



Caractérisation des cloches de fontis par méthodes sismiques. Carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois (Meuse)



Rapport final

BRGM/RP-69826-FR

Juillet 2020



Direction
Départementale
des Territoires
de la Meuse



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Caractérisation des cloches de fontis par méthodes sismiques. Carrière souterraine de Savonnières-en- Perthois (Meuse)

Rapport final

BRGM/RP-69826-FR

Juillet 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP19NCY007

A. Bitri, I. Gaudot, K. Samyn et J. Le Goff

Vérificateur :

Nom : A. Portal

Fonction : Géophysicienne

Date : 29/07/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Midot

Fonction : Directeur régional

Date : 10/08/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



**Direction
Départementale
des Territoires
de la Meuse**



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : imagerie sismique, géotechnique, carrière souterraine, fontis, Savonnières-en-Perthois, Meuse

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bitri A., Gaudot I., Samyn K. et Le Goff J. (2020) – Caractérisation des cloches de fontis par méthodes sismiques. Carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois (Meuse) - Rapport BRGM/RP-69826-FR, 91 p., 48 ill, 2 annexes.

Synthèse

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagée entre la DDT 55 et le BRGM, relative à l'analyse du risque lié aux remontées de fontis au droit de la carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois, des acquisitions sismiques ont été réalisées selon sept profils : deux profils sismiques positionnés sur des zones affectées par des remontées de fontis (zones 6 et 8) et cinq profils positionnés sur des zones sans remontées de fontis (zone 1 à 5). L'objectif de l'étude est (i) de proposer une méthodologie de caractérisation de la nature et de la qualité géotechnique des terrains situés au droit des zones de fontis en formation, et (ii) d'extrapoler les résultats ainsi obtenus aux terrains de couverture situés hors des zones de fontis, afin d'établir un modèle prédictif (qualitatif) d'évolution.

L'analyse comparative des coupes de vitesses sismiques V_p et V_s (annexe 1), et des logs géologiques des forages, a permis d'établir une relation reliant les différents niveaux sismiques à des lithologies de la pile sédimentaire de Savonnières-en-Perthois :

- une couche superficielle à faibles vitesses ($V_p < 1300$ m/s et $V_s < 300$ m/s), hétérogène le long des profils, interprétée comme étant la couche limoneuse du Quaternaire et un niveau d'altération de l'Hauterivien ;
- une seconde couche à vitesses modérées (1300 m/s $< V_p < 1900$ m/s et 300 m/s $< V_s < 450$ m/s), qui peut correspondre à une couche de calcaire altéré (Hauterivien) constituée d'alternance de passages mous avec parfois des passages plus compétents ;
- une couche à vitesses plus rapides que la précédente (1900 m/s $< V_p < 2100$ m/s et 450 m/s $< V_s < 600$ m/s), qui correspondrait à une couche formée de sable fin et de grès ferrugineux mélangés avec du sable grossier (Valanginien) ;
- une couche à vitesse rapide ($V_p > 2100$ m/s et $V_s > 600$ m/s), qui correspondrait à une couche de calcaire plus compétent, du Portlandien inférieur ou Bononien, extrait dans les carrières de Savonnières-en-Perthois pour la production de pierres de taille.

La comparaison entre les valeurs de RQD et les vitesses sismiques dans la couche du Portlandien qui constitue le toit des exploitations souterraines, a permis d'établir un modèle prédictif de rupture de ce toit : les valeurs faibles de RQD qui traduisent des zones fracturées, sont corrélées avec des vitesses sismique V_p moins élevées.

La comparaison entre les vitesses sismiques à l'aplomb des zones de fontis et hors de ces zones a mis en évidence une signature « litho-sismique » caractérisée par des vitesses V_p et V_s très faibles dans les zones de fontis. Cette signature est interprétée comme une chute des propriétés mécaniques des roches, compatible avec une déstructuration totale (Profil 6) ou partielle (Profil 8) des terrains de recouvrement.

Ainsi l'imagerie sismique permet d'élaborer un modèle prédictif des propriétés mécaniques des roches que cela soit au niveau du toit des exploitations souterraines qu'au niveau des terrains de recouvrement dans leur ensemble.

L'imagerie sismique peut donc être utilisée :

- pour prédire (qualitativement) la probabilité d'occurrence d'un fontis en surface ;
- pour suivre l'apparition et l'évolution de fontis dans le cas de mesures répétées dans le temps.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE GENERAL	11
1.2. OBJECTIFS	12
1.3. DONNEES DISPONIBLES.....	15
1.3.1. Caractéristiques des fontis.....	15
1.3.2. Interprétation des forages	15
2. Mesures, moyens mise en œuvre, et traitements	23
2.1. IMPLANTATION	23
2.2. MATERIEL ET ACQUISITION SISMIQUE	23
2.3. QUALITE DES DONNEES.....	24
2.4. TRAITEMENT PAR TOMOGRAPHIE SISMIQUE REFRACTION	25
2.5. TRAITEMENT PAR ANALYSE SPECTRALE DES ONDES DE SURFACE (MASW)....	28
2.6. TRAITEMENT EN ONDES DE SURFACE PAR « CORRECTION DYNAMIQUE ET SOMME »	31
2.7. SENSIBILITE DES VITESSES SIMIQUES AUX PROPRIETES PHYSIQUES DU SOUS-SOL	32
3. Résultats et interprétation	33
3.1. REPRESENTATION DES RESULTATS ET CALIBRATIONS SUR SONDAGES CARROTÉS.....	33
3.2. PROFILS DE VITESSE SUR ZONES DE FORAGE (ZONES 1 A 5).....	34
3.2.1. Profil 1 – forage SAVW	34
3.2.2. Profil 2 – forage SAVS	37
3.2.3. Profil 3 – Forage SAVC.....	41
3.2.4. Profil 4 – forage SAVE	45
3.2.5. Profil 5 – forage SAVN.....	49
3.2.6. Synthèse des calibrations des vitesses sismiques	52
3.3. PROFILS DE VITESSE SUR ZONE DE FONTIS (ZONES 6 ET 8).....	53
3.3.1. Calibration par extrapolation	53
3.3.2. Profil 6	53
3.3.3. Profil 8	56
4. Discussion	61

4.1. CORRELATION SISMIQUE - LITHOLOGIE	61
4.1.1. Zone 6 – Fontis du Pâquis	61
4.1.2. Zone 8 – Fontis F4, F5 et F6	62
4.1.3. Zone 4	63
4.2. CORRELATION VITESSE SISMIQUE – RQD.....	64
4.2.1. Etablissement d’un modèle de prédiction des RQD à partir des données Vp.....	64
4.2.2. Application du modèle prédictif et résultats.....	65
5. Conclusion et recommandations.....	69
5.1. CONCLUSION.....	69
5.2. RECOMMANDATIONS	70
6. Bibliographie.....	73

Liste des illustrations

Illustration 1 - Schéma conceptuel de la remontée d’une cloche de fontis vers la surface à partir d’un vide souterrain (Hannion et al. 2017)	11
Illustration 2 - Cartographie de l’aléa effondrement localisé sur la commune de Savonnières-en-Perthois au 1/5000 (Hannion et al. 2017)	12
Illustration 3 - Position des tirs sismiques indiquant l’implantation des profils sismiques 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 8 dans les 7 zones étudiées. A cette échelle, la plupart des piliers apparaissent comment des points.....	14
Illustration 4 - Caractéristiques des cloches de fontis étudiées (Hannion et al. 2017).....	15
Illustration 5 - Coupe géologique schématique ouest-est au niveau de Savonnières-en-Perthois (Hannion et al., 2017)	16
Illustration 6 - Interprétation des forages (Pmin : profondeur minimum, Pmax : profondeur maximum, ép. : épaisseur) (données extraites du rapport de Hannion et al., 2017, les données en rouge sont modifiées par rapport aux données de 2016 – elles correspondent à la description des logs géologique de 2012).....	16
Illustration 7 - Données de RQD sur les formations géologiques du recouvrement de Savonnières.	19
Illustration 8 - Représentation des formations géologiques interprétées en terme de valeur de RQD, selon une coupe NE (SAVN) – SO (SAVS) des forages de Savonnières.....	20
Illustration 9 - Représentation des formations géologiques interprétées en terme de valeur de RQD, selon une coupe NE (SAVN) – SO (SAVS) des forages de Savonnières.....	21
Illustration 10 - Données du RQD en fonction de la profondeur depuis le toit supposé de la galerie.....	22
Illustration 11 - Photographie illustrant le dispositif d’acquisition sismique et la mise en œuvre de la source sismique chute de poids accélérée sur la zone 6 (fontis du Pâquis).....	24

Illustration 12 - Exemples d'enregistrements sismiques avec application d'un gain de type AGC, fenêtre glissante de 200 ms. Les flèches indiquent : en rouge, les premières arrivées de l'onde P directe, en vert, les ondes de surface de type onde de Rayleigh. Gauche : niveau faible de bruit anthropique. Droite : niveau plus élevé de bruit anthropique	25
Illustration 13 - Exemples de pointés des temps de premières arrivées sismique de l'onde P (croix) sur un tir du profil (gauche). Ces temps d'arrivée sont représentés sous forme d'un diagramme temps/géophone (hodochrone) sur l'illustration de droite.....	26
Illustration 14 - Modèle de vitesse des ondes P (V_p) obtenu par tomographie sismique réfraction	26
Illustration 15 - Séquence de traitement des données en tomographie sismique réfraction réalisée avec le logiciel RAYFRACT 3.36.	27
Illustration 16 - Principe de la méthode de prospection sismique par ondes de surface, de l'acquisition des données au traitement.	28
Illustration 17 - Exemple d'enregistrement sismique (gauche) et le diagramme de dispersion des ondes de surface associé (droite) et représenté avec les outils de visualisation du logiciel Seismic Unix	29
Illustration 18 - Gauche : exemple de courbe de dispersion mesurée (cercles et barres d'erreurs associés) et obtenue par inversion (ligne continue). Droite : modèle de V_s 1D et incertitudes associées obtenus par inversion de la courbe de dispersion	29
Illustration 19 - Modèle de vitesse S obtenu par tomographie sismique en ondes de surface et représenté avec le logiciel Surfer®	30
Illustration 20 - Chaîne de traitements pour l'obtention d'un profil sismique somme en ondes de surface. DLMO signifie Dynamic Linear Move Out en anglais, CRG signifie Common Receiver Gather	31
Illustration 21 - Coupe somme en onde de surface	32
Illustration 22 - Localisation du Profil sismique 1	34
Illustration 23 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 1. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	36
Illustration 24 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 1.	37
Illustration 25 - Localisation du Profil sismique 2	38
Illustration 26 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 2. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	40
Illustration 27 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 2	41
Illustration 28 - Localisation du Profil 3.....	42
Illustration 29 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 3. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	44
Illustration 30 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 3	45
Illustration 31 - Localisation du Profil 4.....	46
Illustration 32 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 4. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	48
Illustration 33 - Coupe somme en ondes de surface le long du Profil 4.....	49
Illustration 34 - Localisation du Profil 5.....	50

Illustration 35 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 5. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	51
Illustration 36 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 5.	52
Illustration 37 - Synthèse du calibrage des vitesses sismiques sur les horizons lithologiques identifiés dans les forages carottés dans chaque zone. La dernière ligne indique les valeurs moyennes calculées sur les cinq profils	53
Illustration 38 - Localisation du Profil 6.....	54
Illustration 39 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 6. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	55
Illustration 40 - Coupe sismique somme en ondes de surface du Profil 6	56
Illustration 41 - Localisation du Profil 8.....	57
Illustration 42 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 8. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.	59
Illustration 43 - Coupe sismique somme des ondes de surface du Profil 8	60
Illustration 44 - Scan 3D des fontis dans la zone V2. Le Profil 8 est colinéaire au fontis 4,5 et 6	62
Illustration 45 - Tir sismique (gauche) et son diagramme de dispersion (droite) du profil 8 montrant une atténuation des amplitudes des ondes de surfaces (carré rouge) et une dispersion multimodale.....	63
Illustration 46 - Modèle de prédiction du RQD à partir des vitesses sismiques V_p . Les données sont issues des forages carottés réalisés dans les zones 1,2,3,4,5 (Hannion et al., 2017). Les valeurs moyennes de RQD et de vitesse dans la couche de calcaire du Portlandien sont utilisées. Un modèle de régression avec ajustement affine est utilisé.	65
Illustration 47 - Prédiction de la qualité de la roche du calcaire du Portlandien en terme de RQD prédits à partir des mesures de vitesse V_p , suivant le modèle de régression linéaire présenté sur l'illustration 46	67
Illustration 48 – Déplacement ondes P et S	77

Liste des annexes

Annexe 1 : Terminologie.....	75
Annexe 2 : Données des sondages.....	79

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GENERAL

La zone urbanisée située au droit de la carrière souterraine exploitée en chambre et pilier de Savonnières-en-Perthois (Meuse, région Grand-Est), fait l'objet d'un Plan de Prévention des Risques Mouvements de terrain (PPR) qui est en cours de mise en place. A Savonnières-en-Perthois, la probabilité d'occurrence d'un effondrement localisé de type fontis (Illustration 1) d'un niveau d'aléa très fort (Illustration 2) est basée sur la présence de fracturation, de circulation d'eau et de l'amorce de remontée de fontis. Plusieurs zones de fontis n'ayant pas percé en surface ont été repérées depuis le fond de la carrière souterraine (Illustration 3).

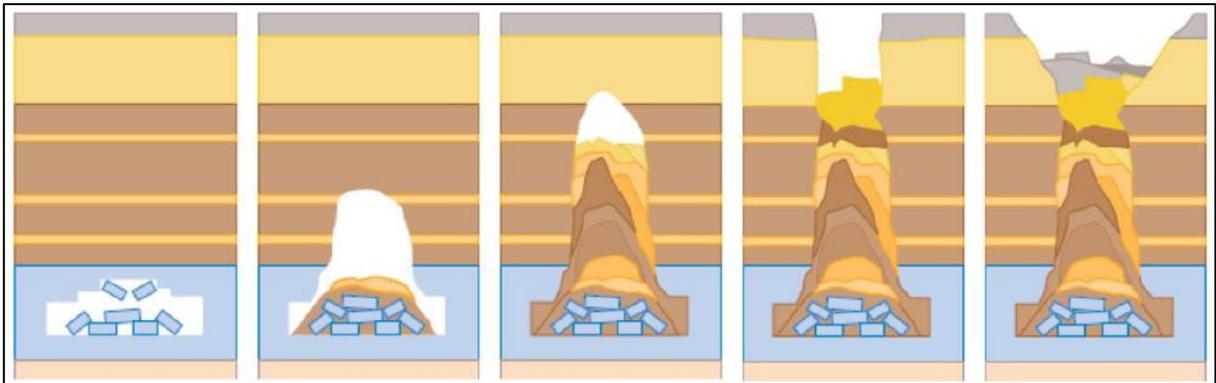


Illustration 1 - Schéma conceptuel de la remontée d'une cloche de fontis vers la surface à partir d'un vide souterrain (Hannion et al. 2017)

La dynamique d'évolution des fontis dépend principalement de la nature lithologique, des propriétés mécaniques et de l'épaisseur du recouvrement. Dans le cadre de Savonnières-en-Perthois, très peu de données sont disponibles sur l'évolution des fontis. Les observations réalisées au niveau de la remontée de voûte de la galerie des V2 (zone 8, Illustration 3) ont montré une évolution plutôt lente, avec seulement quelques pierres détachées depuis 5 ans.

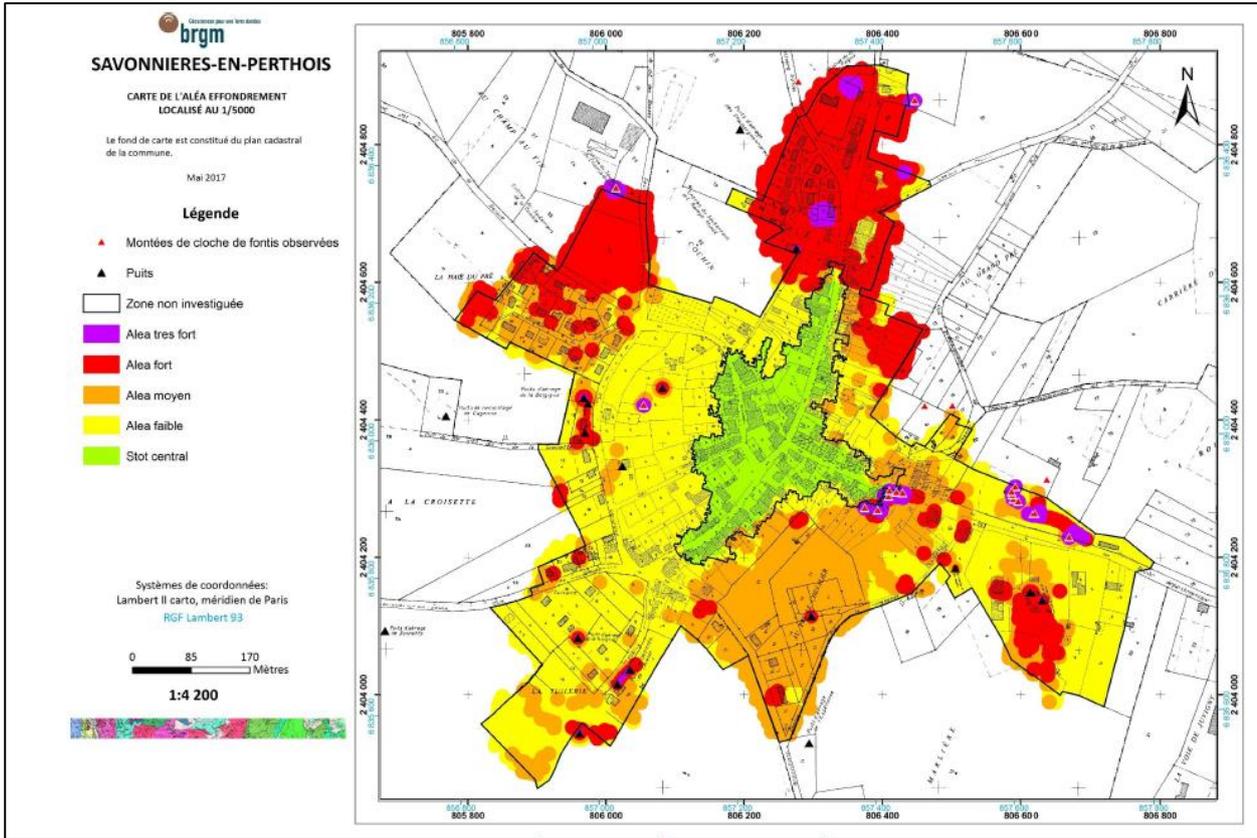


Illustration 2 - Cartographie de l'aléa effondrement localisé sur la commune de Savonnières-en-Perthois au 1/5000 (Hannion et al. 2017)

Des zones d'aléa d'effondrement localisé ont été cartographiées en 2017 (Illustration 2). Des fontis en cours d'évolution sont présents dans certains de ces secteurs. La caractérisation des zones de fontis et de leur évolution représente donc un enjeu majeur.

1.2. OBJECTIFS

Ce projet s'intègre dans un processus d'analyse des zones de risque lié aux remontées de fontis au droit de la carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois. Les objectifs de la présente étude sont :

- de proposer une méthodologie de caractérisation de la nature et de la qualité géotechnique des terrains situés au droit de zones de fontis en formation ;
- d'extrapoler les résultats ainsi obtenus aux terrains de couverture situés hors des zones de fontis, afin d'établir un modèle prédictif (qualitatif) d'évolution.

Pour ce faire, il est proposé d'utiliser des méthodes d'imagerie sismique. Elles consistent à mesurer, à la surface du sol, les temps d'arrivée des ondes sismiques qui sont directement liés aux variations de vitesses existantes dans le sous-sol. Ces dernières sont liées aux caractéristiques géologiques et mécaniques des terrains auscultés. Elles peuvent ainsi apporter de nombreux renseignements, comme l'existence de cavités souterraines, de niveaux altérés, décomprimés ou la présence de remblais peu compacts.

L'approche proposée est d'établir une éventuelle corrélation entre les propriétés de vitesse sismique, et les propriétés géotechniques au droit des fontis (exprimée à travers le RQD- Rock Quality Designation), puis de l'extrapoler à l'ensemble de la zone, dans le but d'identifier, voire de prévenir, une possible survenance de fontis.

Dans le cadre des études de stabilité de la carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois, cinq sondages carottés ont été réalisés pour lesquels un relevé géologique est disponible (Illustration 3).

Cette étude propose ainsi de réaliser des mesures sismiques :

- au droit des 5 sondages carottés ;
- au droit de deux zones de fontis connues :
 - zone 8 (galerie des V2) : la zone 8 est caractérisée par la présence d'une galerie secondaire entre la carrière souterraine et le recouvrement. L'intercalaire entre la galerie secondaire et la galerie principale, estimé à 50 cm d'épaisseur, présente 3 ouvertures (nommées fontis par la suite). Un fontis du toit supérieur de la galerie secondaire est visible ;
 - zone 6 (proximité de l'entrée du Pâquis) : ce secteur correspond à la localisation d'une remontée de fontis visible depuis le fond et d'un désordre en surface. A ce jour la connexion entre les deux n'est pas établie.

Les numéros de profils et de zones sont identiques.

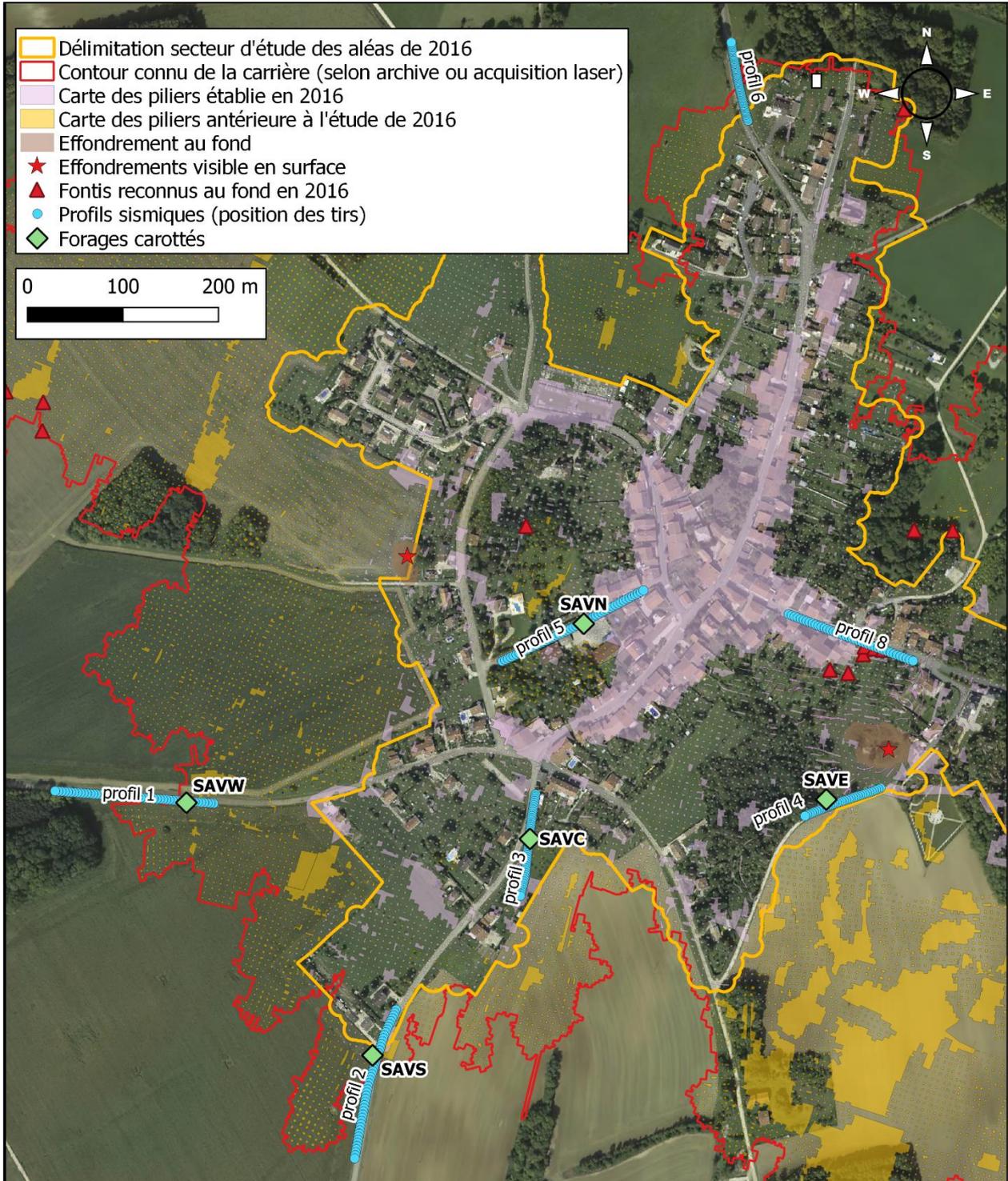


Illustration 3 - Position des tirs sismiques indiquant l'implantation des profils sismiques 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 8 dans les 7 zones étudiées. A cette échelle, la plupart des piliers apparaissent comment des points.

1.3. DONNEES DISPONIBLES

1.3.1. Caractéristiques des fontis

Les fontis étudiés ont été caractérisés en 2016 à l'aide d'un scan 3D (Illustration 4). Le toit de la galerie de la carrière souterraine est situé, pour l'essentiel, à moins de 30 m de profondeur.

Zone	Nom du fontis	Profondeur du toit de la galerie (m)	Hauteur de la planche de roches non altérées (m)	Hauteur de remontée de la cloche par rapport au toit de la galerie (m)
Zone 6	Galerie près de la Rue Pâquis	14	7,40	2,60
Zone 8	Fontis 1	26	14,96	7,04
	Fontis 2	26	16,87	5,13
	Fontis 3	26	16,10	5,90
	Fontis 4 et 5	26	16,10	5,90
	Fontis 6	26	14,00	8,00

Illustration 4 - Caractéristiques des cloches de fontis étudiées (Hannion et al. 2017)

1.3.2. Interprétation des forages

5 sondages carottés ont été réalisés fin 2011 par l'entreprise Fondasol. Ils ont été suivis par le CEREMA. Les levés lithologiques ont été effectués en juillet et août 2012 par le BRGM.

