

Campagne de réflexion sismique dans l'est du bassin minier luxembourgeois

RESULTATS



<https://seismik.lu>



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de la Mobilité
et des Travaux publics

Administration des ponts et chaussées



Service géologique
de l'Etat

Le Service géologique de l'Etat a commencé à s'intéresser au potentiel géothermique du sous-sol profond il y a une dizaine d'années, essentiellement dans le cadre du Projet 'Neischmelz' à Dudelange, mais également suite à une thèse de doctorat sur le sujet qui a livré des arguments pour un potentiel élevé dans l'est du bassin minier luxembourgeois ([Tom Schintgen, 2015: The Geothermal Potential of Luxembourg, Geoforschungszentrum Potsdam](#)).

Etant donné qu'au-delà d'une profondeur d'environ 200 mètres, les connaissances du sous-sol ne se basaient quasiment que sur des hypothèses et des extrapolations, le Gouvernement a décidé en 2020 de procéder à une reconnaissance géologique profonde de la zone la plus prometteuse.

Campagne de réflexion sismique dans l'est du bassin minier luxembourgeois: RESULTATS

- Travaux de reconnaissance réalisés
- Traitement des données
- Résultats
- Conclusions générales
- Conclusions particulières appliquées à quelques sites particuliers



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Énergie et de
l'Aménagement du territoire



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de la Mobilité
et des Travaux publics
Administration des ponts et chaussées



Service géologique
de l'État



Récapitulatif des travaux de reconnaissance réalisés

CALENDRIER

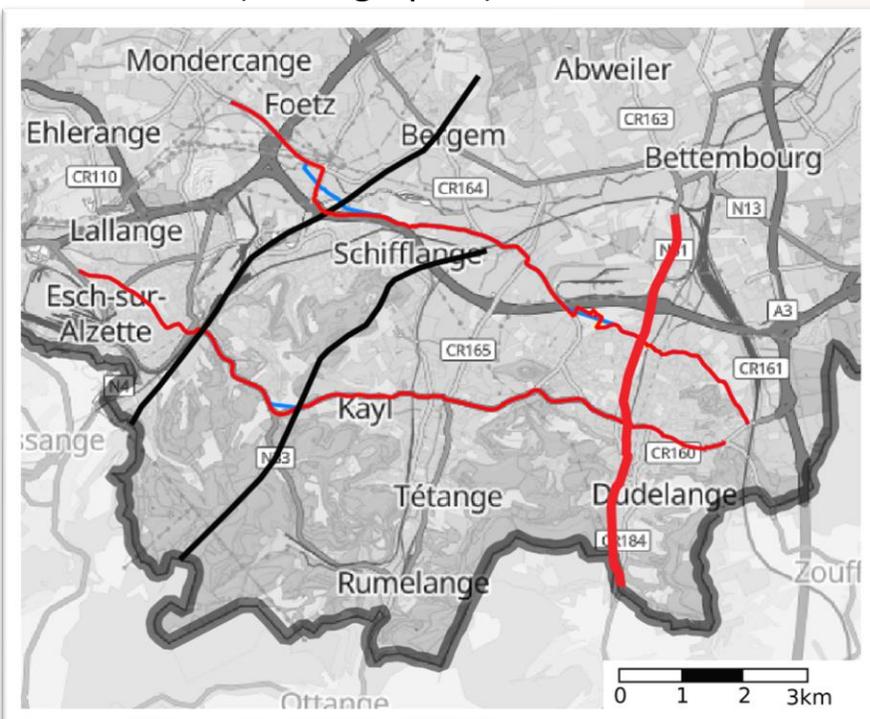
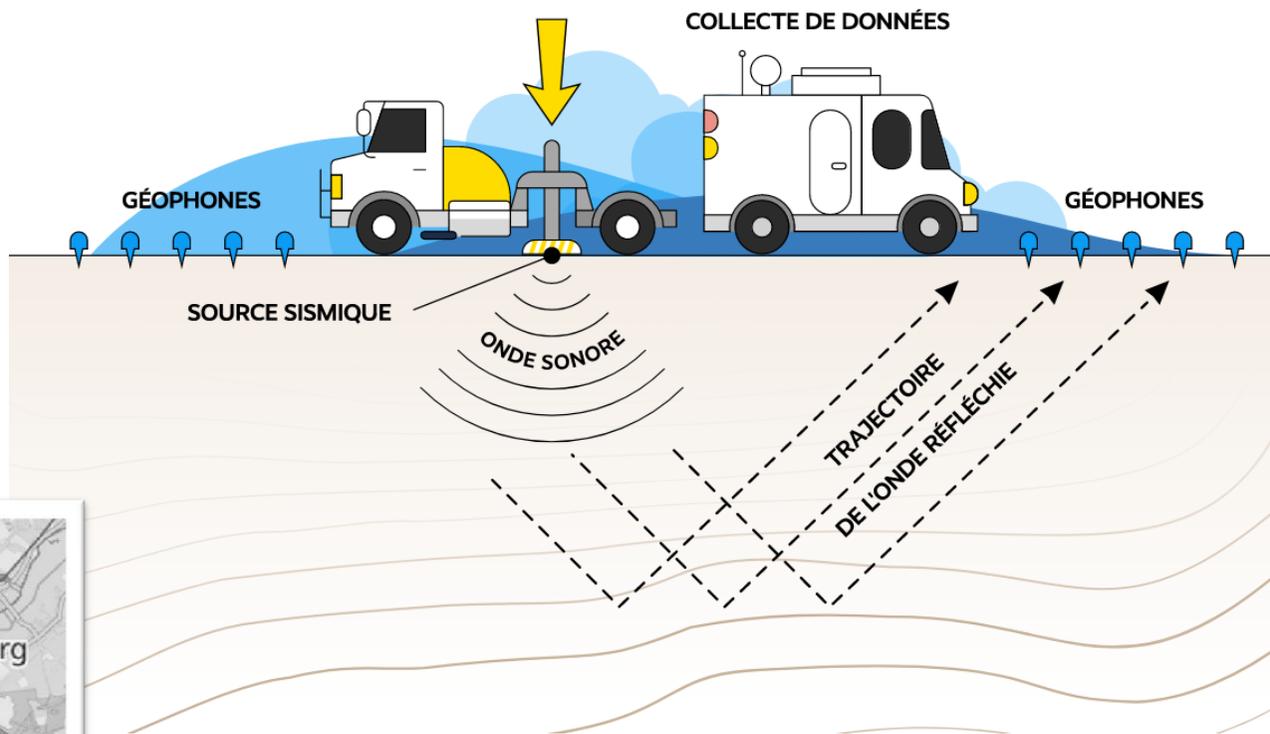
- Marché public européen, attribué à Smart Seismic Solutions (S3) le 18.10.2022, contrat approuvé le 12.05.2023**
- Début des travaux officiel: 20.07.2023**
- Phase de préparation (S3): juillet 2023 à novembre 2023**
- Phase d'acquisition principale (S3): 15.11.2023 - 29.11.2023**
- Phase de traitement des données (CDP Consulting): décembre 2023 - 26.03.2024**
- Phase d'interprétation et de modélisation (45-8 Energy) : avril 2024 - juillet 2024**



Travaux de reconnaissance réalisés: Rappels sur la technique de la sismique réflexion

Méthode d'exploration non invasive (géophysique) se basant sur la propagation d'ondes de vibration,

- générées en surface par des camions vibreurs,
- les réflexions sur les couches géologiques en profondeur sont enregistrées par des capteurs appelés géophones
- afin de fournir une image de la structure du sous-sol (~échographie).



