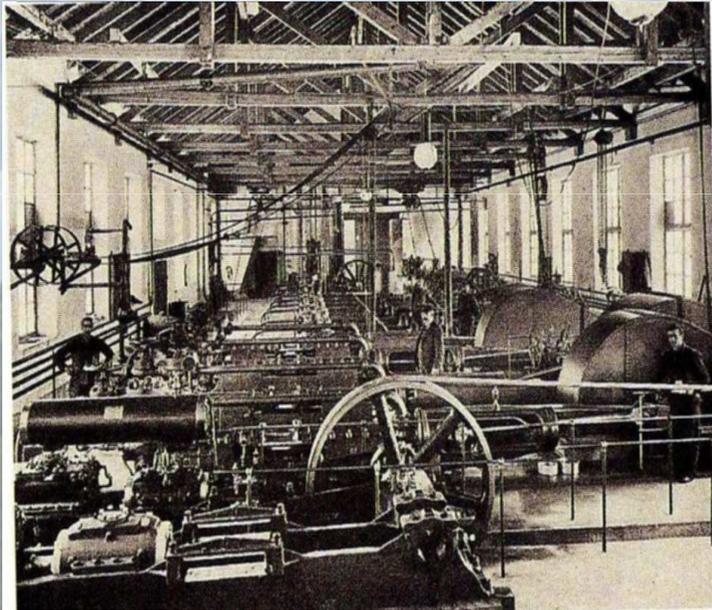
1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

11

Le Simplon



Le Simplon



Les tunnels autrichiens



Tauern



Arlberg

Comparaison de quatre grands tunnels suisses de la première génération

	Gothard fer	Simplon	Lötschberg	Goth. route
longueur m	14 982	19 803	14 605	16 322
section m ²	56,8	49,6	57,6	101,2
volume m ³	847 870	990 000	838 969	1 661 000
durée mois	111	96	66	124
Avancement*	4,47 m/d	6,9	7,33	5,7
coût MFS	66,67	78	50,3	686
effectif max.	3874	3420	3250	700
acc. mortels	177	67	64	17

* Les deux attaques cumulées KOVARI K., FECHTIG R., 2000, Percements historiques de tunnels alpins en Suisse

Tunnel routier Tende



30/10/2000

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

18

Tunnel du Mont Blanc



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

19

Tunnel du Mont Blanc



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

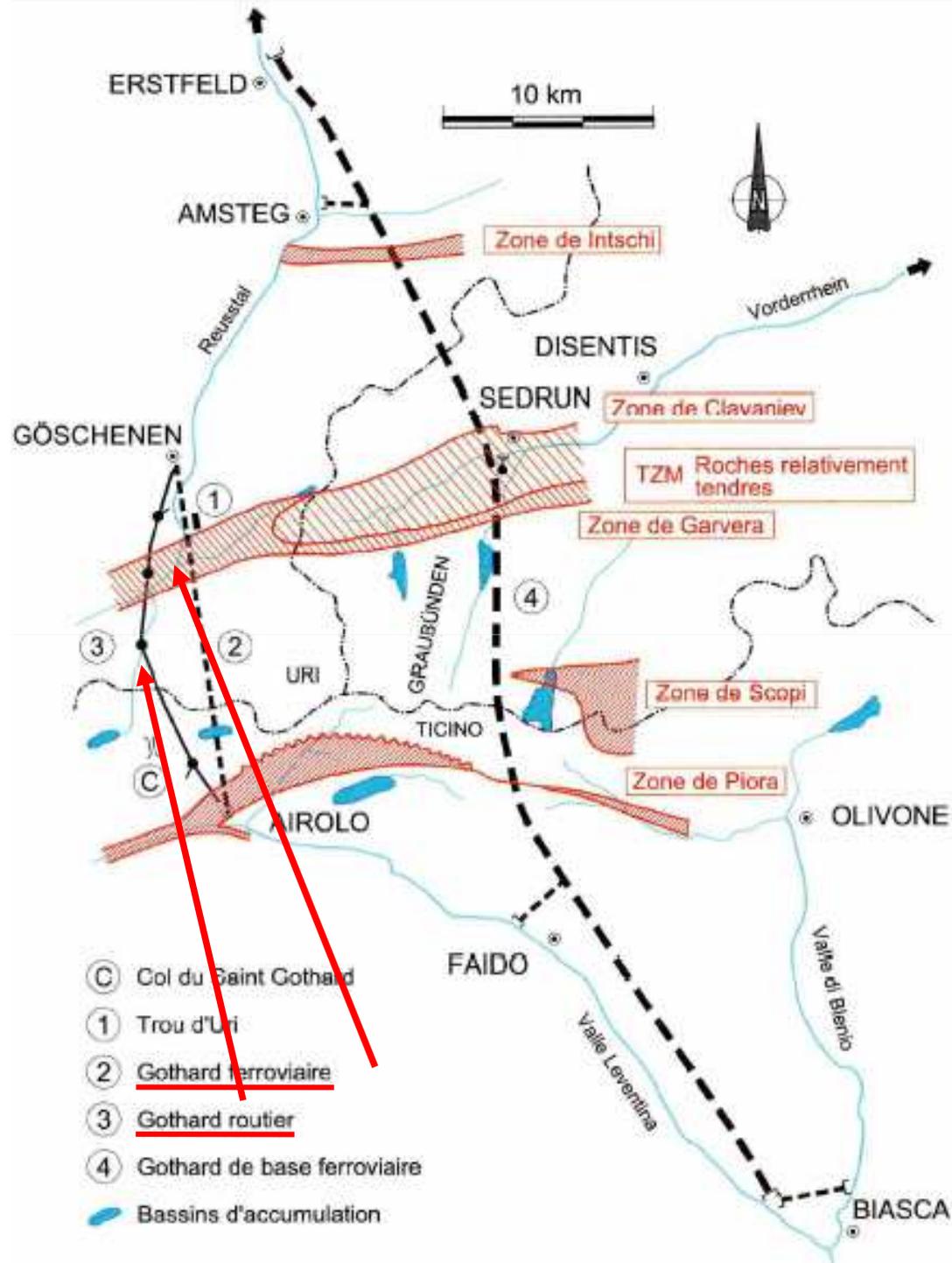
1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

20

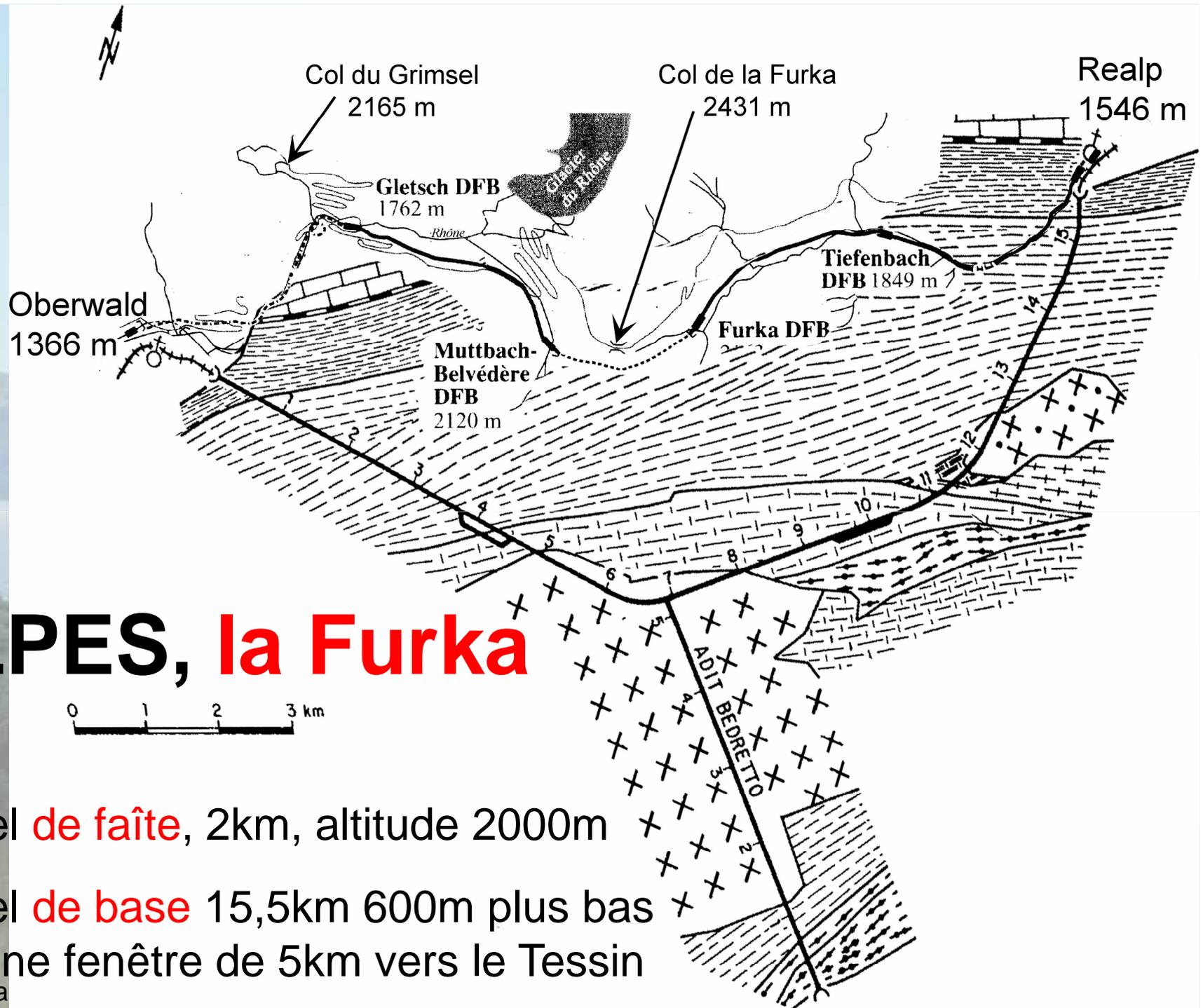


le Gothard

- Par rapport au **Gothard 1**, tunnel **ferroviaire de faîte**, atteint grâce à de nombreux lacets et tunnels hélicoïdaux, parfaitement rectiligne,
- le **Gothard 2**, tunnel **roucier**, est dévié vers l'ouest pour bénéficier de puits d'aération le long de la vallée, pour la route, c'est un tunnel de base à la même altitude que le ferroviaire ;