Description des formations rencontrées

Les forages, réalisés en 2011 (annexe 2) rencontrent les formations géologiques suivantes (Illustration 5 Illustration 6) :

- les limons datant du Quaternaire ;
- les formations de l'Hauterivien (Crétacé). Cet étage est représenté par les "Calcaires à Spatangues" grenus, hétérogènes, plus au moins gréseux au sommet. Ces calcaires reposent sur une couche basale généralement marneuse (Marnes calcaires bleues), mais parfois conglomératique ;
- les formations du Valanginien (Crétacé). Les assises supérieures du Valanginien sont formées par des sables dunaires très fins, blancs, gris ou jaunâtres (alternance). Au-dessous se place le niveau du « Fer géodique » et de grès ferrugineux bruns mélangés avec du sable grossier et parfois avec de l'argile ;
- les formations du Portlandien inférieur (Jurassique). Il s'agit d'un complexe de couches calcaires, marneux, gréseux et dolomitiques, de couleurs grise, beige, jaunâtre, roussâtre, blanchâtre, brunâtre et verdâtre. La carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois exploitait cet horizon.

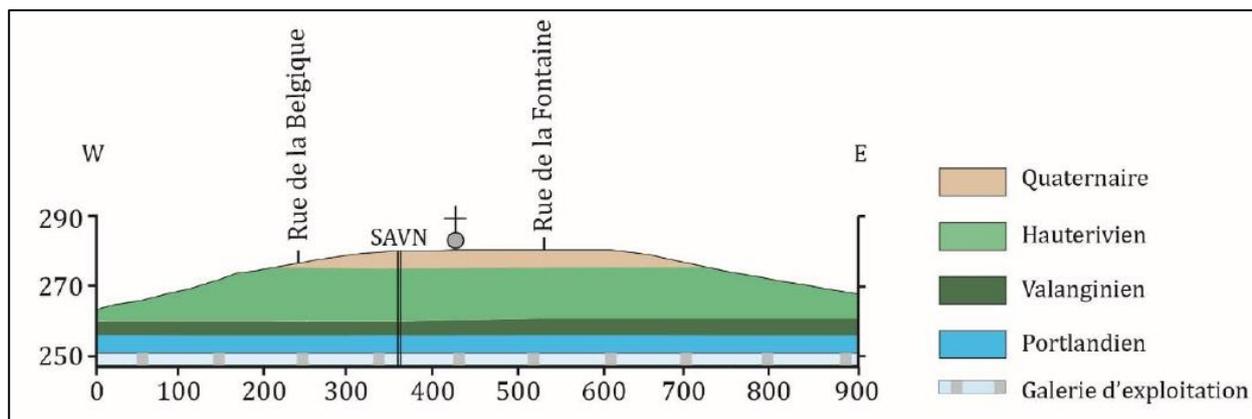


Illustration 5 - Coupe géologique schématique ouest-est au niveau de Savonnières-en-Perthois (Hannion et al., 2017)

L'interprétation des forages en 2016 a montré une forte hétérogénéité des terrains de recouvrement avec des intercalations de nature différente au sein des formations (Hannion et al., 2017). Les données du toit du calcaire de Savonnière en 2016 correspondent à une extrapolation du toit de la galerie. Etant donné que ce calcaire n'a pas toujours été exploité, il a été décidé de conserver sur cette mesure les données descriptives de 2011 (Illustration 6).

Une incertitude demeure sur la profondeur du toit mesurée par les géomètres sur le forage SAVN (mesuré à 30,5 m de profondeur) alors que la description et les photographies des carottes sont disponible jusque 32,7 m. Il est possible que cette mesure ait été prise depuis le fond de la carrière et extrapolée au niveau du forage SAVN. Le forage SAVN aurait dans ce cas traversé un pilier.

	SAVE			SAVS			SAVW			SAVN			SAVC		
	Pmin (m)	Pmax (m)	ép. (m)	Pmin (m)	Pmax (m)	ép. (m)	Pmin (m)	Pmax (m)	ép. (m)	Pmin (m)	Pmax (m)	ép. (m)	Pmin (m)	Pmax (m)	ép. (m)
Quaternaire	0	4	4	0	3	3	0	3	3	0	5	5	0	2	2
Hauterivien	4	11,5	7,5	3	8	5	3	7	4	5	20	15	2	10	8
Valanginien	11,5	13	1,5	8	11	3	7	12	5	20	23,5	3,5	10	17	7
Portlandien	13	21	8	11	18,6	7,6	12	17,4	5,4	23,5	30,7	7,2	17	20,1	3,1
Calcaire de Savonnières-en-Perthois (exploité ou non)	21	24	3	18,6	23	4,4	17,4	22,7	5,3	30,7	32,7	2	20,1	22,1	2
Galerie (vue ou supposée)	21 (forage)			19			16,5			30,5 (mesure géomètre)			22		

Illustration 6 - Interprétation des forages (Pmin : profondeur minimum, Pmax : profondeur maximum, ép. : épaisseur) (données extraites du rapport de Hannion et al., 2017, les données en rouge sont modifiées par rapport aux données de 2016 – elles correspondent à la description des logs géologique de 2012)

Estimation de la qualité géotechnique des formations

Des mesures de qualité de la roche (RQD - Rock Quality Designation) ont été réalisés sur les 5 forages de Savonnières-en-Perthois par le CEREMA (Hannion Y. et al., 2017). Le RQD, exprimé en pourcent, mesure le pourcentage de récupération de morceaux de carotte de forage. La classification est la suivante :

- < 25 % qualité de roche très mauvaise ;
- 25-50 % qualité de roche mauvaise ;
- 50-75 % qualité de roche passable ;
- 75-90 % qualité de la roche bonne ;
- 90-100 % qualité de la roche excellente.

Même s'il est admis en France que le RQD se calcule sur toutes les carottes, les données RQD ne sont véritablement représentatives que sur les roches massives. Sur les roches « molles » ou feuilletées, le calcul d'un état de fracturation n'a pas beaucoup de sens.

Le RQD est défini selon la formule suivante :

$$\frac{\text{somme des longueurs} > \min(10 \text{ cm ou } 2 \times \text{diamètre de la carotte})}{\text{longueur totale de la carotte}}$$

La plupart du temps le seuil fixe de 10 cm est retenu avec une longueur totale de carotte égale à la passe de forage (norme française) ou égale à 1 m (norme internationale).

Dans le cas des forages de Savonnières-en-Perthois :

- le seuil fixe est supposé de 10 cm ;
- la longueur totale de la carotte varie : 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, 1 m et valeurs supérieures à 1 m (sans pouvoir déterminer si le calcul a été réalisé sur des passes de plus de 1 m ou si les valeurs de plus de 1 m correspondent à un regroupement de valeurs identiques : le détail du calcul n'étant pas disponible).

Dans le cadre de l'étude, le RQD calculé sur les forages en 2011 a été vérifié selon les photographies disponibles sur quelques passes aléatoires. Le calcul réalisé à partir des photographies ne donne pas toujours le même résultat que sur la donnée fournie en 2011. La vérification des données a permis de constater :

- sur certaines passes, le RQD calculé sur photographie est inférieur à celui de 2011 : cette différence peut s'expliquer en partie si les carottes ont été manipulées avant la prise de photographies ;
- sur certaines passes, le RQD calculé sur photographie est supérieur à celui de 2011 (exemple : SAVW entre 19,6 et 20,6 m, RQD = 92 %) ;
- le RQD a été calculé sur des roches « molles », raison pour laquelle certaines valeurs de RQD sont égales au taux de récupération (exemple : argile molle, forage SAVN entre 2 et 7 m de profondeur, RQD entre 0 et 100 %).

Ces informations, cumulées à l'absence des données de calculs, permettent de supposer que le RQD comprend quelques incertitudes.

Corrélation données lithologiques – RQD

Les valeurs de RQD sont très variables mais montrent des formations peu fracturées dans l'Hauterivien, le Portlandien et le calcaire de Savonnières. Dans le Portlandien (formation située au droit de l'exploitation), le RQD montre une qualité de roche bonne avec des moyennes variant de 70 à 89 % (Illustration 7). Les valeurs minimums montrant une qualité de roche mauvaise (27 et 43 %) sont sur les forages SAVE et SAVW.

Une compilation des données lithologiques – RQD a été réalisée (Illustration 8 et Illustration 9).

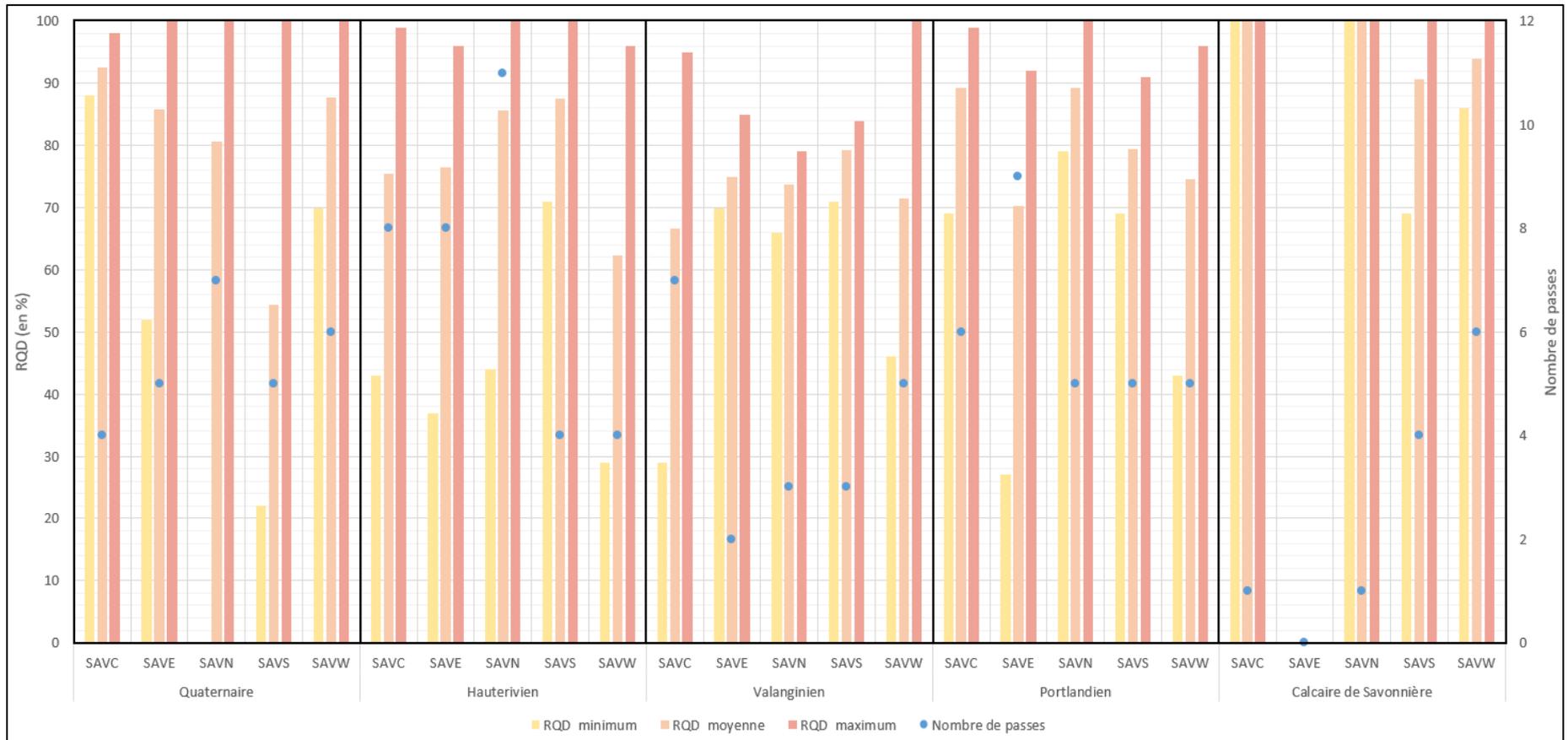


Illustration 7 - Données de RQD sur les formations géologiques du recouvrement de Savonnières.

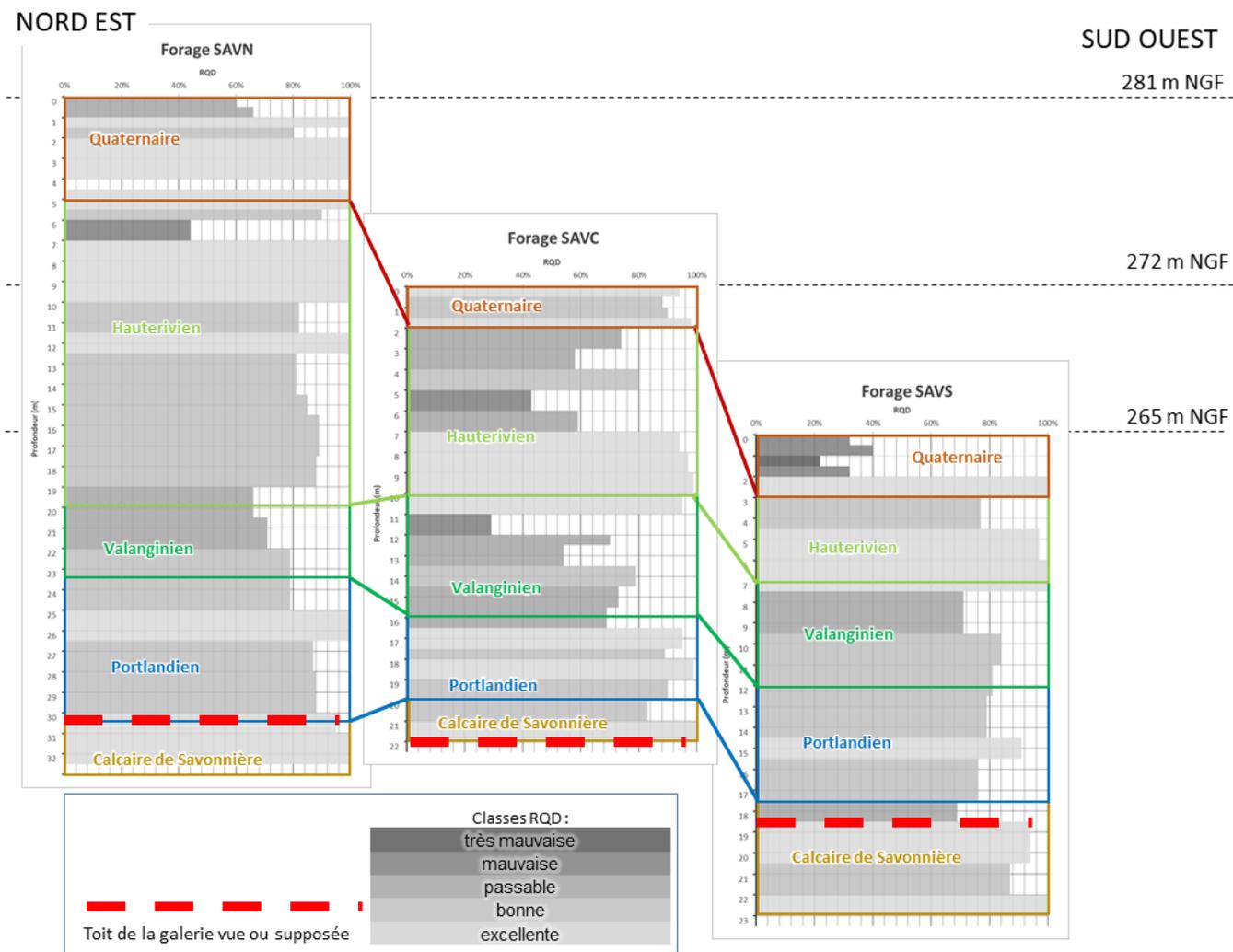


Illustration 8 - Représentation des formations géologiques interprétées en terme de valeur de RQD, selon une coupe NE (SAVN) – SO (SAVS) des forages de Savonnières.

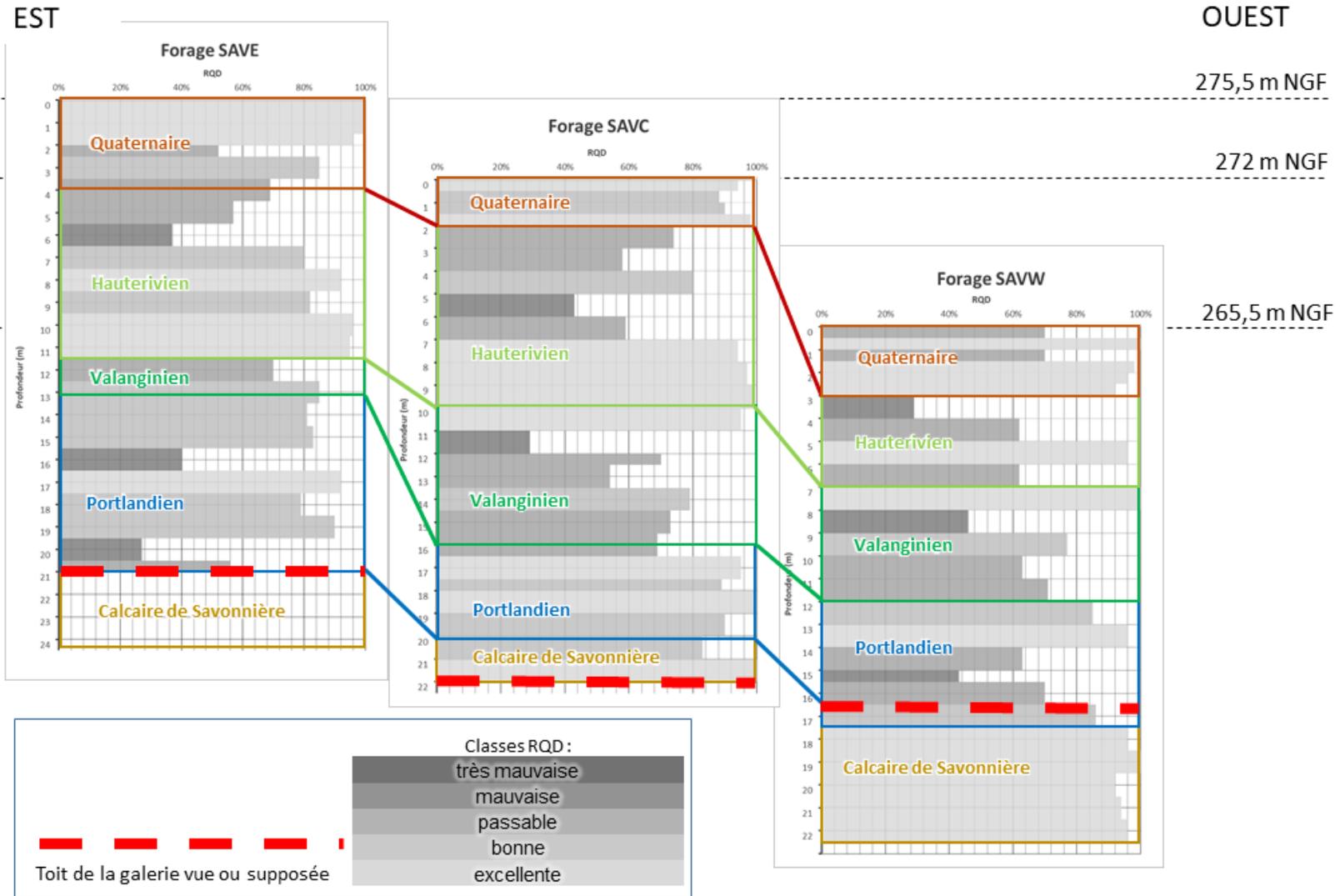


Illustration 9 - Représentation des formations géologiques interprétées en terme de valeur de RQD, selon une coupe NE (SAVN) – SO (SAVS) des forages de Savonnières.

Les variations lithologiques indiquent :

- un pendage NE-SO des formations ;
- une diminution de la puissance de l'Hauterivien vers le sud-ouest ;
- des puissances variables du Valanginien avec un épaissement au centre ;
- le calcaire de Savonnières-en-Perthois correspond à la couche exploitée et n'est donc pas toujours représenté (exemple : forage SAVE).

Les terrains surmontant le calcaire de Savonnières-en-Perthois sont de qualité bonne à excellente excepté sur les forages SAVE et SAVW. Ces différences de RQD peuvent s'expliquer par une déstructuration des terrains de recouvrement au toit de la galerie lors de l'exploitation, notamment pour le forage SAVE.

Le recouvrement du forage SAVW, de qualité géotechnique moindre que les autres forages, peut-être dû, au-delà de l'exploitation de la carrière à proximité, à la présence de karst dans ce secteur.

La comparaison des données de RQD à partir du toit supposé de la galerie (Illustration 10) montre que les données sont relativement cohérentes, excepté sur les forages SAVE et SAVW dont le recouvrement est considéré comme fracturé au droit de la galerie. L'ensemble de ces informations permettent de supposer que ces forages sont peu représentatifs d'un état sain du recouvrement.

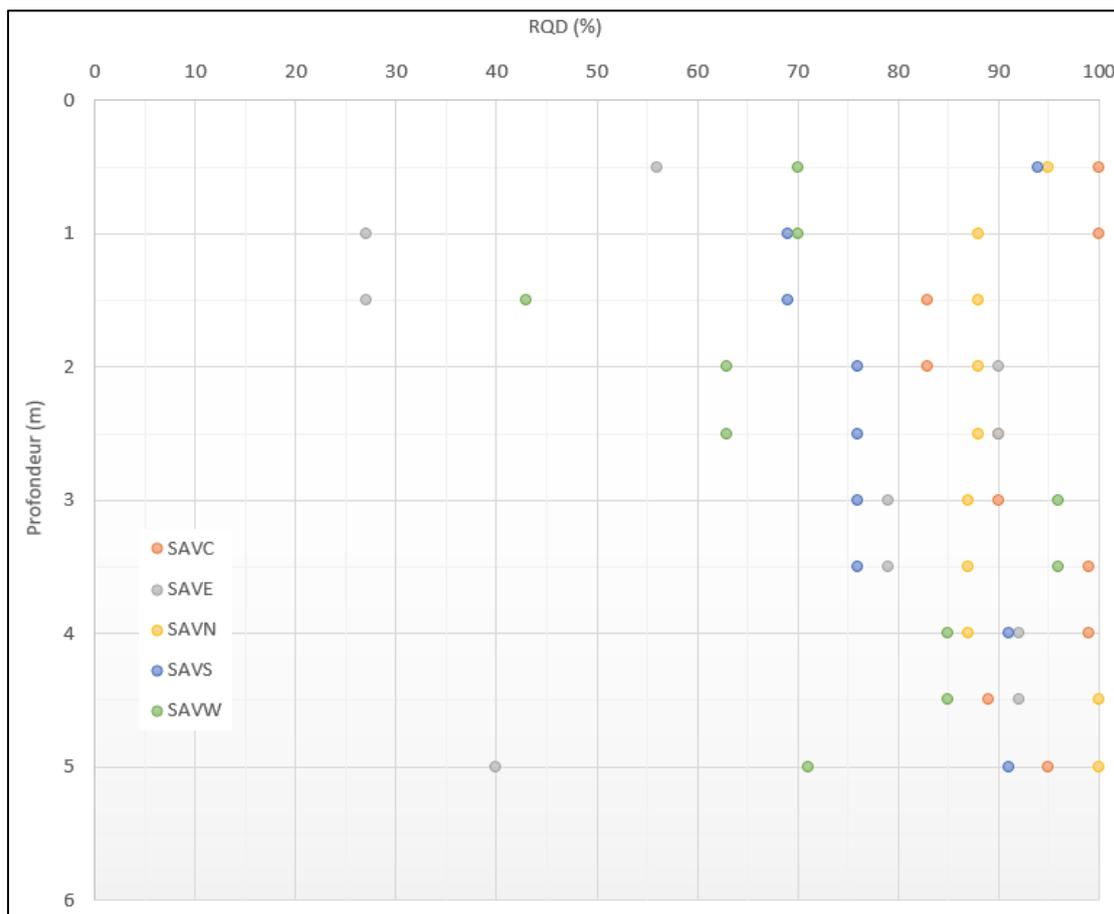


Illustration 10 - Données du RQD en fonction de la profondeur depuis le toit supposé de la galerie.

2. Mesures, moyens mise en œuvre, et traitements

Adnand Bitri, Ianis Gaudot et Kevin Samyn, ingénieurs géophysiciens, et Luc Raymond, technicien au BRGM, ont réalisé l'ensemble des mesures du 24 au 27 juin 2019.

2.1. IMPLANTATION

Les profils ont été positionnés de façon à être, dans la mesure du possible, centrés sur la cible (sondage carotté ou zone de fontis selon la zone considérée) (Illustration 3).

L'ensembles des profils sismiques ont été positionnés en mesurant les coordonnées X et Y des tirs sismiques, grâce à un GPS Trimble Geo7X différentiel centimétrique, connectée à une antenne externe de type Zéphyr. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 14 et 20 satellites). Les valeurs obtenues ont été corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides de l'IGN (ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y inférieure à 5 cm). La base du RGP¹ d'Andernay a été utilisée pour le post-traitement.

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief, ainsi que de la présence de bâtiments à proximité. Les valeurs de Z affectées d'une précision anormalement élevée et/ou qui paraissaient aberrantes (par rapport à la carte IGN au 1/25 000 et par rapport aux observations de terrain), ont été rejetées et ne sont donc pas prises en compte dans la construction du profil topographique. L'altitude est représentée par rapport au NMM (niveau moyen de la mer).

Sur les relevés effectués pendant cette opération, la précision finale en X-Y obtenue est de 5 cm en moyenne et la précision finale sur Z est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres en absolu. Les relevés topographiques sont donc de bonne qualité et d'une résolution suffisante pour localiser les points de mesures (positions de la source sismique et des récepteurs sismiques).