Nom ligne	Code	Direction	Longueur approximative (km)
Foetz-Burange	FB	W-E	11.6
Esch-Dudelage	ED	W-E	12.1
Dudelage-Bettembourg	DB	S-N	6.3
Total :			30.0

Travaux de reconnaissance réalisés: Rappels sur la technique de la sismique réflexion

La méthode de la réflexion sismique qui a été choisie est une méthode d'investigation indirecte du sous-sol à partir de la surface par des mesures géophysiques : à l'image d'une échographie, cette méthode utilise la propagation et la réflexion des ondes vibratoires générées en surface à l'aide de camions spéciaux avec une plaque vibrante qui est pressée sur le sol à des points définis. Les réflexions sur les couches géologiques en profondeur sont ensuite enregistrées par des capteurs appelés géophones disposés en surface le long du tracé.

PHASE D'ACQUISITION (Smart Seismic Solutions - S3) : QUELQUES CHIFFRES

- 30 kilomètres de ligne sismique, répartis en 3 lignes sur les communes de Bettembourg, Dudelange, Esch-sur-Alzette, Kayl, Mondercange et Schifflange
- Campagne de communication: site internet seismik.lu (Klimaagence), hotline, journée portes ouvertes, 5000 flyers distribués aux riverains directs des opérations
- 25 personnes mobilisées au total (Smart Seismic Solutions) = 3.600 heures de travail
- 0 accident de travail
- 14 jours d'acquisition
- 76 heures d'acquisition pure
- 3 camions-vibreurs par point vibré; 4 à 6 ondes de vibration ('sweep') de 28 s chacune (4 à 80 Hz)
- 1.317 points vibrés (sur 1.332 planifiés), interdistance entre points source: 20 m
- 5.498 capteurs déployés, dont 13 détruits ou disparus, interdistance entre points source: 5 m
- 1 téraoctet de données brutes enregistrées
- 6 forages avec mesures sismiques de type 'uphole'
- 15 profils de sismique réfraction (chute de poids, 48 géophones, espacement 2 m)

Travaux de reconnaissance réalisés: Matériel utilisé

Poids 16.5 to
Peak Force: 125 kN



Camion vibreur



>5000 capteurs

Stockage base Dudelange



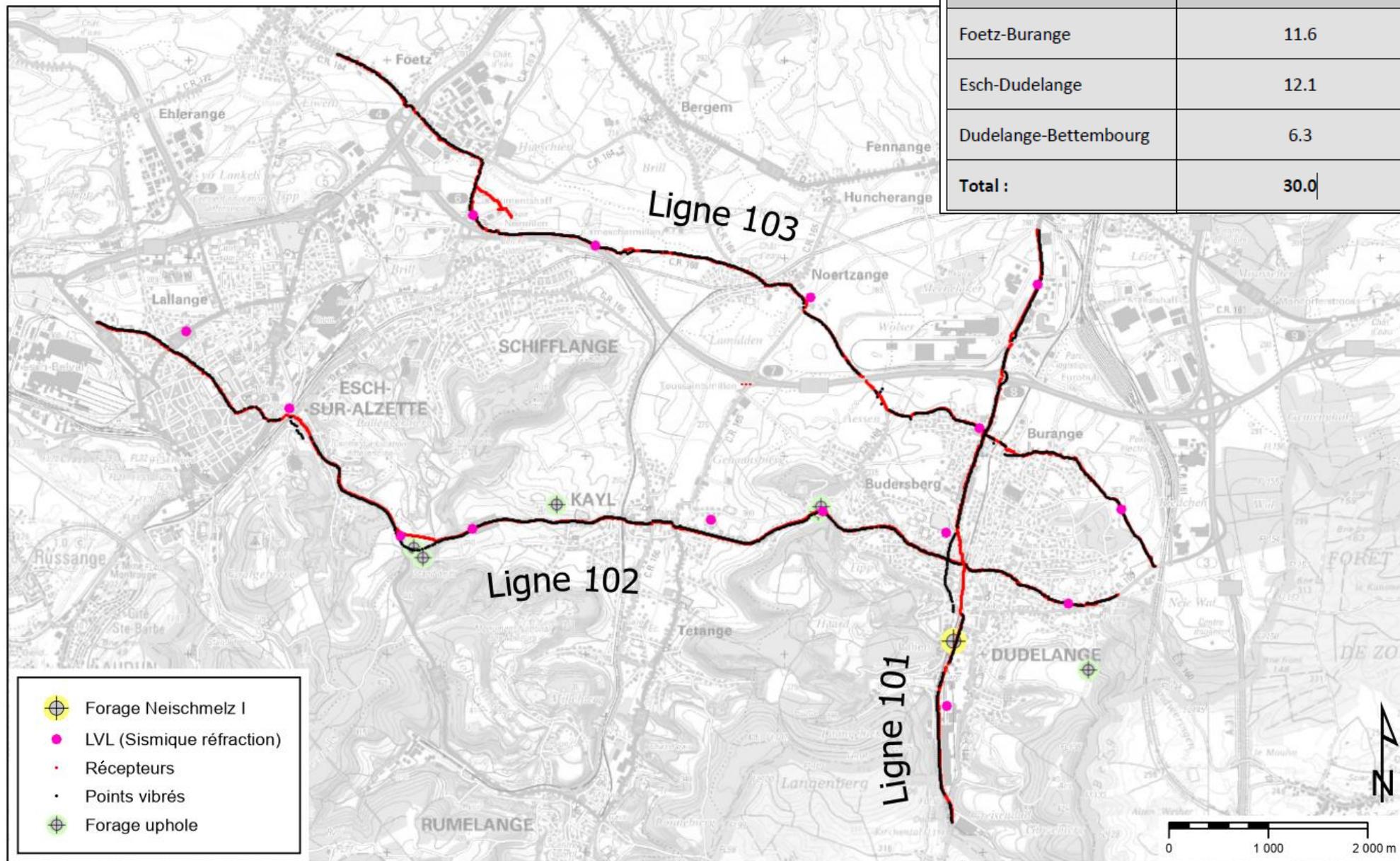
25 cm

Capteur
"Géophone"



Travaux de reconnaissance réalisés: Localisation des opérations

Nom ligne	Longueur approximative (km)
Foetz-Burange	11.6
Esch-Dudelange	12.1
Dudelange-Bettembourg	6.3
Total :	30.0



RETOURS D'EXPERIENCE

- Globalement, très bonne collaboration avec les communes et gestionnaires de réseaux enterrés
 - Conditions d'acquisition relativement difficiles: météo, trafic, bruit de fond important en milieu urbain
 - Bonne réception auprès de la population, quelques plaintes (surtout gêne du trafic)
 - S3: respect des normes en matière de vibrations, pas de dégâts notables
 - S3: qualité d'équipement, expérience du personnel et mode opératoire de haut niveau
 - Echange continu avec le Service géologique nécessaire et utile
- Données acquises de bonne qualité, rapport signal sur bruit favorable, objectifs globalement atteints