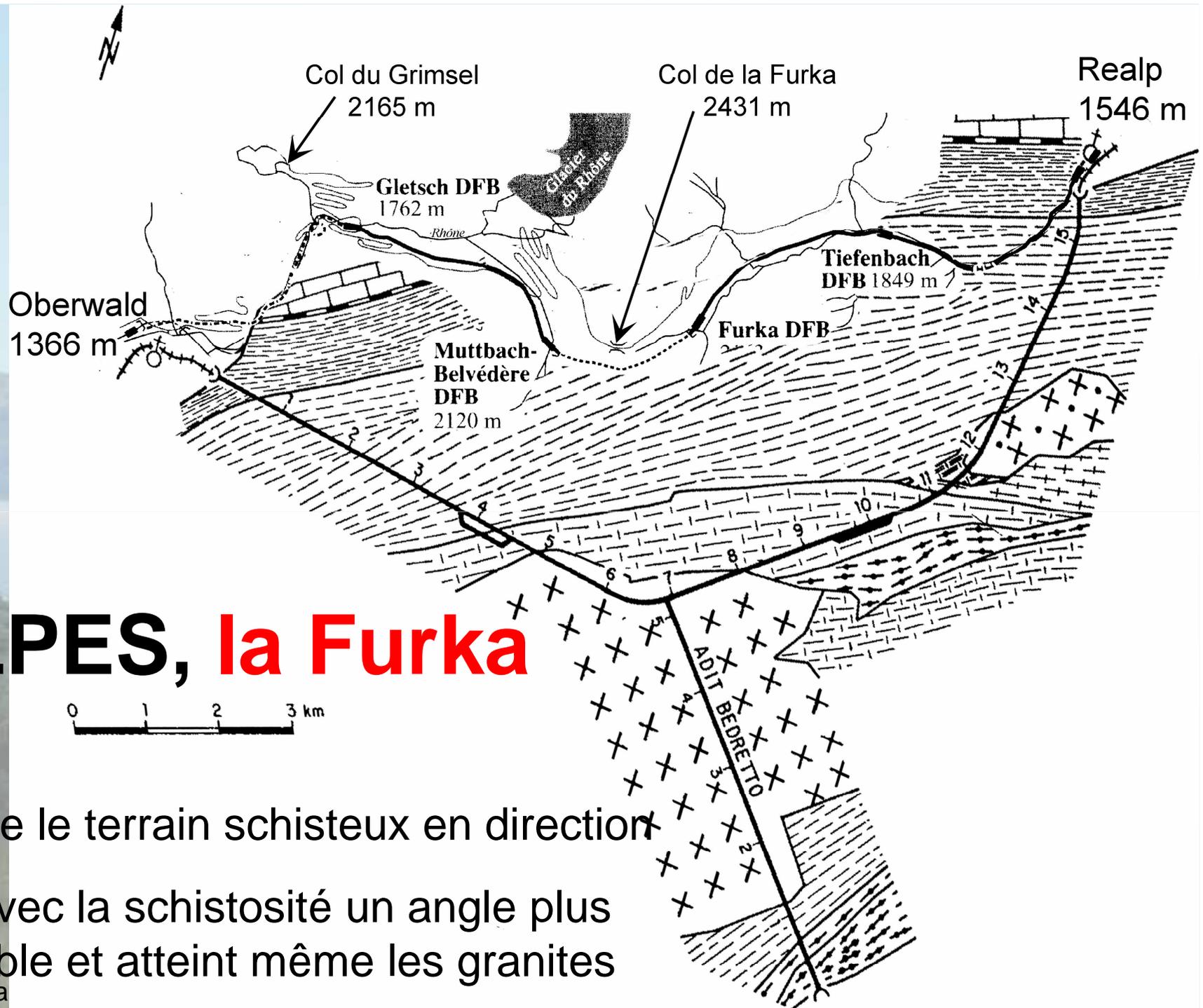






ALPES, la Furka

- tunnel **de faîte**, 2km, altitude 2000m
 - tunnel **de base** 15,5km 600m plus bas
- avec une fenêtre de 5km vers le Tessin



ALPES, la Furka

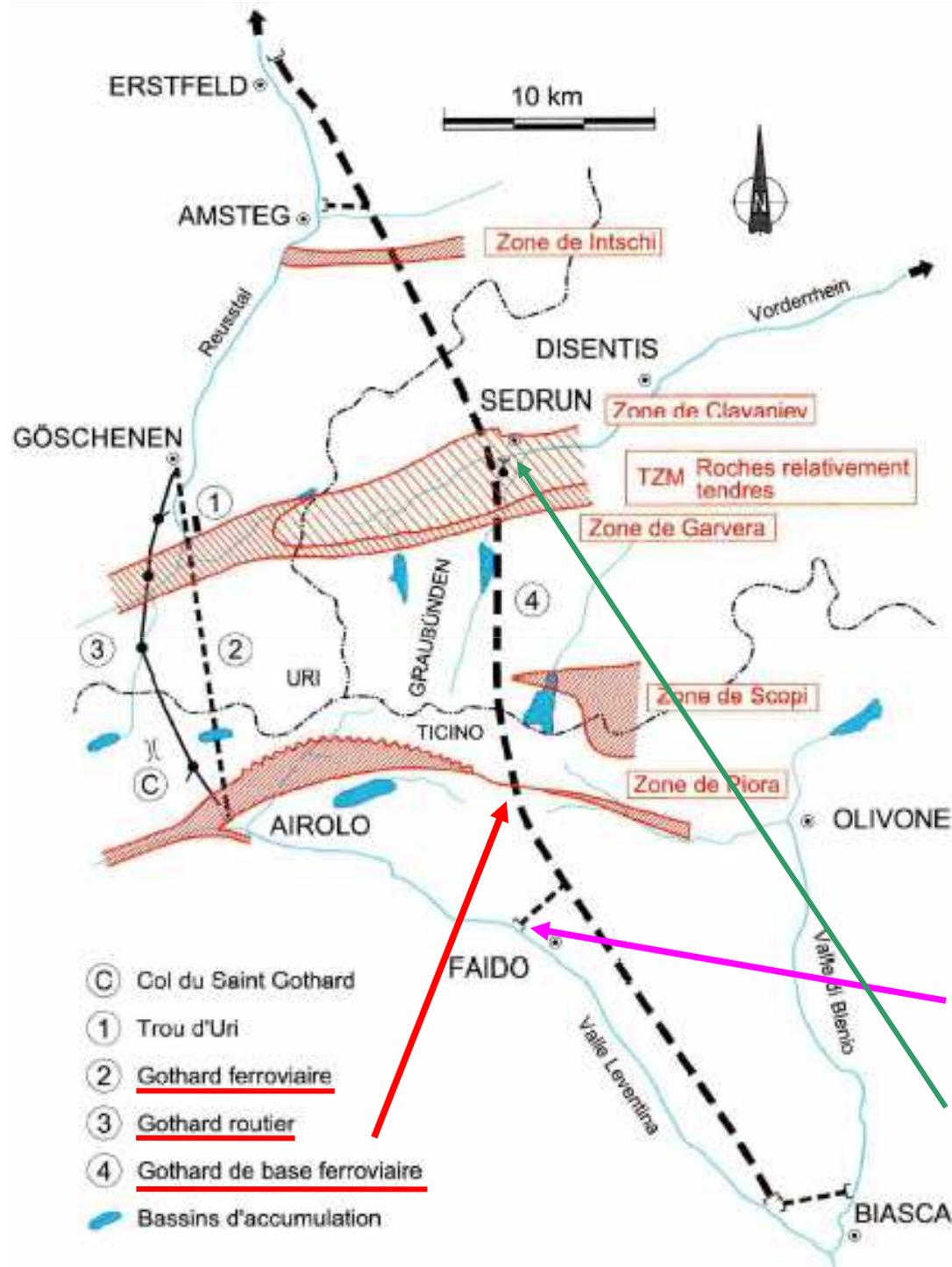
- il évite le terrain schisteux en direction
- fait avec la schistosité un angle plus favorable et atteint même les granites

le Gothard

- Par rapport au **Gothard 1**, tunnel **ferroviaire de faîte**, atteint grâce à de nombreux lacets et tunnels hélicoïdaux, parfaitement rectiligne,

- le **Gothard 2**, tunnel **roucier**, est dévié vers l'ouest pour bénéficier de puits d'aération le long de la vallée, pour la route, c'est un tunnel de base à la même altitude que le ferroviaire ;

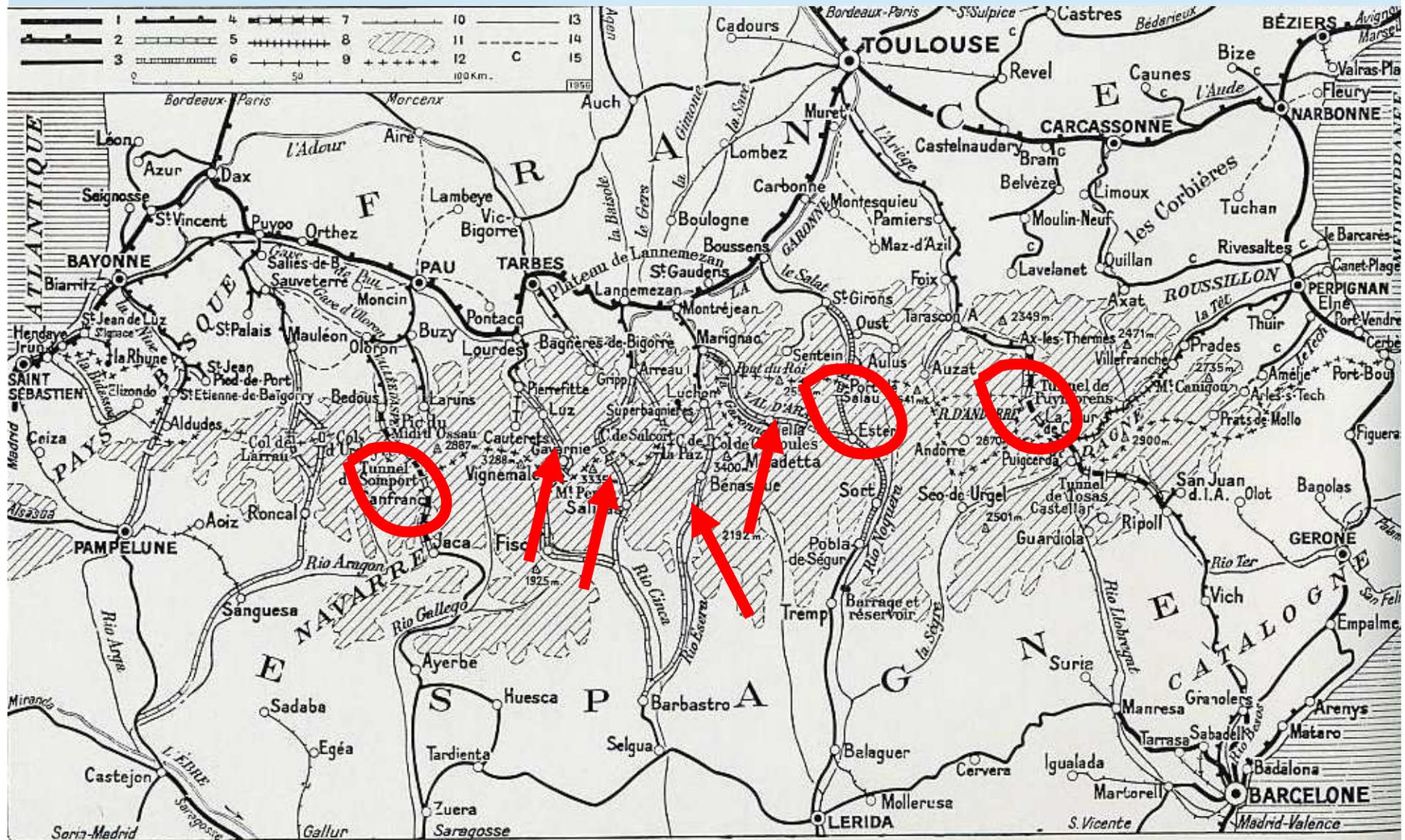
- le **Gothard 3**, **ferroviaire de base**, est nettement plus à l'est ; il cherche des accès par descenderie à **Faido** à partir de la vallée du Tessin, et par puits à **Sedrun** à partir de celle du Rhin antérieur ; il tente d'éviter les barrages réservoirs



Pyrénées: chaîne séparant la France de l'Espagne sur 430km de long, de l'Océan à la Méditerranée,



Tunnels Pyrénéens



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

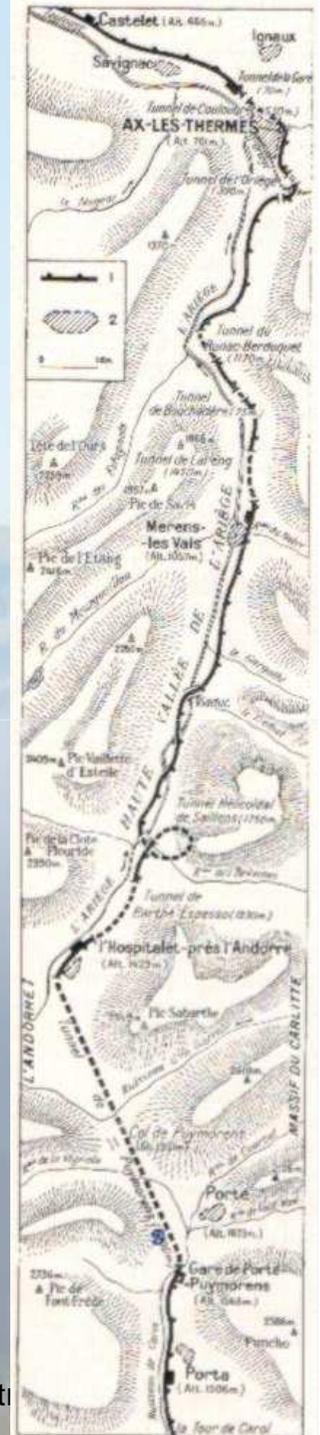
28

col du Somport (1632 m)

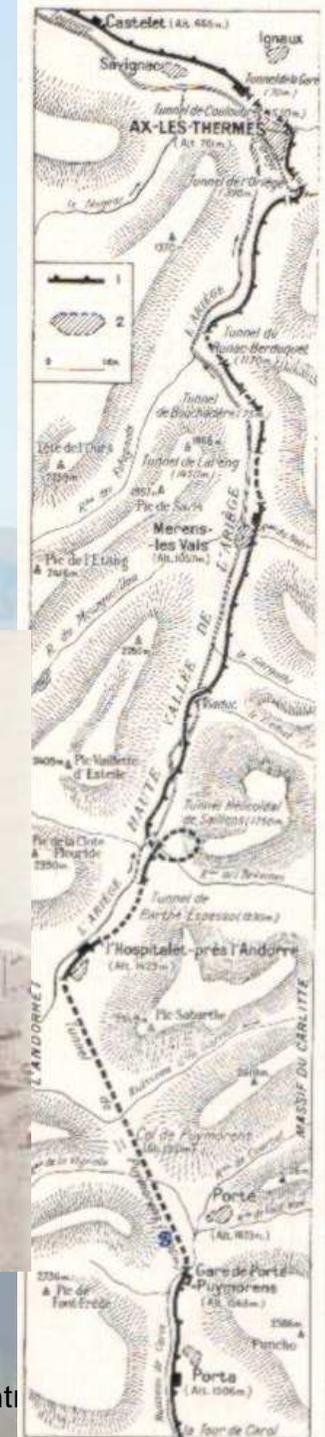
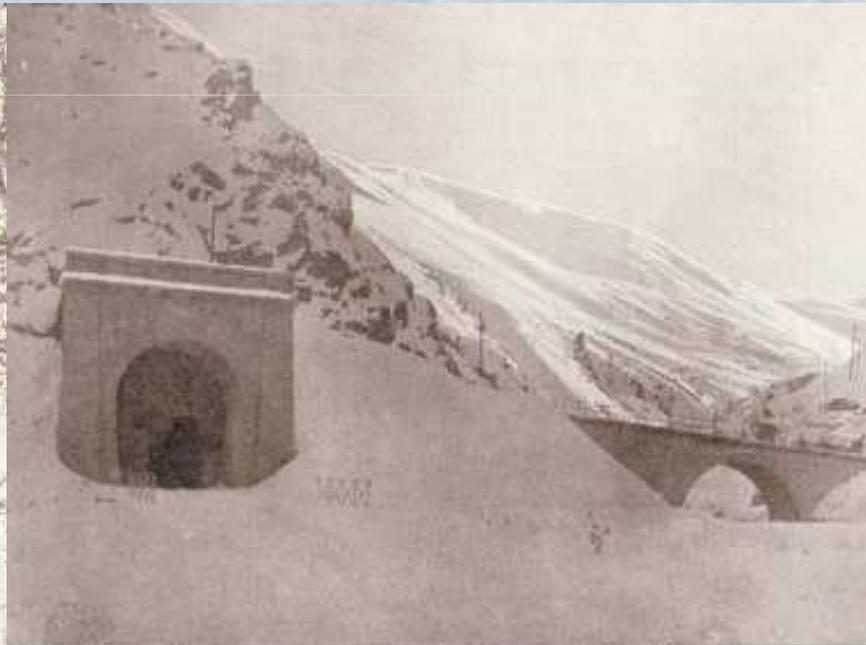
- **Tunnel ferroviaire** à voie unique, 7875 m de long à une altitude de 1183 m
 - Sur la ligne entre Oloron et Huesca
 - Démarrage des travaux de construction du tunnel il y a cent ans
 - La ligne est inaugurée en 1928
 - Côté français elle comprend 16 tunnels dont un tunnel hélicoïdal
 - Depuis 1970 la ligne n'est exploitée que côté espagnol

col de Puymorens (1920 m)

- **La ligne Toulouse Puigcerda s'étend sur 170 km**
- Sur la partie **Ax les Thermes-Tunnel de Puymorens** Nous passons de 701 m d'altitude à 1562 m (sortie Sud du tunnel) en 27 km avec des déclivités atteignent 40 mm sur presque tout le parcours avec 10 tunnels dont le tunnel hélicoïdal de Saillens (1,850 km) et le tunnel du Puymorens, long de 5,4 km
- **Tunnel de Puymorens** : à voie unique, tracé rectiligne, ouvert en 1921 de 5,4 km



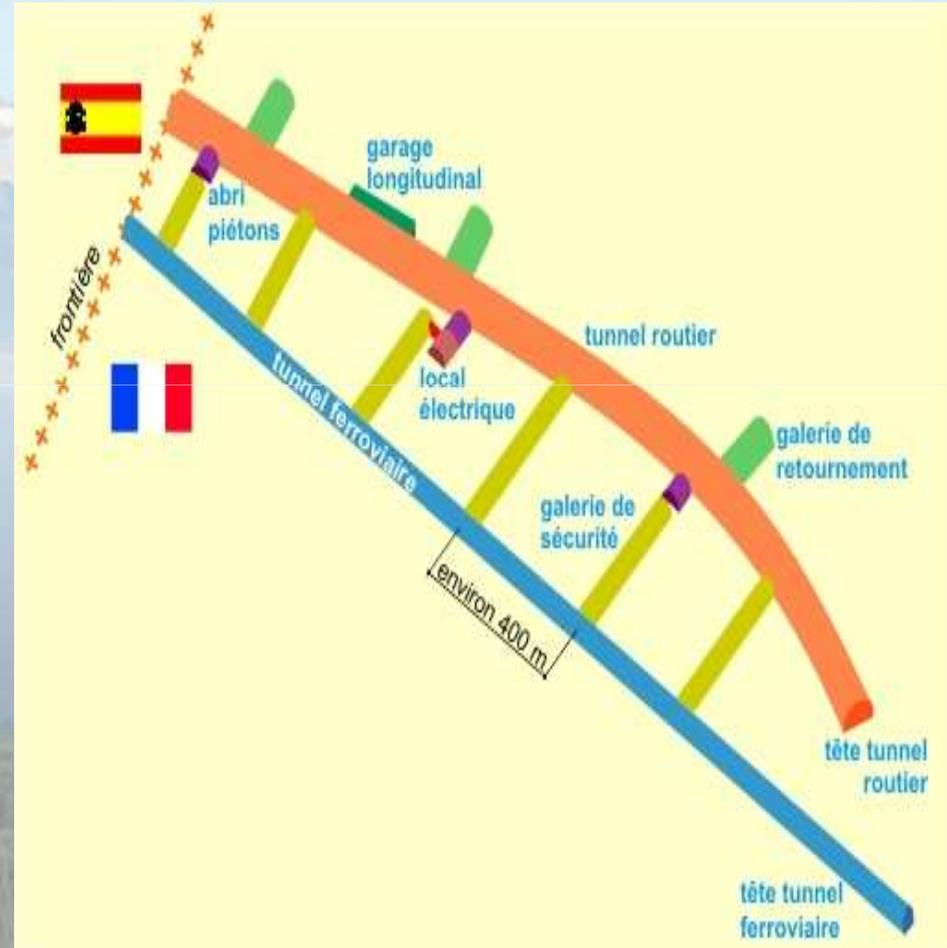
col de Puymorens (1920 m)



Les Tunnels Routiers Pyrénéens

- 5 au total
- 2 modernes parallèles avec les tunnels ferroviaires anciens
 - Au Somport, mis en service en 2003
 - le tunnel précédent est utilisé comme galerie de secours en cas d'incendie, grâce à des rameaux entre les deux

Tunnel du Somport



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

34

Les Tunnels Routiers

- 5 au total
- 2 modernes parallèles avec les tunnels ferroviaires anciens
 - Au Somport, mis en service en 2003
 - Au Puymorens mis en service en 1994
 -

Tunnel de Puymorens



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

36

Tunnel de Puymorens



Les Tunnels Routiers

- 5 au total
- 2 modernes parallèles avec les tunnels ferroviaires anciens
 - Au Somport, mis en service en 2003
 - Au Puymorens mis en service en 1997
- 3 dans la zone centrale
 - Le Val d'Aran est raccordé à l'Espagne par le tunnel de Vielha long de 5200 m. Un nouveau tunnel vient d'être mis en service.

Tunnel de Vielha



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

39

Tunnel de Vielha



Les Tunnels Routiers

- 5 au total
- 2 modernes parallèles avec les tunnels ferroviaires anciens
 - Au Somport, mis en service en 2003
 - Au Puymorens mis en service en 1997
- 3 dans la zone centrale
 - Le Val d'Aran est raccordé à l'Espagne par le tunnel de Vielha long de 5200 m. Un nouveau tunnel vient d'être mis en service.
 - **Le tunnel routier d'Aragnouet-Bielsa est un tunnel mono-tube de 3070 m mis en service en 1976 et qui est en cours de rénovation**

Tunnel d'Aragnouet-Bielsa



Pic de l'Aiguillette (65) - Février 08

Photo: Ber

30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

42

Les Tunnels Routiers

- 5 au total
- 2 modernes parallèles avec les tunnels ferroviaires anciens
 - Au Somport, mis en service en 2003
 - Au Puymorens mis en service en 1997
- 3 dans la zone centrale
 - Le Val d'Aran est raccordé à l'Espagne par le tunnel de Vielha long de 5200 m. Un nouveau tunnel vient d'être mis en service.
 - Le tunnel routier d'Aragnouet-Bielsa est un tunnel mono-tube de 3070 m mis en service en 1976 et qui est en cours de rénovation
 - Le tunnel d'Envalira en Andorre de 2,9 km de long situé à 2000 m d'altitude a été ouvert en 2002.

Tunnel d'Envalira



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

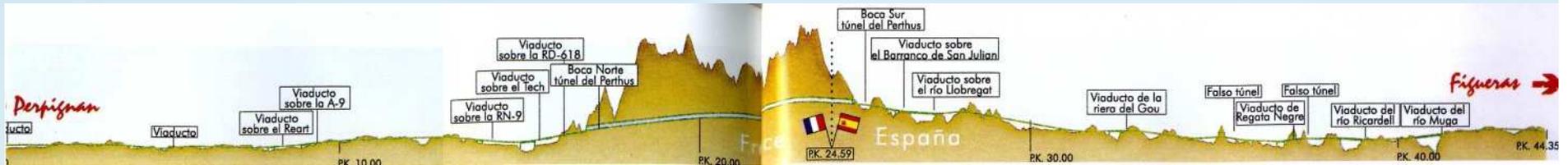
1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

44

col du Perthus (290 m)

- La route et l'autoroute passent au col sans tunnel, comme auparavant la voie romaine
- Le rail suit la côte, une ligne sinueuse, avec quelques courts tunnels
- **TGV ou AVE ?**, la « grande vitesse » appelait un tunnel franco-espagnol, bitube, commencé en 2005, percé en 2007 par deux tunneliers de diamètre 10 m qui va ouvrir dans quelques mois
- **C'est le premier tunnel moderne transpyrénéen !**

Tunnel du Perthus



30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

46

Changement d'acteur



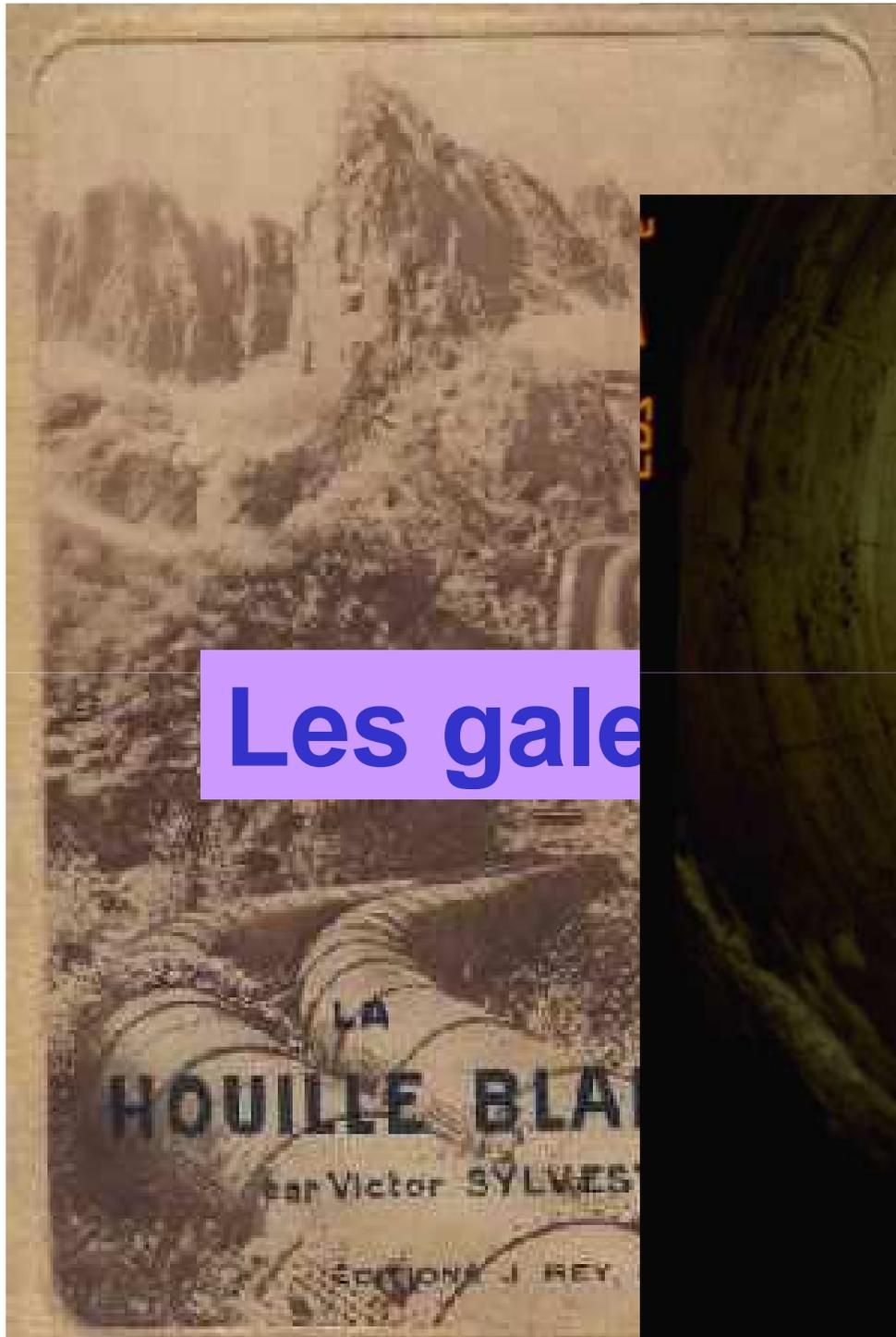
30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

47

Les gale





**Le XIXe siècle est le
«Siècle de la Houille Blanche»**



L'épopée hydroélectrique d'EDF

Les galeries hydroélectriques

Longueurs de tunnels en France

Galeries hydrauliques : 1500km

Chemins de fer : 600km

Routes : 200km

Canaux de navigation : 50km



HOUILLE BLANCHE

par Victor SYLVESTRE

ÉDITIONS J. REY CHAMBLÉ

**Le XIXe siècle est le
«Siècle de la Houille Blanche»**

Les galeries hydroélectriques

Massif central : Montpezat

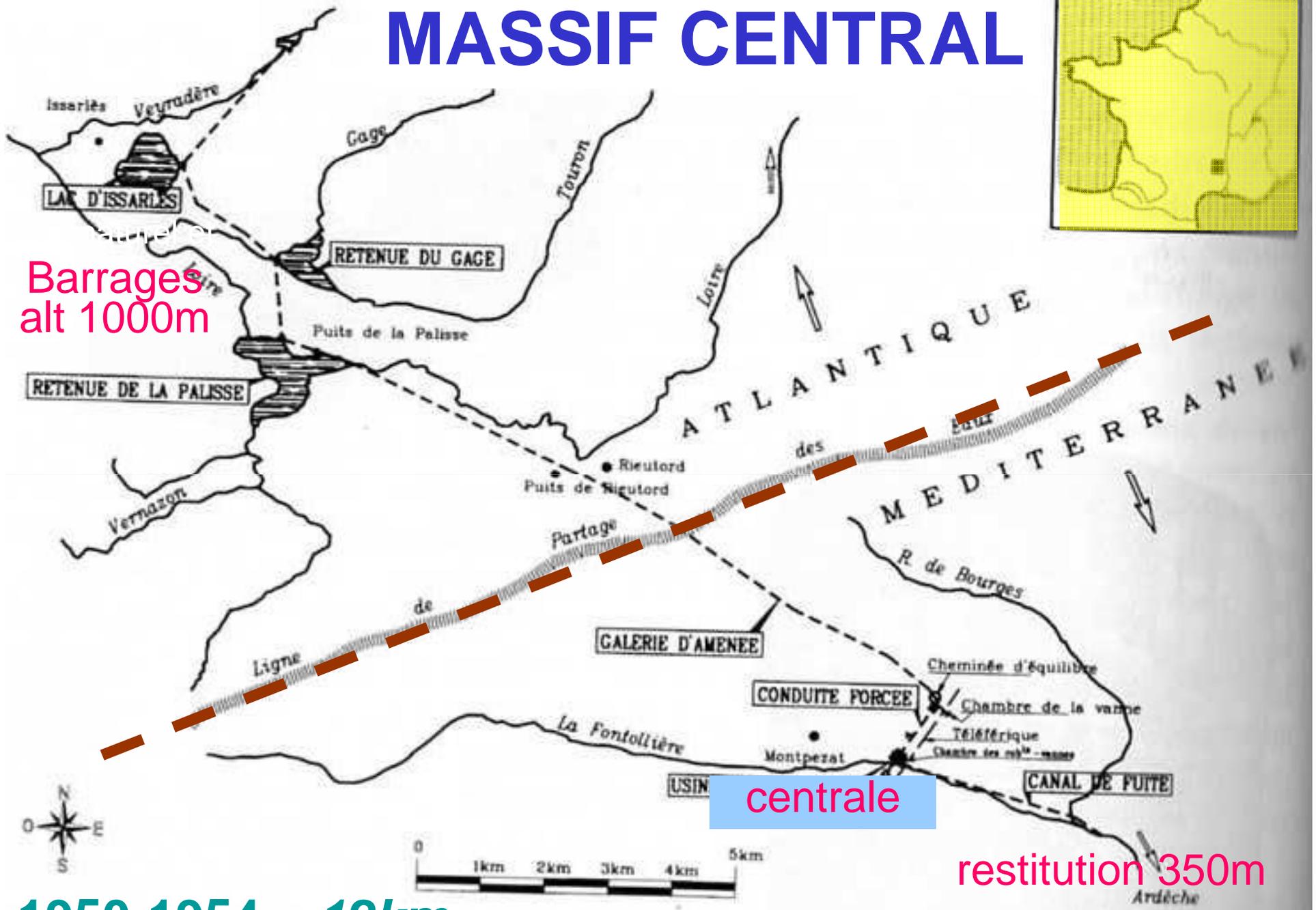
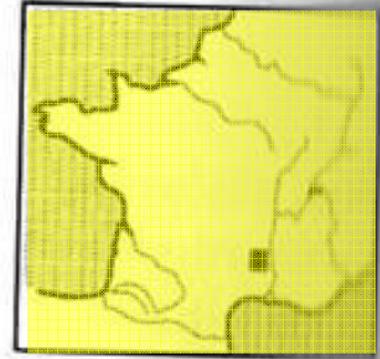
LA
HOUILLE BLANCHE

par Victor SYLVESTRE

ÉDITIONS J. REY CHENOBLE

ur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

MASSIF CENTRAL



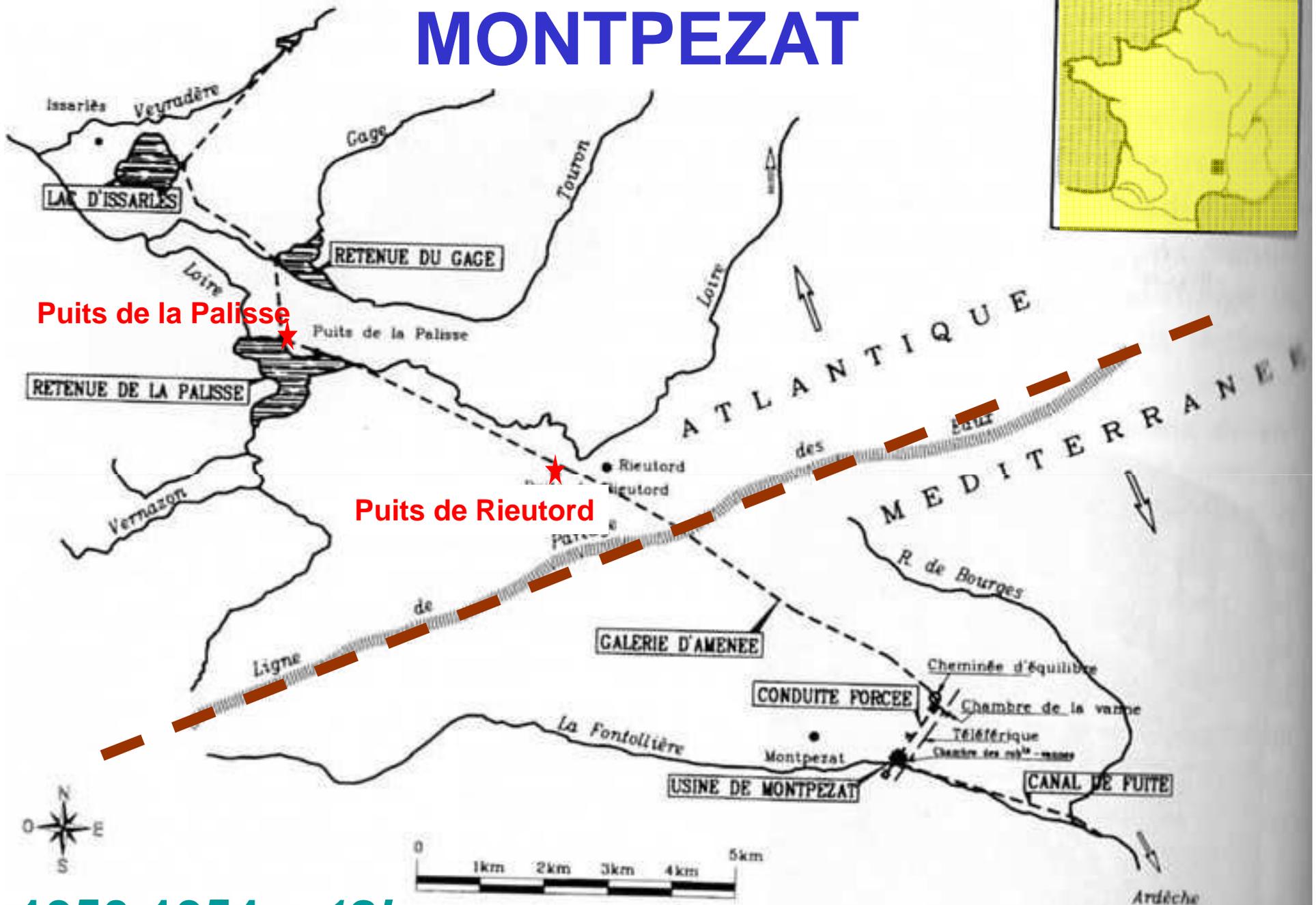
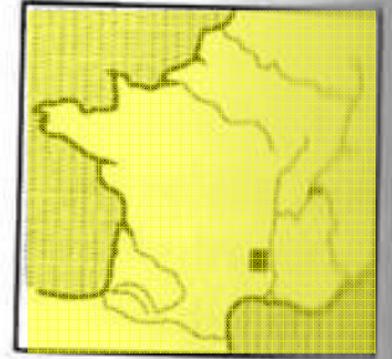
Barrages
alt 1000m

centrale

restitution 350m

1950-1954 12km

MONTPEZAT



1950-1954 12km

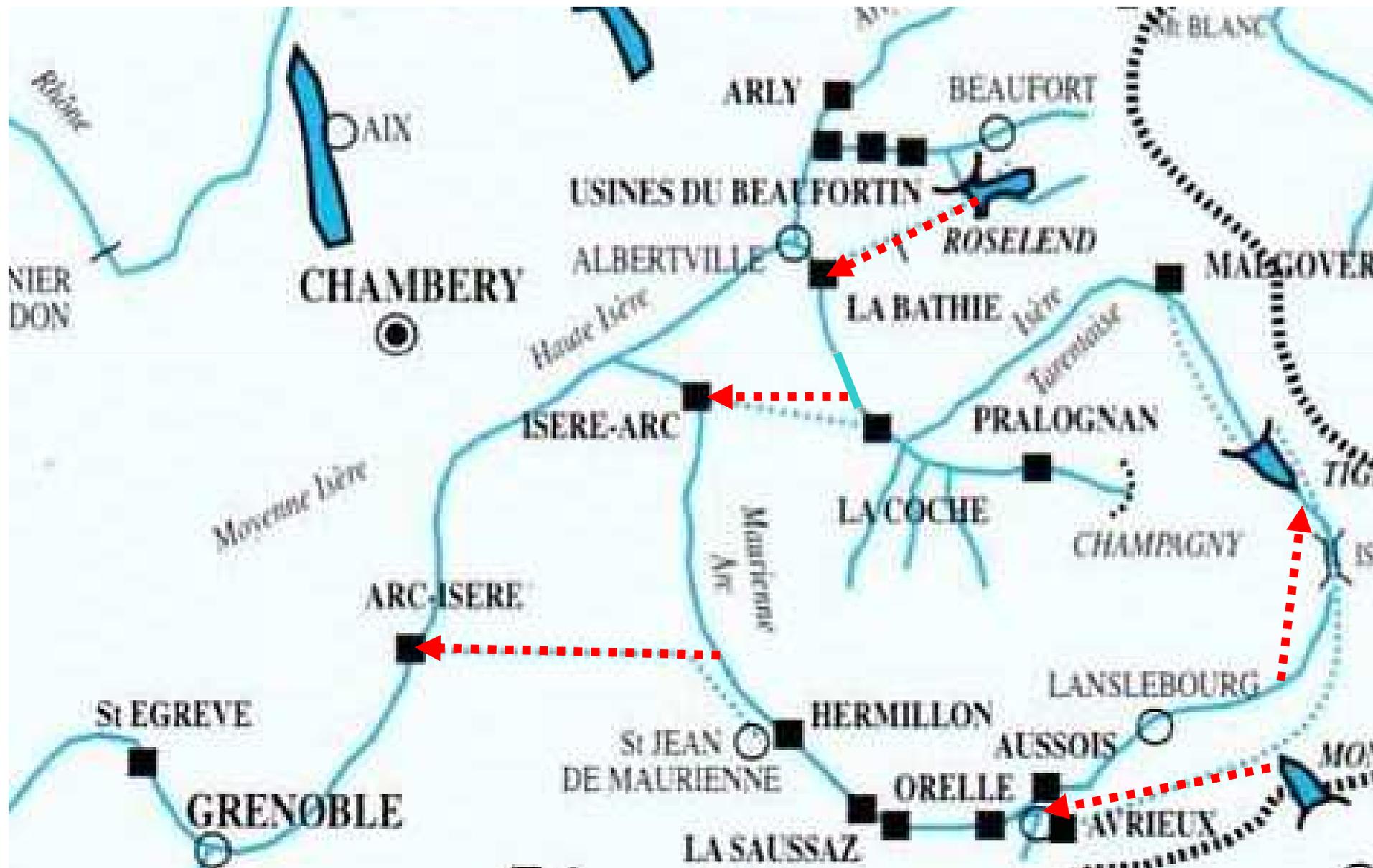
Le XIXe siècle est le
«Siècle de la Houille Blanche»

Les galeries hydroélectriques

ALPES

Roselend-la Bathie
Mont-Cenis-Villarodin
Isère-Arc (Randens)
Arc-Isère amont
Arc-Isère (le Cheylas)

Cinq profondes galeries hydroélectriques qui passent d'un bassin à un autre

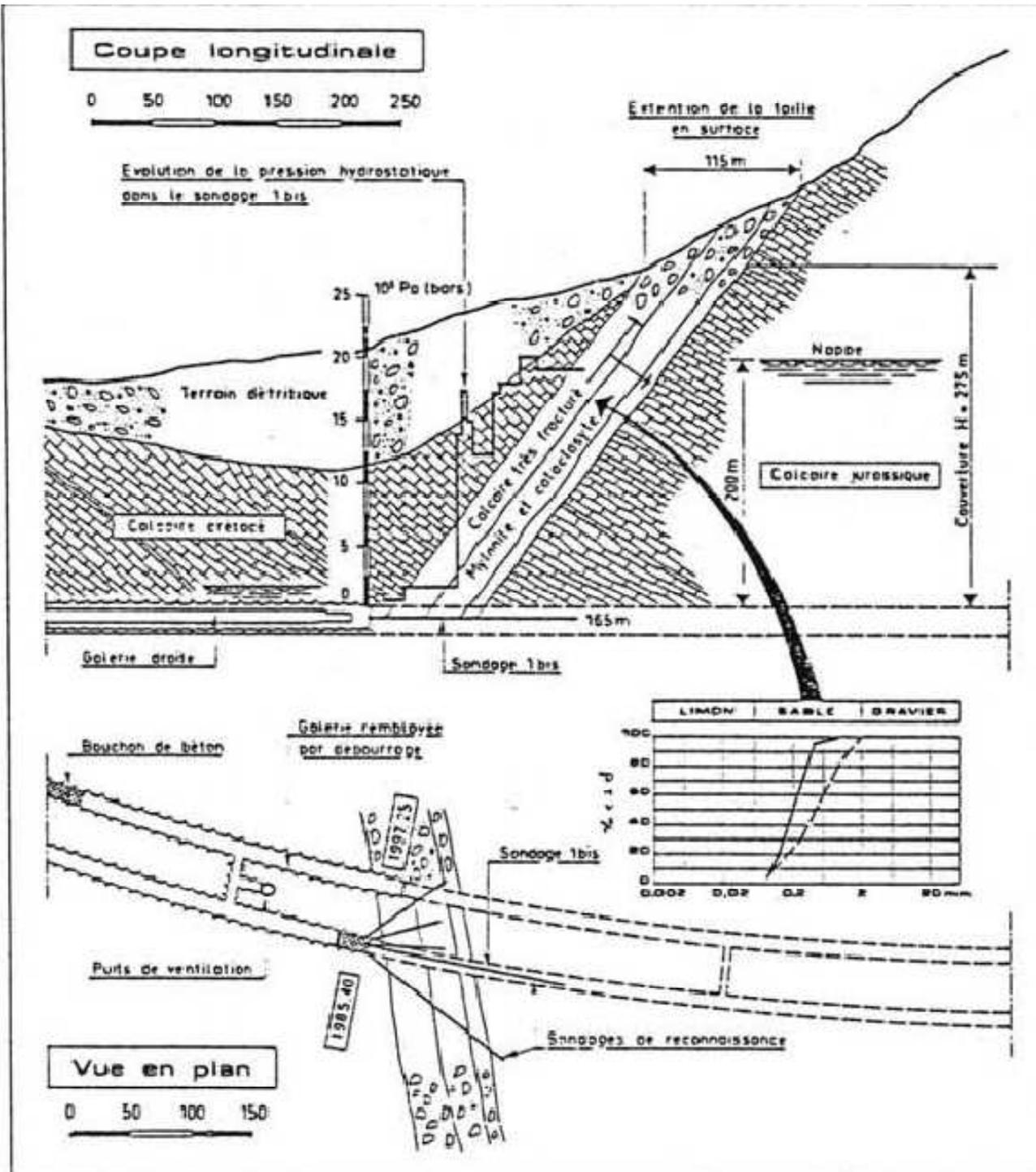


Deux profondes galeries hydroélectriques qui passent d'un bassin à un autre

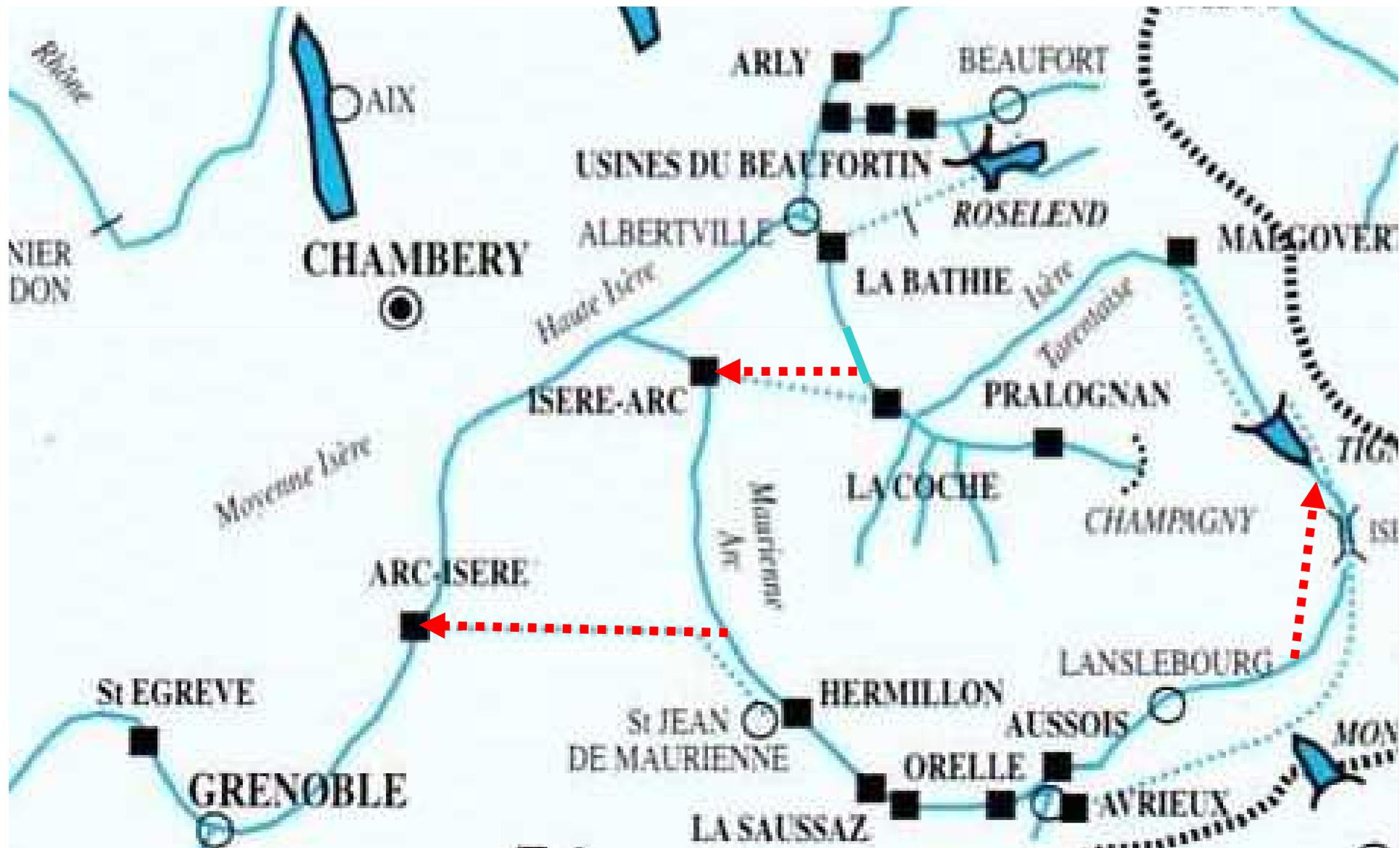
- **Roselend–la Bathie** 1955 1100m 12km
- 90m de «pâte dentifrice» franchis après **injections**

- **Mont-Cenis-Villarodin** 1968 1100m 19km
- faille aquifère en 3 tronçons
rabattue de 400m par drainage

Traversée de la faille de Valle Fredda par le TUNNEL AUTOROUTIER du GRAN SASSO Italie



Trois transferts entre l'Isère et l'Arc, à la faveur des boucles de leurs cours



Trois transferts entre l'Isère et l'Arc

- **Randens : Isère-Arc** 1952 2000m 11km
- **Arc-Isère (dans Tignes)** 1958 1200m 10km
- 3. **Isère-Arc (le Cheylas)** 1980 2200m 18km

Trois transferts entre l'Isère et l'Arc

- **Randens : Isère-Arc** 1952 2000m 11km
écaillage et boulonnage



photo dans Tunnel
du Mont Blanc avec
la même entreprise
Ballot

Tunnel du Lötschberg, 2005



courtoisie Bonnard et Gardel

Trois transferts entre l'Isère et l'Arc

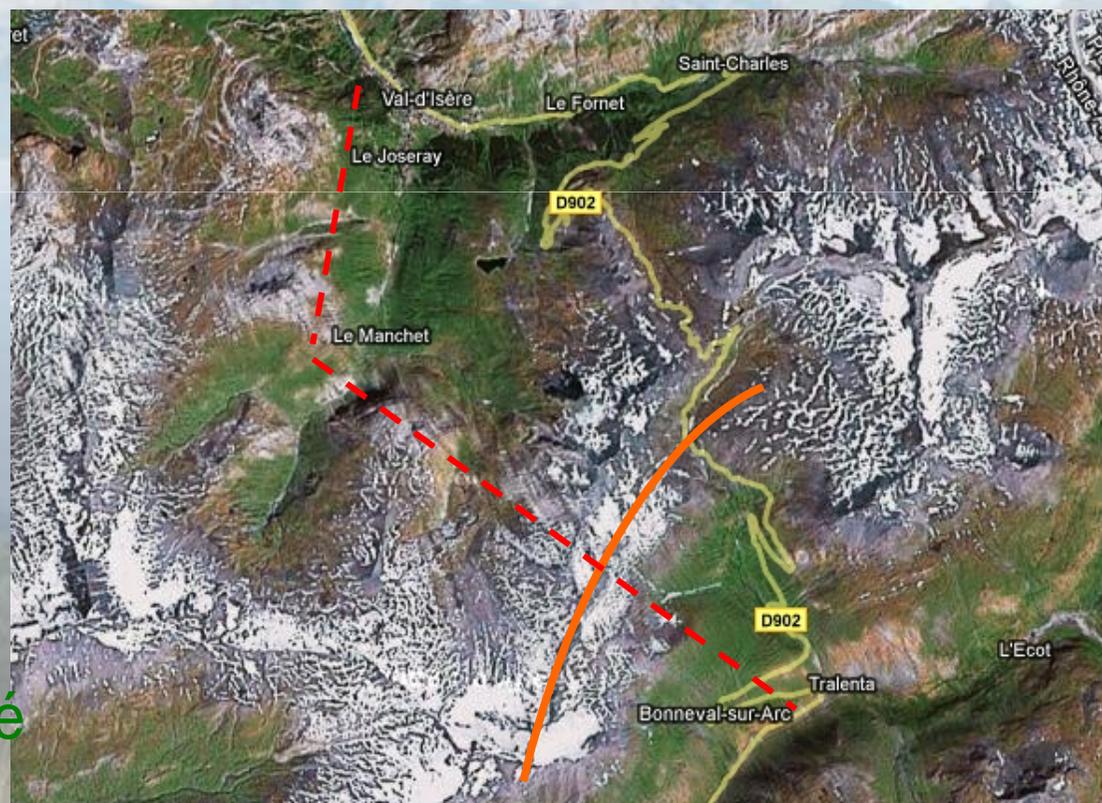
2. **Arc-Isère (dans Tignes)** 1958 1200m 10km

la « bande de l'Iseran »

Elle paraissait inévitable
sous 1000m de
couverture

mais on n'en a rencontré
aucune trace

, prophète de malheur
par destination,
le géologue
est pour une fois désavoué



Trois transferts entre l'Isère et l'Arc

3. Isère-Arc (le Cheylas) 1980 2200m 18km

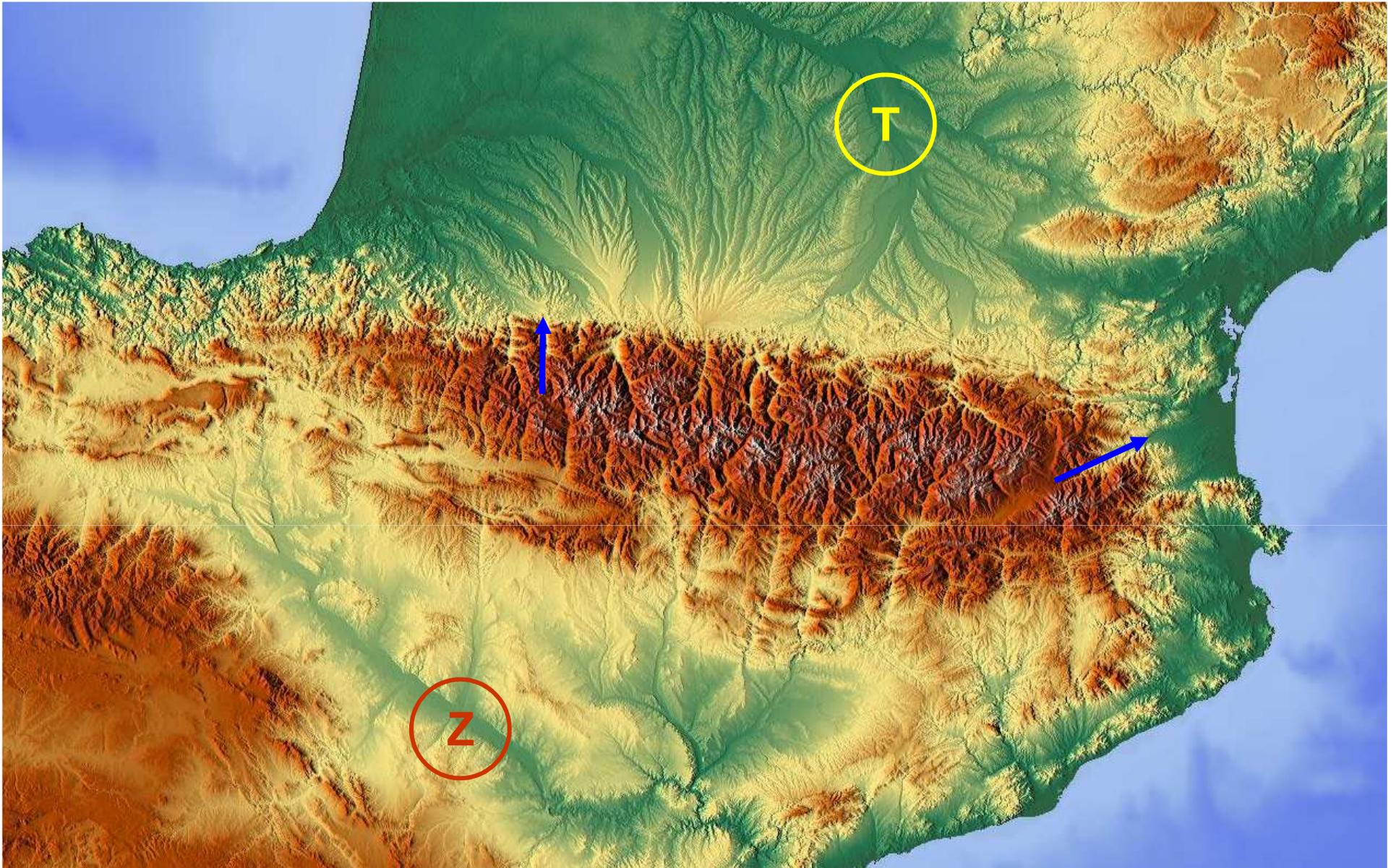
moitié au **tunnelier**, moitié à l'**explosif**

dans à peu près le même délai,
en raison du franchissement de plusieurs failles, **à la main**

Le XIXe siècle est le
«Siècle de la Houille Blanche»

Les galeries hydroélectriques

Pyrénées {
Olette et Nentilla
Pragnères et Fabrèges
entre Carol et Ariège



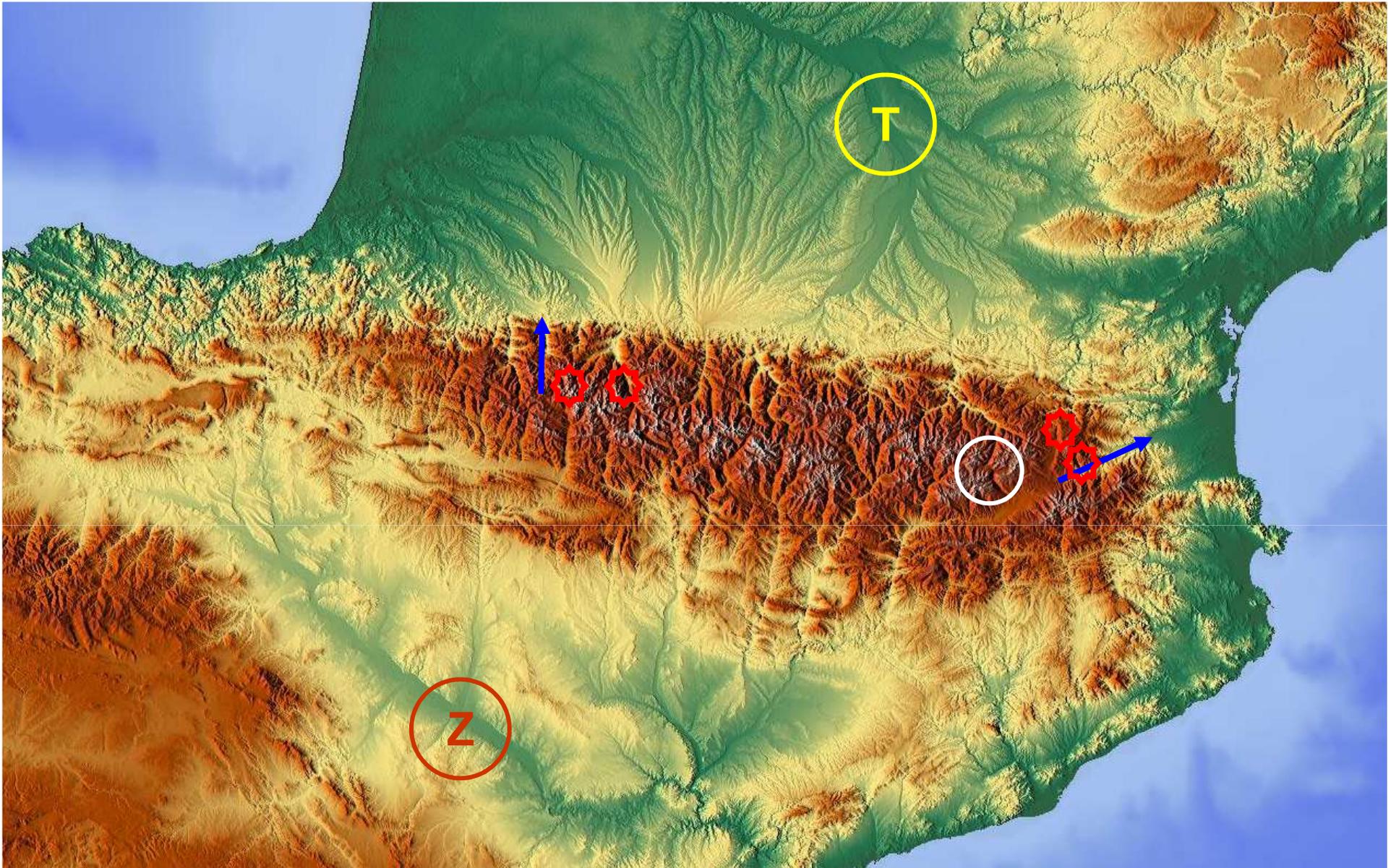
vallées concédées au chemin de fer : Ossau et Têt

30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

64



Entre Carol et Ariège, Lanoux-L'Hospitalet

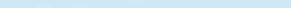
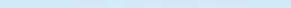
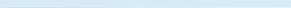
30/10/2008

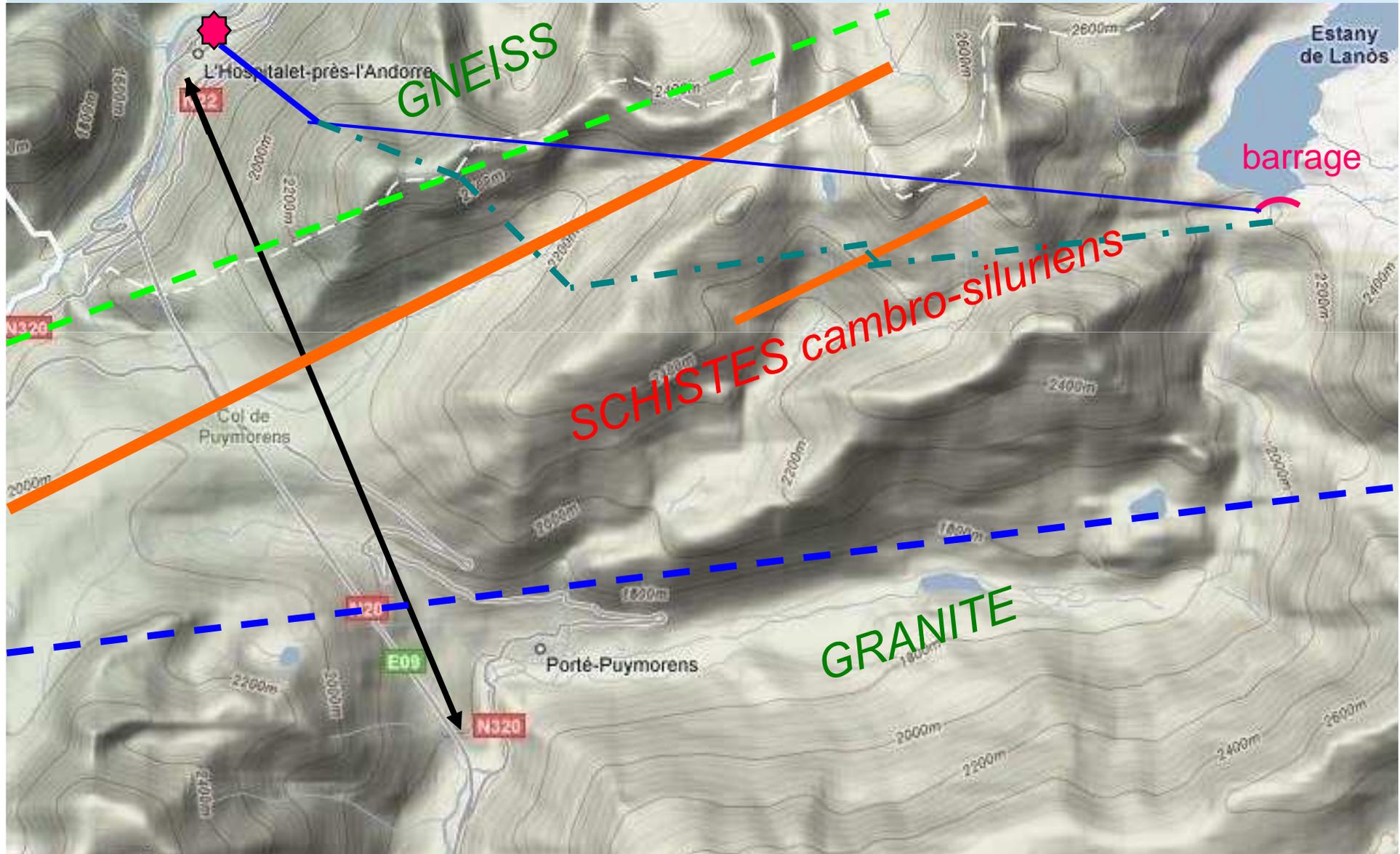
Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

65

Col de Puymorens quatre traversées

- 1920 Chemin de fer 
- 1960 Galerie hydroélectrique 
- 1960 Ariège-Carol 
- 1995 Tunnel routier 





**à 300 m de profondeur, les schistes « flambent »,
cassent les boulons, déforment les cintres**

5 artifices pour limiter les contraintes (en sus des cintres coulissants)

interruptions du
béton projeté

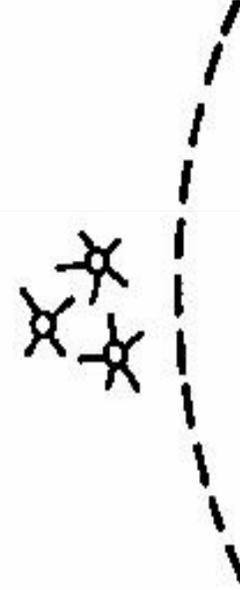


planchettes entre
voussoirs



saignées

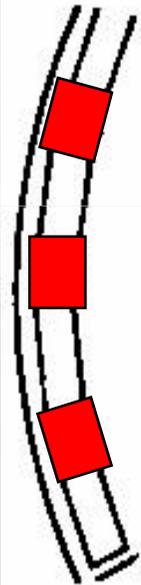
hors-profil



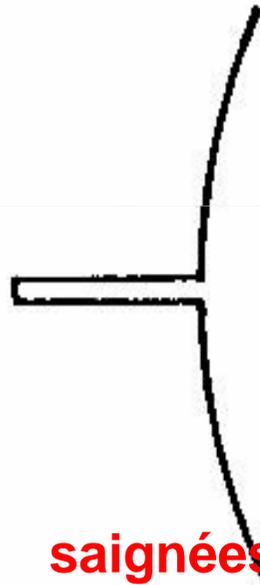
tirs en avant
du front

5 artifices pour limiter les contraintes (en sus des cintres coulissants)

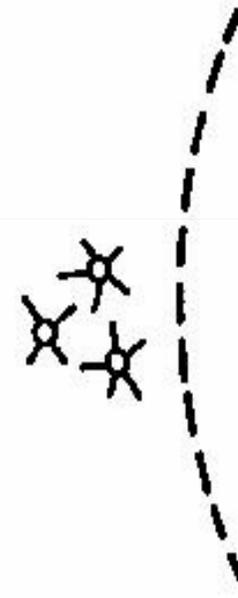
interruptions du
béton projeté



hors-profil



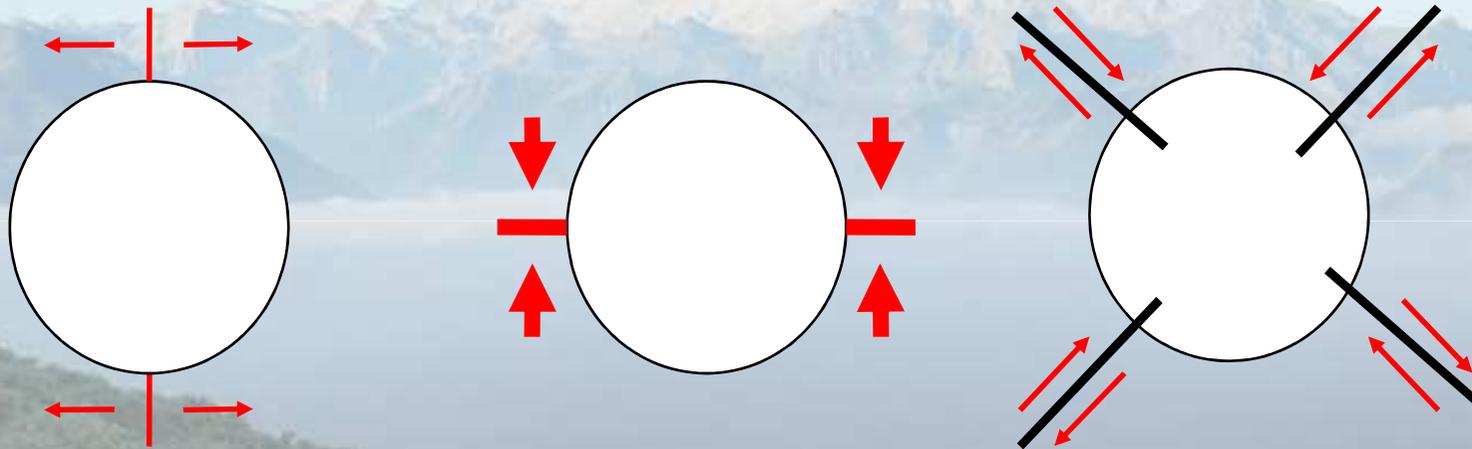
saignées



tirs en avant
du front

béton spécial
Lötschberg
2005

3 mécanismes d'auto-adaptation à tout excès de contrainte



ouverture de joints / expulsion d'argile / glissement sur joints

ces défauts jouent le rôle de
soupapes de sécurité

Conclusion 1

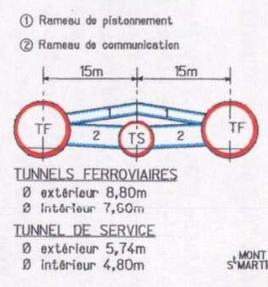
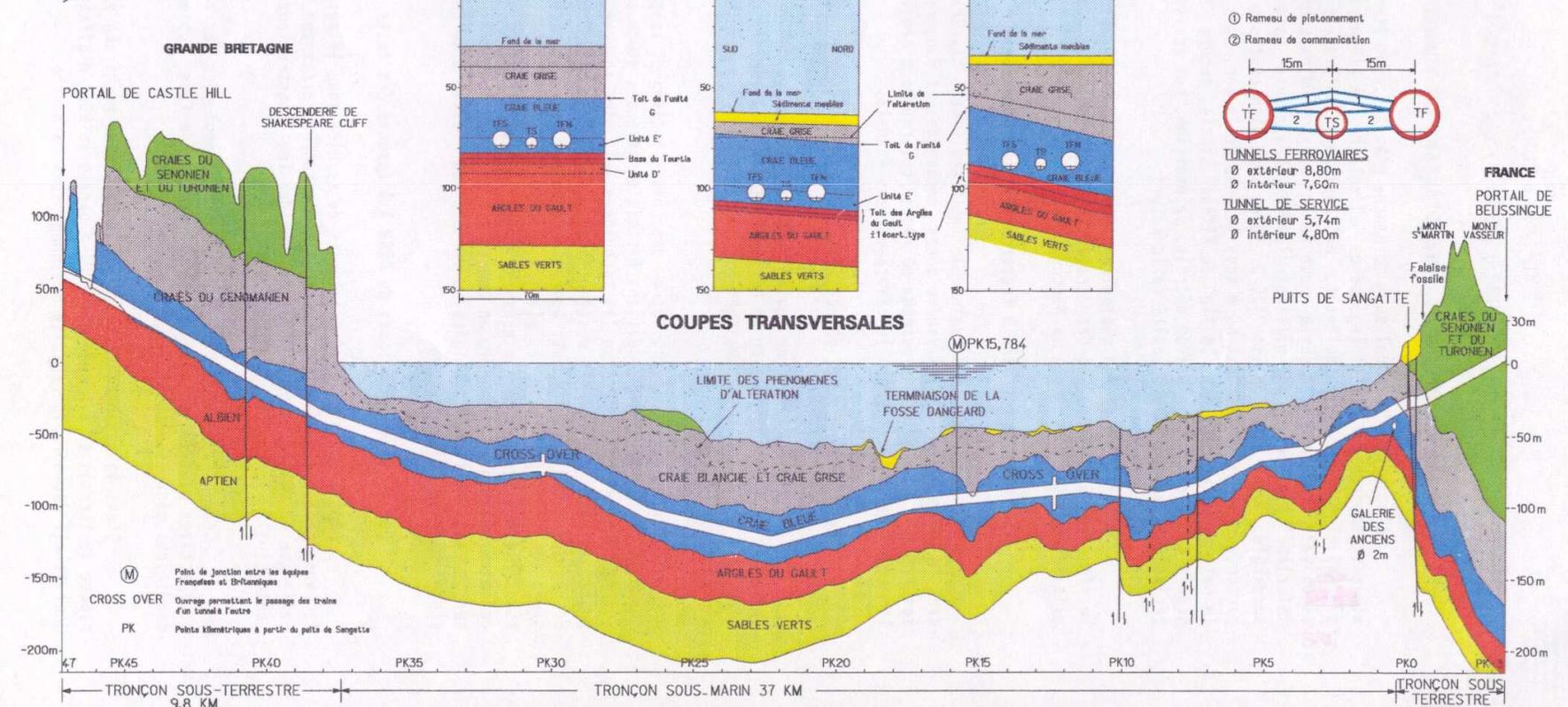
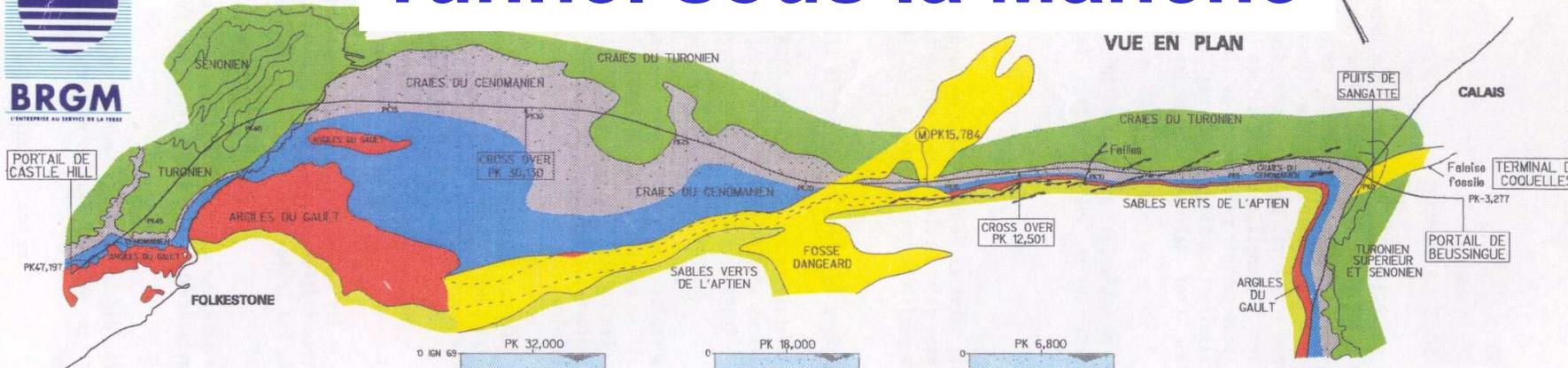
Quels sont les **défis** posés par des tunnels **de base**, très longs et très profonds ?

Le défi logistique s'est évanoui :
au tunnel sous la Manche, plusieurs tunneliers ont atteint **22km**

loin d'être ralentis par la distance,
ils ont au contraire accéléré la troisième année,
pour terminer à la date annoncée au début,
personne ne l'avait cru possible auparavant

Le défi de la **profondeur** est à prendre au sérieux

Tunnel sous la Manche



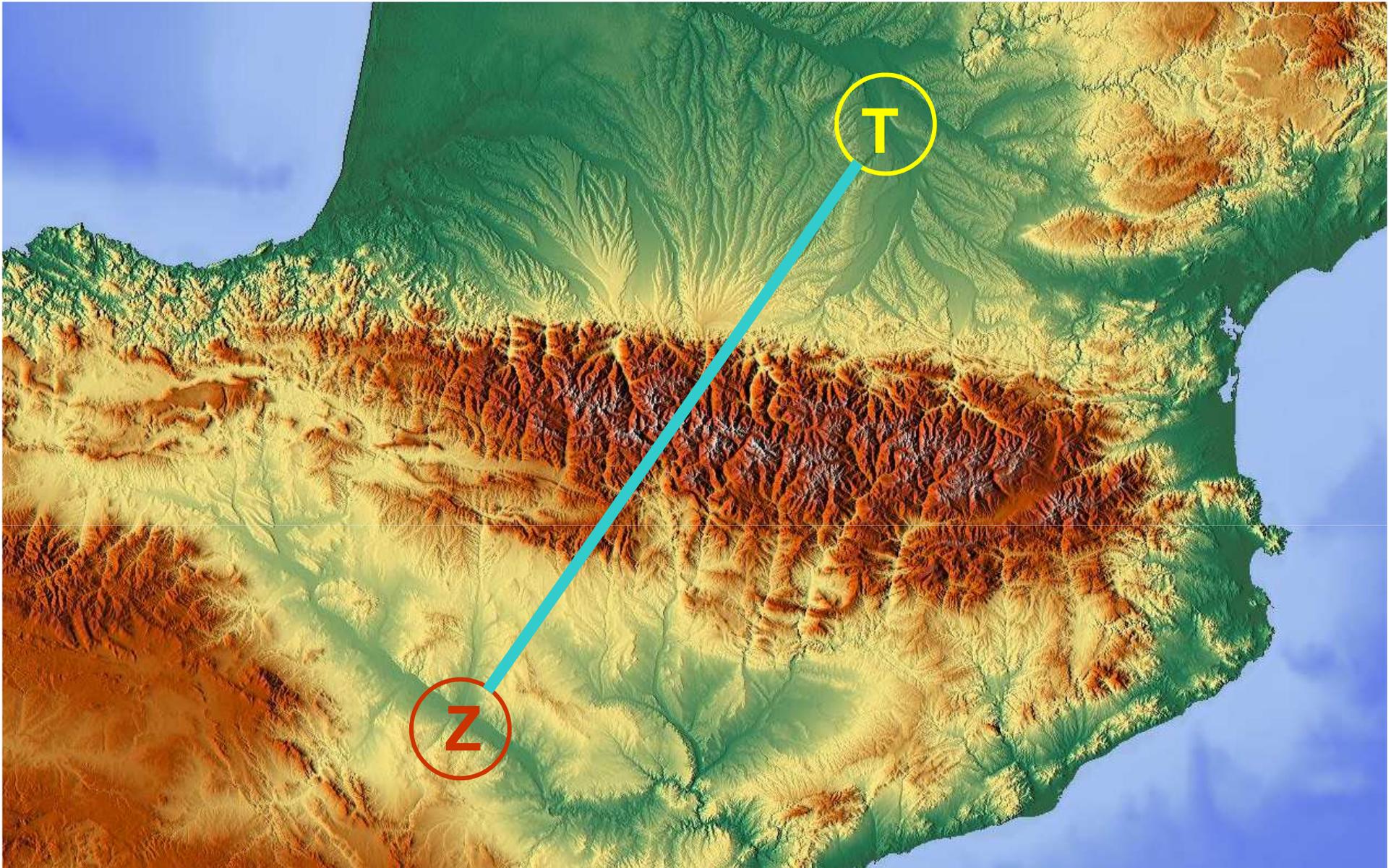
AVRIL 1988 BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINÉRIELLES
B.P. 4009 45060 ORLÉANS CEDEX 2 TEL 38 64 34 34

Conclusion 2

- Craignons davantage **l'eau**, sa pression, et ce qu'elle peut entraîner,
- que le poids de la montagne et **les contraintes** thermiques et tectoniques
- Ne lésinons jamais sur les reconnaissances, ni sur les indices découverts au cours du creusement,
- **car il y aura toujours des surprises !**

Conclusion 3

- La science et la technique de l'homme peuvent venir à bout, tôt ou tard, des contraintes liées au relief et au climat
- Cette assurance, formulée par **Jules Verne** dans **L'Île Mystérieuse**, s'appliquera demain au franchissement central des Pyrénées



Muchas gracias por su atencion

30/10/2008

Pierre Duffaut / Olivier Vion

1er Congrès International sur la traversée ferroviaire des Pyrénées Centrales

76