2.2. MATERIEL ET ACQUISITION SISMIQUE

L'acquisition des profils sismiques a été réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition sismique STRATAVIZOR 48 traces et de 2 modules GEODE 24 traces (GEOMETRICS, USA) connectés à 4 flûtes de 24 traces, soit 96 traces régulièrement espacées de 2 mètres pour un linéaire total de 238 m. La source sismique était de type chute de poids accélérée A200P (United Service Alliance) montée sur un véhicule type pickup. L'espacement entre les points de tir était de 4 m.

¹ RGP : Réseau GNSS Permanent : réseau de plusieurs centaines de stations qui enregistrent en continu les informations envoyées par les satellites des différentes constellations permettant de se localiser en tout point de la surface terrestre (source : site internet IGN).

Le matériel utilisé comprend :

- 1 STRATAVIZOR NZ 48 traces GEOMETRICS ;
- 2 modules GEODE 24 traces GEOMETRICS ;
- 4 flûtes sismiques d'inter-trace 5 m ;
- 96 géophones de fréquence centrale 10 Hz, composante verticale ;
- 1 source sismique chute de poids accélérée A200P montée sur pickup ;
- 5 batteries de voiture 110 Ah ;
- 1 GPS différentiel TRIMBLE ;
- 1 micro-ordinateur portable ;
- 2 véhicules.

L'illustration 11 montre la mise en œuvre du matériel d'acquisition sismique sur la zone 6.



Illustration 11 - Photographie illustrant le dispositif d'acquisition sismique et la mise en œuvre de la source sismique chute de poids accélérée sur la zone 6 (fontis du Pâquis).

2.3. QUALITE DES DONNEES

Les conditions de bruit durant le déroulement des opérations sismiques étant globalement bonnes, les enregistrements sont de très bonne qualité dans l'ensemble. L'illustration 12 montre un exemple des signaux bruts enregistrés avec différents niveaux de bruits anthropiques. Les temps des premières arrivées des ondes P peuvent être pointés sans difficulté jusqu'à une distance de l'ordre de 200 m pour une circulation (de véhicules) modérée et une centaine de mètres pour une circulation dense. La difficulté de pointer des temps des traces à large offset (intervalle de mesure) limitera la profondeur d'investigation et la résolution de la tomographie réfraction. Concernant l'imagerie en ondes de surface, l'occurrence d'évènements transitoires d'origine anthropique (voiture, scooter, tracteur) peut éventuellement rendre difficile le traitement.

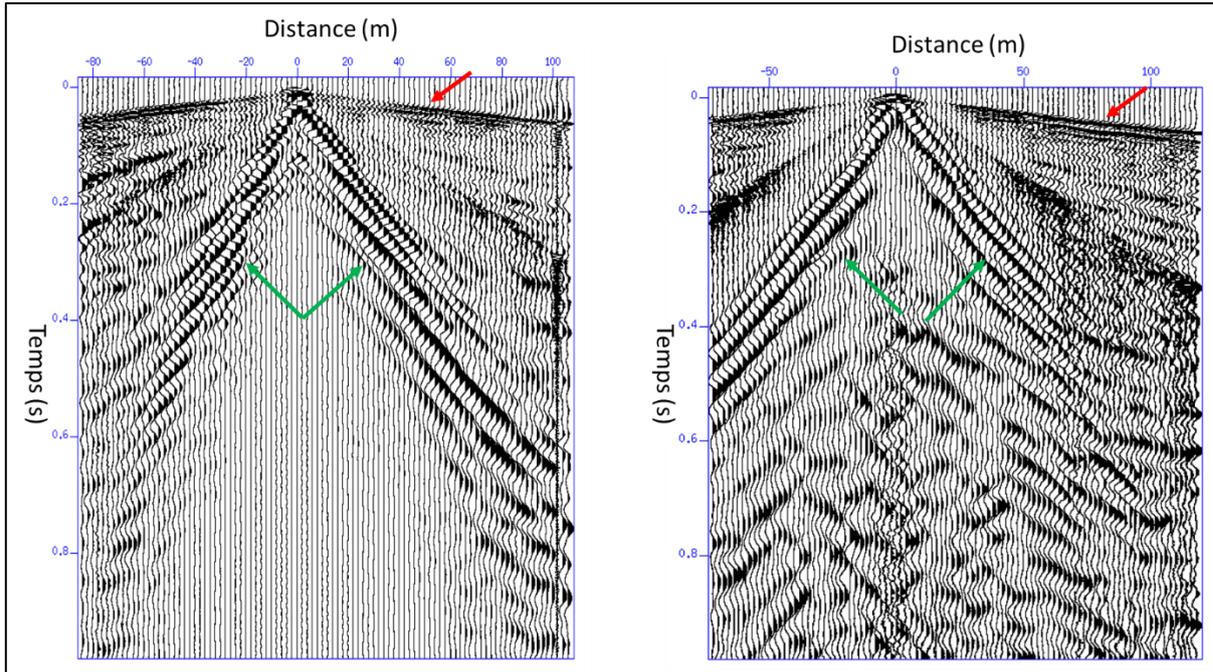


Illustration 12 - Exemples d'enregistrements sismiques avec application d'un gain de type AGC, fenêtre glissante de 200 ms. Les flèches indiquent : en rouge, les premières arrivées de l'onde P directe, en vert, les ondes de surface de type onde de Rayleigh. Gauche : niveau faible de bruit anthropique. Droite : niveau plus élevé de bruit anthropique

2.4. TRAITEMENT PAR TOMOGRAPHIE SISMIQUE REFRACTION

La méthode de la sismique réfraction permet d'obtenir la répartition dans le sol de la vitesse de propagation des ondes sismiques P (V_p). On détermine, à partir de la mesure des temps de propagation des ondes P, la vitesse et l'épaisseur des différentes couches du sous-sol. La profondeur d'investigation dépend de la géométrie du dispositif de mesure et des vitesses sismiques en présence.

Les temps de propagation mesurés aux niveau des différents géophones sont reportés sur un graphique temps/géophone également appelé hodochrone (Illustration 13 droite), à partir duquel on dresse une carte 2D de la répartition spatiale de la vitesse des ondes de compression V_p (Illustration 14). Cette transformation est faite soit par une méthode conventionnelle de type Plus-Minus, soit par inversion tomographique des temps de propagation des ondes P directes et réfractées à l'aide d'un algorithme itératif. Pour tous les profils traités en tomographie sismique réfraction nous avons utilisé la seconde méthode (algorithme itératif) en nous appuyant sur le logiciel RAYFRACT® 3.36. Les résultats présentés sont obtenus au bout de 20 itérations. Pour juger de la fiabilité du modèle de V_p calculé, on effectue à chaque itération du processus d'inversion une comparaison entre les hodochrones mesurées et les hodochrones synthétiques obtenues à partir du modèle de V_p calculé. L'erreur finale obtenue au sens des moindres carrés (RMS) est comprise, pour tous les profils, entre 1,7 et 3,8 %. Ce modèle de V_p est ensuite utilisé pour l'interprétation. Les modèles sont représentés en utilisant le logiciel Surfer (Golden Software®).

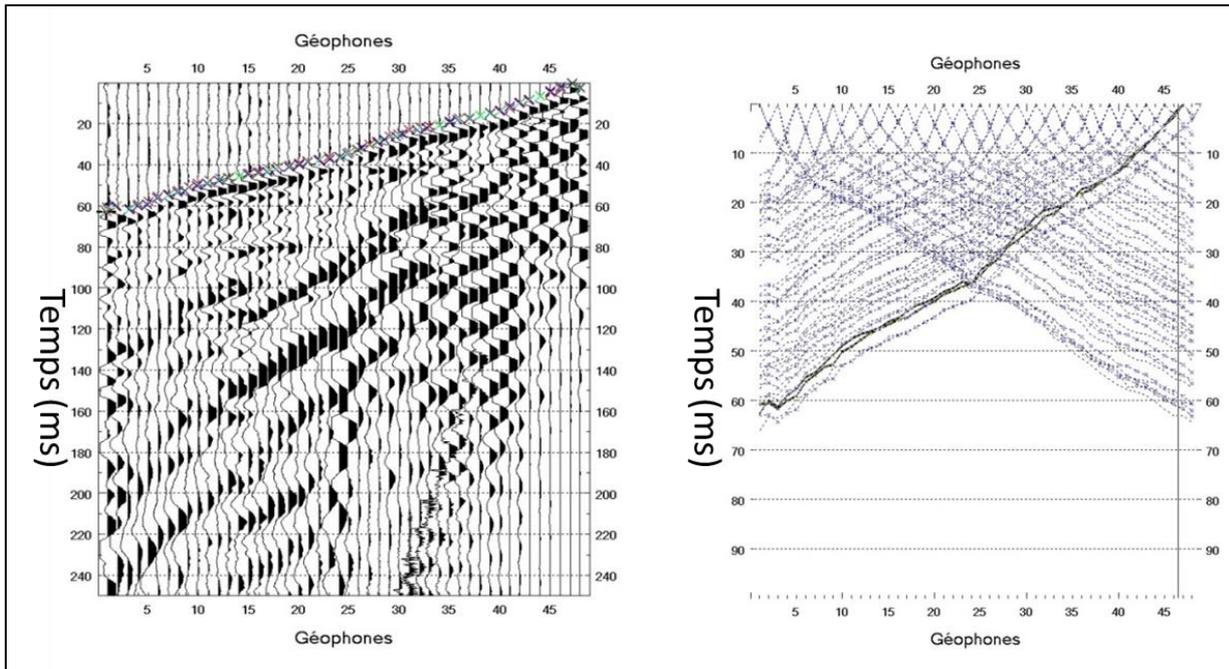


Illustration 13 - Exemples de pointés des temps de premières arrivées sismique de l'onde P (croix) sur un tir du profil (gauche). Ces temps d'arrivée sont représentés sous forme d'un diagramme temps/géophone (hodochrone) sur l'illustration de droite

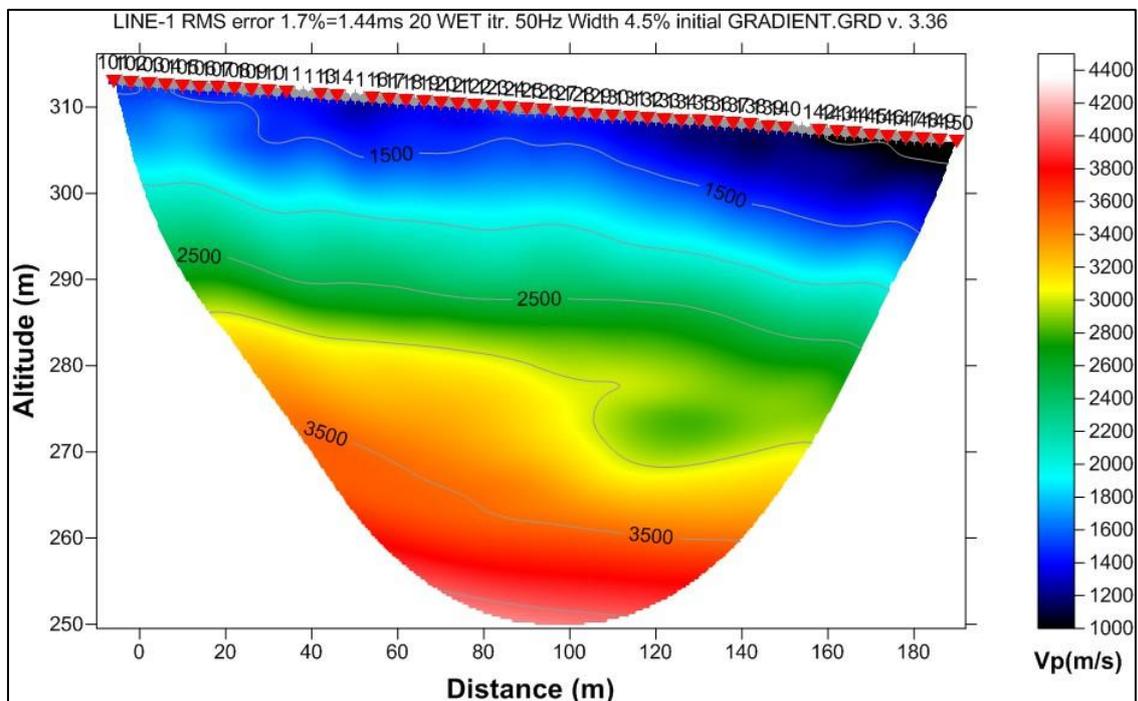


Illustration 14 - Modèle de vitesse des ondes P (V_p) obtenu par tomographie sismique réfraction

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (e.g. V_p étalonnée, profondeur des interfaces), les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (e.g. V_p , épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (e.g. autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements).

L'illustration 15 résume la séquence de traitement sismique réfraction.

Séquences de traitement	Descriptif de l'opération
Edition des traces	L'édition consiste à analyser chaque tir sismique de façon à juger de sa qualité et écarter les enregistrements trop bruités. Le bilan permet de savoir si l'opération de l'acquisition a rempli sa mission et si des cibles sont déjà visibles.
Corrections statiques de source	Cette étape permet de corriger le temps t_0 de début de chaque tir de manière à obtenir un t_0 constant sur l'ensemble des données sismiques. Elle est réalisée par l'analyse des temps d'arrivée sur les traces à offset 0 de tout le jeu de données. Ceci permet de s'affranchir des différences de temps de déclenchement de l'enregistrement.
Pointer des temps de premières arrivées de l'onde P	Cette opération permet de déterminer les temps de propagation de l'onde P entre chaque point de tir et les géophones de la ligne sismique. Le pointé de tous les enregistrements de la campagne ont été réalisés automatiquement avec une reprise manuelle lorsque cela s'avérait nécessaire.
Tracé des hodochrones	Cette étape est la base de l'interprétation graphique en sismique réfraction. On construit un diagramme temps-distance à partir des temps d'arrivées pointés. Les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse.
Détermination de l'erreur sur le pointé	Cette opération permet d'appréhender l'erreur faite sur le pointé des temps de premières arrivées de l'onde P, par comparaison réciproque des temps entre un point source et un récepteur. L'erreur sur le pointé est obtenue en calculant l'écart type des erreurs individuelles de temps de trajets entre chaque couple source-récepteur. De manière générale, sur toutes les données de la campagne, l'erreur sur le pointé est de l'ordre de 2 ms.
Obtention d'un modèle de V_p par tomographie	Le modèle de vitesse est ici obtenu par l'inversion des temps de premières arrivées de l'onde P. Le processus itératif démarre d'un modèle de V_p initial puis met à jour ce modèle à chaque itération, de manière à minimiser progressivement les différences entre les temps de trajets pointés et les temps de trajets calculés obtenus à partir du modèle généré. Globalement, sur tous les profils de la campagne, l'erreur moyenne entre les temps de trajets observés et calculés est comprise entre 1,7 et 3,8 %.

Illustration 15 - Séquence de traitement des données en tomographie sismique réfraction réalisée avec le logiciel RAYFRACT 3.36.

2.5. TRAITEMENT PAR ANALYSE SPECTRALE DES ONDES DE SURFACE (MASW)

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface du sol. Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde et donc avec la fréquence. Cet effet est appelé dispersion. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surfaces contiennent alors de l'information sur les milieux traversés, entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différentes fréquences du signal. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs de paramètres physiques à différentes profondeurs. Le principe d'acquisition et du traitement des ondes de surface est présenté sur l'illustration 16.

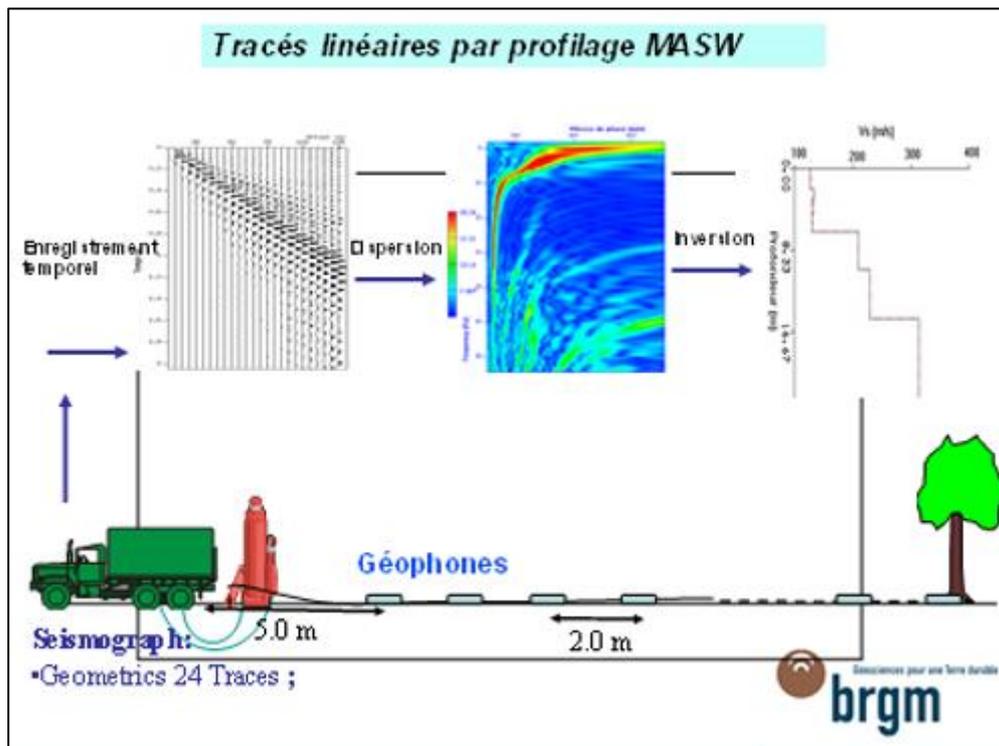


Illustration 16 - Principe de la méthode de prospection sismique par ondes de surface, de l'acquisition des données au traitement.

Un exemple de diagramme de dispersion est présenté sur l'illustration 17 (droite). Le pointé du maximum d'énergie (en rouge) dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. La courbe de dispersion est une variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence. Comme pour la sismique réfraction, les courbes de dispersion sont inversées au cours d'un processus itératif qui permet de retrouver un modèle du sous-sol générant des données synthétiques compatibles avec les mesures (Illustration 18). Une suite de programme BRGM basé notamment sur le logiciel Seismic Unix (Stockwell and Cohen, 1989) a été utilisé pour effectuer le pré-traitement et le calcul des diagrammes de dispersion, ainsi que le pointé manuel des courbes de dispersion. Le logiciel Surf (Computer Programs in Seismology, Hermann ;1987) a été utilisé pour inverser les courbes de dispersion en profils de vitesse sismique cisailante 1D. Seule le mode fondamental de l'onde de Rayleigh a été considéré dans cette étude.

L'interpolation latérale en 2D des profils de vitesses 1D obtenus pour chaque tir permet d'obtenir la coupe de vitesse V_s sur le linéaire investigué (Illustration 19). Cette dernière étape est réalisée en utilisant le logiciel Surfer (Golden software®).

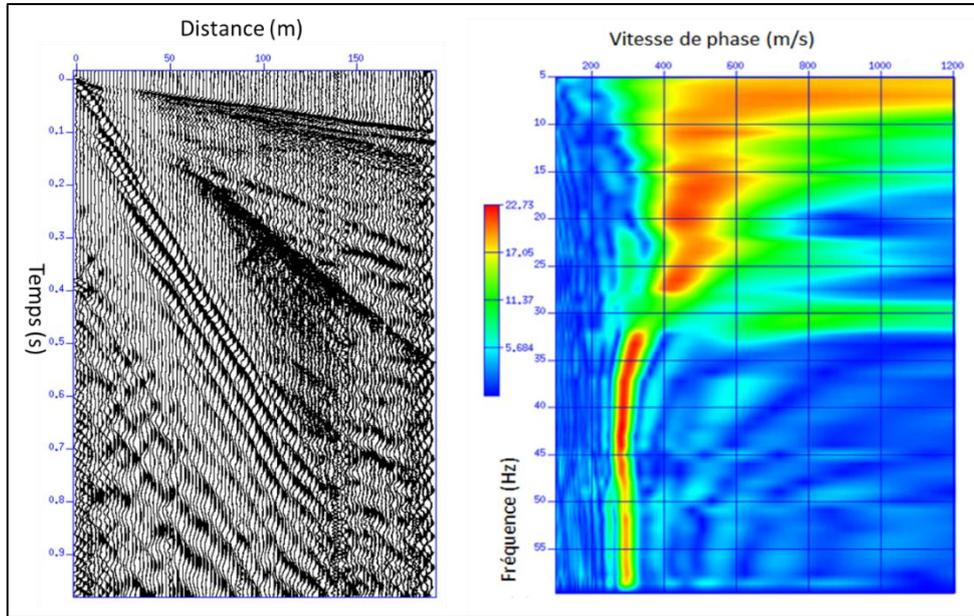


Illustration 17 - Exemple d'enregistrement sismique (gauche) et le diagramme de dispersion des ondes de surface associé (droite) et représenté avec les outils de visualisation du logiciel Seismic Unix

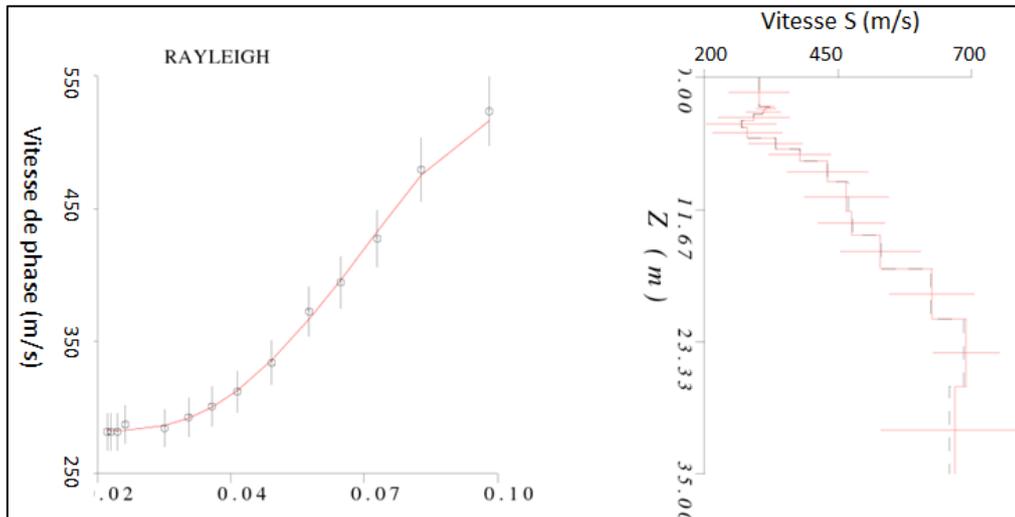


Illustration 18 - Gauche : exemple de courbe de dispersion mesurée (cercles et barres d'erreurs associés) et obtenue par inversion (ligne continue). Droite : modèle de V_s 1D et incertitudes associées obtenus par inversion de la courbe de dispersion

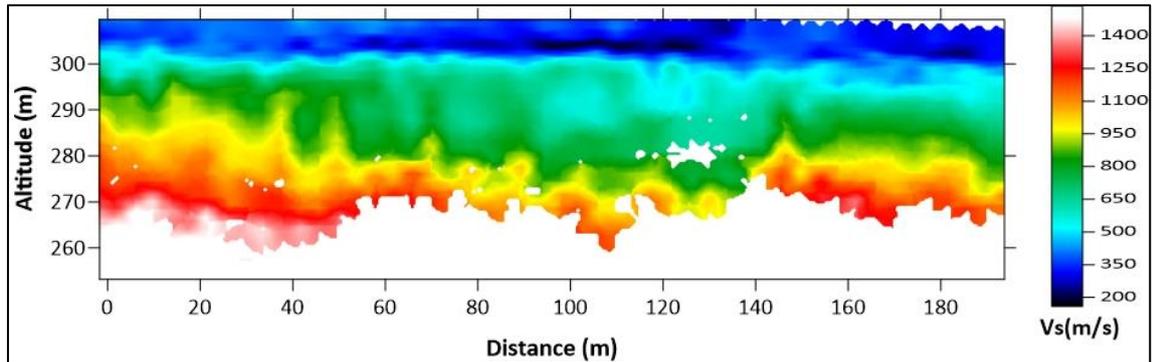


Illustration 19 - Modèle de vitesse S obtenu par tomographie sismique en ondes de surface et représenté avec le logiciel Surfer®

Notons quelques limites importantes à cette approche :

- il est fréquent que les ondes de surface se propagent suivant plusieurs modes (pour une fréquence / longueur d'onde, on a plusieurs vitesses de propagation distinctes, chacune associée à un mode de propagation). Dans ce cas l'interprétation des données et l'inversion sont beaucoup plus délicates car il est alors difficile de discerner suivant quels modes l'onde se propage ;
- tous les algorithmes d'inversion aujourd'hui réalisés font l'hypothèse que sur le dispositif de mesure, la topographie est plane et que le milieu sous-jacent est composé de couches planes. Par conséquent, il est impossible de détecter des fluctuations latérales du milieu inspecté à une échelle inférieure à celle de la longueur du dispositif ;
- tout comme la tomographie en sismique réfraction, les résultats de l'inversion en ondes de surfaces ne sont pas définis de manière univoque si la connaissance sur le modèle recherché est trop faible.

Précisons finalement que le dispositif de géophones choisi pour réaliser une tomographie par réfraction a un impact direct sur le résultat. Pour un dispositif linéaire et un nombre de géophones fixé :

- plus l'ouverture (la distance entre le premier et le dernier géophone) du dispositif est grande, plus la résolution des vitesses extraites sur la courbe de dispersion est bonne ;
- plus l'ouverture est grande, et plus l'espacement entre deux géophones consécutifs est important, plus la vitesse minimale que l'on peut extraire est haute (à fréquence constante) ;
- plus l'ouverture du dispositif est grande, et plus il est probable qu'on quitte l'hypothèse d'une topographie plane et d'un milieu composé de couches planes horizontales. Dans ce cas l'inversion n'a pas de sens.