- ❑ Traitement principal des données : CDP Consulting



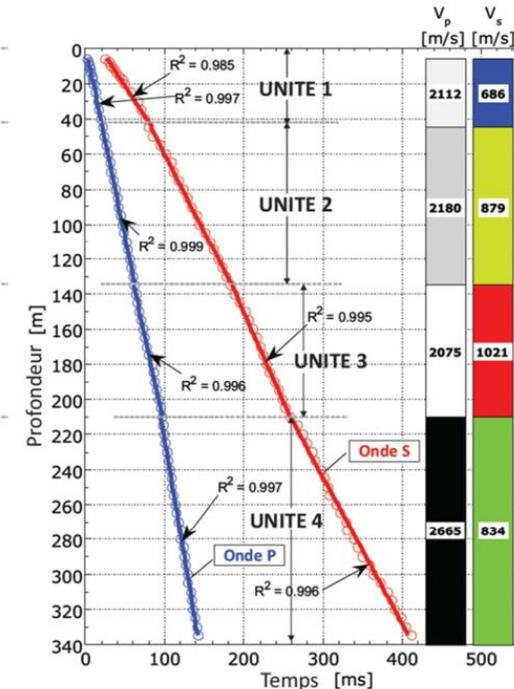
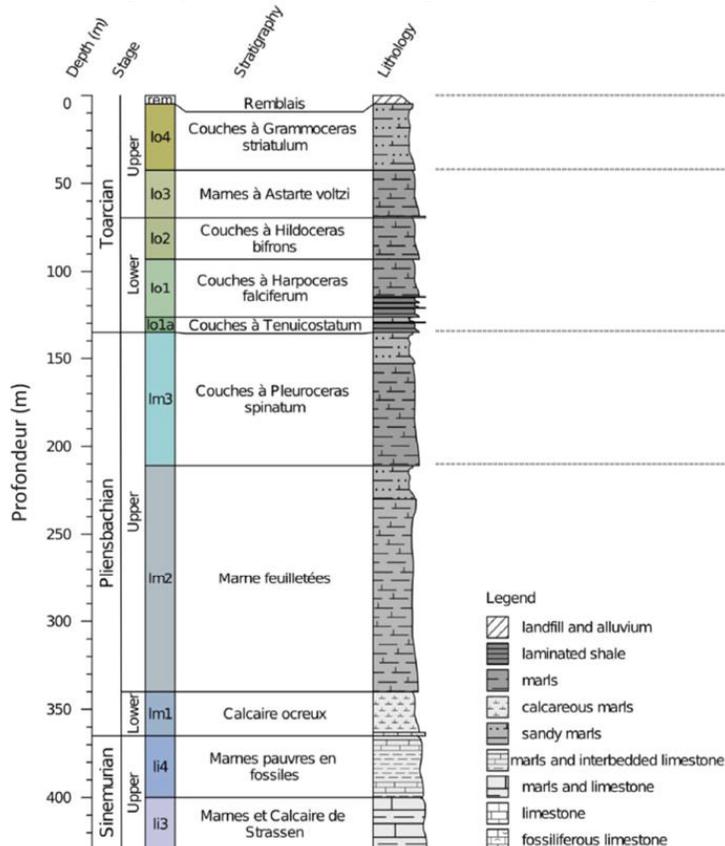
Débruitage – stacking – déconvolution – corrections d'amplitude – corrections statiques – migration

- ❑ Traitement final et interprétation: 45-8 Energy

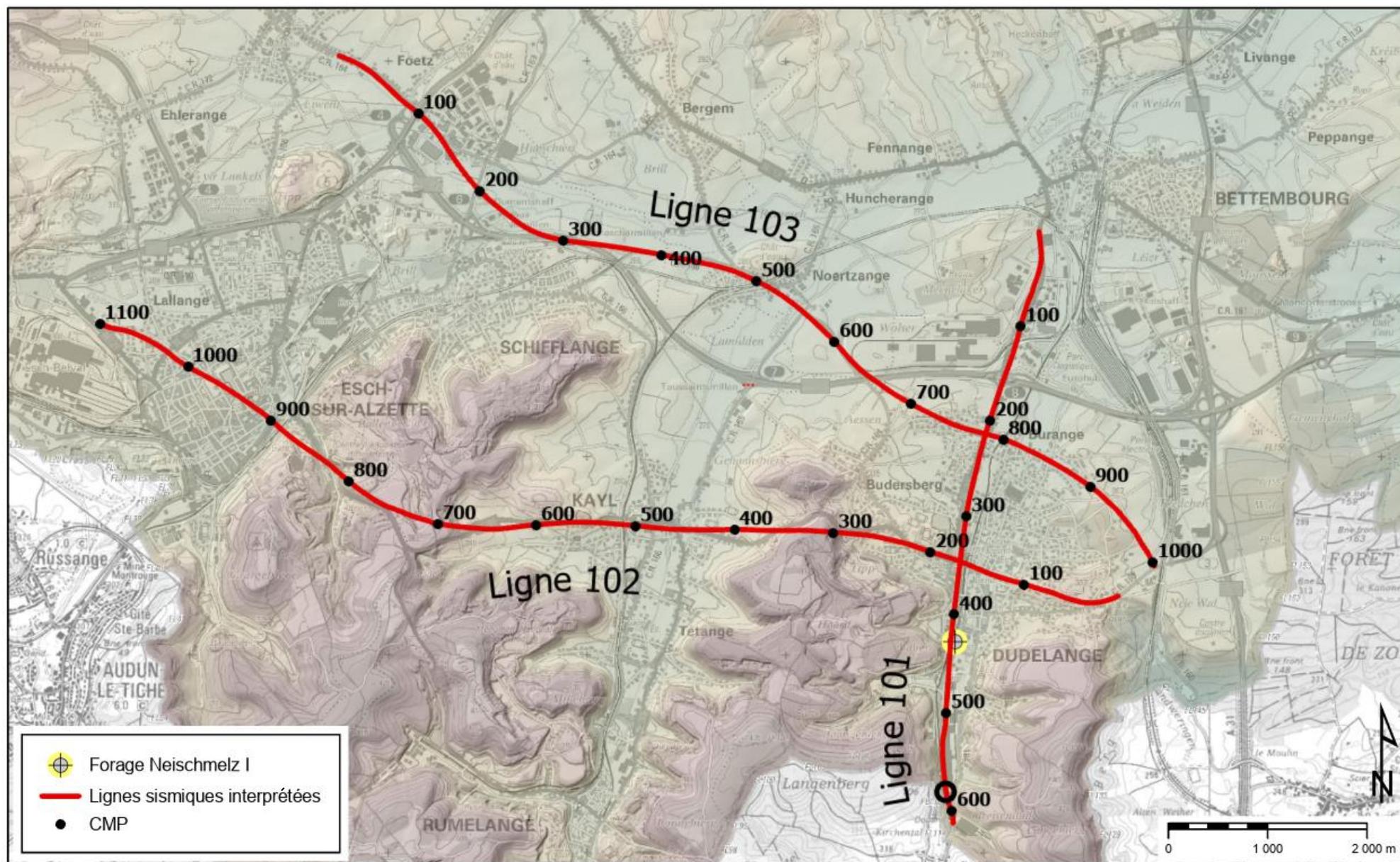


Histoire tectono-stratigraphique – cohérence puits-sismique – sismogramme synthétique – corridor stack – comparaison des lois temps-profondeur – pointé sismique – conversion temps-profondeur