2.6. TRAITEMENT EN ONDES DE SURFACE PAR « CORRECTION DYNAMIQUE ET SOMME »

Parallèlement à l'inversion de la vitesse de phase des ondes de surface, il est possible de traiter les données dans le but d'obtenir un profil en ondes de surface. On utilise alors la chaîne de traitements mise au point au BRGM et utilisée pour la détection de cavités souterraines (Bitri et al., 1997, Debeglia et al. 2006). De la même façon qu'en sismique réflexion, les mesures sont traitées en couverture multiple afin d'optimiser le rapport signal-sur-bruit : en déplaçant la source et la ligne de géophones, le long du profil. La chaîne de traitements mise au point est schématisée sur l'illustration 20. Des corrections dynamiques sont ensuite appliquées sur chaque tir (étape notée DLMO pour « Dynamique Linear Move Out » en anglais). On tient compte ici des phénomènes de dispersion en évaluant les vitesses de phase à partir des diagrammes de dispersion. La vitesse de phase, calculée en fonction de la fréquence, permet de corriger le déphasage dépendant de l'offset. Une fois tous les signaux ramenés à un offset nul après le DLMO, les traces sont sommées par récepteur commun (CRG, pour « Common Receiver Gather » en anglais) dans le domaine temporel. On obtient alors une coupe sismique somme en onde de surface (Illustration 21).

Le caractère dispersif de l'onde de surface ne permet pas une présentation en profondeur de ces coupes. Elle donne une information qualitative de la géométrie des couches superficielles investiguées. Un tel profil permet d'imager les zones de propriétés mécaniques « faibles » telles que les zones décompactées par des travaux de déblais/remblais ou la formation de fontis.

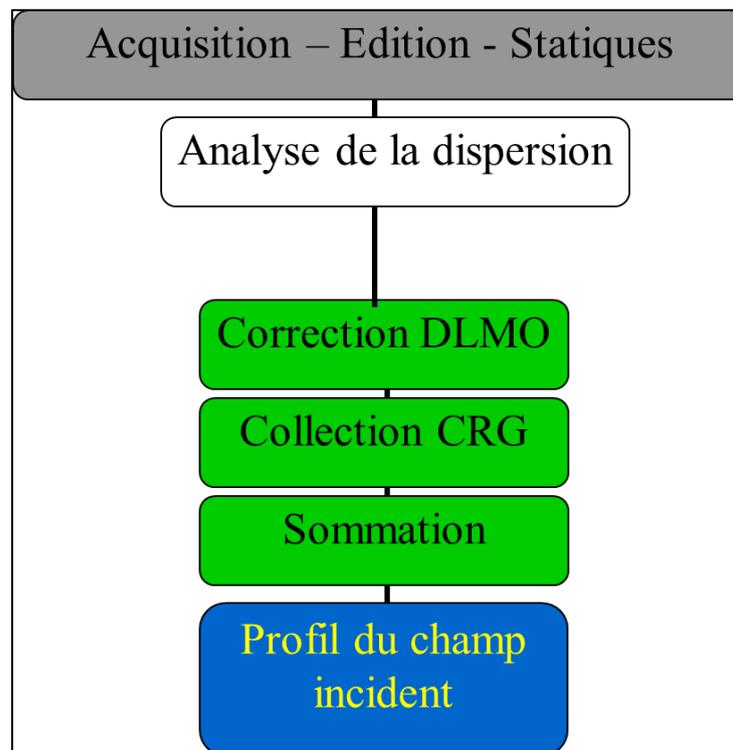


Illustration 20 - Chaîne de traitements pour l'obtention d'un profil sismique somme en ondes de surface. DLMO signifie Dynamic Linear Move Out en anglais, CRG signifie Common Receiver Gather

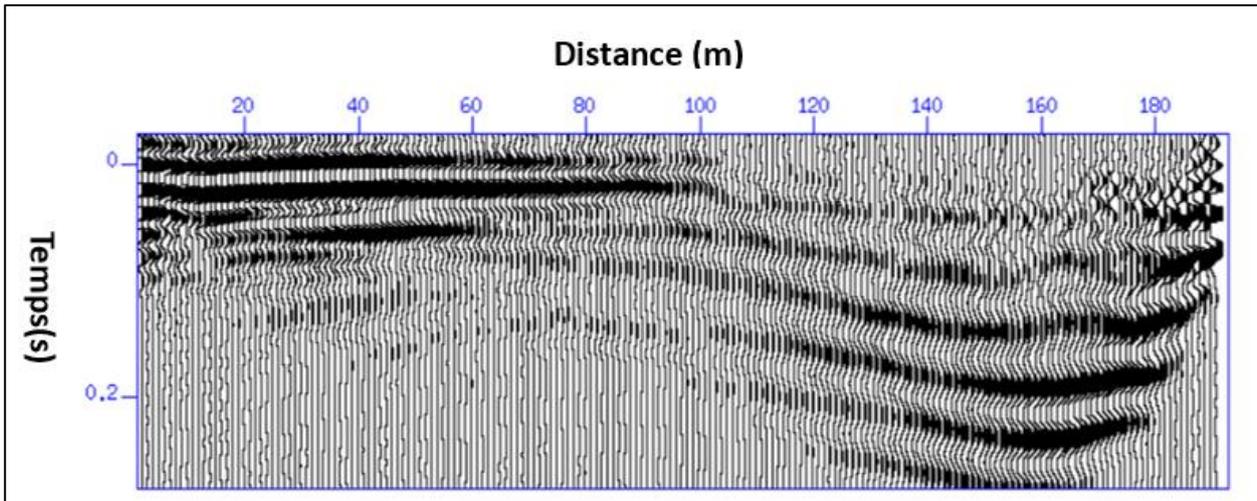


Illustration 21 - Coupe somme en onde de surface

2.7. SENSIBILITE DES VITESSES SISMIQUES AUX PROPRIETES PHYSIQUES DU SOUS-SOL

Plus une roche est dense, et plus les ondes s’y propageront rapidement. C’est la raison pour laquelle, dans la plupart des cas, la vitesse des ondes sismiques augmente avec la profondeur. En effet pour une roche donnée, plus elle est profonde et plus elle est soumise à une pression forte, et plus elle est dense.

A une profondeur fixée, il est possible d’avoir de très forts écarts dans les vitesses de propagation lorsque l’on passe d’un faciès géologique à un autre. Cela est lié à la nature de la roche (roche sédimentaire, roche métamorphique, organisation du réseau cristallin, état de fracturation de la roche, ...).

La vitesse de cisaillement est plus faible que la vitesse de compression, souvent d’un facteur proche de 2. Les ondes de cisaillement sont en règle générale bien plus affectées que les ondes de compression par les milieux fracturés, déconsolidés, ou chargés en eau.

3. Résultats et interprétation

3.1. REPRESENTATION DES RESULTATS ET CALIBRATIONS SUR SONDAGES CARROTÉS

Tous les résultats des profils représentent les variations de vitesse sismique en fonction d'un point métrique (PM) et de l'altitude, exprimés en mètre. Le premier géophone correspond au $PM=0$. Puisque la source sismique, qui constitue un point de mesure, est activée avant le premier géophones (tirs en départ), il est possible d'avoir des PM négatifs sur les sections présentées ci-dessous.

La présence de sondages carottés réalisés en 2011 (annexe 2) au niveau des profils situés dans les zones 1 à 5 permet de calibrer les vitesses sismiques par rapport aux horizons géologiques, *i.e.* de rattacher une gamme de vitesses sismiques à chacune des lithologies du secteur. Pour cela, les logs géologiques de chaque sondage ont été projetés sur les coupes sismiques V_p et V_s .

Le code couleur utilisé pour les logs est celui proposé par Hannion et al., 2017 :

- en beige : Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien ;
- en vert clair : Hauterivien ;
- en vert foncé : Valanginien ;
- en bleu : Portlandien.

Après projection des logs géologiques sur les coupes de vitesses sismiques (V_p et V_s), les gammes de vitesses sismiques de chaque lithologie ont été extraites (Illustration 37). Une échelle de couleur « litho-sismique » a ensuite été établie, pour chacune des vitesses sismiques étudiées. Ces échelles ont ensuite été appliquées aux coupes de distribution des vitesses.

Après analyse de l'ensemble des coupes ainsi représentées, une harmonisation des observations est effectuée afin d'établir une correspondance uniforme entre vitesses sismiques et horizons lithologiques. Et ce dans le but d'extrapoler ces résultats aux zones de fontis sans logs géologiques (zones 6 et 8).

Les résultats de chaque zone sont résumés par une planche présentant :

- la coupe de vitesse sismique V_p non calibrée ;
- la coupe de vitesse sismique V_p calibrée sur les informations lithologiques de sondages ;
- la coupe de vitesse sismique V_s non calibrée ;
- la coupe de vitesse sismique V_s calibrée sur les informations lithologiques de sondages.

Pour toutes les coupes V_p et V_s , la gamme de vitesse sismique représentée est identique et varie entre 400 m/s et 900 m/s pour les V_p , et 100 m/s à 900 m/s pour les V_s .

Pour chacune des vitesses sismiques étudiées, les coupes de vitesse non calibrées sont représentées en utilisant la même échelle de couleur continue.

Attention : Concernant les coupes de vitesse calibrées (*i.e.* coupes litho-sismiques), chacune des coupes a une échelle de couleur discontinue qui lui est propre (du beige au bleu), qui varie d'une coupe calibrée à l'autre (*i.e.* il y a autant d'échelles de couleur que de coupes de calibration, sauf pour les profils 6 et 8 calibrés par extrapolation).

Pour chaque coupe de vitesse calibrée V_p et V_s :

- l'isocontour de la base du Quaternaire et du niveau d'altération de l'Hauterivien pointé sur les vitesses V_p est représenté par une ligne pointillée blanche ;
- l'isocontour du toit du Portlandien pointé sur les vitesses V_p est représenté par une ligne pointillée rouge.

L'altitude minimale représentée sur chaque profil correspond au toit du calcaire de Savonnières-en-Perthois. La présence connue de galerie souterraine est représentée avec des symboles rectangulaires violet en dessous des coupes concernées. La projection des géométries des fontis tel que renseignée dans l'étude d'aléa est indiquée sur les profils 6 et 8 (Hannion et al., 2017).

3.2. PROFILS DE VITESSE SUR ZONES DE FORAGE (ZONES 1 A 5)

3.2.1. Profil 1 – forage SAVW

Le profil 1, long de 196 m, se situe à proximité du sondage carotté SAVW (Illustration 22). Le PM0 se situe le plus à l'est. Les résultats des inversions des vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 23.

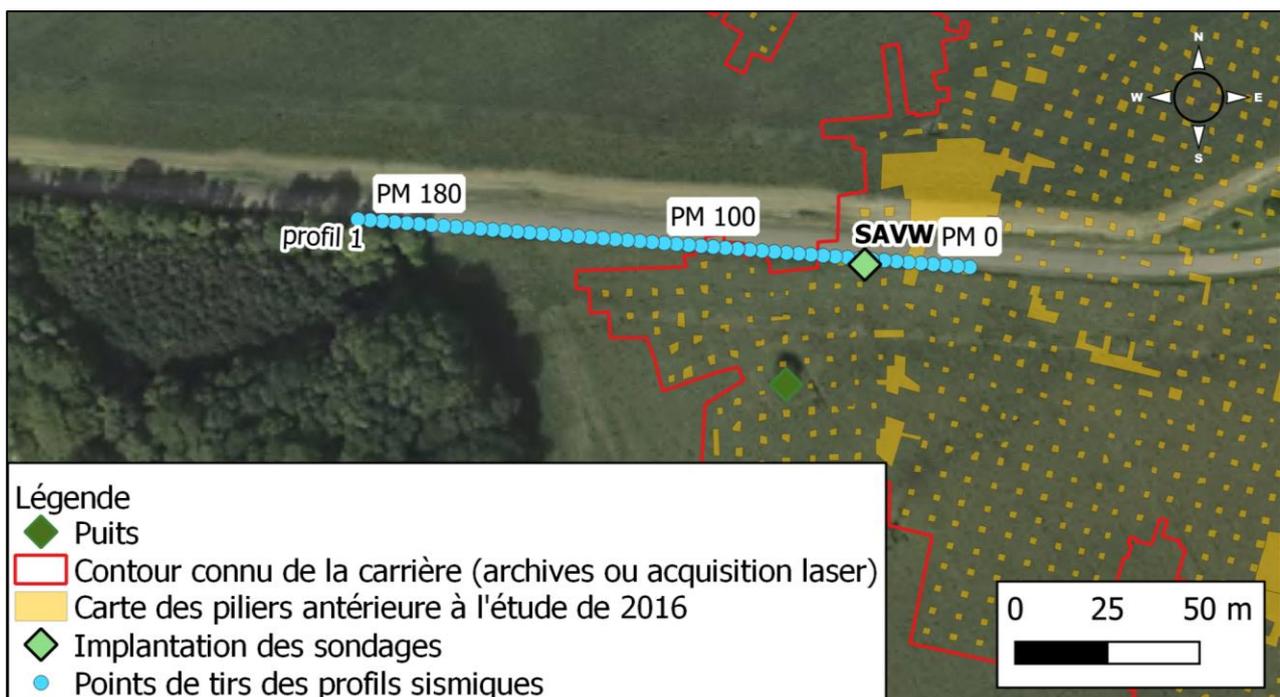


Illustration 22 - Localisation du Profil sismique 1

Le Profil 1 Vp montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une fine couche (épaisseur < 2 m) de limons du Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien entre les PM40 et le PM80 avec des vitesses comprises entre 800 m/s et 1400 m/s. Cette couche apparaît aussi à partir du PM110 et présente une épaisseur croissante avec l'augmentation des PM (de 2 m d'épaisseur au PM110 à 10 m d'épaisseur au PM190). En l'absence des dépôts Quaternaire, le calcaire Hauterivien sous-jacent est à l'affleurement ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien d'épaisseur relativement constante (3 m) le long du profil avec des vitesses comprises entre 1400 m/s et 1500 m/s ;
- une couche de sable du Valanginien d'épaisseur relativement constante (4-5 m) le long du profil avec des vitesses comprises entre 1500 m/s et 2000 m/s ;
- une couche de calcaire du Portlandien dont le toit n'est plus atteint à partir du PM130 avec des vitesses supérieures à 2000 m/s.

La complexité du Profil 1 Vs rend la tâche de calibration plus compliquée. Néanmoins, le Profil 1 Vs montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons du Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien à partir du PM 80 avec des vitesses comprises entre 100m/s et 300 m/s, qui présente une épaisseur croissante avec l'augmentation des PM (de 5 m d'épaisseur au PM 120 à 10 m d'épaisseur au PM190). En l'absence des dépôts Quaternaire, le calcaire Hauterivien est à l'affleurement ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien d'épaisseur variable (10 à 3 m) le long du profil et avec des vitesses comprises entre 300 m/s et 450 m/s ;
- une couche de sable du Valanginien fine (épaisseur < 2 m) avec des vitesses égales à 450 m/s environ ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 450 m/s dont le toit n'est plus atteint entre les PM 120 et PM 158.

Au premier ordre, la calibration lithologique des deux profils Vp et Vs indique un plongement vers l'Ouest des horizons géologiques situés sous les limons superficiels. Cependant, la zone de dépôt Quaternaire autour du PM 60 ainsi que la couche Valanginien observée sur le profil Vp ne sont pas observées sur le profil Vs, ce qui indique une certaine complexité dans la variation des formations lithologiques du sous-sol le long de ce profil.

L'augmentation de l'épaisseur des formations à faible vitesse sismique entre les PM 120 et 190 pourrait également être due à une diminution de l'épaisseur du recouvrement, d'environ 8 m depuis le PM 0 vers le PM 190. Une faible épaisseur rend le recouvrement plus sensible à l'altération météorique, ce qui se traduit généralement par une diminution des propriétés mécaniques des roches et donc une diminution des vitesses sismiques.

La quasi-totalité des tirs sismiques réalisés présentent différents modes de propagation des ondes de surface. Ces modes de propagation sont difficiles à identifier et à interpréter. Ces différents modes de propagation sont révélateurs de la complexité des terrains de proche surface. Cette complexité s'exprime également sur la coupe somme en ondes de surface (Illustration 24), qui montre les variations de la géométrie des couches superficielles le long du Profil 1, à travers des temps de retards variables dans la propagation des ondes de surface.

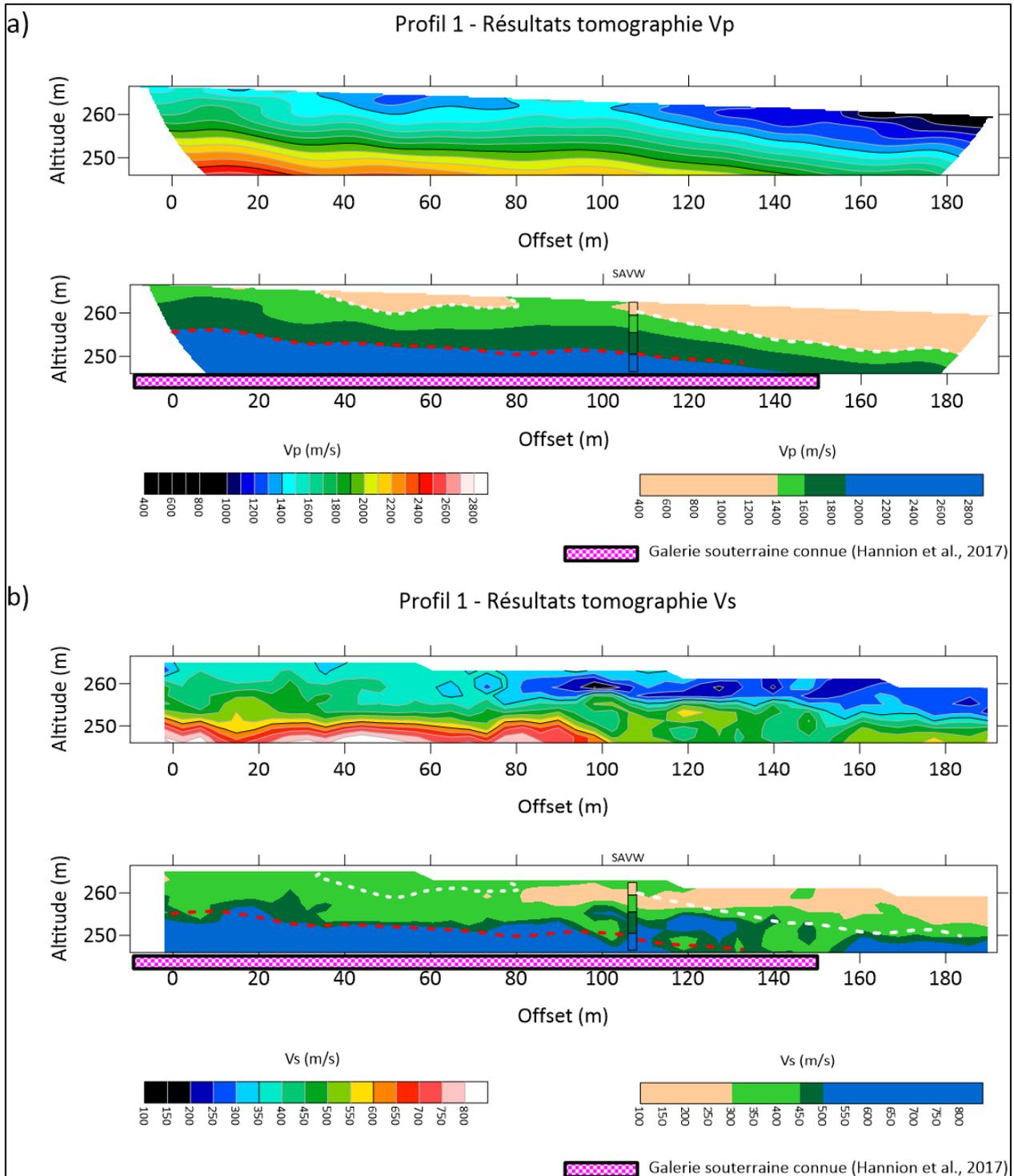


Illustration 23 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 1. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.

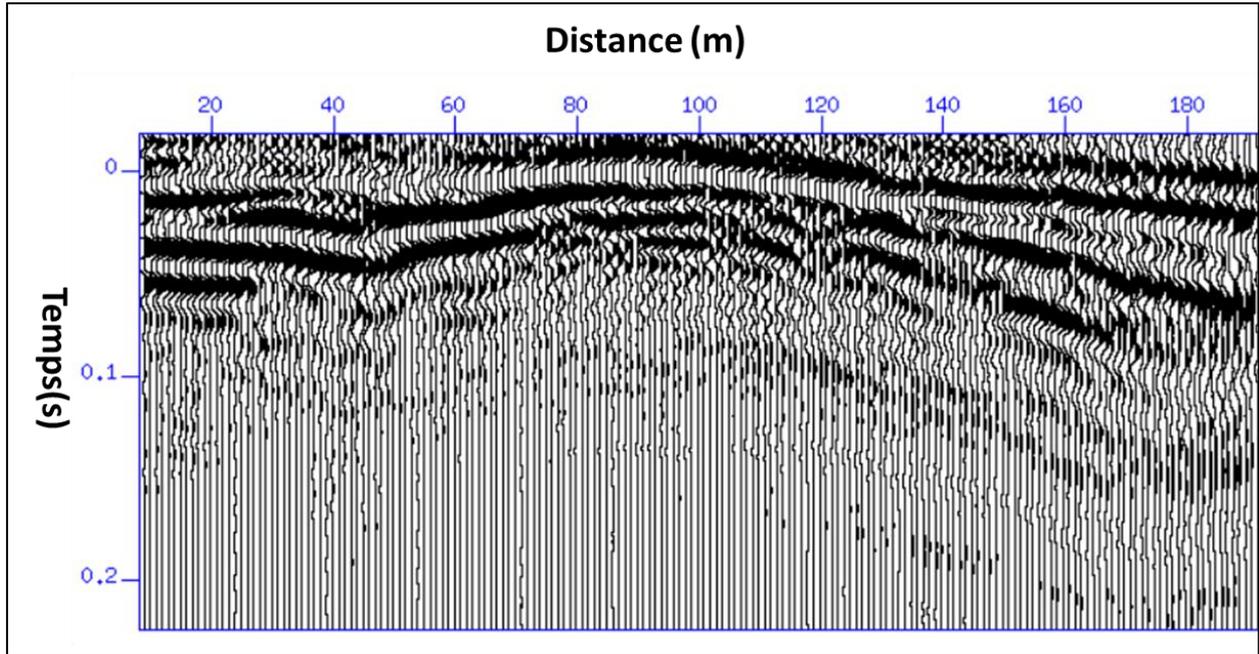


Illustration 24 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 1.

3.2.2. Profil 2 – forage SAVS

Le profil 2, long de 200 m, est situé à proximité du sondage carotté SAVS (Illustration 25). Le PM0 se situe au nord. Les résultats des inversions de vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 26.

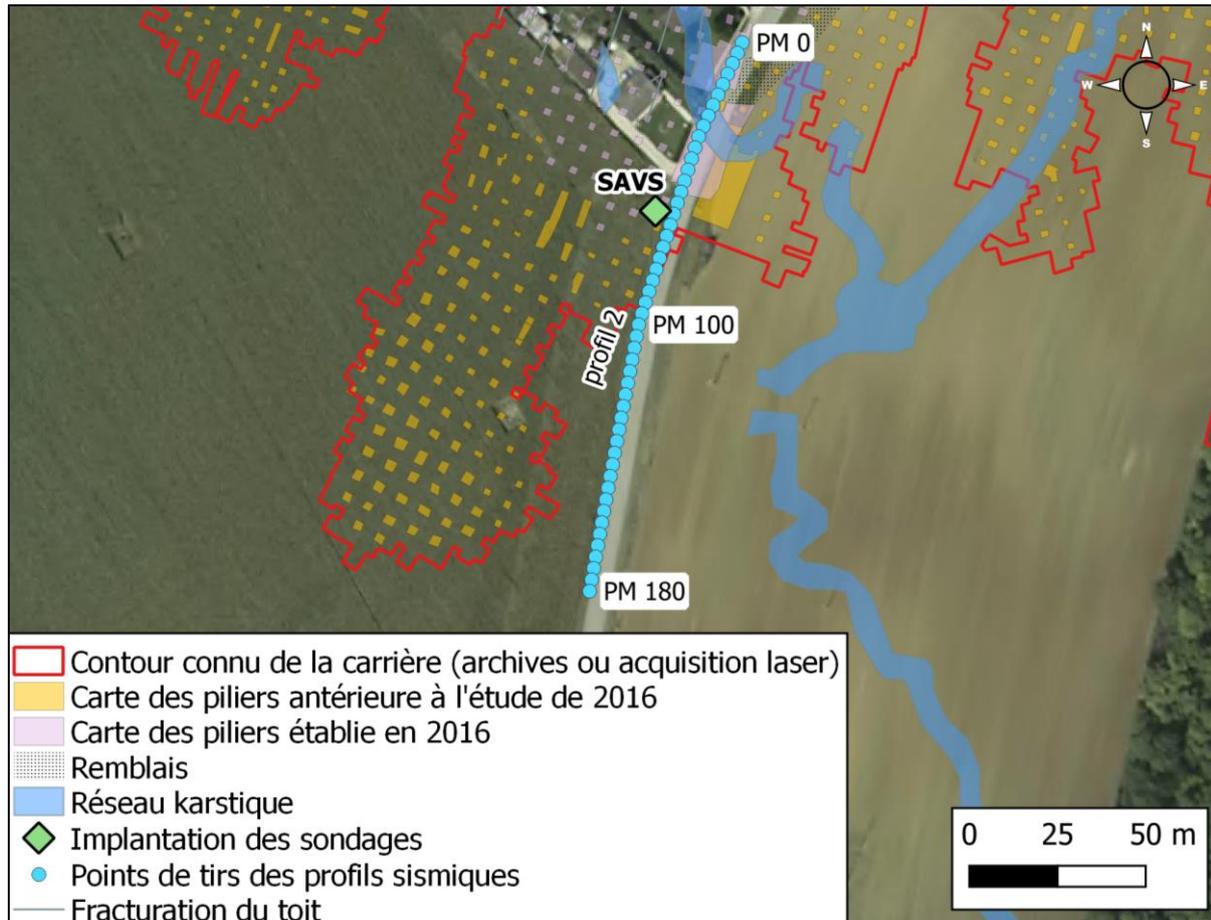


Illustration 25 - Localisation du Profil sismique 2

Le Profil 2 Vp montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons du Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien, de 8-10 m d'épaisseur environ avec des vitesses comprises entre 600 m/s et 1600 m/s, qui s'amincit autour du PM100 ou elle atteint une épaisseur d'environ 2 m ;
- une fine couche de calcaire de l'Hauterivien de 2 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 1600 m/s et 1800 m/s, qui s'épaissit autour du PM75 pour atteindre 8-6 m d'épaisseur ;
- une fine couche de sable du Valanginien de 2 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 1800 m/s et 2000 m/s, qui s'épaissit autour du PM80 pour atteindre 5 m d'épaisseur ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 2000 m/s.

Le Profil 2 Vs montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une fine couche de limons du Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien à partir du PM95 avec des vitesses comprises entre 100 m/s et 275 m/s, d'épaisseur constante (2-3 m). En l'absence des dépôts Quaternaire, le calcaire Hauterivien est à l'affleurement (PM < 95) ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 275 m/s et 450 m/s d'épaisseur variable le long du profil (8 m pour PM < 95 m, 2-3 m pour PM > 95 m) ;

- une couche de sable du Valanginien d'épaisseur constante de 2-3 m avec des vitesses comprises entre 450 m/s et 550 m/s ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 550 m/s.

La géométrie des dépôts quaternaires observés sur le profil Vp n'est pas similaire à celle observée sur le profil Vs. Ceci traduit une certaine complexité dans la variation des propriétés mécaniques du sous-sol le long de ce profil, notamment pour les parties les plus superficielles.

La coupe somme en onde de surface est typique d'un milieu avec une forte dichotomie Nord/Sud pour la structure de Vs superficielle. On observe notamment à partir du PM96 une diminution des vitesses dans la partie supérieure qui engendre un retard dans la propagation des ondes de surface (Illustration 27).

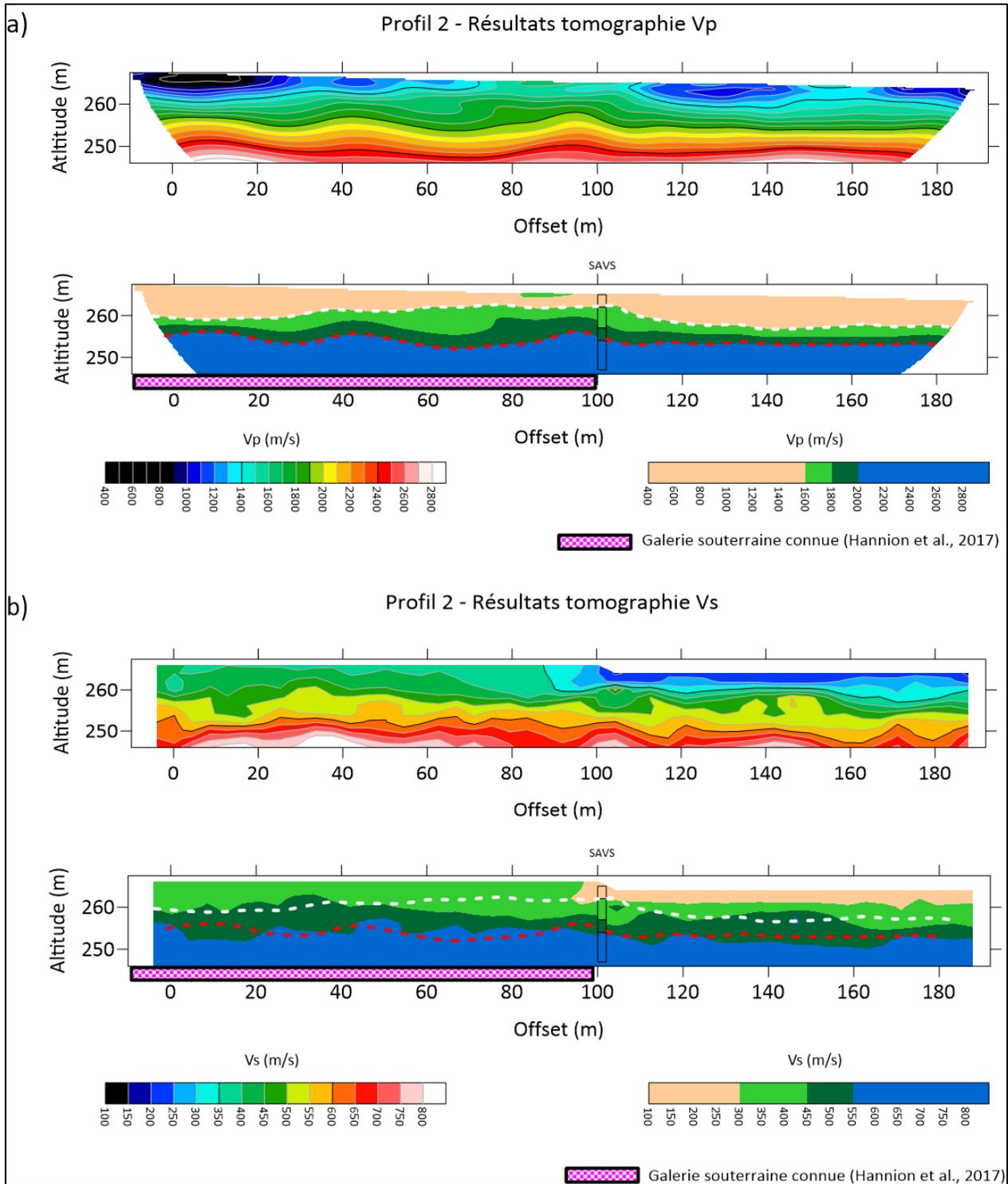


Illustration 26 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 2. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.

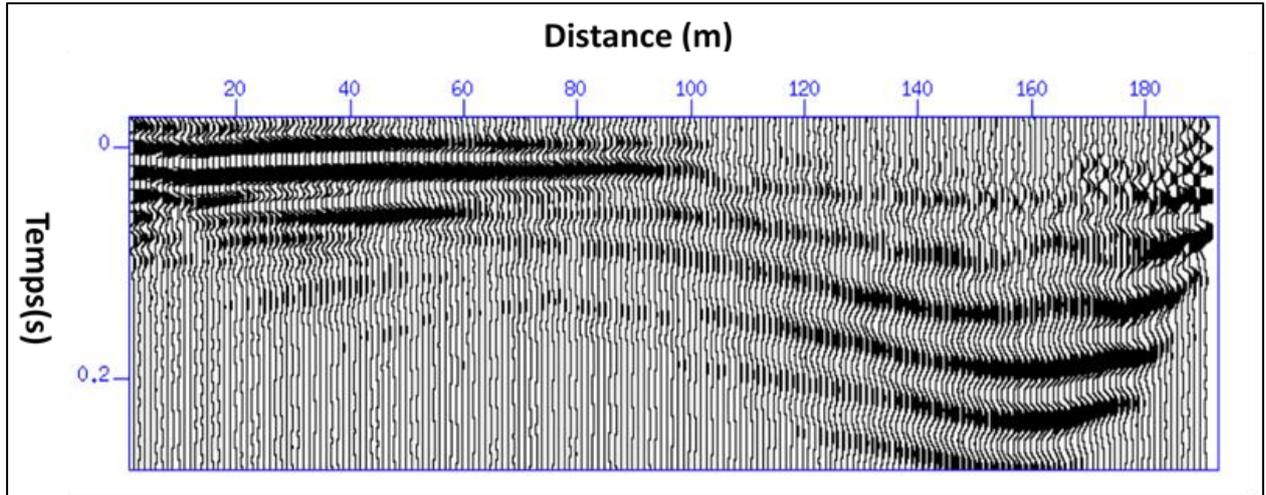


Illustration 27 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 2

3.2.3. Profil 3 – Forage SAVC

Le profil 3, long de 140 m, est centré sur le sondage carotté SAVC (Illustration 28). Le PM0 se situe au nord. Les résultats des inversions de vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 29.

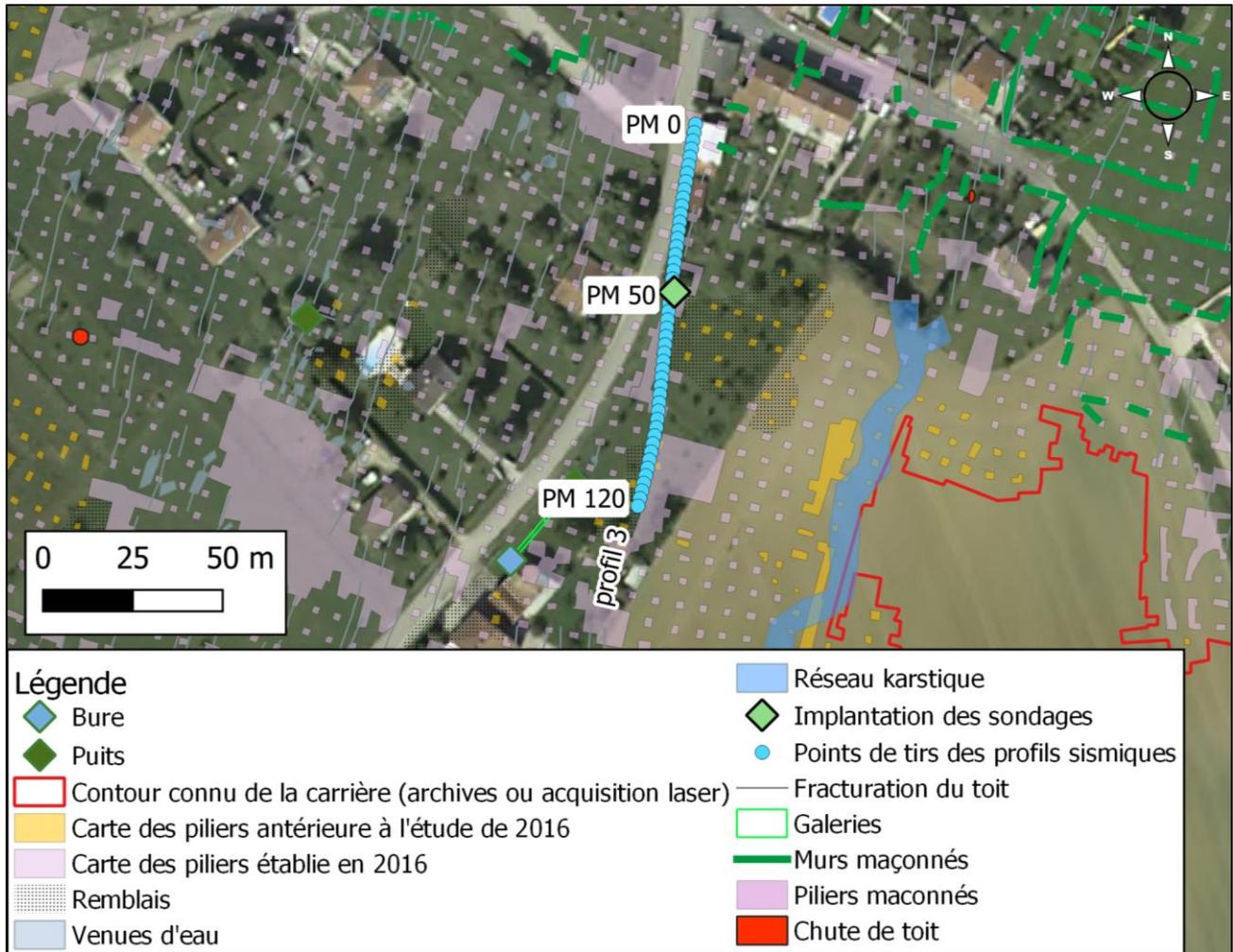


Illustration 28 - Localisation du Profil 3

Le Profil 3 V_p montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- des zones de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 600 m/s et 800 m/s, très localisées, de 1 à 2 m d'épaisseur, le calcaire Hauterivien étant à l'affleurement partout ailleurs ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien de 5-15 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 800 m/s et 2000 m/s, et avec une épaisseur maximale atteinte autour du PM25 ;
- une fine couche de sable du Valanginien de 4 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 2000 m/s et 2400 m/s ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 2400 m/s.

Le Profil 3 V_s montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- des zones de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 150 m/s et 360 m/s, très localisé, de 1-2 m d'épaisseur, le calcaire Hauterivien étant à l'affleurement sinon ;

- une couche de calcaire de l'Hauterivien de 5-15 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 360 m/s et 550 m/s ;
- une couche de sable Valanginien d'épaisseur constante de 4 m avec des vitesses comprises entre 550 m/s et 650 m/s ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 650 m/s.

La géométrie et la localisation des dépôts quaternaires observés sur le profil V_p ne sont pas identiques à celles observées sur le profil V_s . Ceci indique une certaine complexité dans la variation des propriétés mécaniques du sous-sol le long de ce profil, notamment pour les parties les plus superficielles.

On distingue à partir du PM33 un léger changement de propagation dans les ondes de surface, qui se traduit par une légère diminution des vitesses dans la partie supérieure, engendrant un retard dans la propagation des ondes de surface (Illustration 30).

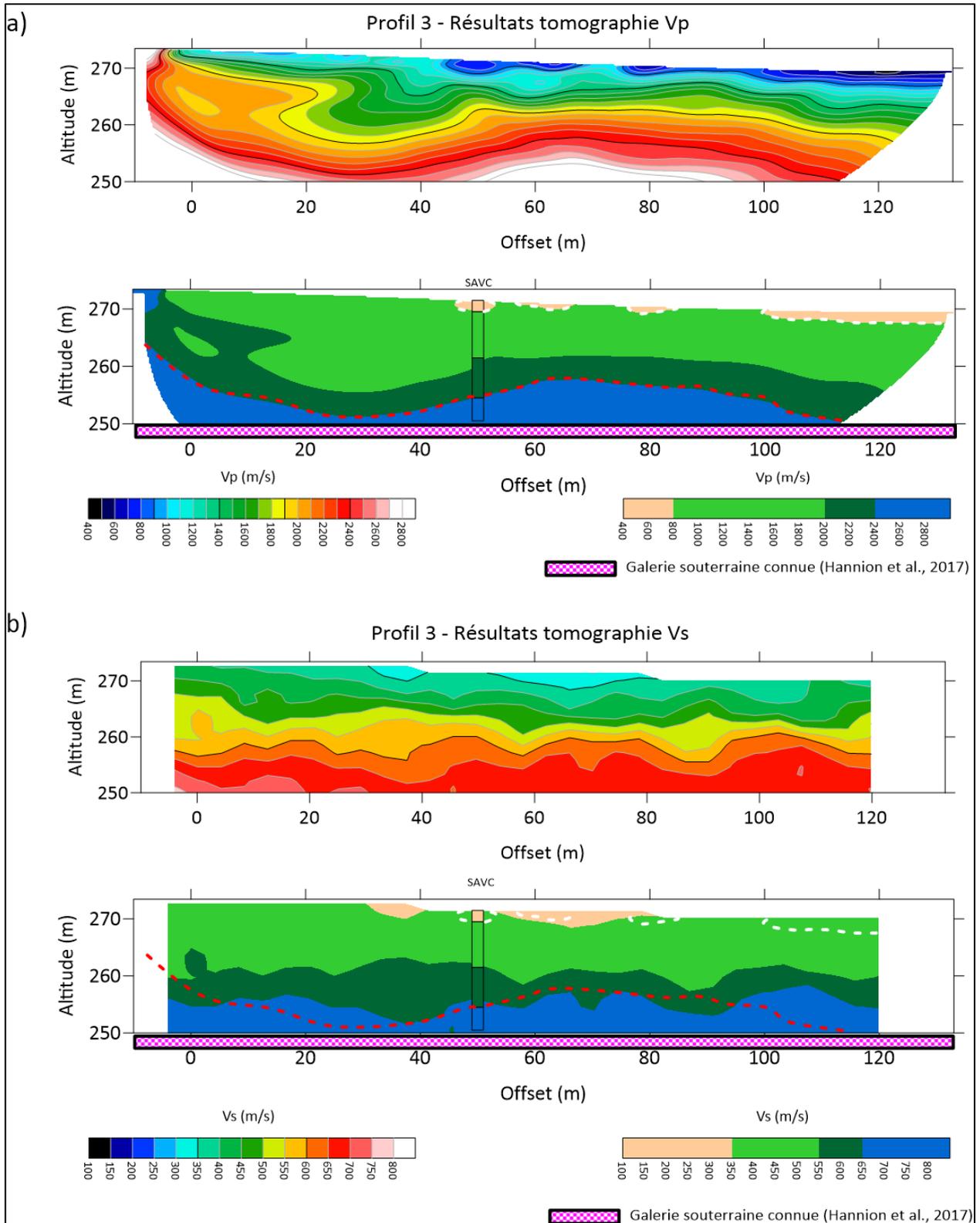


Illustration 29 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 3. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.

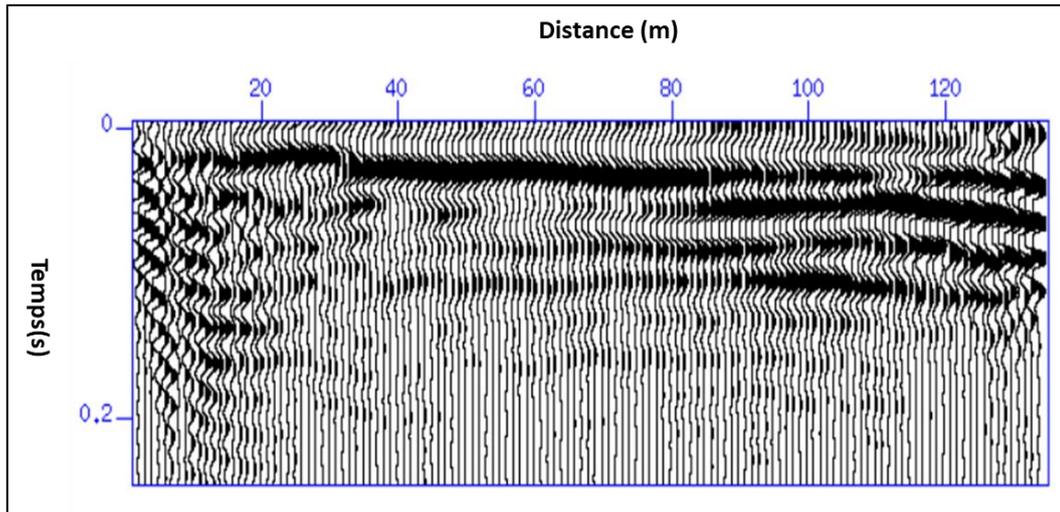


Illustration 30 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 3

3.2.4. Profil 4 – forage SAVE

Le profil 4, long de 150 m, est centré sur le sondage carotté SAVE (Illustration 31). Le PM0 se situe au nord. Les résultats des inversions de vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 32.

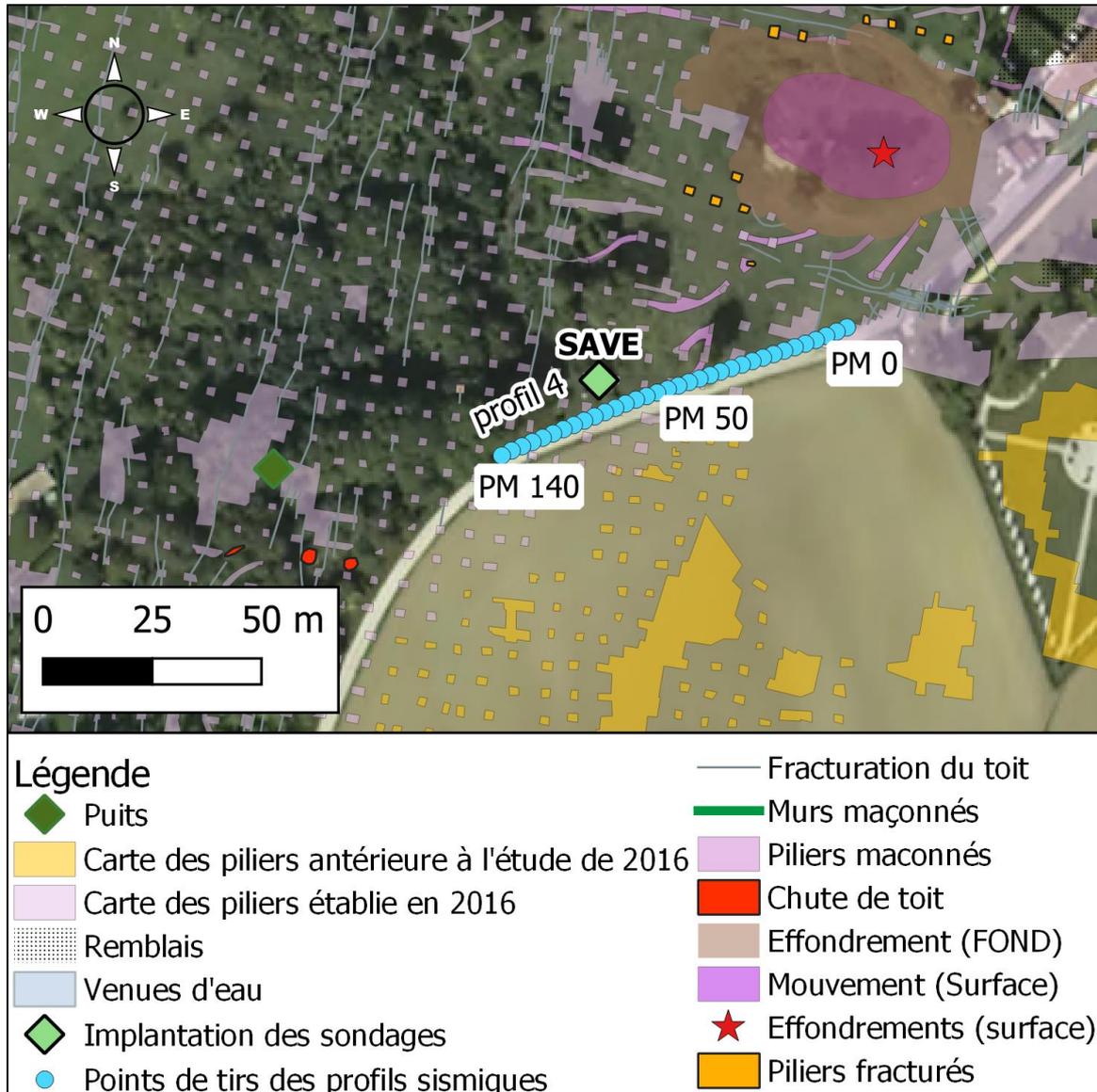


Illustration 31 - Localisation du Profil 4

Le Profil 4 V_p montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien de 4-5 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 600 m/s et 1300 m/s ;
- une couche de calcaire Hauterivien de 8-11 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 1300 m/s et 2100 m/s, qui s'amincit vers le sud (vers PM140) ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 2100 m/s, qui se caractérise notamment par une zone à plus faible vitesse au niveau du PM30 à 255 m d'altitude (zone avec des vitesses similaires à celles du calcaire de l'Hauterivien).

Le Profil 4 Vs montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien de 4-5 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 100 m/s et 340 m/s ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien de 5-10 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 340 m/s et 460 m/s, qui s'amincit vers le sud (vers PM140) ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 460 m/s, qui se caractérise notamment par une zone à plus faible vitesse entre les PM20 et PM60.

La zone caractérisée par des Vp similaires à celles du calcaire de l'Hauterivien n'est pas observée dans le profil Vs calibré (même si une chute de vitesse Vs est observée proche de cette zone dans le profil Vs non calibré).

Des variations des temps de retard sont observées dans la coupe somme en onde de surface (Illustration 33), qui traduisent des contrastes assez importants au sein des formations superficielles. Une caractéristique est la forte atténuation des ondes de surfaces observées entre les PM20 et PM70. Cette partie du profil sismique étant située à proximité de l'effondrement des Auvions, il conviendrait de s'assurer que les faibles vitesses ne sont pas dues à un impact éventuel de l'effondrement sur la qualité mécanique des terrains encaissants.

Pour ce faire, il est recommandé de réaliser un profil sismique complémentaire au droit de cet effondrement afin d'en déterminer les caractéristiques mécaniques des terrains de recouvrement.