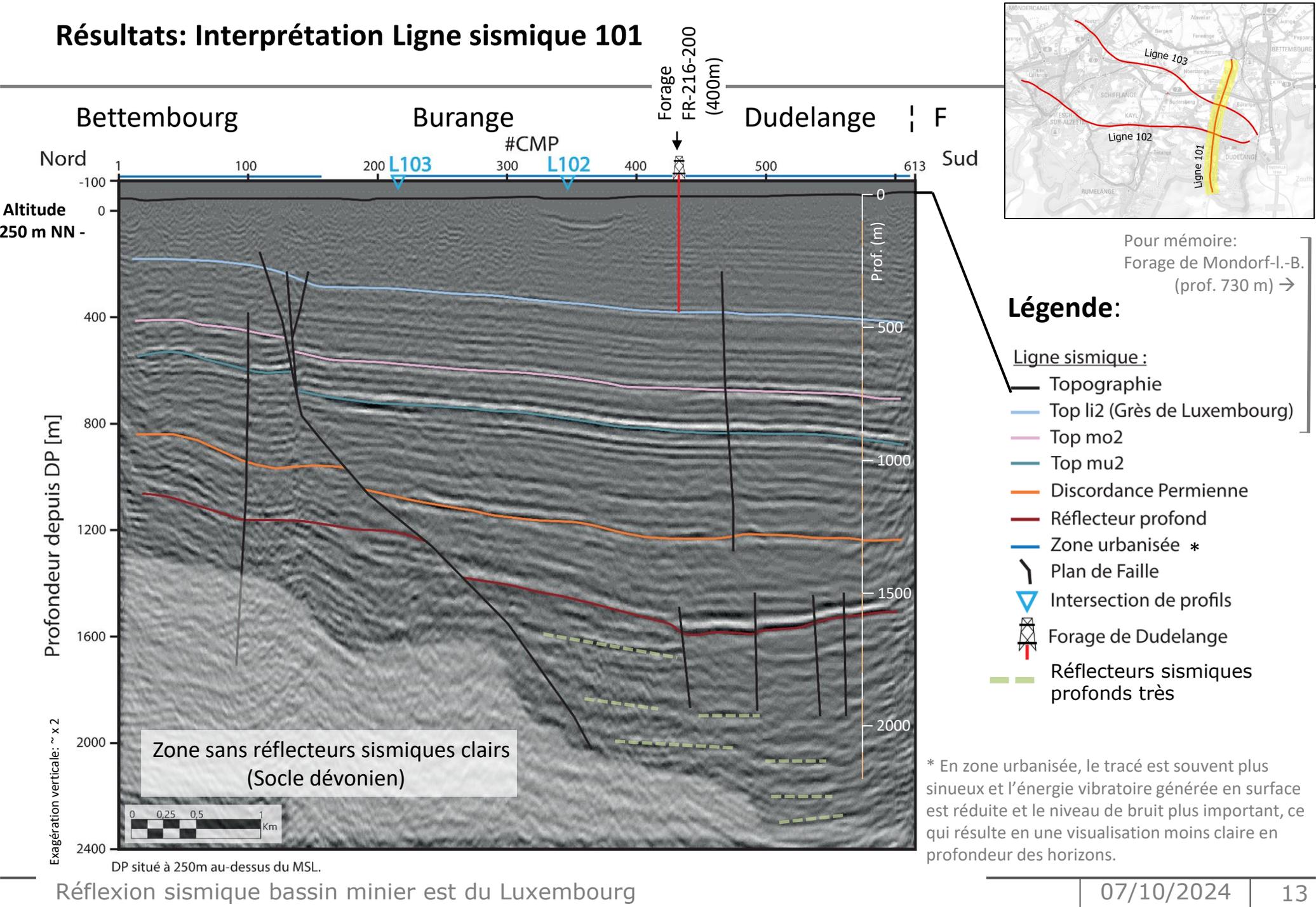
A ce stade, vu l'absence de données de sismique réflexion dans la région, l'étude a pu profiter largement de l'existence du forage de reconnaissance de 2018 (FR-218-200, Dudelange Neischmelz, 430 m de profondeur), grâce à des mesures complémentaires de type vertical seismic profile (VSP) effectuées dans ce forage (CALCIS, Spotlight).



Résultats: Lignes sismiques finales interprétées



Résultats: Interprétation Ligne sismique 101



Bettembourg

Burange

Dudelange

F

Nord

Sud

Altitude
250 m NN -

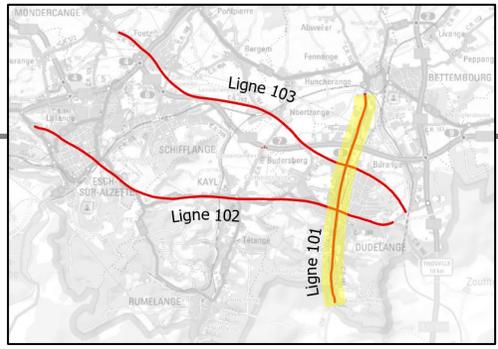
Profondeur depuis DP [m]

Prof. (m)

Zone sans réflecteurs sismiques clairs
(Socle dévonien)



DP situé à 250m au-dessus du MSL.



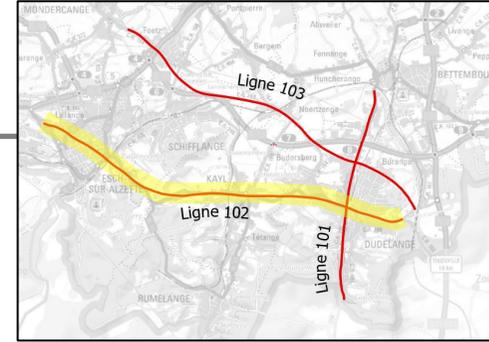
Pour mémoire:
Forage de Mondorf-I.-B.
(prof. 730 m) →

Légende:

- Ligne sismique :
- Topographie
 - Top li2 (Grès de Luxembourg)
 - Top mo2
 - Top mu2
 - Discordance Permienne
 - Réflecteur profond
 - Zone urbanisée *
 - Plan de Faille
 - ▽ Intersection de profils
 - ⊞ Forage de Dudelange
 - Réflecteurs sismiques profonds très

* En zone urbanisée, le tracé est souvent plus sinueux et l'énergie vibratoire générée en surface est réduite et le niveau de bruit plus important, ce qui résulte en une visualisation moins claire en profondeur des horizons.