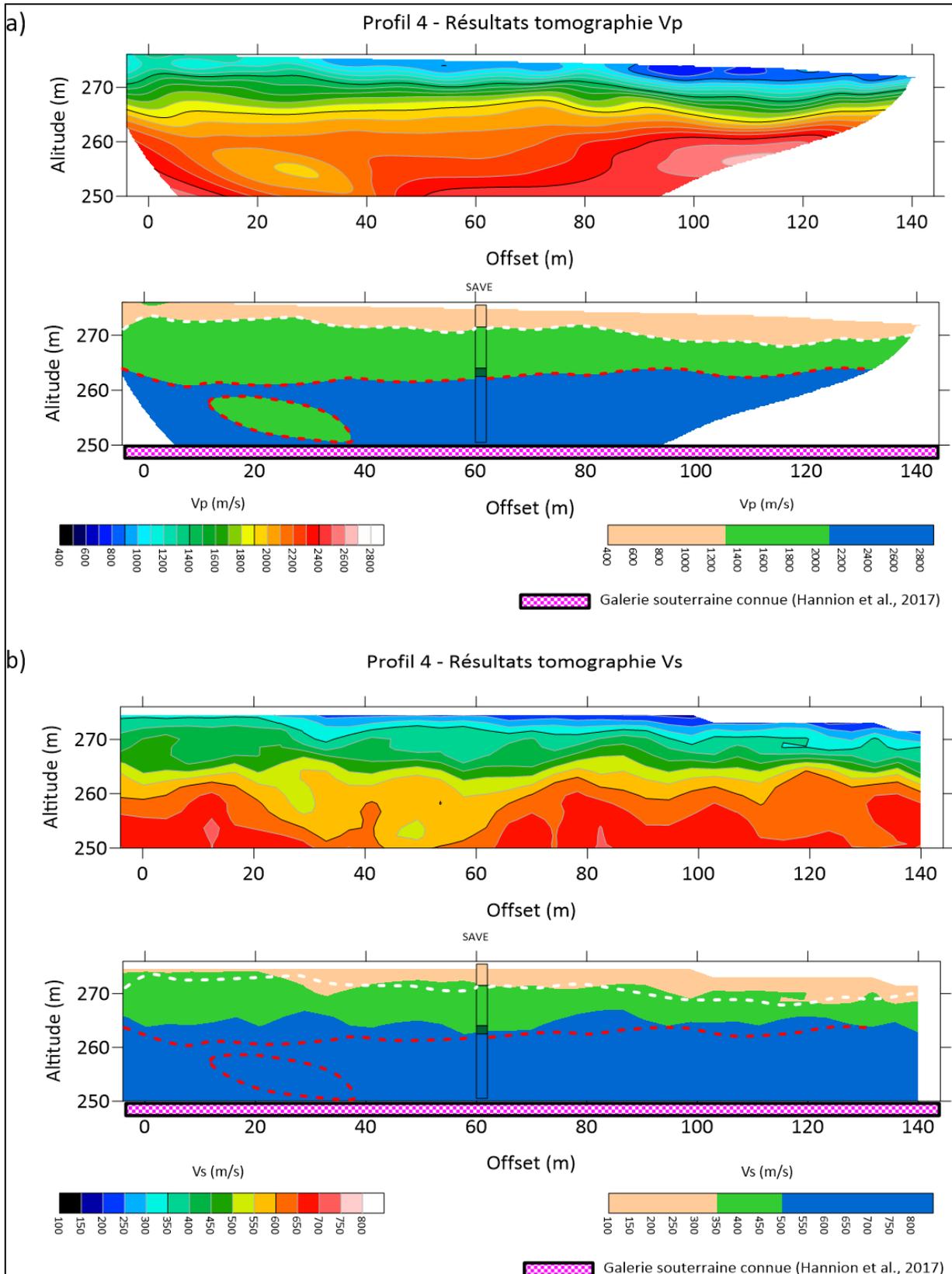


Illustration 32 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 4. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.

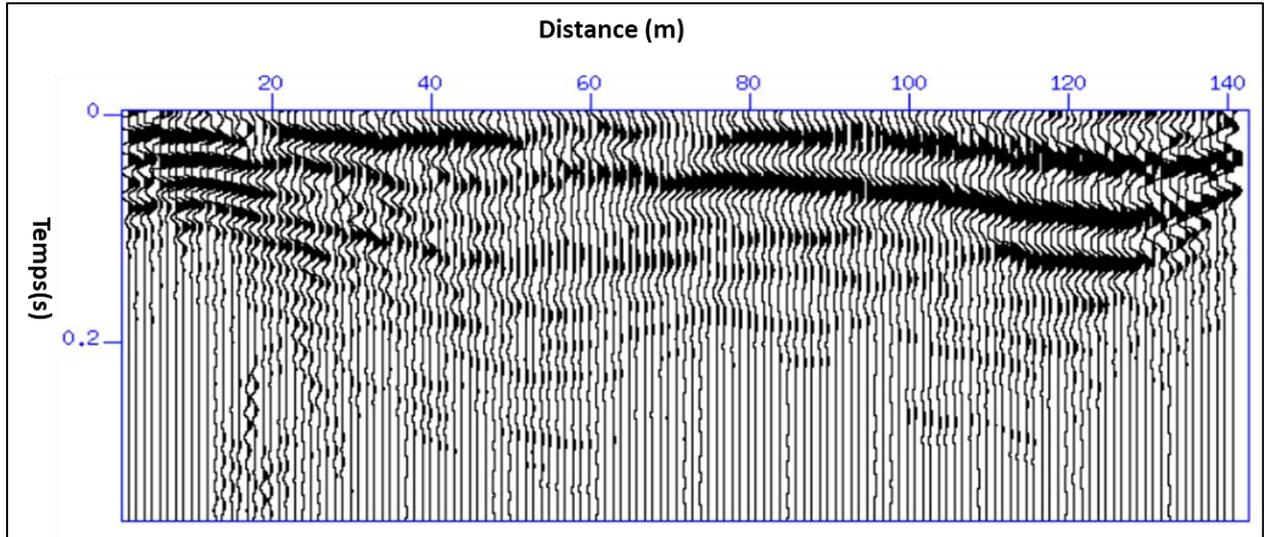


Illustration 33 - Coupe somme en ondes de surface le long du Profil 4.

3.2.5. Profil 5 – forage SAVN

Le profil 5, long de 150 m, est centré sur le sondage carotté SAVN (Illustration 34). Le PM0 se situe à l'ouest. Les résultats des inversions de vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 35.

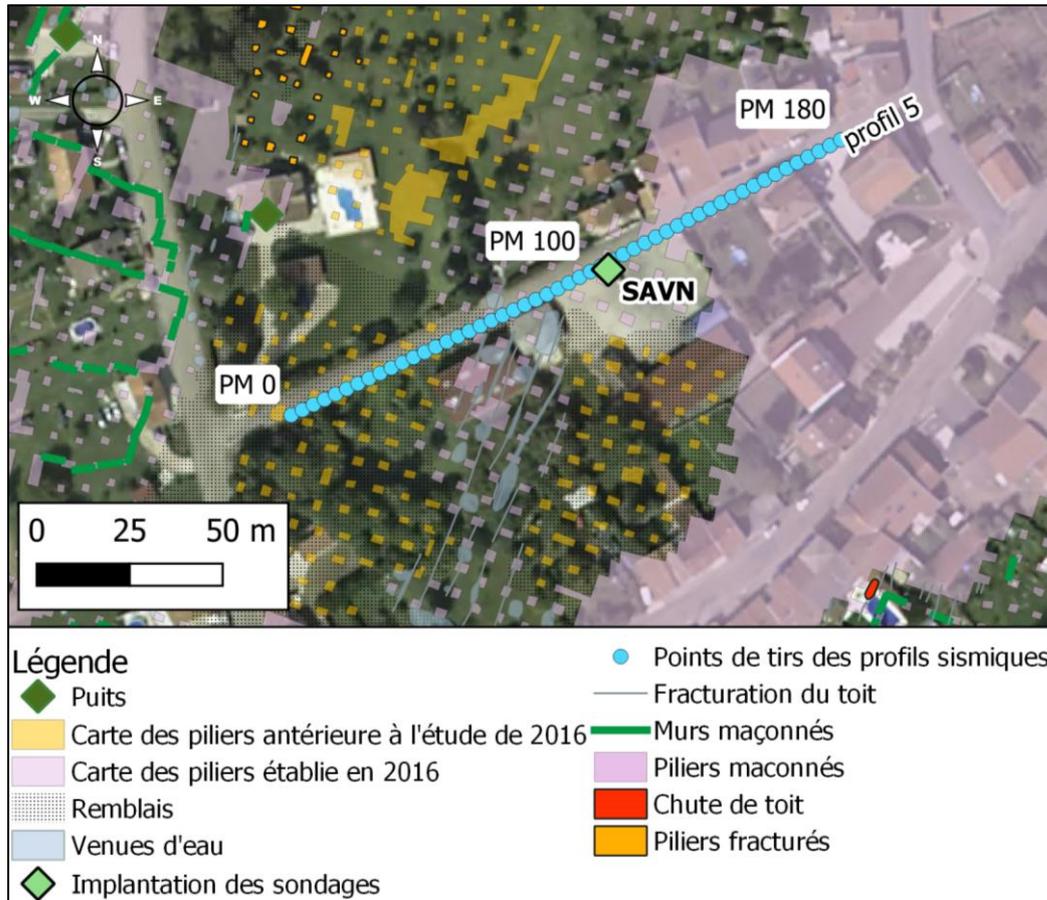


Illustration 34 - Localisation du Profil 5

Le Profil 5 V_p montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien de 4-10 m d'épaisseur qui s'épaissit vers l'est, avec des vitesses comprises entre 600 m/s et 1800 m/s;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien d'une épaisseur de 20 m relativement constante le long du profil et avec des vitesses comprises entre 1800 m/s et 2400 m/s;
- une couche de calcaire du Portlandien de vitesse supérieure à 2400 m/s, et dont le toit n'est pas atteint au niveau du PM40.

Le Profil 5 V_s montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de dépôts limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien de 4-10 m d'épaisseur qui s'épaissit vers l'est, avec des vitesses comprises entre 100 m/s et 250 m/s;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien de 5-12 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 250 m/s et 460 m/s;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 460 m/s.

La couche de calcaire de l'Hauterivien apparaît plus épaisse sur le profil V_p , faisant remonter le toit des calcaires du Portlandien sur la coupe V_s .

La coupe somme en onde de surface (Illustration 36) indique une dichotomie nord/sud dans les propriétés Vs des couches les plus superficielles. On observe un retard dans l'arrivée des ondes de surface à partir du PM120 et jusqu'à la fin du profil.

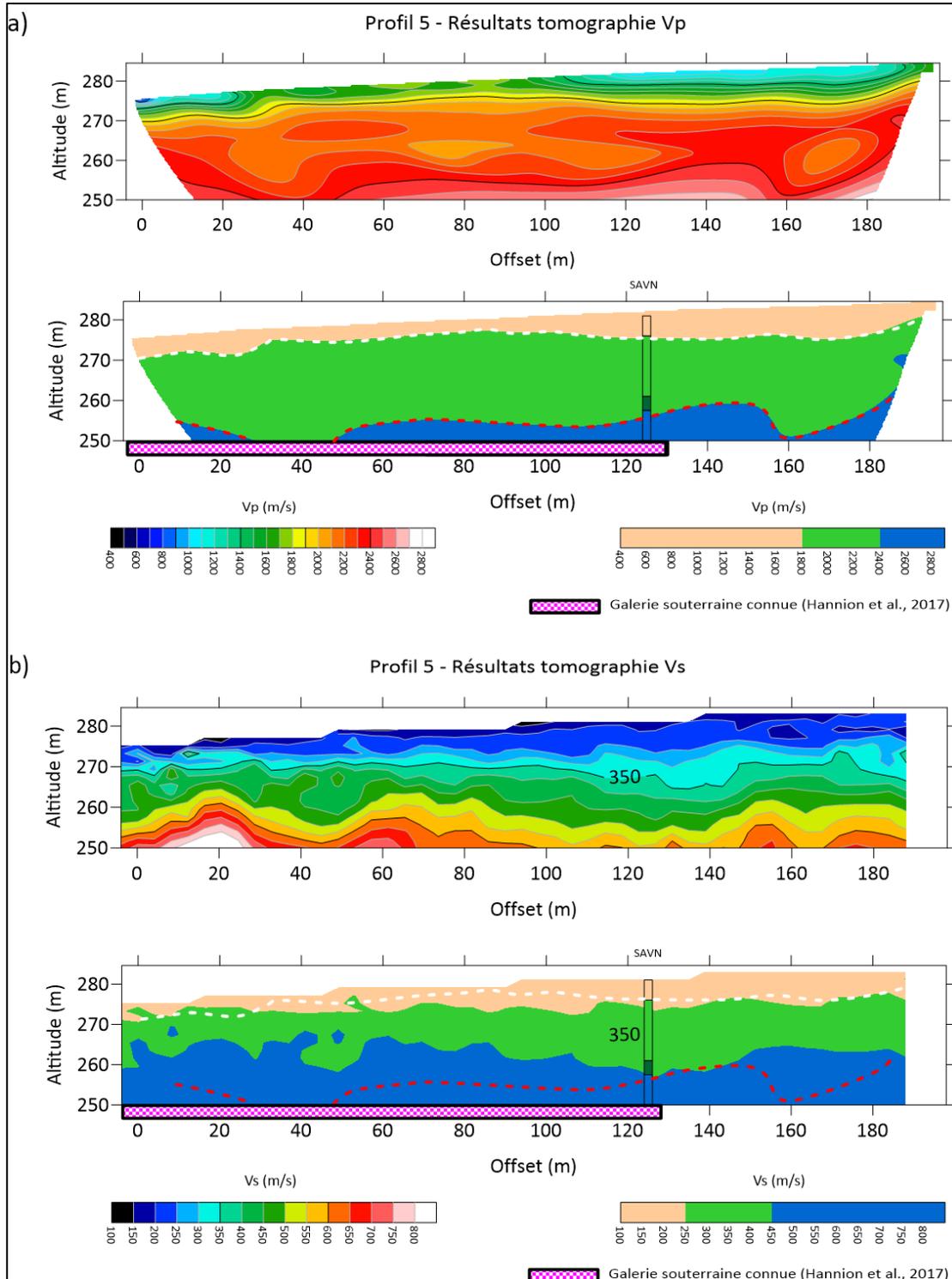


Illustration 35 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 5. a) Vitesse de compression Vp , b) Vitesse de cisaillement Vs. Offset est traduit par PM dans le texte.

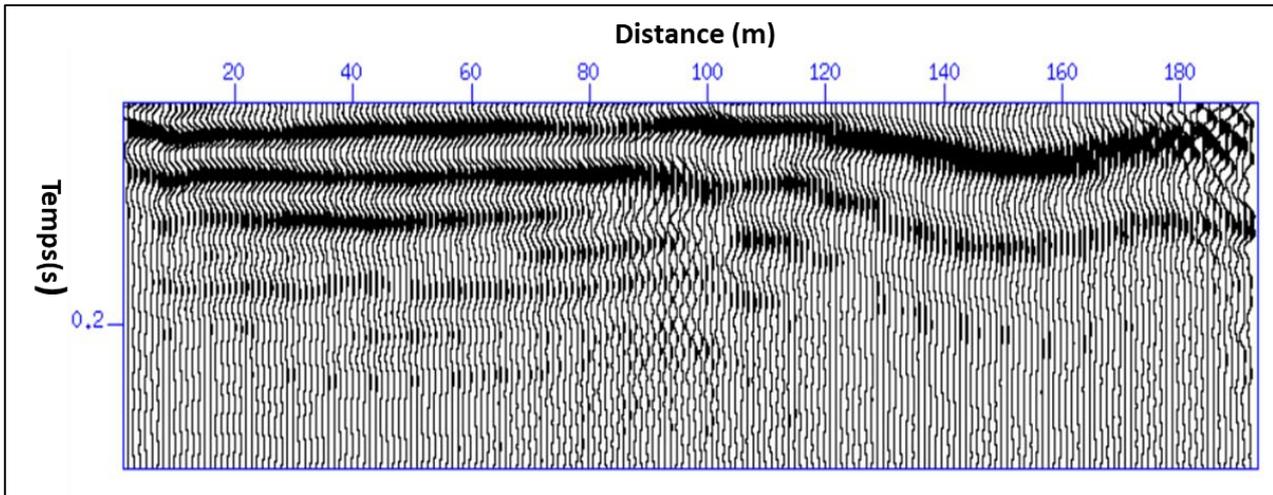


Illustration 36 - Coupe somme en ondes de surface du Profil 5.

3.2.6. Synthèse des calibrations des vitesses sismiques

L'illustration 37 résume l'ensemble des correspondances relevées entre les horizons géologiques et les gammes de vitesses sismiques minimales et maximales qui leur sont associées. Les valeurs moyennes sont indiquées dans la dernière ligne du tableau.

Les valeurs moyennes montrent une augmentation des vitesses sismiques avec la profondeur quelque que soit la lithologie rencontrée. Les formations du Valanginien, constituées de sable, présentent donc des vitesses sismiques plus fortes que les calcaires de l'Hauterivien situé au-dessus. Ceci traduit des propriétés mécaniques supérieures des sables par rapport au calcaire, qui doit avoir un assez fort degré d'altération.

Profil	Horizon	Vp [min-max] (m/s)	Vs [min-max] (m/s)
P1	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[800-1400]	[100-300]
	Hauterivien	[1400-1500]	[300-450]
	Valanginien	[1500-2000]	[450-450]
	Portlandien inf.	>2000	>450
P2	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[600-1600]	[100-275]
	Hauterivien	[1600-1800]	[275-450]
	Valanginien	[1800-2000]	[450-550]
	Portlandien inf.	>2000	>550
P3	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[600-800]	[150-350]
	Hauterivien	[800-2000]	[350-550]

Profil	Horizon	Vp [min-max] (m/s)	Vs [min-max] (m/s)
	Valanginien	[2000-2400]	[550-650]
	Portlandien inf.	>2400	>650
P4	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[600-1300]	[100-340]
	Hauterivien	[1300-2100]	[340-460]
	Valanginien	/	/
	Portlandien inf.	>2100	>460
P5	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[600-1800]	[100-250]
	Hauterivien	[1800-2400]	[250-460]
	Valanginien	/	/
	Portlandien inf.	>2400	>460
Moyenne	Quaternaire et niveau d'altération de l'Hauterivien	[640-1380]	[110-295]
	Hauterivien	[1380-1960]	[295-474]
	Valanginien	[1960-2133]	[474-550]
	Portlandien inf.	>2133	>550

Illustration 37 - Synthèse du calibrage des vitesses sismiques sur les horizons lithologiques identifiés dans les forages carottés dans chaque zone. La dernière ligne indique les valeurs moyennes calculées sur les cinq profils

3.3. PROFILS DE VITESSE SUR ZONE DE FONTIS (ZONES 6 ET 8)

3.3.1. Calibration par extrapolation

Les vitesses sismiques minimales et maximales moyennes, obtenues pour chaque horizon à partir des profils 1 à 5, ont été utilisées pour calibrer, par extrapolation les coupes sismiques des profils 6 et 8.

3.3.2. Profil 6

Le profil 6, long de 100 m, est centré sur un fontis observé dans la zone du Pâquis, côté ouest (Illustration 38). Le PM=0 se situe au sud. Les résultats des inversions de vitesses de compression (Vp) et des vitesses de cisaillement (Vs) sont présentés sur l'illustration 39.

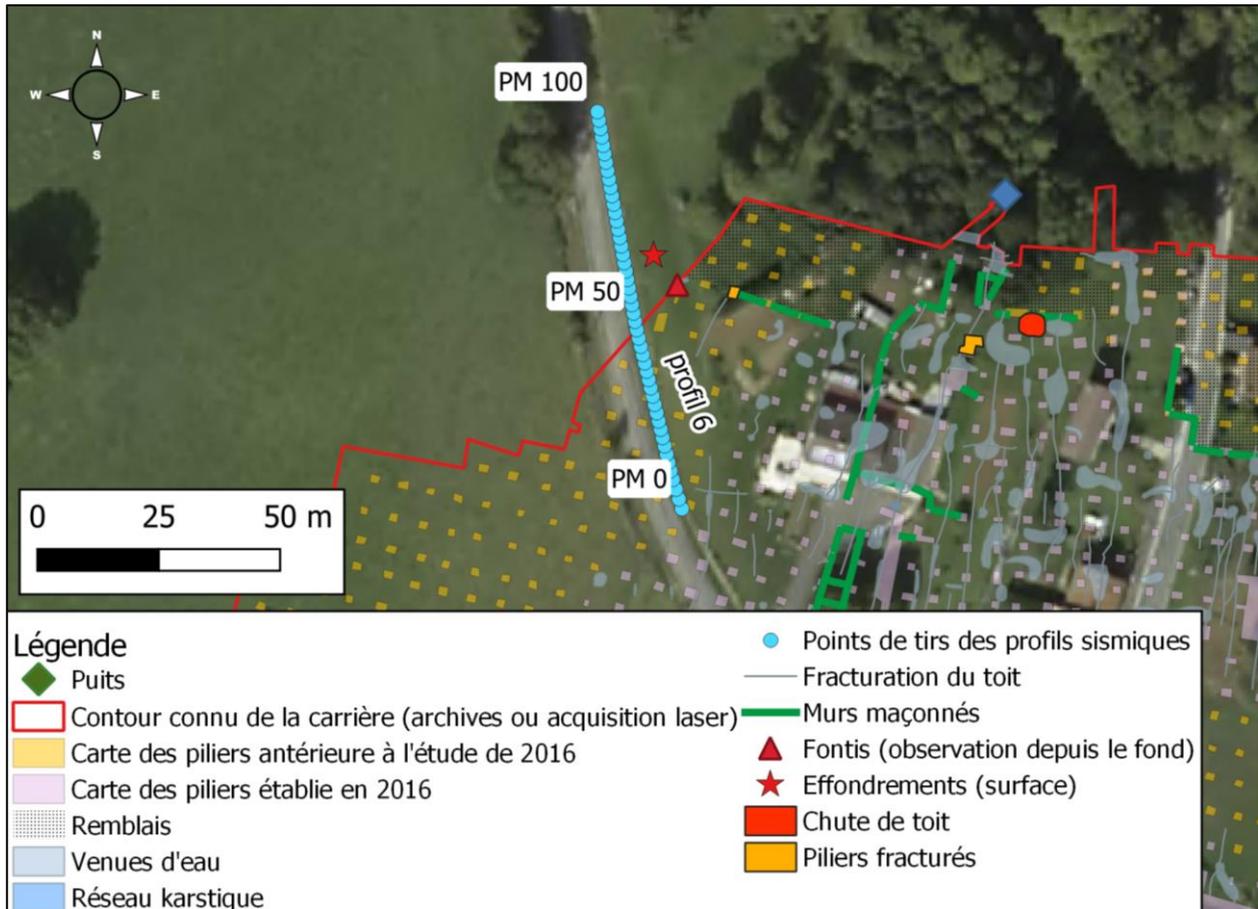


Illustration 38 - Localisation du Profil 6

Le Profil 6 V_p montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 640 m/s et 1380 m/s, de 5-15 m d'épaisseur, avec une épaisseur maximale au niveau du PM50 ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 1380 m/s et 1960 m/s, de 3-10 m d'épaisseur, avec une épaisseur maximale au niveau du PM35. Le mur de cette couche n'est pas atteint entre les PM30 et PM57 ;
- une fine couche de sable du Valanginien avec des vitesses comprises entre 1960 m/s et 2133 m/s, de 2-4 m d'épaisseur. Cette couche n'est pas observée entre les PM30 et PM65 ;
- une zone avec les propriétés du calcaire du Portlandien (vitesses supérieures à 2133 m/s) entre les PM10 et PM25 d'environ 8 m d'épaisseur.

Le Profil 6 V_s montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 110 m/s et 295 m/s, de 4-10 m, avec une épaisseur maximale au niveau du PM50 ;

- une couche de calcaire de l'Hauterivien, de 2-8 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 295 m/s et 474 m/s, recoupée/intercalée par des zones aux propriétés des limons Quaternaires, sables Valanginien et calcaire Portlandien ;
- une fine couche de sable du Valanginien de 1 à 3 m d'épaisseur avec des vitesses comprises entre 474 m/s et 550 m/s;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 550 m/s.

Une atténuation des amplitudes des ondes de surface est observée autour du PM=50 dans la coupe somme, et la coupe somme est globalement très hétérogène (Illustration 40), confirmant le fort degré d'hétérogénéité du sous-sol le long du Profil 6.

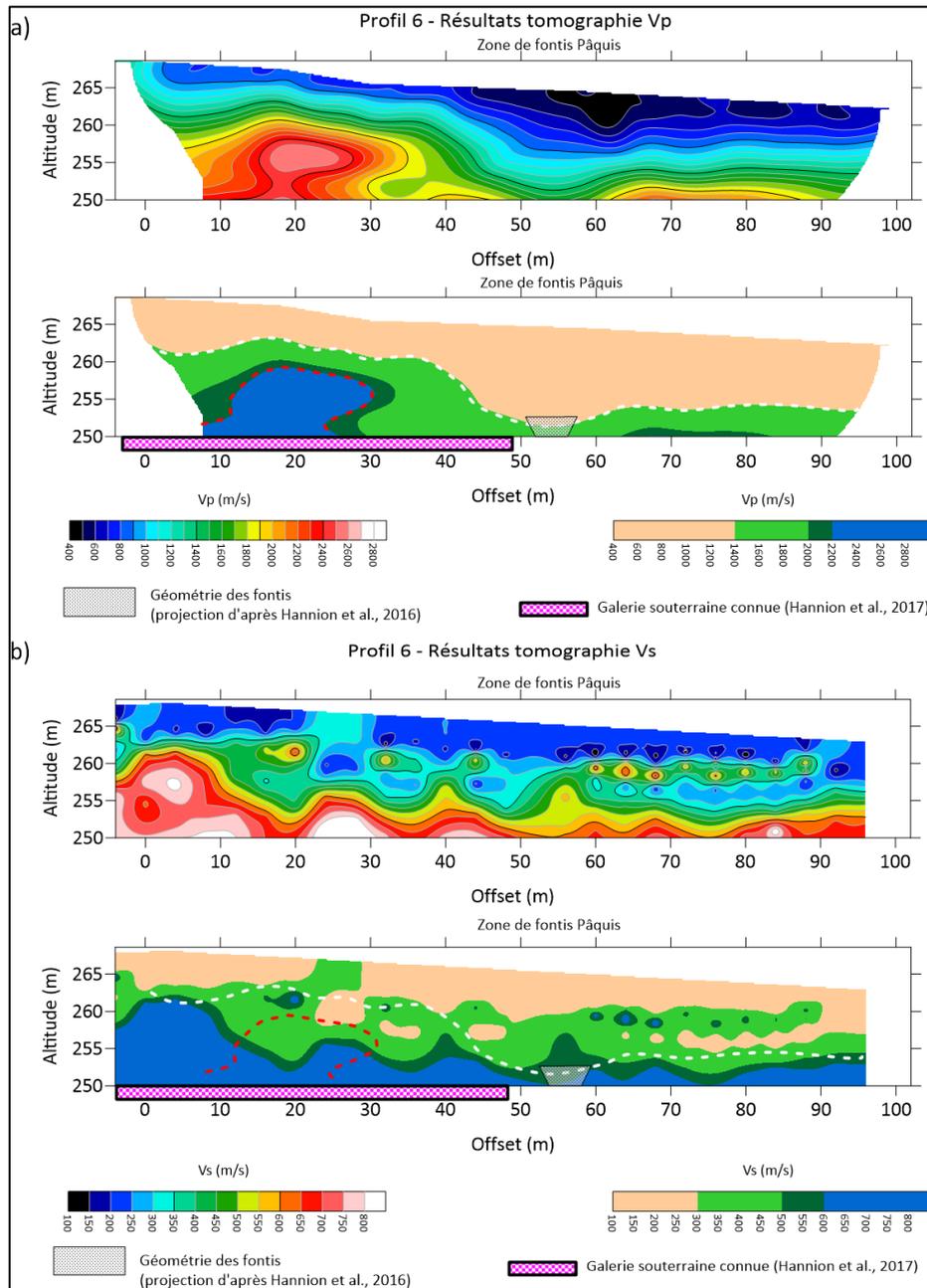


Illustration 39 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 6. a) Vitesse de compression V_p , b) Vitesse de cisaillement V_s . Offset est traduit par PM dans le texte.

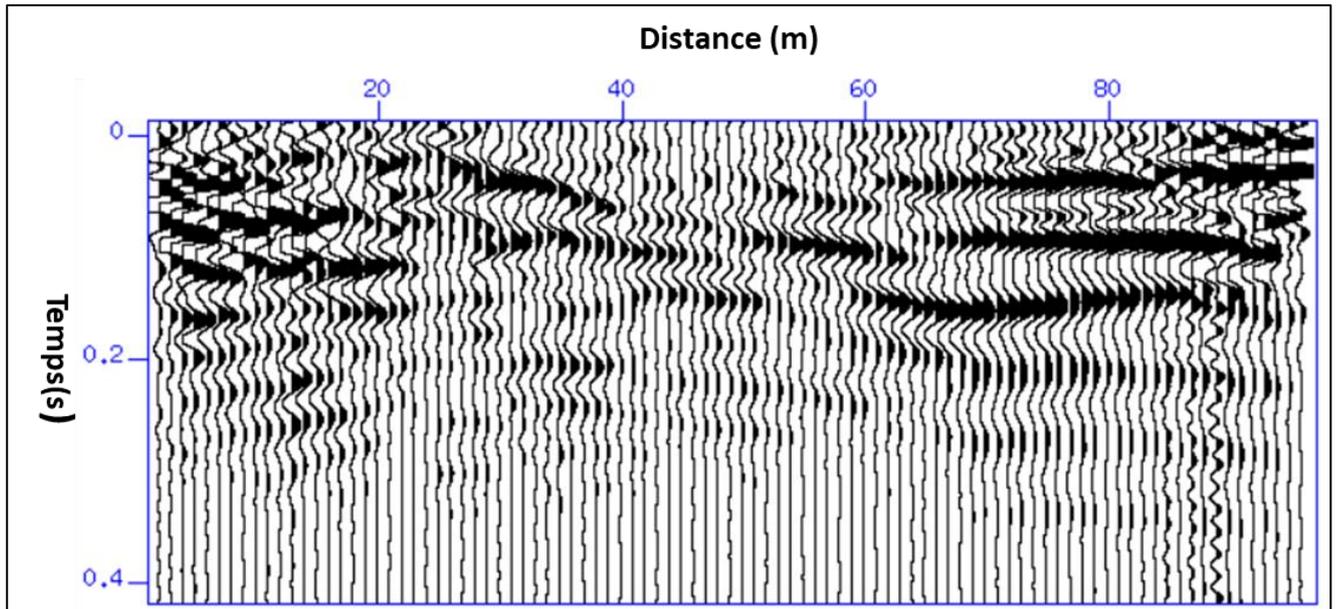


Illustration 40 - Coupe sismique somme en ondes de surface du Profil 6

3.3.3. Profil 8

Le profil 8, long de 190 m, est centré sur les « fontis » observés dans la zone V2 (Illustration 41). Le PM=0 se situe à l'ouest. Les résultats des inversions des vitesses de compression (V_p) et des vitesses de cisaillement (V_s) sont présentés sur l'illustration 42.

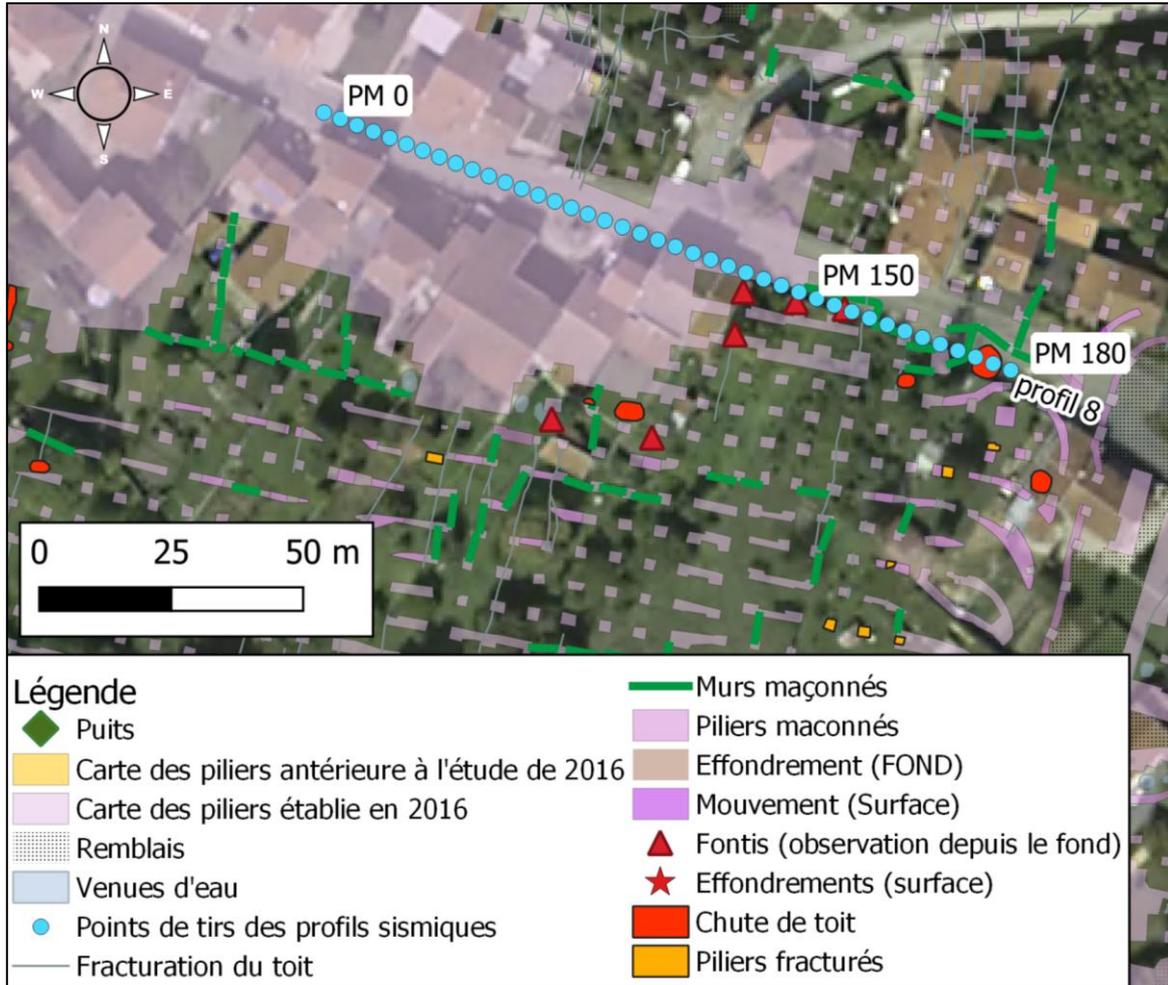


Illustration 41 - Localisation du Profil 8

Le Profil 8 Vp montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 640 m/s et 1380 m/s, de 2-5 m d'épaisseur. Il n'y a pas de limons autour du PM100 où le calcaire Hauterivien est à l'affleurement ;
- une couche de calcaire de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 1380 m/s et 1960 m/s, de 5-8 m d'épaisseur, avec une épaisseur maximale au niveau du PM100.
- une fine couche de sable du Valanginien avec des vitesses comprises entre 1960 m/s et 2133 m/s, de 2-3 m d'épaisseur ;
- une couche de calcaire du Portlandien, avec des vitesses supérieures à 2133 m/s, de 20 m d'épaisseur, qui possède une zone à plus faible vitesse entre les PM40 et PM160 à 260 m d'altitude (zone avec des vitesses similaires aux sables Valanginien, contenant elle-même une zone avec des vitesses similaires aux calcaires Hauterivien, au niveau du PM140 à 258 m d'altitude).

Le Profil 8 Vs montre les caractéristiques suivantes, de la surface vers la profondeur :

- une couche de limons quaternaires et niveau d'altération de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 110 m/s et 295 m/s, de 8 m d'épaisseur avant PM100, et de 4 m d'épaisseur au-delà.
- une couche de calcaire de l'Hauterivien avec des vitesses comprises entre 295 m/s et 474 m/s, de 12 m d'épaisseur avant PM100, et de 6 m d'épaisseur après ;
- une fine couche de sable du Valanginien avec des vitesses comprises entre 474 m/s et 550 m/s, de 2 à 3 m d'épaisseur ;
- une couche de calcaire du Portlandien avec des vitesses supérieures à 550 m/s.

La zone de faible vitesse observée dans le profil Vp n'est pas observé dans le profil Vs, qui montre au contraire une zone à plus forte vitesse à cet endroit qui se manifeste par une remontée du toit de la couche calcaire du Portlandien à partir du PM100.

La coupe somme en ondes de surface (Illustration 43) indique la présence d'une discontinuité au niveau du PM100.

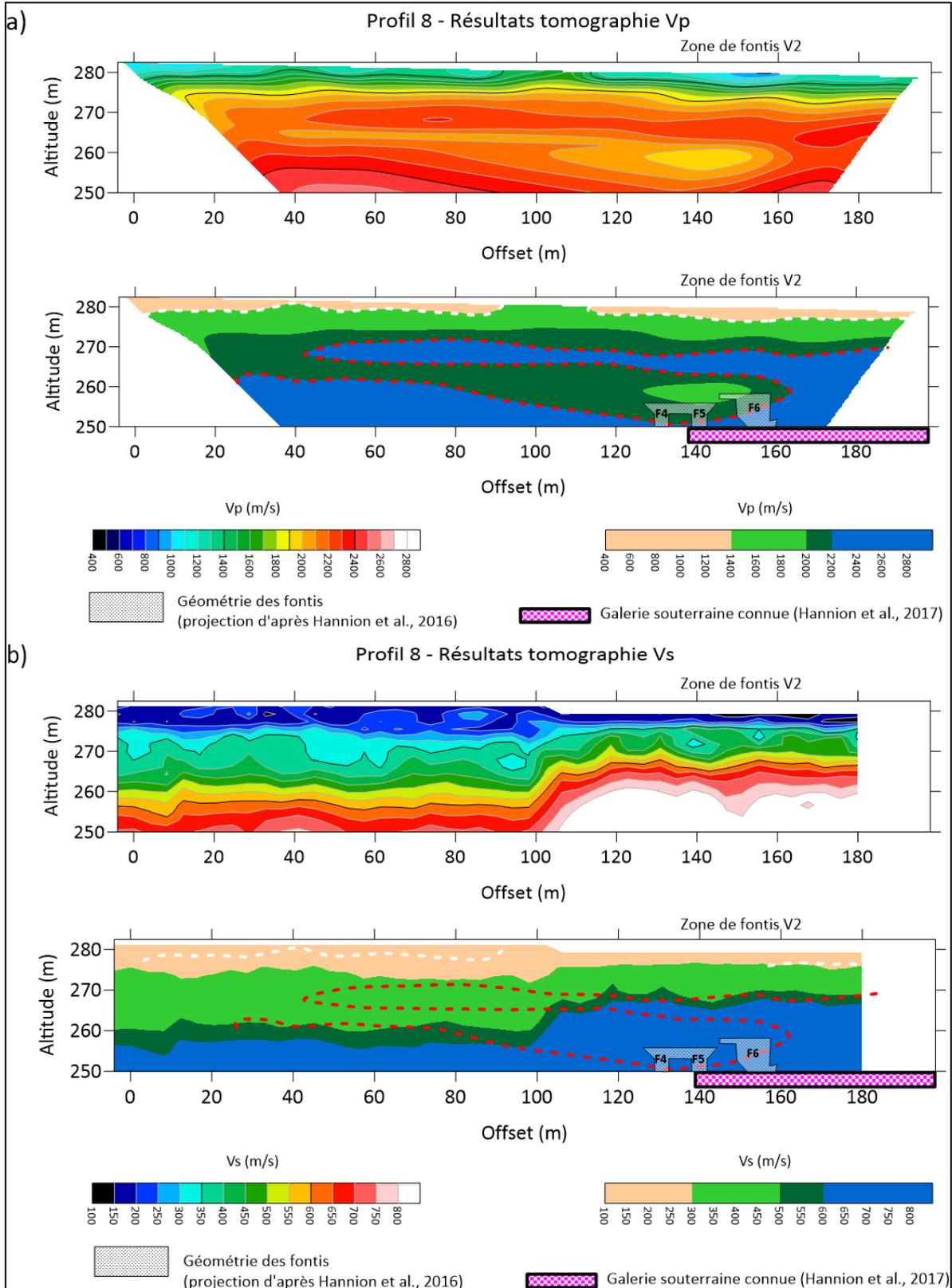


Illustration 42 - Coupes de vitesses sismiques non calibrées (coupes du haut) et calibrées (coupes du bas) pour le Profil 8. a) Vitesse de compression Vp, b) Vitesse de cisaillement Vs. Offset est traduit par PM dans le texte.

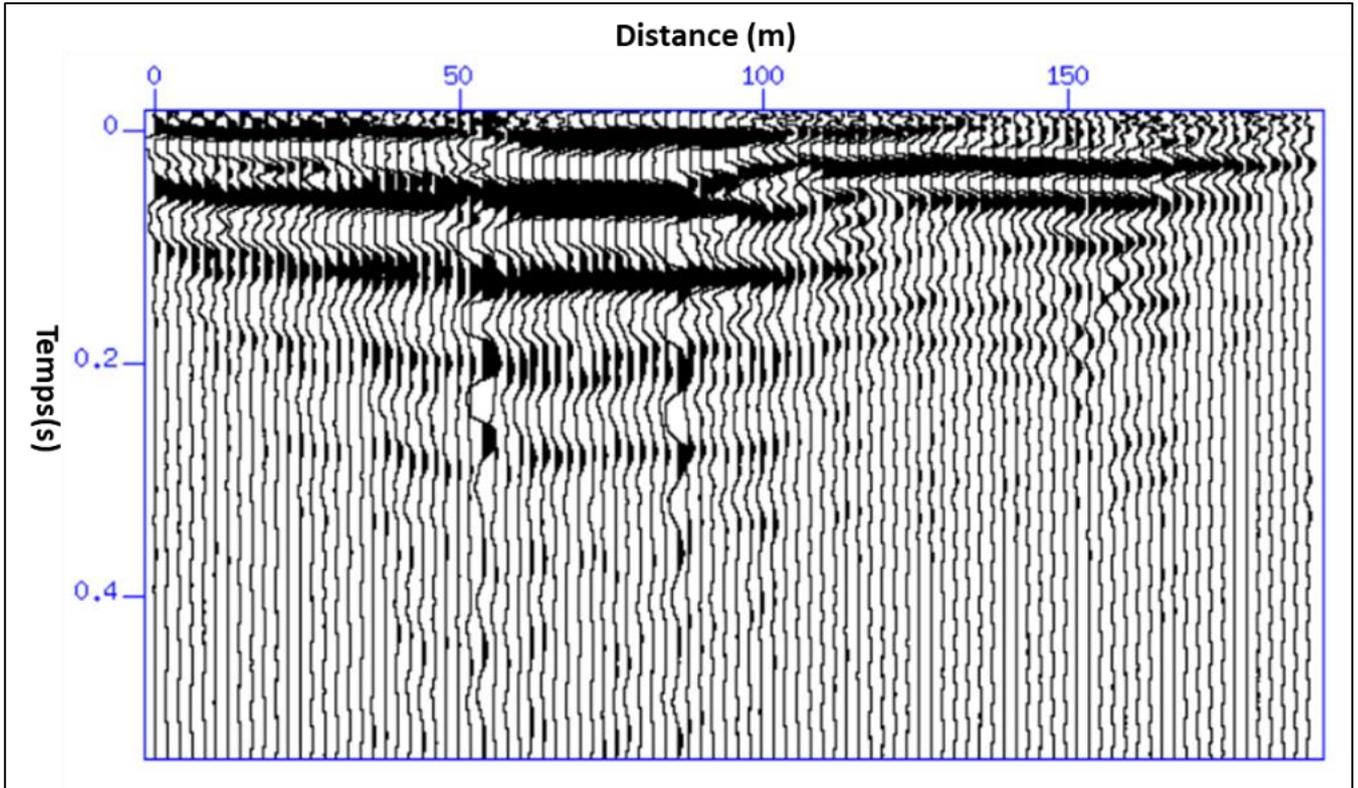


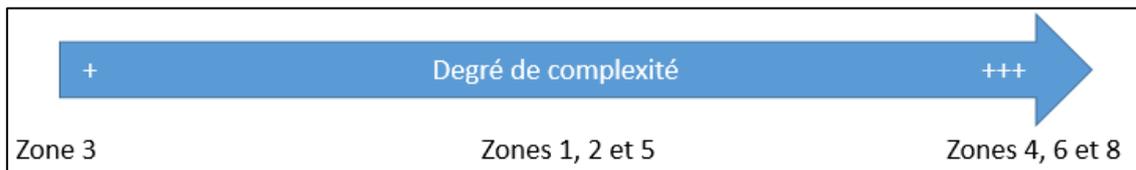
Illustration 43 - Coupe sismique somme des ondes de surface du Profil 8

4. Discussion

4.1. CORRELATION SISMIQUE - LITHOLOGIE

L'interprétation jointe des profils sismiques Vp et Vs, de la lithologie et des coupes sommes en ondes de surface, met en lumière des caractéristiques lithologiques variables, complexes à interpréter, des terrains de recouvrement de la carrière de Savonnières-en-Perthois. Bien que les zones ne montrent pas toutes le même degré de complexité, trois types d'observations principales communes à chaque zone peuvent être mentionnées :

- discordances entre les coupes Vp et Vs calibrées d'une même zone ;
- fortes variations latérales de vitesses sismiques ;
- changements brutaux sur les coupes sommes en ondes de surface.



Seules les zones 4, 6 et 8 sont détaillées dans les paragraphes suivants. Les autres profils (1, 2, 3 et 5) ne présentent aucun signe qui pourrait être interprété comme la présence d'une remontée de fontis.

4.1.1. Zone 6 – Fontis du Pâquis

Le profil 6 est réalisé à l'aplomb du fontis du Pâquis. La remontée de la cloche de fontis depuis le toit du calcaire de Savonnières-en-Perthois est mesurée à 2,6 m en 2016 (Hannion et al., 2017).

La position du fontis du Pâquis correspond au PM55 sur les profils sismiques (Illustration 39).

Le Profil 6 montre des irrégularités décamétriques du mur des limons quaternaires et d'altération de l'Hauterivien qui ne sont observées sur aucun des autres profils.

Sur le profil Vp, les vitesses sismiques superficielle sont très faibles associées aux limons Quaternaire, atteignent 15 m de profondeur au niveau du PM55, au droit du fontis du Pâquis. Cette chute de vitesse peut être reliée à une chute des propriétés mécaniques de la roche en profondeur et à l'apport de roches superficielles (remblais, limons quaternaires). Cette chute de vitesse est observée sur le profil Vp dans un rayon d'au moins 20 m.

En revanche, sur le profil Vs, l'interprétation lithologique est plus délicate, à cause d'une forte hétérogénéité dans la distribution des vitesses.

L'apparition récente d'un cratère de fontis en surface au niveau du PM55 (et qui n'est pas forcément relié géométriquement au fontis observé au fond) **pourrait témoigner d'une karstification intense de la couverture qui se traduirait par une diminution des propriétés mécaniques des roches et donc des vitesses sismiques.**

4.1.2. Zone 8 – Fontis F4, F5 et F6

Le profil 8 a été réalisé à l'aplomb des « fontis » F4, F5 et F6 de la zone V2. Seul, le fontis 6 est un fontis naturel ayant percé au-delà du toit de la galerie secondaire. Les scans 3D en profondeur montrent l'orientation ouest-est de la galerie secondaire bétonnée et la remontée du fontis F6 au-delà du toit de la galerie (Illustration 44). Les données mesurées sont les suivantes (Hannion et al., 2017) :

- la hauteur du toit de la galerie secondaire est de 5,9 m depuis le toit de la galerie principale (« fontis » F4 et F5) ;
- la remontée de fontis F6 depuis le toit du calcaire de Savonnières-en-Perthois est mesurée à 8 m en 2016.

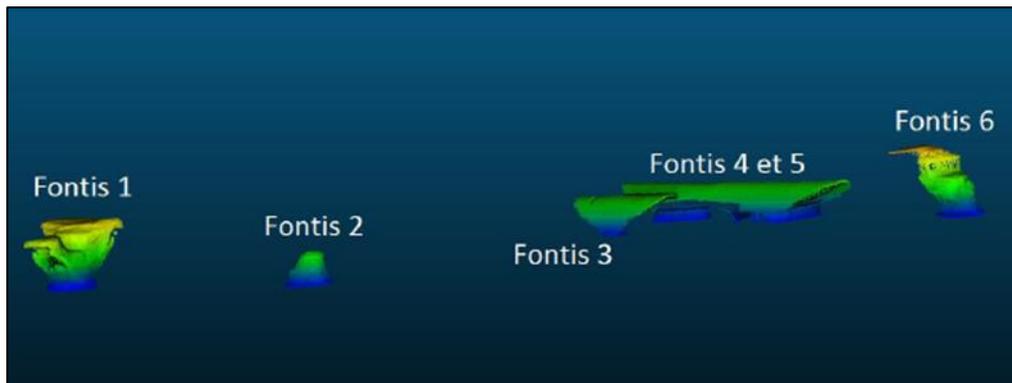


Illustration 44 - Scan 3D des fontis dans la zone V2. Le Profil 8 est colinéaire au fontis 4,5 et 6

La position des « fontis » est centrée autour du PM145 sur les profils sismiques (entre PM130 et PM160, Illustration 42).

Les observations faites sur le profil Vs et le profil Vp sont en contradiction :

- le profil Vp montre une zone de plus faibles vitesses ($V_p \sim 1900$ m/s, jaune-orange) au sein de la couche de calcaire du Portlandien (rouge). Cette zone de faible vitesse de 20 m de large est centrée sur la position des « fontis » (PM145) (Illustration 42). Centrée autour de l'altitude 255 m, elle se prolonge vers l'ouest (vers le PM0), en remontant légèrement vers la surface (ce qui semble correspondre à la galerie secondaire) ;
- le profil Vs se caractérise par la présence de vitesses relativement rapides (PM140) (Illustration 42). On observe en effet sur le profil Vs une remontée brutale d'une couche à forte vitesse à partir du PM100 et qui correspond aux vitesses du Portlandien.

Les plus fortes vitesses sismiques Vs à partir du PM100 ne sont très probablement pas représentatives des vitesses sismiques réelles dans le sous-sol. En effet, la présence de fortes hétérogénéités dans le sous-sol peut, dans certains cas, aboutir à des vitesses apparentes élevées.

Ce phénomène est lié à l'apparition de modes supérieurs de propagation des ondes de surface, qui se propagent plus rapidement que le mode fondamental ciblé dans cadre de cette étude.

La présence de modes supérieurs de propagation des ondes de surface est justifiée par :

- les retards moins importants sur la coupe somme en ondes de surface (Illustration 43) ;
- la présence de plusieurs branches dans les diagrammes de dispersions (Illustration 45)

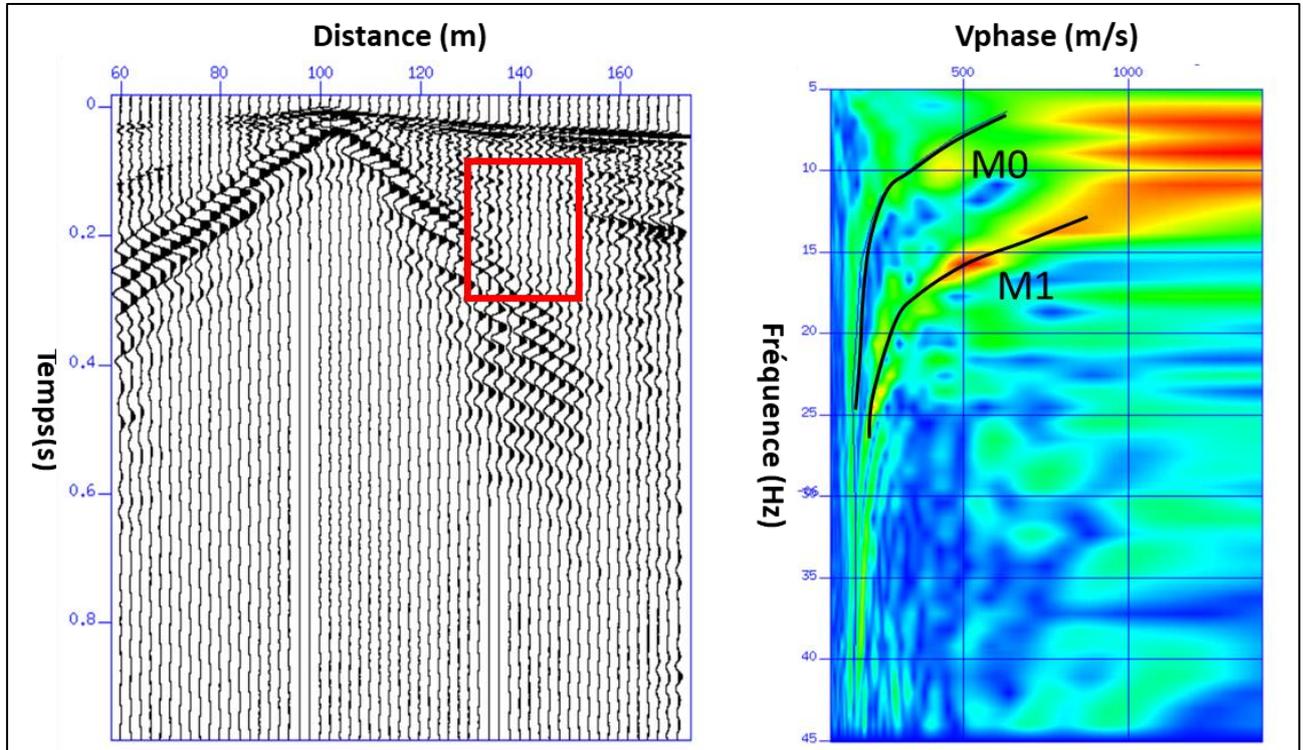


Illustration 45 - Tir sismique (gauche) et son diagramme de dispersion (droite) du profil 8 montrant une atténuation des amplitudes des ondes de surfaces (carré rouge) et une dispersion multimodale

4.1.3. Zone 4

Sur le Profil 4, qui ne se situe pas à l'aplomb d'une zone de fontis connue, on observe sur la coupe V_p une zone de plus faible vitesse ($V_p \sim 1900$ m/s, jaune-orange, Illustration 32) au sein de la couche de calcaire du Portlandien (rouge). Cette zone de faible vitesse, de 20 m de large, est centrée au niveau du PM30, et située à une altitude d'environ 255 m (Illustration 32). Ses caractéristiques sont proches de la zone de faible vitesse observée sur le Profil 8 au niveau des fontis V2 et discutée dans le paragraphe précédent.