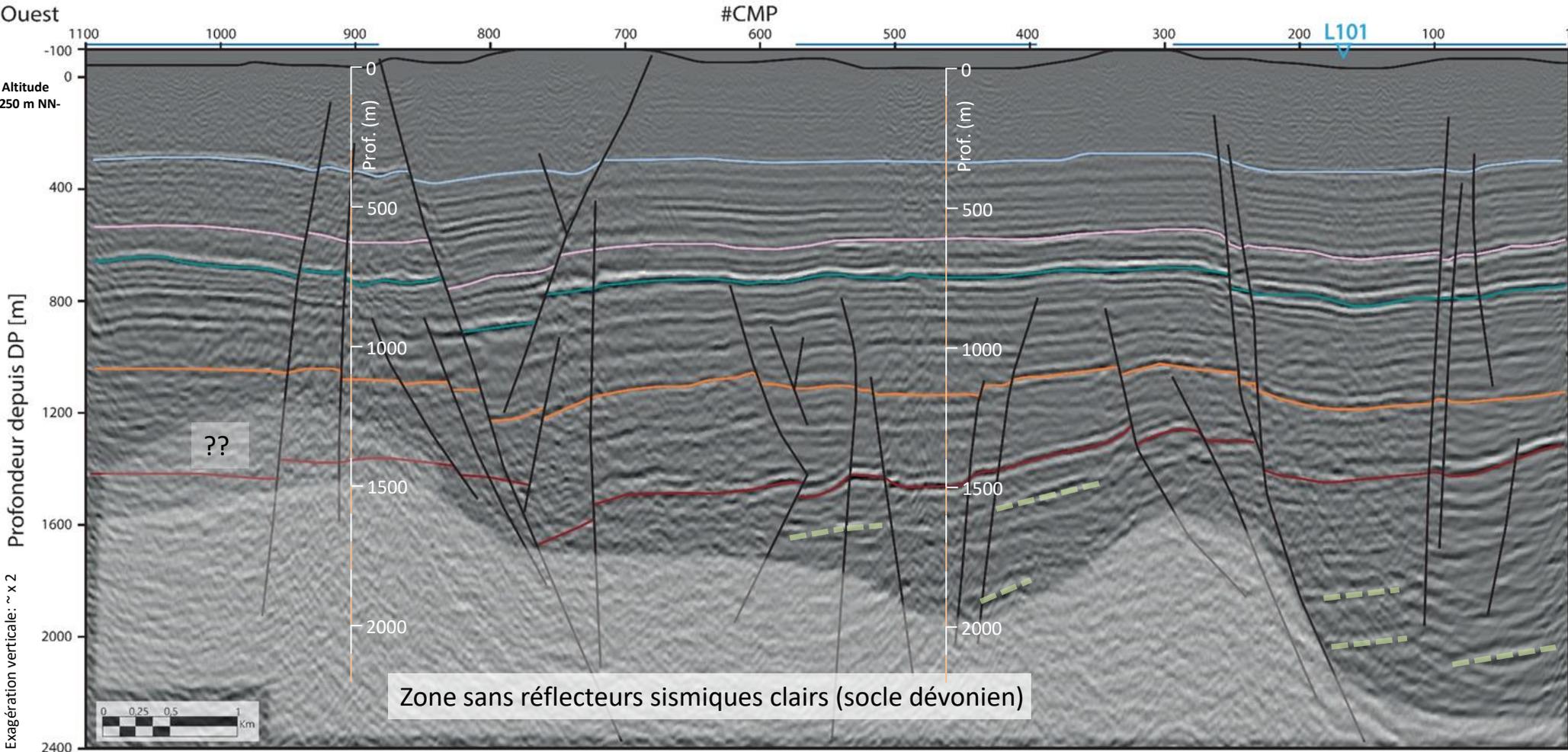
Résultats: Interprétation Ligne sismique 102



Esch/Alzette

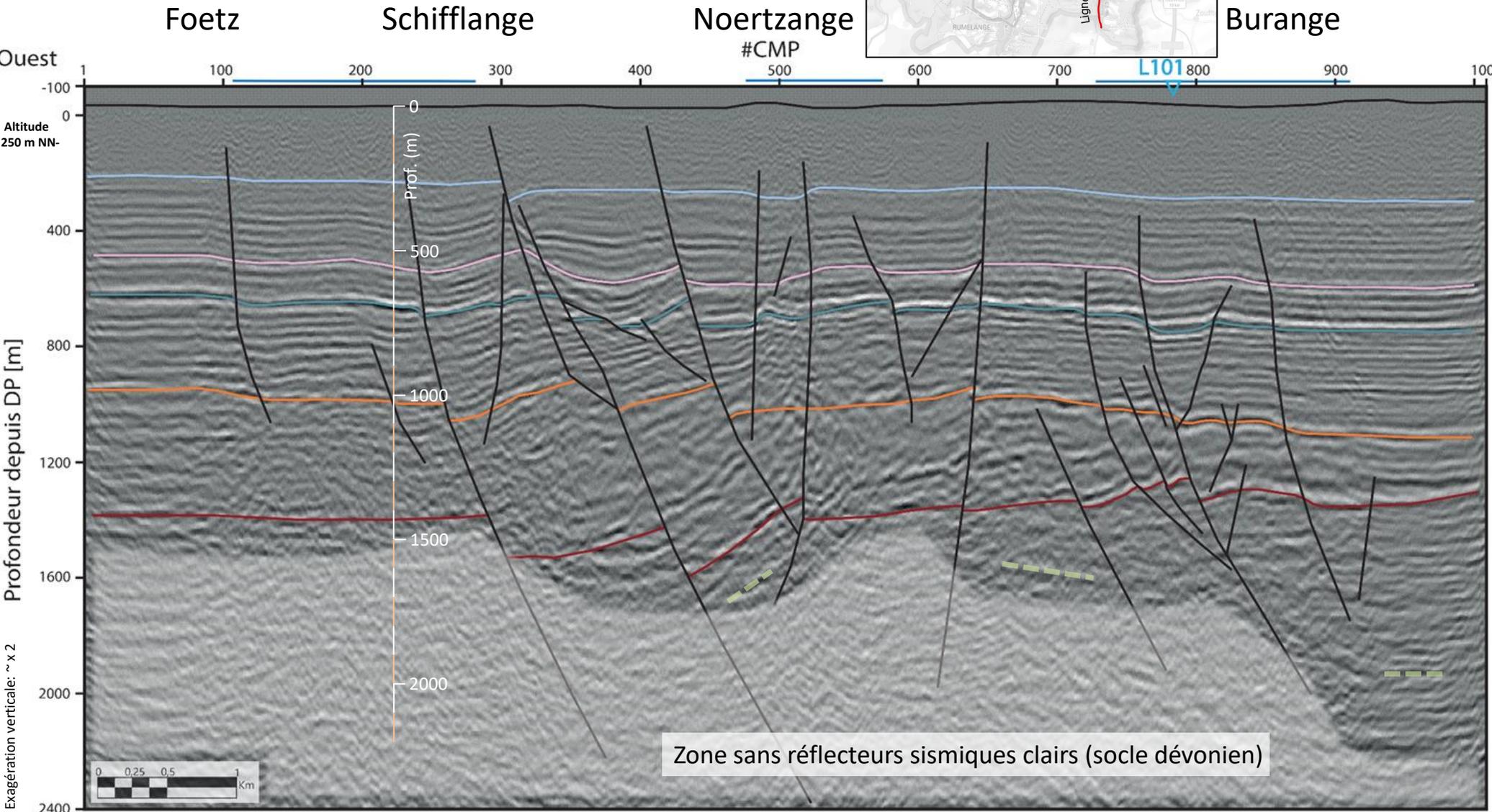
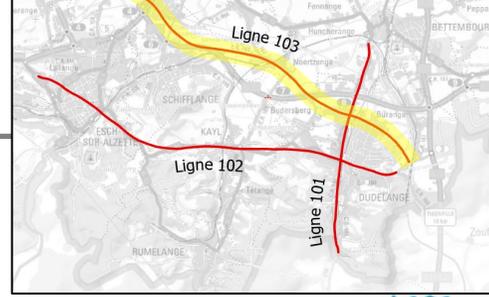
Kayl

Dudelange



DP situé à 250m au-dessus du MSL.

Résultats: Interprétation Ligne sismique 103



DP situé à 250m au-dessus du MSL.

Résultats : Réflecteurs sismiques identifiés

➔ Dans la partie supérieure des profils, les réflecteurs ('horizons') sismiques subhorizontaux suivants ont été identifiés et corrélés entre les 3 lignes:

Top du li2 (Grès de Luxembourg)

(profondeurs: ~250 - 500 m)

Top du mo2 (Dolomies du Muschelkalk supérieur)

(profondeurs: ~450 - 800 m)

Top du mu2 (Dolomies et Grès du Muschelkalk inférieur)

(profondeurs ~600 - 950 m)

Discordance du Permien (Rotliegend) ??

(profondeurs: ~900 - 1350 m)

Un réflecteur fort profond continu (régional) intra-permien ??

(profondeurs: ~1150 - 1700 m)

Au-delà, on ne retrouve plus de réflecteur continu, mais:

Localement, quelques réflecteurs très profonds bien identifiables

(profondeurs: ~1700 - 2300 m)

Réflecteurs sismiques supposés
(à défaut d'étude de réflexion
sismique de référence)

— Top li2 (Grès de Luxembourg)

— Top mo2

— Top mu2

— Discordance Permienne

— Réflecteur profond

■ Réflecteurs sismiques
très profonds

Unités non rencontrées
jusqu'à au Luxembourg

➔ **A plus grande profondeur, le signal est décorrélé et le bruit prépondérant.**

Ceci peut être lié à deux facteurs:

- pas assez d'énergie sismique fournie produite lors de l'acquisition (contraintes du milieu urbain)
- on est en présence de socle Dévonien, formé par une alternance de schistes et de grès fortement plissés ne produisant pas de réflexions sismiques claires.

Résultats : Réflecteurs sismiques identifiés et disposition géologique

- ❑ Les résultats donnent pour la première fois une visualisation du sous-sol profond sous notre pays, jusqu'à une profondeur d'environ 2400 mètres (jusqu'ici: un seul forage de 400 m de profondeur dans le bassin minier luxembourgeois, forage le plus profond au Luxembourg à 730 m de profondeur)
- ❑ Le modèle classique de la géologie du Gutland, avec des unités subhorizontales légèrement inclinées vers le sud, reposant sur un socle plissé supposé dévonien, se voit largement confirmé, mais avec des unités du Trias inférieur, voire du Permien, localement beaucoup plus épaisses que normalement admises.

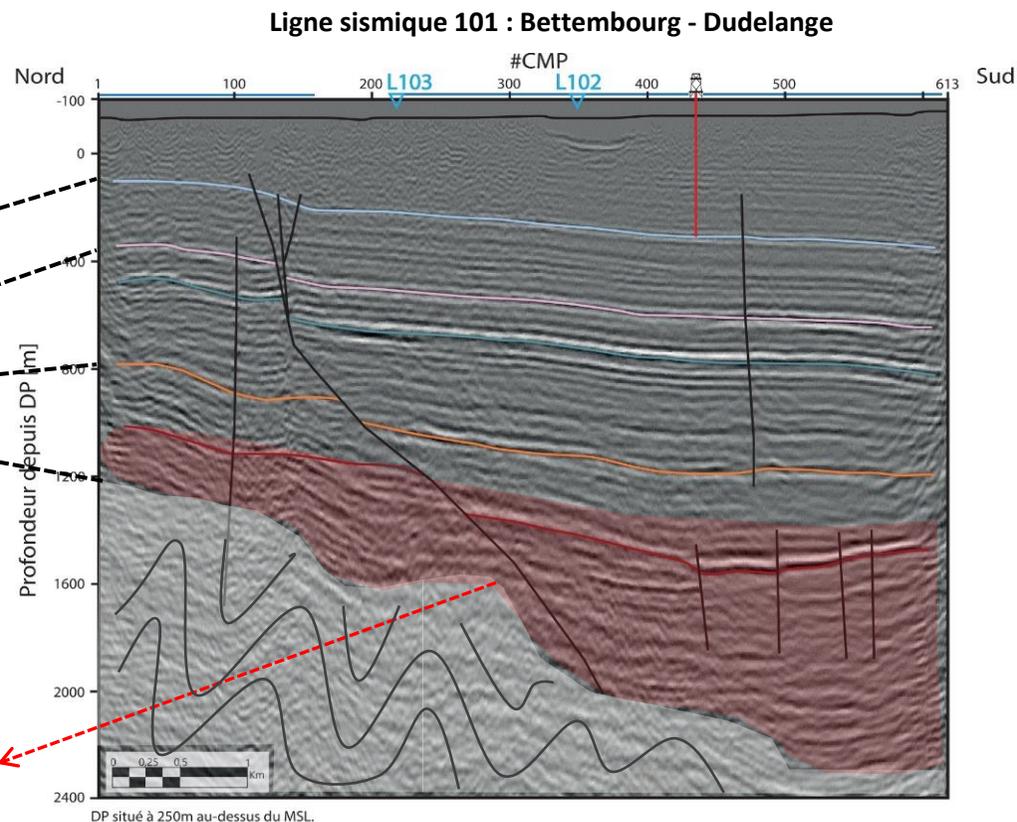
 **Contiennent des unités aquifères**
→ propice à la géothermie hydrothermale

Couches sub-horizontales:
Jurassique, Trias et Permien (Gutland)
→ Réflecteurs bien visibles

Roches schisteuses plissées du Dévonien (Éisleck)
→ Pas de réflecteurs clairs

 **Sans unités aquifères**
→ peu propice à la géothermie hydrothermale

Zone avec unités géologiques non rencontrées jusque-là au Luxembourg (probablement Permien)

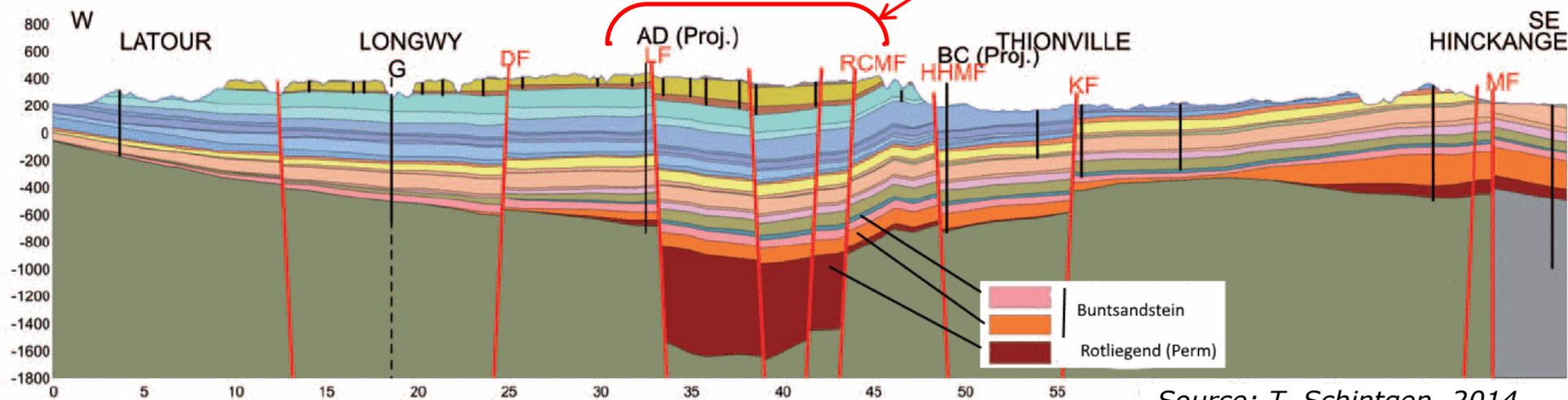


Résultats : Epaisseurs des unités et histoire géologique

- Conformément à l'hypothèse de départ (T. Schintgen, 2014), les unités géologiques du sud du Gutland semblent effectivement montrer des épaisseurs largement supérieures dans la zone d'étude et ceci surtout au niveau des unités du Trias inférieur (Buntsandstein) et celles attribuées au Permien (Rotliegend):

Ouest			Est		
Unité géologique	Forage Longwy FR-107-100	Forage de Reberg (Garnich) FR-172-010	Forage Cessange FR-037-010	Etude sismique Esch- Dudelage (max.)	Forage Mondorf FR-179-100
Keuper	205	224	>365	~200	193
Muschelkalk	32	77	-	~200	165
Buntsandstein	58	49	-	350	235
Permien	0	0	-	>500	3

- On est donc bien, dans la zone d'étude, en présence d'un bassin d'effondrement qui a accumulé des épaisseurs plus importantes qu'ailleurs au Luxembourg



Source: T. Schintgen, 2014

Résultats : Histoire géologique et géologie structurale

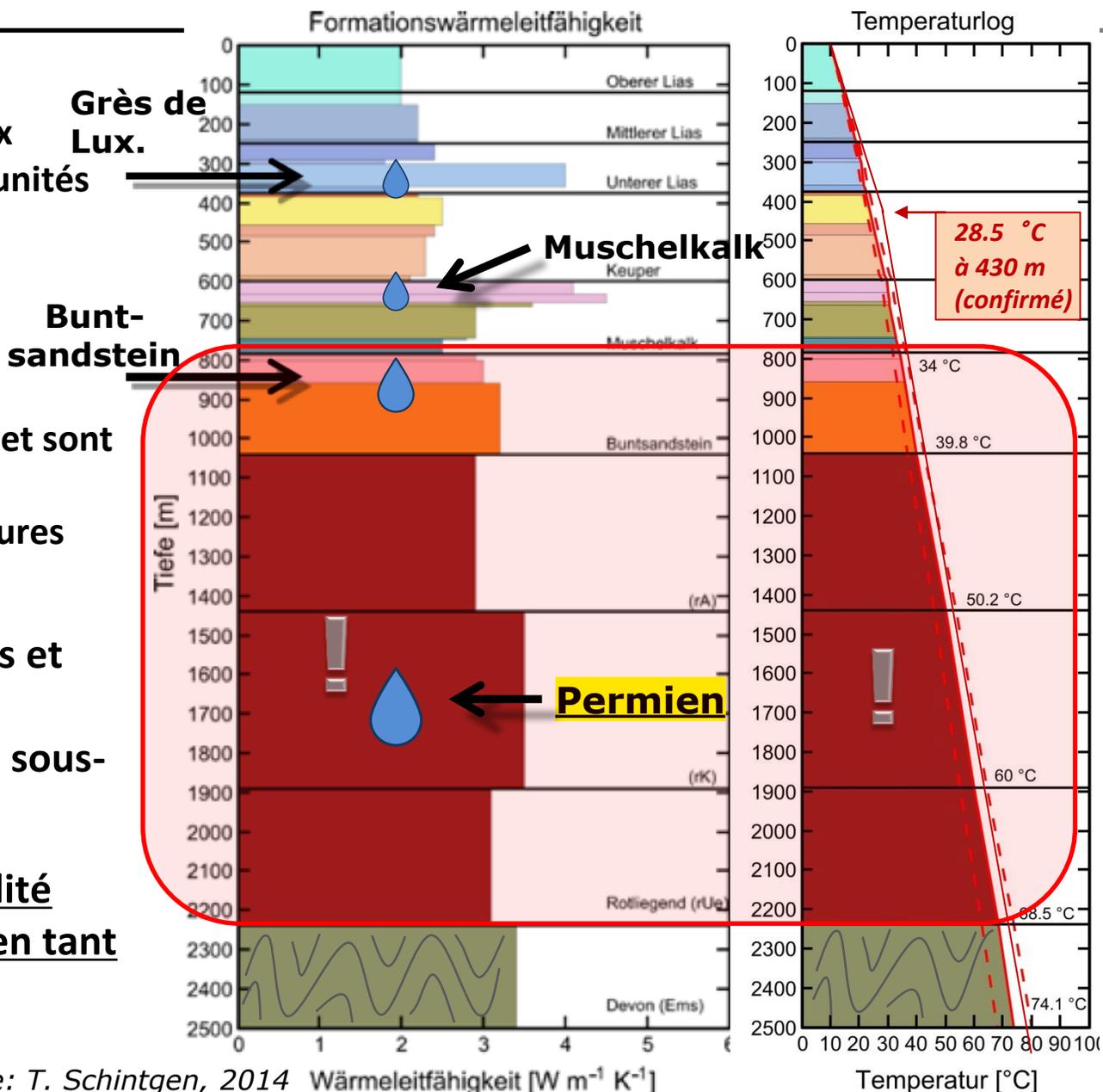
- Comme prévu, on constate un pendage général des unités vers le sud. Le pendage apparent moyen observé dans le Lias et le Muschelkalk qui peut être déduit de la sismique (L101) est de 1.9° vers le sud. Dans le Trias sous-jacent vers le sud du profil, les pendages semblent s'annuler. Il semblent même s'inverser localement dans le Permien pour former une cuvette.
- Les décalages des réflecteurs sismiques ont permis de mettre en évidence de nombreuses failles jusque-là inconnues.
- Plusieurs failles connues en surface sur les cartes géologiques en France continuent bien au Luxembourg.
- Certains tracés de failles connues sur les cartes géologiques au Luxembourg sont à adapter.
- Beaucoup d'entre elles étaient actives au Trias et leurs mouvements diminuent fortement au Lias et seulement les failles majeures ont encore été actives depuis.
- L'hypothèse d'une zone d'extension avec un approfondissement du bassin sédimentaire ('graben' géologique) à la fin du Paléozoïque et début du Mésozoïque se confirme au niveau tectonique aussi:
 - toutes les failles observées semblent être des failles normales;
 - une majorité de failles avec pendage faible vers l'est;
 - quelques failles antithétiques mineures avec pendage vers l'ouest;
 - en profondeur, les plans de faille majeurs s'aplatissent légèrement, accompagnés d'une rotation des plans de stratigraphie des unités ('failles listriques')
- Plutôt qu'une zone d'approfondissement unique, on aurait trois zones d'approfondissement juxtaposées:
 - une à l'est d'Esch-sur-Alzette (la moins exprimée et la moins profonde)
 - une au niveau de la vallée de Kayl-Rumelange
 - une au niveau de Dudelange (la plus profonde)

Campagne de réflexion sismique

Conclusions générales

- ❑ La présence de réflecteurs horizontaux profonds permet de conclure que les unités du Permien/Rotliegend présumées semblent bien être présentes.
- ❑ Elles ont des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres (jusqu'à 1500 m) et sont disposées à des profondeurs très intéressantes au niveau des températures (entre 1000 et 2300 m).
- ❑ Il s'agit d'unités A PRIORI poreuses et perméables → eaux thermales (par opposition au socle dévonien sous-jacent).
- ❑ A condition d'offrir une perméabilité suffisante, l'intérêt de ces unités en tant que réservoir hydrothermal est confirmé.

Coupe verticale schématique prédictive Dudelange Neischmelz

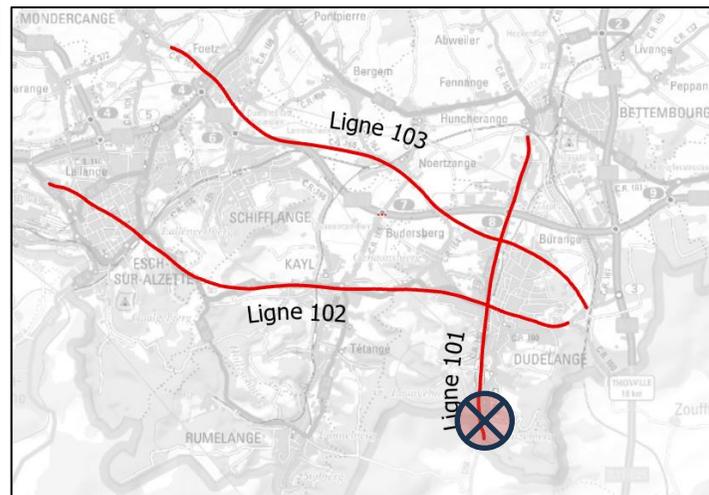


Source: T. Schintgen, 2014 Wärmeleitfähigkeit [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]

Conclusions particulières: Neischmelz, Dudelange

- ❑ Réflecteurs subhorizontaux très profonds clairement identifiables jusqu'à 2200 m
- ❑ A priori, zone la plus favorable pour la géothermie (profondeurs du bassin maximales)

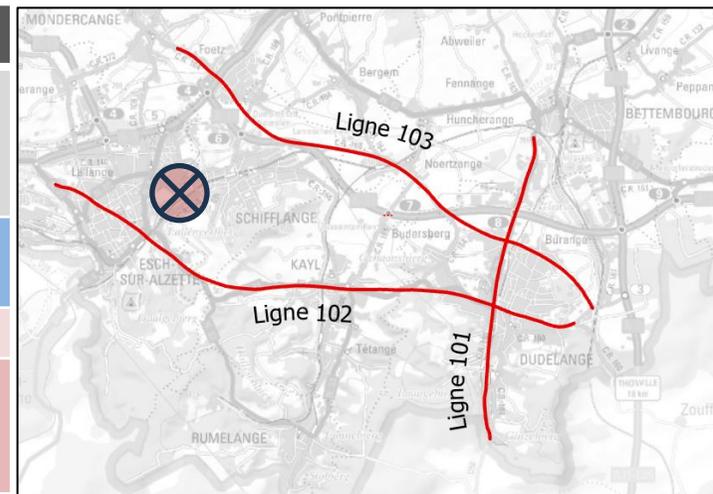
Neischmelz, Dudelange				
Zone cible géothermique	Profondeur min. (m)	Profondeur max. (m)	Température estimée sommet (°C)	Température estimée base (°C)
Grès de Luxembourg	480	580	30	34
Muschelkalk sup.	780	850	39	42
Muschelkalk inf., Buntsandstein et Permien	950	2200	45	86



Conclusions particulières: Metzeschmelz, Schiffflange

- ❑ Réflecteurs sismiques incertains au-delà de 1000 m
- ❑ Possibilité d'intercepter la faille d'Audun-le-Tiche et le compartiment est par forage dirigé ?

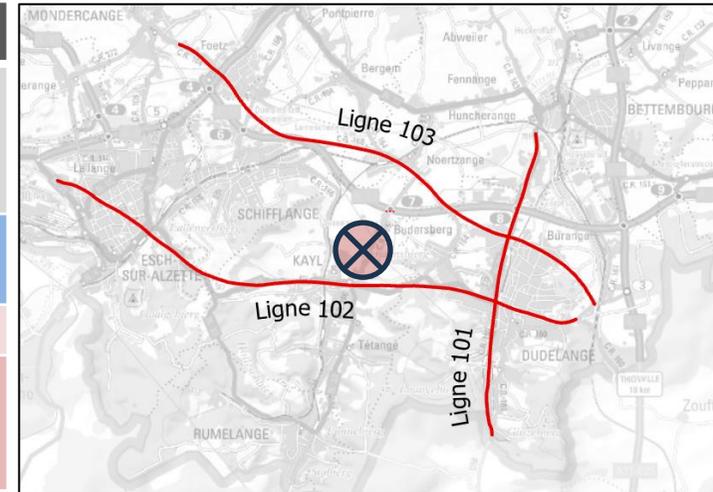
Metzeschmelz, Schiffflange				
Zone cible géothermique	Profondeur min. (m)	Profondeur max. (m)	Température estimée sommet (°C)	Température estimée base (°C)
Grès de Luxembourg	350	450	25	29
Muschelkalk sup.	600	670	34	35
Muschelkalk inf., Buntsandstein et Permien	750	1500 (1700 ?)	39	63 (70 ?)



Conclusions particulières: Kayl-Nord

- ❑ Réflecteurs subhorizontaux très profonds clairement identifiables jusqu'à 1700 m
- ❑ Zone très faillée

Kayl-Nord				
Zone cible géothermique	Profondeur min. (m)	Profondeur max. (m)	Température estimée sommet (°C)	Température estimée base (°C)
Grès de Luxembourg	325	425	23	27
Muschelkalk sup.	600	670	34	36
Muschelkalk inf., Buntsandstein et Permien	750	1650	39	68



Résumé des résultats

Les résultats donnent pour la première fois une visualisation du sous-sol profond sous notre pays et ceci jusqu'à une profondeur d'environ 2400 mètres. Des unités géologiques en disposition subhorizontale peuvent y être identifiées jusqu'à des profondeurs de 2200 mètres. Ces unités sont attribuées au groupe géologique du **Trias**, mais très probablement également au groupe sous-jacent du **Permien**. Le modèle classique de la géologie du Guttland, avec des unités subhorizontales légèrement inclinées vers le sud, reposant sur un socle plissé dévonien, se voit globalement confirmé, mais les unités du Trias inférieur, voire du Permien, montrent, du moins dans cette région, des épaisseurs largement plus importantes qu'il n'avait été soupçonné auparavant.

Comme les unités du Trias inférieur et du Permien, formés en grande partie de grès et de conglomérats, sont a priori des unités **poreuses et perméables**, on est donc en présence d'eaux souterraines chaudes à des profondeurs situées entre 750 et 2200 mètres. Les prévisions actuelles prévoient ainsi des températures situées respectivement entre 40 et 70 degrés.

A condition d'offrir une perméabilité suffisante, l'intérêt de ces unités en tant que réservoir géothermique est donc confirmé.

Les conditions exactes et les débits exploitables de ces eaux souterraines doivent être confirmés par des forages de reconnaissance.

Si elle s'avère faisable, l'exploitation potentielle future de cette ressource en chaleur renouvelable se ferait par l'installation d'un **doublet hydrothermal**, comprenant un forage de pompage de l'eau chaude et un forage de réinjection de l'eau refroidie.