Sur la coupe V_s , on observe aussi une diminution des vitesses entre les PM20 et PM60. Une atténuation de l'amplitude des ondes de surface est observée entre les PM20 et PM70 dans la coupe somme en onde de surface (Illustration 33).

Les observations faites sur le profil 4 autour du PM30 sont interprétées comme la zone déstructurée dans les terrains de recouvrement. Ce qui pourrait témoigner de faiblesses mécaniques dans les terrains de recouvrements préexistantes à l'effondrement des Auvions ou en lien avec ce dernier (en rose sur l'Illustration 3).

4.2. CORRELATION VITESSE SISMIQUE – RQD

4.2.1. Etablissement d'un modèle de prédiction des RQD à partir des données Vp

La présence de zones déstructurées dans le calcaire du Portlandien peut être renseignée par de faibles valeurs de RQD au toit des galeries souterraines. Dans le contexte de Savonnière-en-Perthois, ces zones peuvent indiquer la présence de zone de départ de fontis (bien que d'autres phénomènes puissent conduire à une chute de RQD : karst, déstructuration des terrains lors de l'exploitation).

Nous proposons ici d'établir un modèle prédictif des valeurs de RQD **dans les formations du Portlandien à partir des données de vitesses sismiques**. Le choix a été fait d'écarter les profils Vs car les données étaient trop hétérogènes (bruits géologiques de surface) et qu'aucune corrélation n'a pu être faite entre les Vs et le RQD au toit des couches exploitées du calcaire de Savonnières. Les Vp ont été extraites des coupes sismiques, à l'altitude du toit des formations du Portlandien au droit des logs de forages exploités dans le cadre de cette étude.

L'illustration 46 (points bleus) représente l'évolution des valeurs moyennes de RQD mesurées en 2011 dans les sondages carottés en fonction des valeurs moyennes de Vp extraites des coupes géophysiques. Une régression linéaire avec un ajustement affiné (ligne rouge) permet d'obtenir un modèle prédictif des RQD au droit des galeries souterraines. Les limites de cette analyse sont :

- le nombre de points de mesures (5 forages) ;
- les incertitudes sur les valeurs de RQD (Section 1.3), notamment sur les sondages SAVE et SAVW ;
- les incertitudes sur les valeurs de RQD très certainement plus importantes que l'évolution des propriétés mécaniques de la qualité de la roche entre 2011 et 2019.

Cette corrélation entre le RQD et les Vp constitue un modèle prédictif au 1^{er} ordre pour la caractérisation des propriétés géotechniques des formations du Portlandien à partir de l'imagerie sismique. Il permet ainsi de déterminer une **probabilité de départ** pour la formation de fontis au droit des profils réalisés.

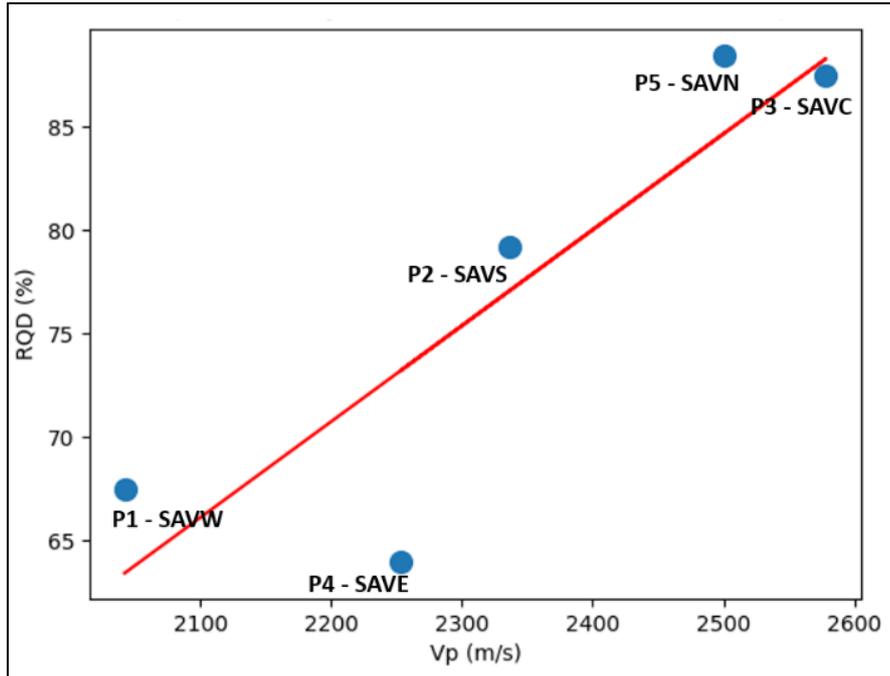


Illustration 46 - Modèle de prédiction du RQD à partir des vitesses sismiques V_p . Les données sont issues des forages carottés réalisés dans les zones 1,2,3,4,5 (Hannion et al., 2017). Les valeurs moyennes de RQD et de vitesse dans la couche de calcaire du Portlandien sont utilisées. Un modèle de régression avec ajustement affine est utilisé.

4.2.2. Application du modèle prédictif et résultats

L'illustration 47 présente les valeurs de RQD prédites à partir des valeurs de vitesses V_p moyennes situées dans une couche horizontale (i.e. de même altitude), de 3 m d'épaisseur, située au droit des galeries souterraines supposées (soit les 3 derniers mètres des coupes de vitesse). L'objectif est d'extraire les V_p moyennes dans la couche de calcaire du Portlandien.

Cette méthodologie ne tient pas compte des éventuels pendages lithologiques. Cela signifie que de faibles RQD prédits sont associés à des changements de faciès (limons quaternaires) plutôt qu'à des faibles qualités des calcaires : c'est particulièrement le cas sur le profil 1 qui ne fera donc pas l'objet d'une analyse.

Le RQD prédit ne reflète pas l'état de la carrière souterraine (exploité ou non) mais l'état du calcaire du Portlandien. Une zone non exploitée peut avoir un recouvrement calcaire de moins bonne qualité qu'un recouvrement calcaire d'une zone exploitée (exemple sur le profil 8, le calcaire au-dessus du stot est de qualité bonne (RQD entre 75 et 90 %) tandis que sur le profil 3 le calcaire au-dessus de la carrière exploitée est excellent (RQD entre 90 et 100 %).

Sur l'ensemble des autres profils, on observe les éléments suivants :

- profils 2, 3 et 5 : RQD prédit supérieurs à 75 % (bonne à excellente) ;
- profil 8 : RQD prédit inférieurs à 75 % atteint à partir du PM110. Le minimum est atteint au niveau du PM140 avec un RQD égal à 70 % environ. Cette diminution de qualité de roche correspond à la localisation de la galerie secondaire et des « fontis » associés. L'état du recouvrement au-dessus de la galerie bétonnée n'a jamais été observée et pourrait être légèrement fracturé (galerie secondaire difficile d'accès avec un intercalaire qui s'est déjà rompu) ;
- profil 4 : RQD prédit supérieurs à 75 %, sauf autour du PM30 où une inflexion est clairement observée avec une diminution du RQD jusqu'à des valeurs de 65 % environ. Cette baisse du RQD pourrait être liée à une déstructuration des terrains de recouvrement dû à l'effondrement des Auvions. Ce secteur n'a pas fait l'objet d'une investigation au fond récente ;
- profil 6 : RQD prédit inférieurs à 60 %, avec un minimum atteint au niveau du fontis des Pâquis (PM55). La qualité de roche est mauvaise au nord du secteur d'étude ce qui pourrait refléter une karstification de la couverture (cartographie des piliers non réalisée dans ce secteur - secteur non investigué au fond en 2020²) ;
- profil 1 : RQD prédit qui se dégrade avec l'augmentation des PM (vers l'ouest). Cette tendance pourrait être liée à des variations lithologiques ou à une variation de la qualité de la roche due à une diminution de l'épaisseur de la couverture qui la rendrait plus sensible à l'altération météorique.

L'utilisation des vitesses sismiques V_p comme proxy de la qualité (RQD) du calcaire du Portlandien situé au droit des galeries souterraines sur la commune de Savonnières-en-Perthois semble être une piste intéressante pour détecter des éventuels départs de remontée de fontis. Les résultats confirment que les profils 4, 6 et 8 présentent une qualité de roche dégradée localement qui pourraient indiquer la présence d'un recouvrement en partie déstructuré.

La chute des valeurs de V_p dans le calcaire du Portlandien, peut donc être corrélée au 1^{er} ordre à une chute de la qualité de la roche, et ainsi constituer un indicateur sur la probabilité de départ des fontis.

Le modèle proposé comprend quelques limites :

- une chute de la vitesse sismique V_p peut avoir d'autres origines que la présence d'un fontis (karst, altération, variation lithologique...) ;
- les résultats obtenus ne tiennent pas compte des éventuels pendages lithologiques (la valeur est prise sur une moyenne des 3 m d'épaisseur au-dessus de la zone exploitée) ;
- les résultats obtenus restent ponctuels (le long des profils sismiques) et ne peuvent être extrapolés à l'ensemble de la commune.

² Ce secteur n'a pas fait l'objet de relevé laser lors de l'étude de 2016. Il était situé en dehors du périmètre d'étude.



Illustration 47 - Prédiction de la qualité de la roche du calcaire du Portlandien en terme de RQD prédits à partir des mesures de vitesse Vp, suivant le modèle de régression linéaire présenté sur l'illustration 46

5. Conclusion et recommandations

5.1. CONCLUSION

Une campagne d'acquisition par imagerie sismique comprenant sept profils a été menée sur la commune de Savonnières-en-Perthois, dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagée entre la DDT55 et le BRGM.

Les objectifs de la présente étude sont :

- de proposer une méthodologie de caractérisation de la nature et de la qualité géotechnique des terrains situés au droit de zones de fontis en formation ;
- d'extrapoler les résultats ainsi obtenus aux terrains de couverture situés hors des zones de fontis, afin d'établir un modèle prédictif (qualitatif) d'évolution.

Une analyse des coupes de vitesses sismiques V_p et V_s par calibration aux logs géologiques des forages a été développée. Cette calibration a été réalisée sur les profils sismiques acquis dans les zones 1 à 5, zones pour lesquelles des sondages carottés étaient disponibles. Elle a permis d'établir une relation reliant les différents niveaux sismiques à des lithologies de la pile sédimentaire de Savonnières-en-Perthois :

- une couche superficielle à faibles vitesses ($V_p < 1300$ m/s et $V_s < 300$ m/s), hétérogène le long des profils interprétée comme étant la couche limoneuse du Quaternaire et un niveau d'altération de l'Hauterivien ;
- une seconde couche à vitesses modérées (1300 m/s $< V_p < 1900$ m/s et 300 m/s $< V_s < 450$ m/s), qui est associée aux calcaires altérés de l'Hauterivien, constitués d'alternance de passages mous et des passages plus compétents ;
- une couche à vitesses élevées (1900 m/s $< V_p < 2100$ m/s et 450 m/s $< V_s < 600$ m/s), attribuée à aux formations du Valanginien, constituées de sable fin et de grès ferrugineux mélangés avec du sable grossier ;
- une couche à vitesses très élevées ($V_p > 2100$ m/s et $V_s > 600$ m/s), associée à aux calcaires plus compétents du Portlandien inférieur ou Bononien, extraits dans les carrières de Savonnières-en-Perthois.

Cette correspondance vitesses sismiques - lithologies a ensuite été appliquée aux résultats obtenus dans les zones 6 et 8. Dans ces deux zones, les objectifs étaient :

- de caractériser l'agencement des formations géologiques en l'absence de log de forage ;
- d'identifier les signatures « litho-sismiques » des fontis connus dans ces secteurs.

Le Profil 6 a été réalisé à l'aplomb du fontis du Pâquis. La signature « litho-sismique » de ce profil est caractérisée par des vitesses V_p et V_s très faibles interprétées comme une chute des propriétés mécaniques des roches, **compatible avec une déstructuration des terrains de recouvrement.**

Le Profil 8 a été réalisé à l'aplomb du secteur des V2 (fontis F4, F5, F6). La signature « litho-sismique » de ce profil est caractérisée par une zone de faible vitesse V_p au niveau des fontis indiquant une chute localisée des propriétés mécaniques dans la roche calcaire du Portlandien, compatible avec une zone de fontis en cours d'évolution. Les vitesses V_s sur ce profil ne sont pas interprétables à cause d'une trop grande complexité dans la propagation des ondes de surface. Cette complexité peut cependant traduire la présence de désordres souterrains en lien avec la présence des fontis.

Le Profil 4 présente localement une zone de faible vitesse V_p , très proche de celle observée sur le Profil 8, et qui pourrait donc être associée à la présence d'une zone de fontis. Il faut noter que cette chute de V_p est dans ce cas aussi accompagnée par une chute des V_s .

Les autres profils (1,2,3,5) ne présentent aucun signe qui pourrait être interprété comme la présence d'une remontée de fontis.

Ce projet de recherche a également permis d'établir :

- une corrélation entre les vitesses sismiques et la qualité géotechnique (exprimée en RQD) pour le calcaire du Portlandien constituant le toit des exploitations souterraines. Cette corrélation a abouti à l'élaboration d'un modèle prédictif au 1^{er} ordre permettant de relier les variations de vitesse sismique aux propriétés géotechniques des roches du toit des exploitations, permettant ainsi d'estimer une probabilité de départ d'un fontis.
- les zones de fontis connues (Profils 6 et 8) se traduisent par des vitesses sismiques plus faibles que celles mesurées en dehors des zones de fontis, reflétant une déstructuration totale (Profil 6) ou partielle (Profil 8) du recouvrement.

L'imagerie sismique peut donc être utilisée :

- pour prédire (qualitativement) la probabilité d'occurrence d'un fontis en surface, fonction en partie de la déstructuration du recouvrement ;
- pour suivre l'apparition et l'évolution de fontis dans le cas de mesures répétées dans le temps.

5.2. RECOMMANDATIONS

Afin de suivre l'évolution des fontis, nous proposons un monitoring sismique à **intervalles réguliers** (5 ans) pour identifier des modifications de vitesse sismique au sein des terrains de recouvrement. **Une phase d'acquisition sismique peut être envisagée en cas d'accélération des dégradations au fond ou en surface (fontis) ou dans 5 ans au plus si aucune dégradation n'a été observée³.**

³ Les fontis situés sur les profils 6 et 8 font l'objet d'une surveillance annuelle par observation des blocs tombés depuis le fond.

A la suite de chacune des phases d'acquisition, les données seront analysées par cross-corrélation de manière à caractériser l'évolution des vitesses et des amplitudes des ondes sismiques au cours du temps, par rapport à l'état de référence (cette étude). **Les variations de vitesse sismique au cours du temps permettront de suivre la formation des fontis et l'évolution des fontis. Dans le cas où celle-ci augmente, des investigations complémentaires ou des mesures de remédiation pourraient être envisagées.**

Au niveau du profil 4 où des faibles vitesses sismiques ont été observées, il est recommandé de procéder à des investigations complémentaires pour vérifier un éventuel impact de l'effondrement des Auvions sur les terrains encaissants, en réalisant un profil sismique complémentaire au droit de cet effondrement et/ou réalisation d'un modèle numérique de terrain en surface au LIDAR pour déterminer l'influence de la cuvette en surface.

Une inspection au fond est recommandée dans les secteurs des profils 1 et 6 présentant une probabilité de propagation forte.

6. Bibliographie

Magnin O., Bertrand Y. (2005) – les cahiers de l'Agap n°2 – guide sismique réfraction. 96p.

Bitri, A., Le Bégat S. and Baltassat J.M. (1998) - Shear wave velocity determination of soils from in-situ Rayleigh waves measurements. Procc. 4th Meeting EEGS, Barcelona, Spain, 503-506.

Debeglia N., Bitri A., Thierry P. (2006) - Karst investigations using microgravity and MASW. Application to Orléans, France. Near Surface Geophysics p215-225

Hannion Y., Le Goff J., et Cartannaz C. (2017) – Cartographie des aléas mouvements de terrain liés à une carrière souterraine sur une partie de la commune de Savonnières-en-Perthois (55). BRGM/RP-66703-FR

Hermann, R.B. (1987) - Computer programs in seismology. Saint-Louis University, USA.

Stockwell J. , and Cohen J. (1989) - Seismic-Unix. Colorado Schools of Mines

Annexe 1 :

Terminologie

Ondes Vp et ondes Vs (cahier de l'Agap 2 – guide sismique réfraction)

La théorie de l'élasticité montre que sous l'effet d'une contrainte (ébranlement) les solides élastiques homogènes et isotropes subissent une déformation correspondant alors à deux types principaux d'ondes pouvant se déplacer soit longitudinalement (ondes de compression ou ondes P, vitesse Vp), soit transversalement (ondes de cisaillement ou ondes S, vitesse Vs). L'illustration ci-dessous montre les déformations d'une lame d'un milieu soumis à ces deux types d'ébranlements.

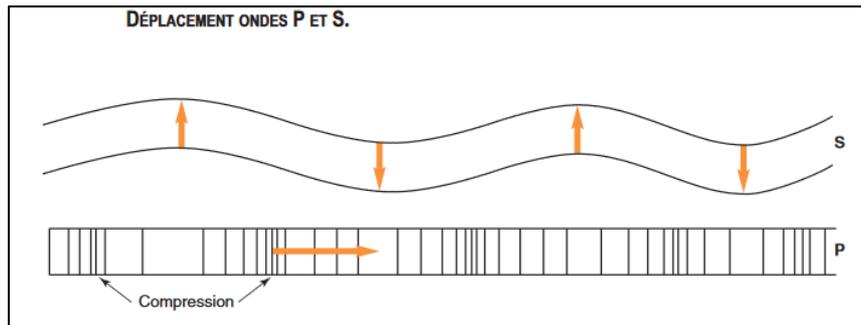


Illustration 48 – Déplacement ondes P et S

RQD- Rock Quality Designation

Le RQD (*Rock Quality Designation*), donné par la formule suivante, exprime la densité de fracturation :

$$\frac{\text{somme des longueurs} > \min(10 \text{ cm ou } 2 \times \text{diamètre de la carotte})}{\text{longueur totale de la carotte}}$$

Annexe 2 :

Données des sondages

Dans les données suivantes, le RQD est issu des données de 2011 et les différenciations lithologiques de 2016

Photographies du sondage SAVC

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage
Caisse 1	0		1	9 4	Quaternaire
	1			8 8	
Caisse 2	2		3	7 4	
	3			5 8	
Caisse 3	4	photographie de la caisse 3 manquante	5	8 0	
	5			6 4 3	
Caisse 4	6		7	5 9	
	7			8 9 4	
Caisse 5	8		9	9 7	
	9			1 0 9 9	
Caisse 6	1 0		1 1	9 5	Vaingnien
	1 1			2 2 9	

Caisse 7	12		13	70	Valanginien		
	13		14.2	54			
Caisse 8	14.2		15.2	79		Valanginien	
	15.2		16.2	73			
Caisse 9	16.2		17.1	69			Portlandien
	17.1		18.1	89			
Caisse 10	18.1		19.1	99	Portlandien		
	19.1		20.1	90			
Caisse 11	20.1		21.1	83	Calcaire		
	21.1		22.1	100			

Photographies du sondage SAVE

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage	
Caisse 1	0		1	100	Quaternaire	
	1		2	100 96		
Caisse 2	2		3	52		
	3		4	85 69		
Caisse 3	4		5	57		Hauterivien
	5		6	37		
Caisse 4	6		7	80		
	7		8	92		
Caisse 5	8		9	82		
	9		9.5	96		
Caisse 6	9.5		10.5	95		
	10.5		11.5			

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage
Caisse 7	11.5		12.5	7.0	Valanginien
	12.5		13.5	8.5	
Caisse 8	13.5		14.5	8.1	Portlandien
	14.5		15.5	8.3	
Caisse 9	15.5		16.5	4.0	
	16.5		17.5	9.2	
Caisse 10	17.5		18.5	7.9	
	18.5		19.5	9.0	
Caisse 11	19.5		20.5	2.7	
	20.5		21	5.6	

Photographies du sondage SAVN

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage	
Caisse 1	0		1	60	Quaternaire	
	1			66		
Caisse 2	2			3		100
	3					100
Caisse 3	4		6	0	Hauterivien	
	6			100		
Caisse 4	7			8		90
	8					44
Caisse 5	9		10	100		
	10			82		
Caisse 6	11		12	82	Hauterivien	
	12			100		
Caisse 6	11			13		100
	12					81

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage
Caisse 7	1 3		1 4	8 1	Hauterivié Valanginien Portlandien
	1 4		1 5	8 1	
Caisse 8	1 5		1 6	8 5	
	1 6		1 7	8 9	
Caisse 9	1 7		1 8	8 9	
	1 8		1 9	8 8	
Caisse 10	1 9		2 0	6 6	
	2 0		2 1	6 7	
Caisse 11	2 1		2 2	7 1	
	2 2		2 3	7 9	
Caisse 12	2 3		2 4	7 9	
	2 4		2 5	7 9	

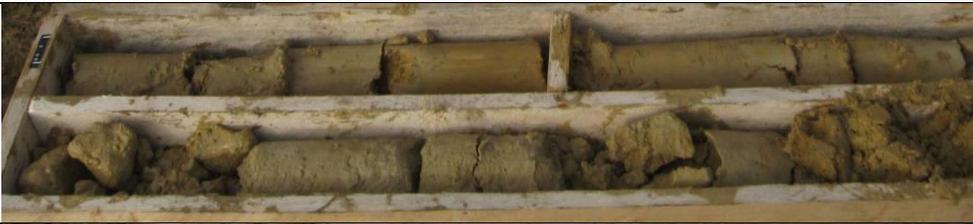
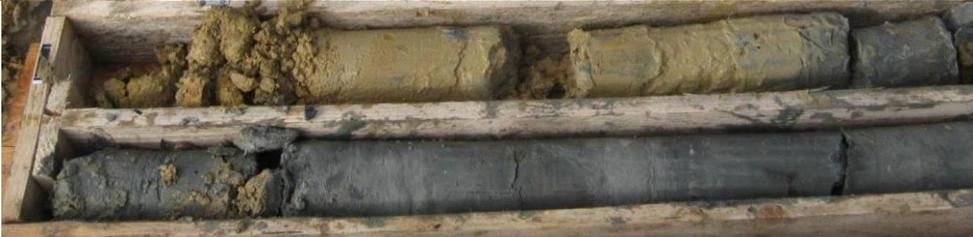
Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage
Caisse 13	25		26	100	Portlandien
	26		27	100 87	
Caisse 14	27		28	87	
	28		29	88	
Caisse 15	29		30	88	
	30		31	95	
Caisse 16	31		32	100	Calcaire de Savonnières
	32		32.7	100	

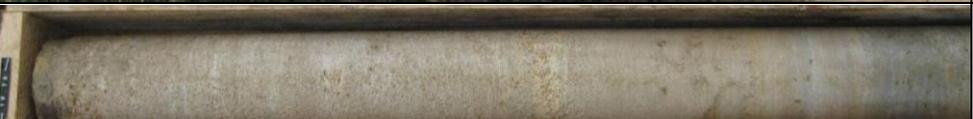
Photographies du sondage SAVS

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage	
Caisse 1	0		1	32	Quaternaire	
	1			40		
Caisse 2	2		2	22		
	3			32		
Caisse 3	4		3	100	Hauterivien	
	5			77		
Caisse 4	6		4	77		
	7			97		
Caisse 5	8		5	77		
	9			97		
Caisse 6	10		6	100		Valanginien
	11			100		
Caisse 7	12		7	71		
	13			71		
Caisse 8	14		8	84		
	15			84		
Caisse 9	16		9	84	Valanginien	
	17			81		

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage
Caisse 7	12		13	81	Portlandien
	13			79	
Caisse 8	14		15	79	
	15			91	
Caisse 9	16		16	91	
	17			76	
Caisse 10	18		17	76	
	19			69	
Caisse 11	20		18	69	
	21			94	
Caisse 12	22		19	94	Calcaire de Savonnières
				87	
			20	94	
			21	87	
			22	87	
			23	100	

Photographies du sondage SAVW

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD	Etage	
Caisse 1	0		1	70	Quaternaire	
	1			100		
Caisse 2	2		2	70		
	3			98		
Caisse 3	4		3	96		Hauterivien
	5			92		
Caisse 4	6		4	29		
	7			62		
Caisse 5	8		5	62	Valanginien	
	9			96		
Caisse 6	10		6	62		
	11			100		
Caisse 7	12		7	46		
	13			77		
Caisse 8	14		8	63		
	15			71		

Caisse	Pmin	Photographies	Pmax	RQD		
Caisse 7	12		13	85	Portlandien	
	13		14	96		
Caisse 8	14		15	63		
	15		16	43 70		
Caisse 9	16		17	70 86		
	17		18	86 96		
Caisse 10	18		19	96 100		
	19		19.6	100		
Caisse 11	19.6		20.6	92		Calcaire de Savonnières
	20.6		21.6	94		
Caisse 12	21.6		22.7	96		



Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr