

Document public



# Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface

Rapport final

BRGM/RP-58853-FR

Juin 2010



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**





# Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface

Rapport final

**BRGM/RP-58853-FR**  
Juin 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2009 (09RISG07)

**A. Roullé, S. Auclair, T. Dewez, A. Hohmann, A. Lemoine, J. Rey**

**Vérificateur :**  
Nom : J. DOUGLAS  
Date : 1/12/2010  
Signature :

**Approbateur :**  
Nom : H. MODARESSI  
Date : 3/12/2010  
Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots clés :** Vs30 , effets de site, Eurocode 8, Wald, Allen, Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain, classe de sol, France, Lourdes, Mulhouse, Haut-Rhin, Bouches-du-Rhône

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

**Roullé A., Auclair S., Dewez T., Hohmann A., Lemoine A., Rey J.** (2010) - Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface. Rapport final. BRGM/RP-58853-FR, 66 p., 29 fig., 11 tabl.

## Synthèse

Cette étude a été réalisée à la demande du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) dans le cadre du Plan Séisme 2005-2010 (action II.5 de la convention MEEDDM/DGPR-BRGM n°0005731 du 18 mai 2009 et avenant du 7 avril 2010). A ce titre elle a été réalisée dans le cadre des activités de Service public du BRGM (fiche 09RISG07).

L'objectif de cette étude est de tester une méthodologie de cartographie automatique simplifiée des classes de sol d'après une adaptation au contexte français (métropole) des travaux de Wald et Allen (2007) réalisés aux États-Unis.

Pour cela, une base de données de mesures directes ou indirectes de vitesses moyennes des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de sol a été constituée pour le territoire métropolitain. Ces données ont ensuite été utilisées pour tenter d'établir des corrélations entre un paramètre morphométrique (pente, openness) et les classes de sol qui seront bientôt réglementaires en France (classes de sols issues des Eurocode 8).

Dans un deuxième temps des routines ont été développées afin de réaliser de façon automatique une cartographie des classes de sol selon la vitesse moyenne estimée pour les 30 premiers mètres de sol ( $V_{s,30}$ ).

Enfin des tests ont été réalisés sur 4 zones pilotes (2 communes : Mulhouse et Lourdes et deux départements : Haut-Rhin et Bouches-du-Rhône) afin de vérifier la pertinence des résultats obtenus à l'aide de l'outil développé.

Il s'est révélé impossible de corréliser les données françaises de  $V_{s,30}$  (métropole) avec les deux paramètres morphométriques testés : pente et openness. Ainsi, les corrélations établies par Wald et Allen ont été utilisées pour établir les routines de calcul, pour différents Modèles Numériques de Surface (MNS) : ASTER-GDEM, SRTM-3, SRTM-30plus.

Les résultats obtenus pour les 4 zones pilotes en utilisant les corrélations établies par Wald et Allen pour un contexte de sismicité « actif », sont assez variables selon le MNS choisi : pour la même zone les résultats peuvent être plus ou moins convainquants selon le MNS utilisé.

La méthodologie proposée par Wald et Allen et programmée dans le cadre de cette étude peut cependant permettre de classer correctement les sols (selon les classes proposées par les EC8) pour certaines zones et pour peu qu'on choisisse le MNS le plus adapté.

Tous les phénomènes physiques en jeu ne sont cependant pas totalement connus et cette méthodologie ressemble encore assez à une « boîte noire » qu'il convient de manier avec précaution. Ce type de méthode donne ainsi des informations de « niveau

0 ». La méthodologie est adaptée pour des études globales à une grande échelle et/ou pour des zones pour lesquelles on ne dispose d'aucune donnée mais pour des études fines et/ou locales il est cependant préférable de réaliser des investigations détaillées pour établir un zonage des classes de sol plutôt que d'utiliser ce type de méthodologie.

Cette méthodologie étant prometteuse et également de plus en plus utilisée dans le monde de la sismologie appliquée, différentes possibilités d'approfondissement sont proposées : nécessité de compiler plus de données de  $V_{s,30}$  et uniformiser le processus de calcul de ce  $V_{s,30}$  pour améliorer les corrélations, prendre en compte les contextes sismotectoniques dans ces corrélations et adapter les seuils de pente en conséquence, adaptation des seuils de pente en fonction du MNS utilisé, définition d'autres paramètres ou des combinaisons de paramètres morphométriques.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Présentation de la méthode de Wald et Allen</b> .....	<b>15</b>
2.1. DEFINITION DES CLASSES DE SOL .....	15
2.1.1. Définition des classes de sol selon les EC8 .....	15
2.1.2. Définitions des classes de sol utilisées par Wald et Allen (NEHRP) .....	17
2.1.3. Correspondance entre les différentes classes de sol.....	17
2.2. PRESENTATION DE LA METHODE DE WALD ET ALLEN (2007).....	18
2.3. RESULTATS OBTENUS .....	19
<b>3. Construction d'une corrélation paramètre morphométrique-classe de sol en France métropolitaine</b> .....	<b>21</b>
3.1. CHOIX DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN OU DE SURFACE.....	21
3.2. CHOIX DU PARAMETRE MORPHOMETRIQUE DE REFERENCE.....	28
3.2.1. Pente .....	28
3.2.2. Openness .....	29
3.3. CORRELATION MORPHOMETRIE-Vs,30 .....	30
3.3.1. Données de base .....	30
3.3.2. Données directes.....	31
3.3.3. Données indirectes .....	32
3.3.4. Limites dans le traitement des données .....	35
3.4. ANALYSE DES DONNEES .....	37
3.4.1. Données de Vs,30 .....	37
3.4.2. Distribution des pentes .....	38
3.4.3. Corrélation pente-Vs,30.....	40
3.4.4. Distribution openness-Vs,30.....	43
3.4.5. Conclusion.....	44
<b>4. Développement des routines</b> .....	<b>45</b>
4.1. DESCRIPTION DES DONNEES DE BASE NECESSAIRES A L'OUTIL .....	45
4.1.1. Prétraitements réalisés sur les MNS .....	45
4.1.2. Format de la base de données Vs,30.....	45

4.2. ROUTINES D'EXPLOITATION DES DONNEES VS 30 AVEC DES DONNEES MORPHOMETRIQUES .....	46
4.3. LIMITES DANS LE TRAITEMENT DES DONNEES .....	50
4.3.1. Calcul des paramètres morphométriques .....	50
4.3.2. Exploitation de la base de données .....	50
<b>5. Validation et application de la méthode en France métropolitaine .....</b>	<b>51</b>
5.1. LES ZONES PILOTES PROPOSEES .....	51
5.2. METHODOLOGIE DE LA VALIDATION .....	52
5.3. RESULTATS .....	53
5.4. SYNTHESE DE CES VALIDATIONS .....	58
<b>6. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>61</b>
6.1. CONCLUSIONS .....	61
6.2. PERSPECTIVES.....	62
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>65</b>



## Liste des figures

Figure 1 - Exemple de modèles numériques d'altitude (MNA) du même site en vue oblique ombrée. On distingue les modèles numériques de surface (MNS) et les modèles numériques de terrain (MNT). Les petits points noirs sur le MNS mettent en exergue le relief causé par les arbres.....	21
Figure 2 - Extrait du MNS ASTER-GDEM (au pas de 30m) sur la zone du Lac d'Annecy.....	23
Figure 3 - Extrait du MNT BD Alti IGN (au pas de 50m) sur la zone du Lac d'Annecy. ....	23
Figure 4 - Extrait du MNS SRTM-3 (au pas de 90m) sur la zone du Lac d'Annecy. ....	24
Figure 5 - Extrait du MNS SRTM-30Plus (au pas de 1km) sur la zone du Lac d'Annecy. ....	24
Figure 6 - Profil topographique le long d'une pente régulière de 10% (ligne noire) sur un MNA dont les altitudes sont codées en nombres réels.....	25
Figure 7 - Profil topographique le long d'une pente à 10% mais sur un MNA dont les altitudes sont codées en nombres entiers plutôt qu'en nombres réels.....	26
Figure 8 - Schéma de calcul de pente. La pente calculée est la norme des gradients d'altitude le long des lignes et des colonnes. Dans le cas de MNA où les altitudes sont codées au plus proche entier, la plus petite pente détectable correspond au cas où un seul pixel est un mètre plus haut que ses voisins. Cette pente limite dépend directement de la taille du pixel (tpix) du MNA.....	27
Figure 9 - Comparaisons des pentes obtenues pour un échantillon de points à partir des 3 MNS utilisés dans le cadre de cette étude (SRTM-3 vs ASTER-GDEM à gauche, SRTM-30plus vs ASTER-GDEM au centre et SRTM-30plus vs SRTM-3 à droite).....	28
Figure 10 - Schéma de calcul de l'openness positive et négative. Dans un rayon de recherche défini, l'openness positive est la moyenne des gradients maxima rencontrés dans les huit directions principales. L'openness négative est la moyenne des gradients minima rencontrés dans les huit directions principales. ....	30
Figure 11 - Notion de Zmax pour les points issus des études LGV .....	33
Figure 12 - Représentation du relief le long du tracé des lignes à grande vitesse « Rhin-Rhône » (A) et « Est » (B).....	34
Figure 13 - Répartition des vitesses de Vs,30 collectées. La densité de probabilité (en haut) montre que les vitesses les plus fréquentes ont une valeur de 400 m/s et de 800 m/s. La courbe cumulée reporte la médiane (point bleu foncé) vers 400m/s, l'écart interquartile (ligne bleue foncée) et l'écart interquartile (5% et 95%, ligne bleue claire). 90% des vitesses sont comprises entre 200 et 800 m/s. Les lettres ABCD indiquent les classes de sol EC8 avec leur limites (barres verticales grises).....	38
Figure 14 - Répartition des pentes observées au droit des points de mesure Vs,30 sur trois MNS différents : SRTM-30 en bleu, SRTM-3 en vert et ASTER-GDEM en orange. Haut : densité de probabilité représentant une généralisation des histogrammes respectifs. Bas : Boîtes à moustaches représentant l'écart inter-quantiles (pointillés), l'écart inter-quartiles (en couleur) et la médiane (barre verticale noire). On voit clairement que les distributions se décalent progressivement vers des pentes plus raides à cause du changement de résolution du MNS. ....	39

Figure 15 - Corrélation proposées par Wald et Allen 2007 en contexte tectonique actif (gauche) et passif (droite).....	40
Figure 16 - Distribution des Vs 30 en fonction de la pente. La distribution pente-Vs,30 a également été représentée sans les Vs,30 modélisées pour les tracés des lignes grande vitesse (panneau droit) au cas où celles-ci auraient biaisé l'interprétation. Il n'y a aucune corrélation. Pour une même valeur de pente toute la gamme de Vs,30 a été observée.....	41
Figure 17 - Distribution des Vs,30 en fonction des pentes sur les trois MNS SRTM-30, SRTM3 et ASTER-GDEM. Le codage coloré indique la classe de sol à laquelle la mesure de Vs est rattachée. Les médianes de pente et Vs pour chaque classe (points noirs) montrent que même en résumant la distribution par une statistique synthétique, aucune corrélation n'apparaît. La corrélation est même inversée dans le cas de SRTM-30.....	42
Figure 18 - Distribution cumulées des pentes des points respectivement situés sur des sols de classe A (vert foncé), classe B (vert clair), classe C (orange) et classe D (rouge) .....	43
Figure 19 - Vs,30 en fonction de de l'openness positive et négative calculées sur SRTM-30. Aucune corrélation ne sort de cette relation. ....	44
Figure 20 - Procédure d'enchaînement des géotraitements dans le logiciel SIG .....	46
Figure 21 - Extrait de la base de données des Vs,30 au format Excel .....	47
Figure 22 - Visualisation sous forme cartographique et graphique des points de mesures Vs,30 après leur importation dans le SIG. Sur cette carte a été réalisée une analyse thématique sur la proportion des types de mesures disponibles dans la Base de données. ....	48
Figure 23 - Une des interfaces de l'outil permettant le renseignement de 3 attributs pentes (SRTM 30, SRTM 3, ASTER GDEM) de la couche de points Vs,30.....	49
Figure 24 - Haut-Rhin : Carte des pentes calculées sur SRTM-3.....	54
Figure 25 - Haut-Rhin : Carte de référence des sols EC8 (Roullé et al., 2007).....	55
Figure 26 - Haut-Rhin : Classification automatique des sols EC8 sur SRTM-3 par la méthode de Allen et Wald (2009). ....	55
Figure 27 - Haut-Rhin : Erreurs de classification des sols EC8 induite par l'application de la méthode automatique d'Allen et Wald (2009). ....	56
Figure 28 - Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparées par région. Une courbe centrée sur 0 indique que la majorité des pixels sont correctement classés. Une valeur négative indique une prédiction de Vs,30 plus lente que la réalité, ce qui est pénalisant. Une valeur positive indique une prédiction de Vs,30 plus rapide que la réalité, ce qui est dangereux pour la construction. ....	58
Figure 29 - Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparée par type de MNS. Une courbe centrée sur 0 indique que la majorité des pixels sont correctement classés. Une valeur négative indique une prédiction de Vs,30 plus lente que la réalité, ce qui est pénalisant. Une valeur positive indique une prédiction de Vs,30 plus rapide que la réalité, ce qui est dangereux pour la construction. ....	58

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractérisation des classes de sol selon les EC8.....	16
Tableau 2 - Classes de sol utilisées par Wald et Allen (classes de sol NEHRP).....	17
Tableau 3 - Correspondance proposée entre les classes de sol utilisées par Wald et Allen (NEHRP) et les classes utilisées dans la présente étude (EC8).....	18
Tableau 4 - Corrélations pente-Vs,30 définies par Wald et Allen (2007) pour les données SRTM30. ....	19
Tableau 5 - Synthèse des modèles numériques d'altitude disponibles.....	22
Tableau 6 - Présentation des prétraitements opérés sur les MNS.....	45
Tableau 7 - Seuils de pentes appliqués pour reclasser automatiquement les pentes en classes EC8. Ces seuils sont tirés littéralement du tableau I de Allen et Wald (2009). ....	53
Tableau 8 - Synthèse des zones validées et des MNS utilisés pour la classification automatique. Au total 8 configurations ont été testées.....	53
Tableau 9 - Synthèse des comparaisons de classification EC8. Les chiffres expriment le pourcentage de pixels pour chaque classe d'erreur. Une erreur de 0 indique que la classe EC8 prédite est conforme à la réalité. Une classe d'erreur négative (bleue) traduit une vitesse moyenne prédite plus faible que la réalité. Une erreur positive (rouge) traduit une vitesse moyenne prédite plus importante qu'en réalité. Les valeurs maximales sont indiquées en gras.....	57
Tableau 10 - Synthèse des erreurs de classification EC8 en pourcentages cumulés. Les cellules représentent le pourcentage de pixels en fonction des erreurs de classe. Pour Lourdes sur ASTER-GDEM par exemple, 66% des pixels sont classés correctement (0 erreur), 95% des pixels sont contenus dans l'intervalle de +/-1 classe d'erreur et 100% à 2 classes d'erreur. Le plus mauvais classement automatique est celui de Lourdes sur SRTM-3 et le meilleur est celui de Lourdes sur ASTER-GDEM. ....	57
Tableau 11 - Synthèse des zones validées et des MNS utilisés pour la classification automatique. Au total 8 configurations ont été testées.....	59



# 1. Introduction

Les paramètres les plus utilisés pour caractériser les sols sont la nature et l'épaisseur des couches meubles ainsi que la vitesse des ondes S dans ces couches. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de pouvoir cartographier et caractériser les couches meubles responsables des amplifications locales (effets de site) du mouvement sismique afin de classer simplement les sols à l'échelle régionale. Ces informations pourraient servir notamment aux communes exposées à un aléa sismique faible à modéré, donc a priori non concernées par un microzonage à une échelle fine mais nécessitant néanmoins une prise en compte de la réglementation parasismique. Elles pourraient également être utilisées dans le cadre de scénarios sismiques régionaux ou toute autre étude nécessitant une cartographie simplifiée des effets de site. Ce type d'étude est d'ailleurs en développement rapide à l'échelle européenne par exemple. D'un point de vue réglementaire, les futures règles parasismiques attendues en 2010 en France seront basées sur les classes de sol définies dans les règles européennes Eurocode 8 (EC8). Ces classes de sol sont basées à la fois sur le profil stratigraphique et sur d'autres paramètres physiques tel que le paramètre appelé  $V_{s,30}$  : vitesse moyenne des ondes S dans les 30 premiers mètres<sup>1</sup>.

L'objectif de cette étude est de tester une méthodologie de cartographie simplifiée des effets de site basée sur l'utilisation des  $V_{s,30}$  d'après une adaptation au contexte français (métropole) des travaux de Wald et Allen (2007) réalisés aux Etats-Unis. Ces deux auteurs ont montré que, à l'échelle régionale ou nationale, il existait une bonne corrélation entre la pente d'un Modèle Numérique de Surface (SRTM30) et la vitesse des ondes de cisaillement S des couches superficielles. Ils ont ainsi pu cartographier le paramètre  $V_{s,30}$  à l'échelle régionale à la fois dans des zones tectoniquement actives (avec des reliefs importants) et des zones plus stables (avec des reliefs plus doux) simplement à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou de Surface (MNS).

Le but de la présente étude est de tester la méthode développée par Wald et Allen en France métropolitaine afin d'aboutir éventuellement à une méthodologie simplifiée de cartographie automatique des  $V_{s,30}$  applicable au territoire français. Les quatre principales étapes du travail réalisé ont été :

- 1) la constitution d'une base de données des  $V_{s,30}$  sur le territoire métropolitain ;
- 2) tester la possibilité de définir des corrélations entre  $V_{s,30}$  et pente ou autre paramètre morphométrique en France métropolitaine ;
- 3) développer des routines pour automatiser la cartographie des classes de sols ;
- 4) valider cette procédure sur des zones pilotes situées en France métropolitaine.

---

<sup>1</sup> Cette vitesse moyenne des ondes de cisaillement  $V_{s,30}$  est définie tel que : 
$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

Ces 4 étapes de travail sont présentées dans le présent rapport après une description de la méthode développée par Wald et Allen ainsi que des rappels sur les modèles numériques d'altitudes (MNA) et les paramètres morphométriques.

## **2. Présentation de la méthode de Wald et Allen**

### **2.1. DEFINITION DES CLASSES DE SOL**

La méthode développée par Wald et Allen en 2007 propose de caractériser des classes de sol à l'aide d'un paramètre morphométrique : la pente. Avant de présenter la méthode en elle-même, il convient de préciser comment peuvent être définies ces classes de sol.

#### **2.1.1. Définition des classes de sol selon les EC8**

La réglementation européenne prévoit la prise en compte des effets de site de manière forfaitaire en caractérisant la réponse du site en fonction de la catégorie de sol selon la classification établie dans les EC8 (NF-En-1998-1, 2005).

Dans la classification des sols par les EC8, le paramètre principal permettant de classer les sols est basé sur la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres. Ce paramètre est classiquement appelé « Vs,30 ». Le Tableau 1 résume cette classification.

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (bl/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	> 800	–	–
B	Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité des sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de $V_s$ de classes C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s			
S <sub>1</sub>	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ( $PI > 40$ ) et une teneur en eau importante.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
S <sub>2</sub>	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S <sub>1</sub>			

Tableau 1 - Caractérisation des classes de sol selon les EC8

$V_{s,30}$  est la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, elle est calculée selon l'expression suivante :

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

où  $h_i$  et  $V_i$  représentent l'épaisseur et la vitesse des ondes S de la formation ou couche  $i$ , sur un total de  $N$ , existant dans les 30 premiers mètres. Le site est classé suivant la valeur de  $V_{s,30}$  si celle ci est disponible, sinon, la valeur de  $N_{SPT}$  sera utilisée.

$N_{SPT}$  est le nombre de coups au pénétromètre dynamique SPT (Standard Penetration Test) ;

$C_u$  est la cohésion non drainée.



La présente étude étant réalisée pour la France métropolitaines, les classes de sol de la future réglementation en vigueur doivent être utilisées pour que la méthodologie puisse être appliquée directement dans le futur. Ainsi ces classes de sol EC8 seront considérées comme référence pour toute la suite de cette étude.

### 2.1.2. Définitions des classes de sol utilisées par Wald et Allen (NEHRP)

Dans leurs différents travaux, appliqués principalement aux Etats-Unis, Wald et Allen ont utilisé les classes de sol réglementaires américaines. Les classes de sol réglementaires aux Etats-Unis ont été proposées par le Building Seismic Safety Council (BSSC) en 1997 et sont basées sur des propositions du National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP).

Le tableau ci-dessous récapitule les classes de sol préconisées par le NEHRP (BSSC, 1997).

Site class	Time-averaged SH-wave velocity to 30 m ( $V_s$ ) (m/s)
A — hard rock	$V_s > 1.500$
B — rock	$760 < V_s \leq 1.500$
C — dense soil	$360 < V_s \leq 760$
D — stiff soil	$180 < V_s \leq 360$
E — soft soil	$V_s \leq 180$
F — requires site specific evaluation	

Tableau 2 - Classes de sol utilisées par Wald et Allen (classes de sol NEHRP)

### 2.1.3. Correspondance entre les différentes classes de sol

Les classes de sol définies par le NEHRP et les EC8 sont basées sur les mêmes paramètres physiques, et en particulier la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de sol ( $V_{s,30}$ ). Les différents types de sol considérés sont proches et les fourchettes de  $V_{s,30}$  utilisées pour définir ces différents types de sol sont également proches, ce qui n'est pas étonnant car la méthode de classification des EC8 est directement inspirée des propositions américaines, comme de nombreuses autres normes de constructions parasismique dans le monde.

Cependant on peut noter qu'il existe quelques petites différences entre les classes de sol : le rocher est différencié par le NEHRP entre « hard rock » et « rock » alors que les EC8 n'identifient qu'une seule classe de sol « rocheux » : classe A. Ensuite la limite entre un sol de type rocher et un sol de type « sol compacté » est fixée pour un  $V_{s,30}$  de 760 m/s par le NEHRP mais 800 m/s pour les EC8. Les autres limites ( $V_{s,30}=360$  m/s limite entre un sol « compacté » et un sol « mou » et  $V_{s,30}=180$  m/s limite entre un sol « mou » et un sol « très mou ») sont identiques. Des classes de sol spécifiques (E, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> pour les EC8 et F pour les NEHRP) sont également définies. Cependant comme ces classes de sol ne sont pas directement et exclusivement basées sur une définition utilisant le  $V_{s,30}$  ces classes de sol **ne seront pas considérées dans toute la suite de la présente étude.**

Une correspondance entre les classes NEHRP et EC8 est ainsi proposée dans le Tableau 3 ci-dessous.

Vs,30 (m/s)	Classe NEHRP	Classe EC8
> 1500	A	A
760-1500	B	A
360-760	C	B
180-360	D	C
< 180	E	D
	F	S1, S2
		E

} non utilisées

Tableau 3 - Correspondance proposée entre les classes de sol utilisées par Wald et Allen (NEHRP) et les classes utilisées dans la présente étude (EC8)

## 2.2. PRESENTATION DE LA METHODE DE WALD ET ALLEN (2007)

Afin d'estimer les effets de site lithologiques à l'échelle régionale dans les zones qui disposent de peu d'informations géologiques, notamment pour l'établissement en temps réel de cartes prédictives de mouvements du sol ou de cartes de dommages suite à un séisme (ShakeMaps), l'USGS (Wald et Allen, 2007) a développé une méthode simple permettant de cartographier les Vs,30 à partir de modèles numériques de terrain ou d'élévation. La cartographie des Vs,30 permet ainsi de quantifier au premier ordre les effets de site lithologiques en se basant sur les classes de sol utilisées dans les règles parasismiques américaines (classification dite NEHRP, voir 2.1.2).

Ce travail est basé sur la définition de corrélation pente-Vs,30 établie à partir de données de profils de vitesse d'ondes S recueillies sur le territoire américain, à Taiwan, en Italie et en Australie. Deux corrélations ont été établies : l'une pour les zones dites « tectoniquement actives » (caractérisées par des reliefs plus raides) et l'autre pour les zones dites « tectoniquement stables » (caractérisées par des reliefs plus mous). Il est à noter que les deux corrélations ainsi définies ne sont valables que pour le type de Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou de Surface (MNS, voir 3.1) pour lequel elles ont été calculées, à savoir ici le MNS SRTM30. Autre point important : les corrélations n'ont pas été calculées à partir de relations statistiques (par exemple régressions linéaires) mais elles ont été définies à dire d'experts afin de tenir compte en particulier du manque de données pour certaines pentes (en particulier les pentes extrêmes) ou de la variabilité des données pour certaines classes de sol.

Classe de sol NEHRP	Valeurs de Vs,30 (m/s)	Valeurs de pente (m/m)	
		Zone tectoniquement active	Zone tectoniquement stable
E	< 180	< 1.0 E -4	< 2.0 E-5
D	180-240	1.0 E-4 – 2.2 E-3	2.0 E-5 – 2.0 E-3
	240-300	2.2 E-3 – 6.3 E-3	2.0 E-3 – 4.0 E-3
	300-360	6.3 E-3 – 0.018	4.0 E-3 – 7.2 E-3
C	360-490	0.018 – 0.050	7.2 E-3 – 0.013
	490-620	0.050 – 0.10	0.013 – 0.018
	620-760	0.10- 0.138	0.018 – 0.025
B	> 760	> 0.138	> 0.025

Tableau 4 - Corrélations pente-Vs,30 définies par Wald et Allen (2007) pour les données SRTM30.

Les étapes du travail à réaliser pour appliquer la méthode décrite par Wald et Allen (2007) sont les suivantes :

- Calcul de la pente à partir de la grille de travail (SRTM30 dans ce cas) ;
- Choix de la corrélation à appliquer (zone active ou zone stable) à partir de la pente moyenne sur la zone d'étude (le seuil entre les deux types de zone se situant à 0.05 m/m) ;
- Assignment du paramètre Vs,30 à chaque cellule de la grille de travail à partir de la corrélation pente-Vs,30 choisie ;
- Si besoin est, estimation du coefficient d'amplification empirique du mouvement du sol à partir des classes de sol réglementaires NEHRP.

### 2.3. RESULTATS OBTENUS

Wald et Allen ont appliqué cette méthode sur différents sites et comparé les résultats obtenus aux données géologiques et géotechniques disponibles sur ces sites. Les sites testés sont les suivants : pour les zones actives, Californie avec des zooms sur la Baie de San Francisco et la région de Los Angeles, Taiwan, et enfin Salt Lake City et l'Ouest des Etats-Unis (Rocheuses) ; pour les zones stables, Memphis (Tennessee) et l'est des Etats-Unis (à l'est des Rocheuses). D'après les auteurs, les résultats obtenus à l'échelle régionale sont plutôt encourageants et permettent une estimation au premier ordre des effets de site lithologiques. Plusieurs limites sont néanmoins pointées du doigt :

- les corrélations proposées ne permettent pas de distinguer correctement les rochers dits « mous » ou « raides » (sols situés à la limite entre la classe C et la classe B des NEHRP) en raison du peu de données disponibles pour ces sols ;

- la méthode proposée n'est valable que dans l'hypothèse où la corrélation pente- $V_{s,30}$  a un sens physique : par exemple, dans les cas où les vitesses d'ondes S sont gouvernées par la granulométrie et donc liées à l'énergie de dépôts des sédiments. Dans ces cas, plus on est loin de la source des dépôts – montagnes à fortes pentes – plus le relief est plat, les grains sont fins, et donc les  $V_s$  faibles. Cette hypothèse de travail n'est pas valable par exemple pour les plateaux volcaniques ou calcaires ;
- enfin les corrélations proposées ne sont valables que pour les données d'entrée utilisées, à savoir SRTM30. Ces corrélations sont à adapter si nécessaire en cas d'utilisation d'autres sources de données.

Concernant ce dernier point, les auteurs (Allen et Wald, 2009) ont d'ailleurs testé leur méthode en utilisant des sources de données à plus grande résolution (modèles numériques d'élévation à 3 et 9 secondes d'arc au lieu des 30 secondes d'arc du SRTM30) après adaptation des corrélations pente- $V_{s,30}$ . Les résultats ne sont d'ailleurs pas probants puisqu'ils ne montrent pas d'amélioration significative dans l'estimation des  $V_{s,30}$ . Il semble même que les pentes calculées à partir de ces sources de données soient moins fiables que celles obtenues à partir du SRTM30 (variations d'élévation liées à la présence de la canopée trop importantes). Ce point concernant la qualité des données d'entrée sera d'ailleurs discuté dans notre étude.

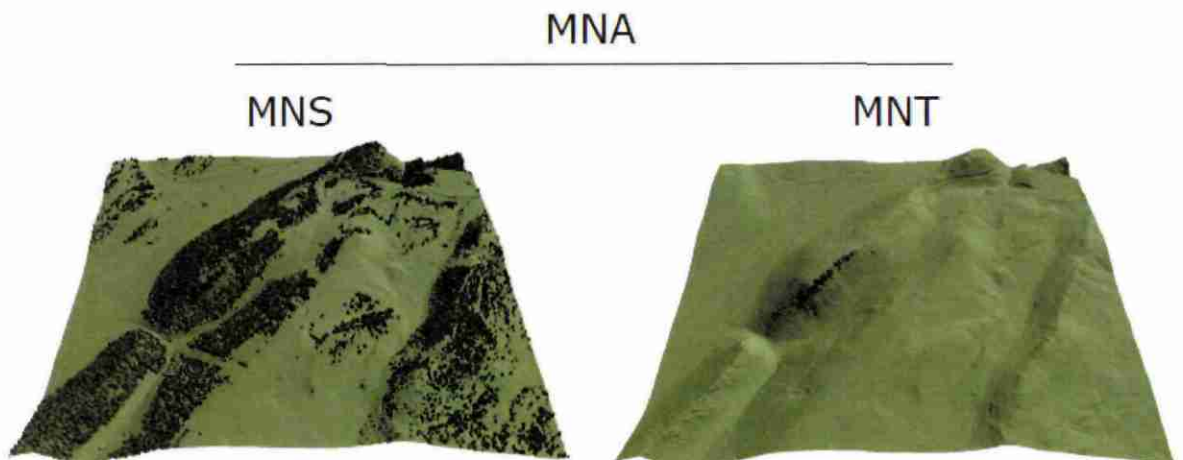
Dans les chapitres suivants, chaque étape du travail de Wald et Allen décrite plus haut est reprise pour en définir les aspects techniques et les limites rencontrées lors du traitement des données sur la France métropolitaine.

### 3. Construction d'une corrélation paramètre morphométrique-classe de sol en France métropolitaine

#### 3.1. CHOIX DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN OU DE SURFACE

D'un point de vue terminologique, il existe plusieurs types de données décrivant la topographie selon qu'elles contiennent ou pas une mesure des éléments s'élevant au dessus du sol (appelé « sursol »). Le fait de contenir cette information sur le sursol vient de la manière dont l'altitude a été extraite. Les méthodes automatiques basées sur de la photogrammétrie satellitaire (par exemple Aster GDEM) ou l'interférométrie radar (par exemple mission SRTM) incluent l'altitude du sursol, les méthodes manuelles (par exemple BD Alti IGN) représentent au mieux l'altitude du sol.

Le terme générique désignant une grille d'altitude est le **MNA** *modèle numérique d'altitude*. On parle spécifiquement de **MNS** *modèle numérique de surface* pour des grilles d'altitude décrivant la topographie *et* tous les objets qui se trouvent à sa surface. L'altitude portée par les MNS inclut donc la hauteur des arbres et des bâtiments en plus du relief naturel. On parle de **MNT** *modèle numérique de terrain* pour une grille d'altitude ne contenant *que* le relief naturel sans végétation ou bâtiments. On parle enfin accessoirement de **MNE** *modèle numérique d'élévation* pour les grilles décrivant uniquement la hauteur des objets situés sur le sol naturel.



*Figure 1 - Exemple de modèles numériques d'altitude (MNA) du même site en vue oblique ombrée. On distingue les modèles numériques de surface (MNS) et les modèles numériques de terrain (MNT). Les petits points noirs sur le MNS mettent en exergue le relief causé par les arbres.*

Désignation du MNA	Type de MNA	Résolution spatiale	Pente limite mesurable (voir Figure 8)	Couverture	Système géodésique et/ou projection d'origine	Coût	Infos Bathy	Producteur/ Sources	Sites de téléchargement
SRTM 30 plus	MNS avec peu d'artefacts	1 km	0.56%	Globale	WGS84	Gratuit	Valeurs bathymétriques	NASA/USGS	<a href="http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html">http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html</a>
SRTM 3	MNS avec peu d'artefacts	90 m	1.8%	60 degrés Nord ~ 56 degrés Sud	WGS84	Gratuit	égal à No data	NASA/USGS	<a href="http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Elevation_Products">http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Elevation_Products</a>
BD alti IGN	MNT	50 m	2.5%	France	NTF Clarke 1880 IGN/ Lambert 2 étendu	Payant	égal à No data	IGN	
Aster GDEM	MNS avec beaucoup d'artefacts	30 m	3.2%	83 degrés Nord ~ 83 degrés SUD	WGS84	Gratuit	égal à 0	Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)	<a href="http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp">http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp</a>

Tableau 5 - Synthèse des modèles numériques d'altitude disponibles

La France métropolitaine dans son ensemble est couverte par plusieurs types de MNA : SRTM30plus, SRTM3, BD Alti de l'IGN et ASTER-GDEM (Tableau 5).

La mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a mesuré le relief global, en février 2000, au moyen d'un système interférométrique radar en bande C qui repère l'altitude du sol et du sursol. Deux MNS à résolutions différentes sont disponibles gratuitement sur la France : 3 arc secondes (~90m, dénomination SRTM-3) et de 30 arc seconde (~1km, dénomination SRTM-30plus). Le MNS SRTM-30plus est un produit hybride où les zones polaires ont été complétées par d'autres jeux de données complémentaires et inclut la bathymétrie. Les altitudes de SRTM-30plus agrègent les données de SRTM-3 sur des mailles de 1km.

La précision altimétrique de SRTM-3 en Eurasie est de 8.7 m (Rodriguez et al 2006).

Le MNS global ASTER-GDEM résulte de l'extraction d'altitudes d'images satellitaires stéréoscopiques acquises par le satellite américain ASTER. La grille du MNS a un pas de 30 m. Hayakawa et al. (2008) ont comparé la qualité d'ASTER-GDEM vis-à-vis de SRTM-3 sur le Japon et ont trouvé que i) les altitudes de GDEM étaient plus fidèles à la réalité (comparées aux cartes topographiques), ii) les pentes extraites de GDEM décrivent mieux les pentes inférieures à 12° que SRTM-3 et iii) les erreurs altimétriques sont deux fois plus petites que sur SRTM-3 au Japon. Ceci étant, un certain nombre d'artefacts, biais et erreurs affectent quand même le MNS ASTER-GDEM, comme on peut le voir sur la Figure 2 (ASTER-GDEM Validation Summary Report version 1, Juin 2009). ASTER-GDEM a été utilisé comme source de donnée à haute résolution.

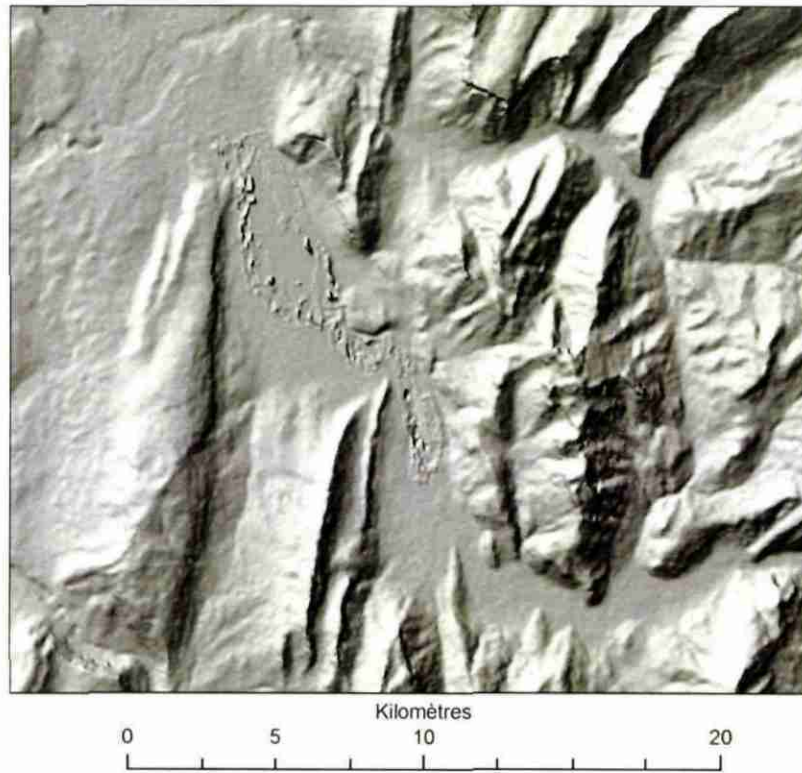


Figure 2 - Extrait du MNS ASTER-GDEM (au pas de 30m) sur la zone du Lac d'Annecy.

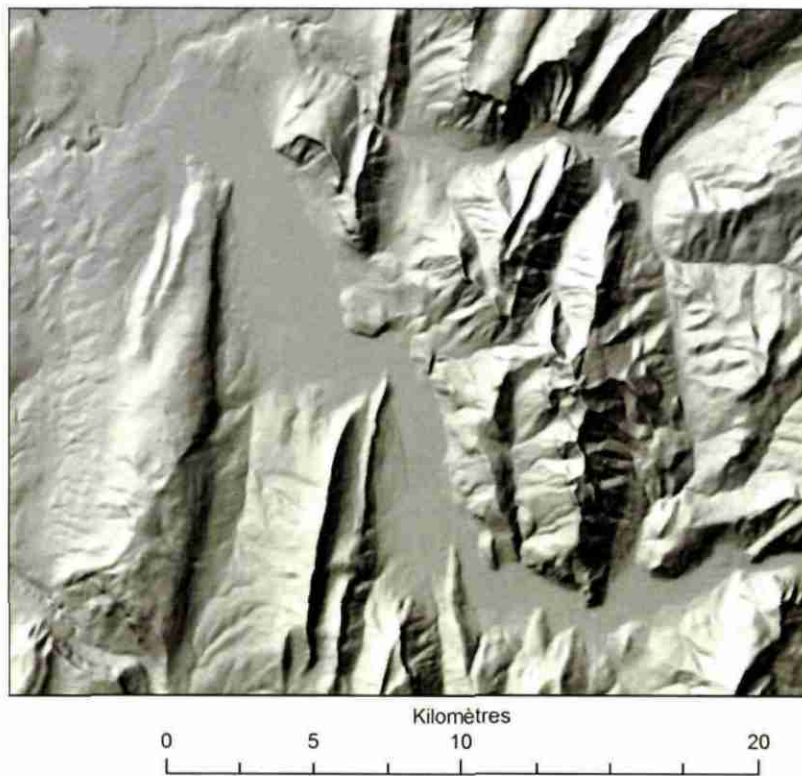


Figure 3 - Extrait du MNT BD Alti IGN (au pas de 50m) sur la zone du Lac d'Annecy.

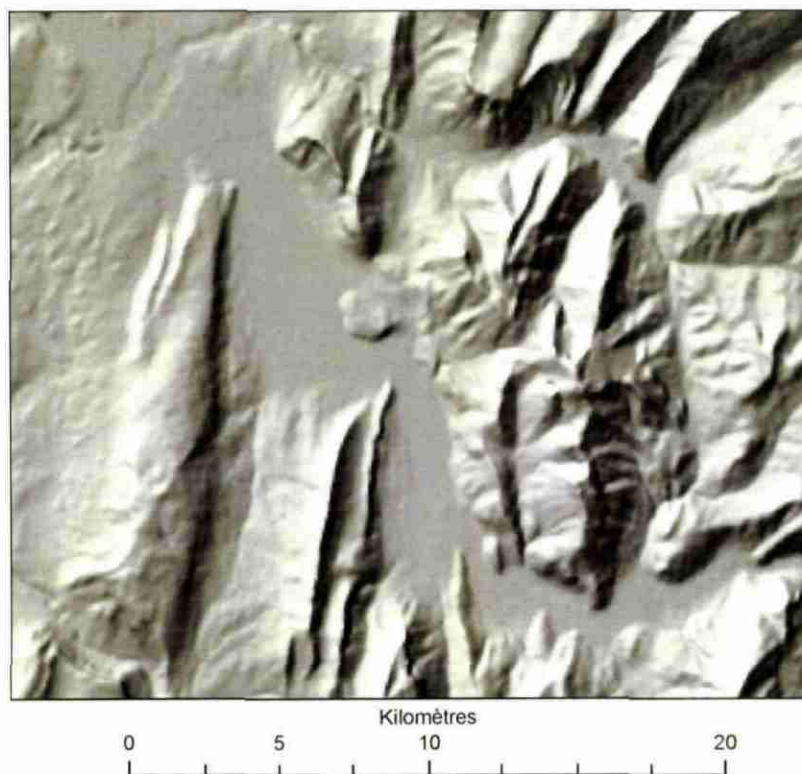


Figure 4 - Extrait du MNS SRTM-3 (au pas de 90m) sur la zone du Lac d'Annecy.

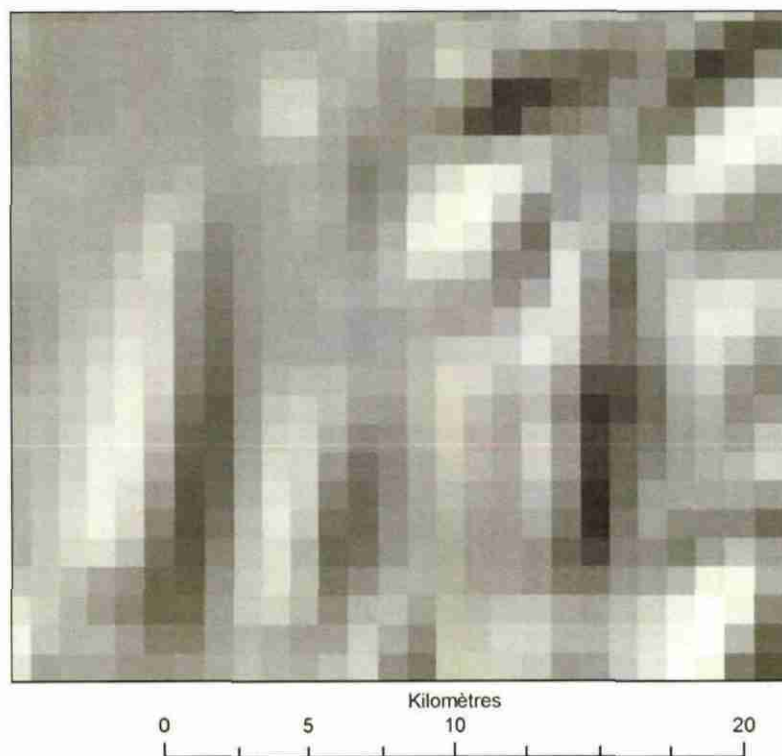


Figure 5 - Extrait du MNS SRTM-30Plus (au pas de 1km) sur la zone du Lac d'Annecy.



La BD alti de l'IGN, quant à elle, provient de l'interpolation de courbes de niveau et de points cotés des cartes topographiques et a une résolution de 50 m sur la France métropolitaine. La précision altimétrique d'une courbe de niveau est sensée représenter l'altitude vraie à une demi équidistance près. Cette précision est spatialement variable selon la carte dont sont issues les altitudes, et donc du relief de la zone couverte par la carte. Typiquement, dans les vallées alpines ou pyrénéennes, l'équidistance est de 25m, la précision altimétrique est donc de 12.5 m. Dans des zones à dynamique de relief plus faible, l'équidistance des courbes de niveau est de 10 m, ce qui conduit à une erreur altimétrique ponctuelle de 5 m. Un facteur supplémentaire est que tout relief inférieur à l'équidistance n'est pas représenté. Le MNT sera donc plus lisse que les MNS SRTM-3 et ASTER-GDEM.

Il reste aussi un facteur supplémentaire à prendre en considération pour appliquer la corrélation entre pente et  $V_{s,30}$ , il s'agit de la variabilité spatiale de l'altitude et du codage de l'altitude. Tous les MNA utilisés encodent l'altitude comme des entiers, ce qui arrondi les altitudes à l'entier le plus proche. Pour les endroits où la pente topographique est très faible, le profil topographique ressemble à une série de marches d'escalier distinctes (Figure 6 et Figure 7).

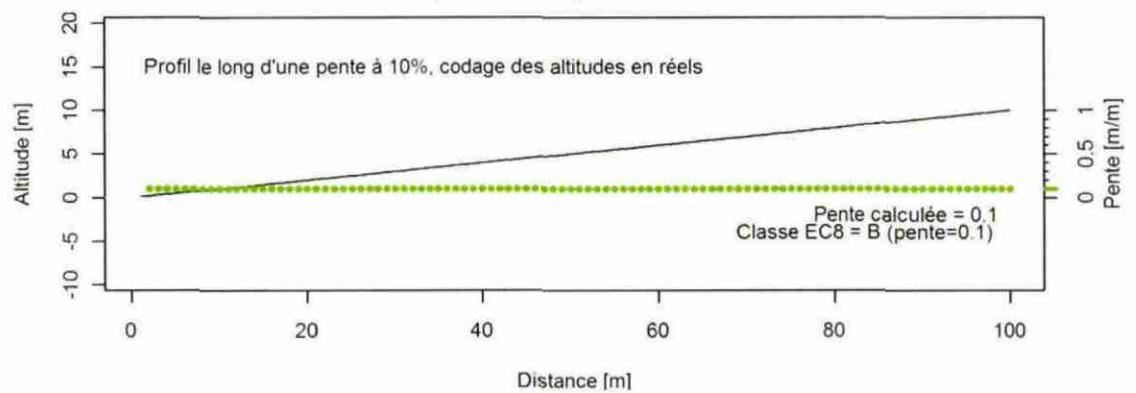


Figure 6 - Profil topographique le long d'une pente régulière de 10% (ligne noire) sur un MNA dont les altitudes sont codées en nombres réels.

On voit sur la Figure 6 que si les altitudes sont codées en nombres réel, la pente calculée correspond bien à la pente vraie et la classe EC8 qu'on en déduit, soit la classe B, est correcte (voir les classes de Wald et Allen plus loin).

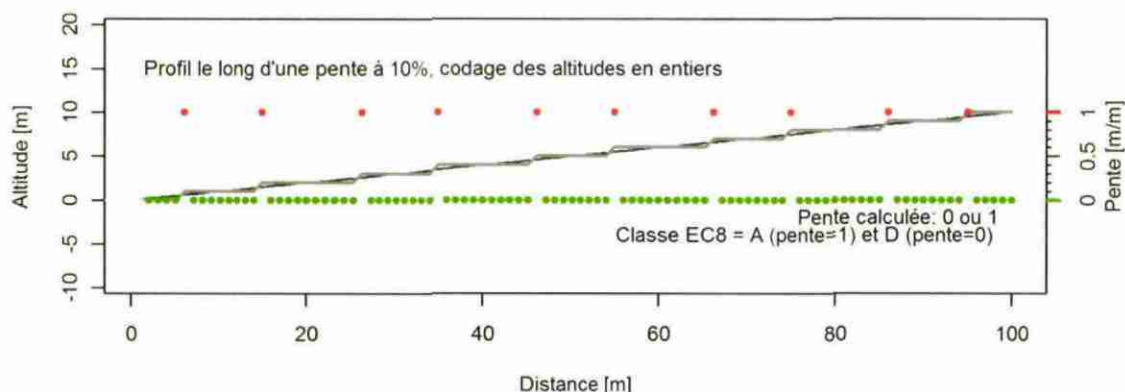


Figure 7 - Profil topographique le long d'une pente à 10% mais sur un MNA dont les altitudes sont codées en nombres entiers plutôt qu'en nombres réels.

On voit sur la Figure 7 que les marches d'escalier représentent les altitudes arrondies à l'entier le plus proche. Il s'ensuit que le calcul de la pente le long du profil vaut tantôt 0%, tantôt 100%. On en déduit une classe EC8 D ou A respectivement, ce qui est incorrect puisqu'on devrait avoir une classe B correspondant à une pente de 10%.

La Figure 6 représente un cas idéal où les altitudes sont codées en nombres réels. La pente calculée est correcte et la classification EC8 déduite l'est également. La Figure 7 représente la même pente à 10% mais pour laquelle les altitudes sont arrondies à l'entier le plus proche. Les pentes déduites sont fausses et conduisent une mauvaise classification EC8.

Ce codage au plus proche entier a une conséquence également sur la plus petite pente détectable dans le MNT. Sur la Figure 8, on voit que cette pente limite, qui décrit la sensibilité du paramètre de pente, est directement liée à la résolution du MNA. La pente sera d'autant plus sensible aux faibles pentes que la résolution sera grossière.

Schéma de calcul	Pondération	Altitudes																											
<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>c</td></tr> <tr><td>d</td><td style="background-color: #e0f0ff;">e</td><td>f</td></tr> <tr><td>g</td><td>h</td><td>i</td></tr> </table>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	1	2	0	2	1	2	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
a	b	c																											
d	e	f																											
g	h	i																											
1	2	1																											
2	0	2																											
1	2	1																											
1	0	0																											
0	0	0																											
0	0	0																											
$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{1 \cdot (g - a) + 2 \cdot (h - b) + 1 \cdot (i - c)}{8 \cdot \text{tpix}}$		$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0}{8 \cdot \text{tpix}}$																											
$\frac{\Delta Z}{\Delta Y} = \frac{1 \cdot (c - a) + 2 \cdot (f - d) + 1 \cdot (i - g)}{8 \cdot \text{tpix}}$		$\frac{\Delta Z}{\Delta Y} = \frac{1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0}{8 \cdot \text{tpix}}$																											
$\text{pente} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Z}{\Delta X}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{\Delta Y}\right)^2}$		$\text{pente limite} = \sqrt{\frac{1}{32 \cdot \text{tpix}}}$																											

Figure 8 - Schéma de calcul de pente. La pente calculée est la norme des gradients d'altitude le long des lignes et des colonnes. Dans le cas de MNA où les altitudes sont codées au plus proche entier, la plus petite pente détectable correspond au cas où un seul pixel est un mètre plus haut que ses voisins. Cette pente limite dépend directement de la taille du pixel (tpix) du MNA.

Enfin, l'usage de la BD Alti IGN s'est révélé problématique sur les zones à faible pente dans la mesure où les faibles reliefs d'une amplitude inférieure à l'équidistance ne sont pas décrits. C'est le cas par exemple dans les Landes. La conséquence est de cartographier de très grandes surfaces en catégorie D, ce qui est très pénalisant et incorrect. Pour cette raison nous avons écarté la BD Alti de l'analyse.

Wald et Allen ont utilisé deux types de MNA comme données d'entrée pour cartographier les classes de sol à l'échelle nationale : les données SRTM30 (MNS, au pas de 1 km) et les données NED (MNT, au pas de 90 m).

En conclusion, nous explorons trois sources de MNS : ASTER-GDEM, SRTM-3 et SRTM-30plus.

Il convient de noter que ce choix n'est pas anodin car les pentes calculées avec les différents MNA utilisés ne sont pas les mêmes pour un point donné. A titre d'exemple les pentes respectivement calculées à partir des MNS ASTER-GDEM, SRTM-3 et STRM-30plus pour un échantillon de plus de 2000 points situés en métropole (voir §3.3) sont comparées sur la Figure 9 ci-dessous.

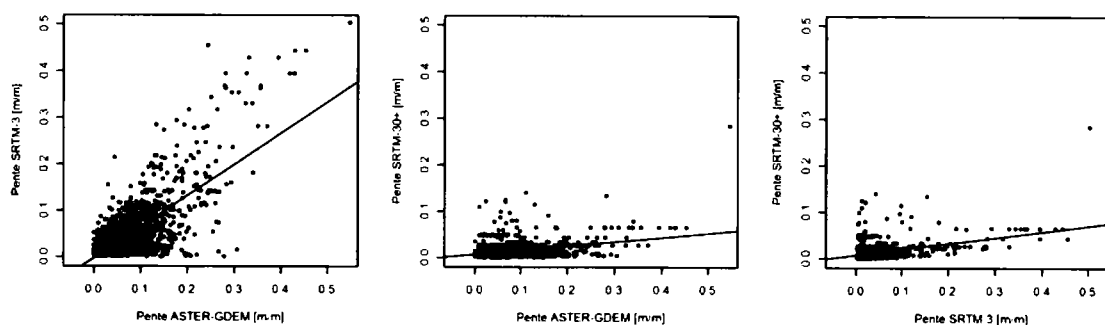


Figure 9 - Comparaisons des pentes obtenues pour un échantillon de points à partir des 3 MNS utilisés dans le cadre de cette étude (SRTM-3 vs ASTER-GDEM à gauche, SRTM-30plus vs ASTER-GDEM au centre et SRTM-30plus vs SRTM-3 à droite)

On observe clairement qu'il n'existe pas de relation linéaire simple entre les pentes calculées avec les différents MNS. On remarque cependant, en considérant l'ensemble des points d'observation, que plus le MNS est échantillonné avec une maille fine et plus les pentes calculées sont fortes, pour une même localisation. Ainsi les pentes les plus fortes sont celles calculées à partir d'ASTER-GDEM (un pas 30 m) puis des pentes moins fortes sont calculées à partir de SRTM-3 (un pas de 90 m) et enfin les pentes les plus faibles sont globalement déterminées à partir de SRTM-30plus (un pas de 1 km). Cette observation est très importante car elle peut expliquer certains artefacts observés sur les exemples pratiques réalisés (voir §5.1).

### 3.2. CHOIX DU PARAMETRE MORPHOMETRIQUE DE REFERENCE

Wald et Allen (2007) ont utilisé la pente comme paramètre discriminant pour construire leur corrélation avec le paramètre  $V_s,30$  et ainsi caractériser leurs sols. Bien que fréquemment utilisé, ce paramètre ne permet pas nécessairement de rendre compte de la complexité d'une topographie. Il existe d'autres paramètres comme l'« openness » décrite par Yokoyama et al. (2002) qui donne une mesure morphologique de la forme du relief et devrait permettre une meilleure appréciation de la taille des bassins (et donc des épaisseurs possibles de remplissages sédimentaires). Il s'agit de tester l'utilisation de ce paramètre en lieu et place de la pente dans la méthode de cartographie des effets de site lithologiques à partir d'un modèle numérique de terrain.

#### 3.2.1. Pente

La pente calculée sur un MNA raster correspond à la norme des gradients directionnels d'altitude (Figure 8). Comme les gradients sont évalués entre les altitudes des pixels entourant un pixel central (Figure 8), elle est donc directement dépendante de la résolution spatiale du MNA. En d'autres termes, l'évaluation de la pente est une mesure locale dont la portée spatiale est égale à 3 pixels. La recherche d'un MNA à résolution la plus élevée n'est pas nécessairement un objectif à poursuivre puisque la mesure de pente ne détectera alors que le comportement de la topographie à très courte distance.

L'algorithme de Wood (1996) calcule également la norme des gradients directionnels d'altitude mais autorise l'introduction d'un rayon d'intérêt pour explorer différentes échelles spatiales dans un voisinage supérieur à 3 pixels. Malheureusement, cet algorithme n'est pas disponible sous ArcGIS®, le logiciel utilisé pour cette étude.

Il existe d'autres algorithmes pour calculer les pentes à partir d'un MNA (par ex. Wilson & Gallant, 2001). Wilson & Gallant (2001) évoquent l'algorithme D8 qui recherche la direction de plus forte descente entre un pixel et ses huit voisins. Il s'agit d'une mesure qui est utile en hydrologie pour le routage des flux d'eau. Dans le contexte de cette étude, la portée spatiale de la pente D8 est de l'ordre de un pixel. C'est un estimateur plus local que l'algorithme de pente classique qui n'est ici pas adapté car trop pénalisant.

Le paramètre de pente retenu est donc celui utilisé par Wald et Allen (2007).

### 3.2.2. Openness

Comme évoqué plus haut, le calcul de pente a une portée locale de 3 pixels de MNA. Pour explorer des échelles spatiales de plus grandes dimensions, on peut recourir à d'autres indices géomorphométriques. Yokoyama et al. (2002) ont développé l'indice d'*openness*. Celui-ci mesure la pente maximale et minimale rencontrée dans un voisinage de taille croissante. C'est en quelque sorte un estimateur de la pente rencontrée à une certaine distance du point d'intérêt. Ce paramètre pourrait notamment permettre une meilleure prise en compte de la taille des bassins sédimentaires et donc des épaisseurs possibles de remplissages sédimentaires.

Le principe de la mesure est le suivant (Figure 10) : pour chaque pixel de la grille, on cherche dans un rayon donné autour de ce point le gradient d'altitude maximal et le gradient d'altitude minimal rencontré le long de chacune des huit directions principales. L'*openness* positive est la moyenne des gradients maxima dans chaque direction et l'*openness* négative est la moyenne des gradients minima dans chaque direction.

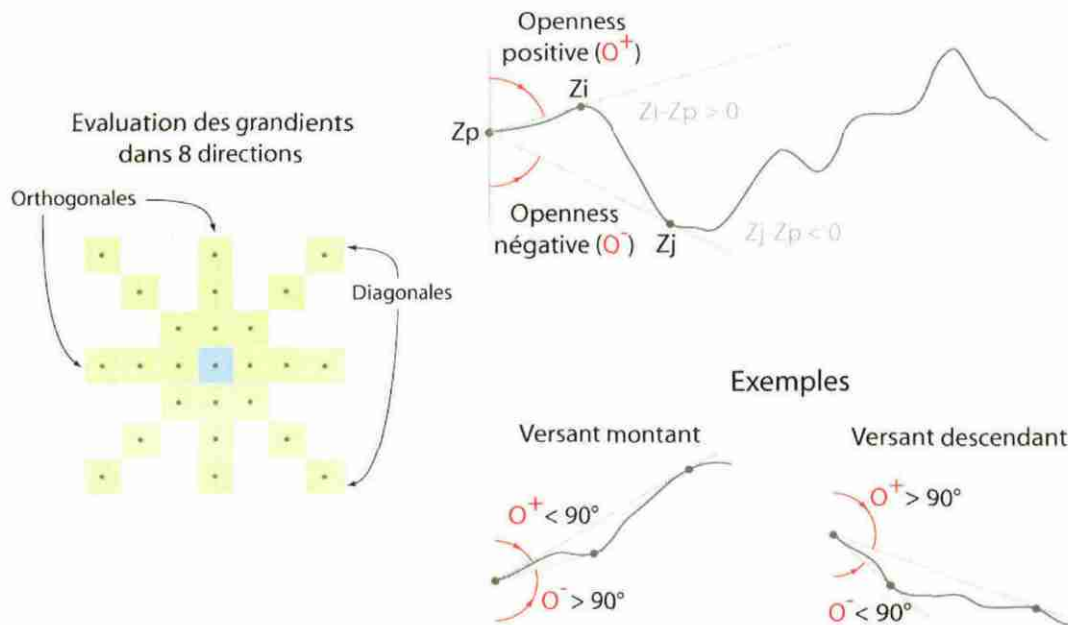


Figure 10 - Schéma de calcul de l'openness positive et négative. Dans un rayon de recherche défini, l'openness positive est la moyenne des gradients maxima rencontrés dans les huit directions principales. L'openness négative est la moyenne des gradients minima rencontrés dans les huit directions principales.

### 3.3. CORRELATION MORPHOMETRIE-Vs,30

#### 3.3.1. Données de base

Afin d'établir des corrélations entre des paramètres morphométriques et la Vs,30 il faut constituer une base de données de Vs,30 géolocalisées.

Dans un premier temps l'ensemble des données disponibles doit ainsi être rassemblé. Les mesures directes de vitesse d'onde sont relativement rares car il faut en général utiliser des procédés géophysiques destructifs très chers (de type cross-hole) pour les obtenir. Une alternative consiste à utiliser des méthodes géophysiques non destructives de type SASW (Spectral Analysis of Surface Waves ou mesures des vitesses des ondes de cisaillement par inversion des ondes de surface). L'ensemble de ces mesures constituent des **mesures directes** de la Vs,30 car la vitesse moyenne est estimée directement à partir des vitesses estimées des ondes dans les différentes couches.

Pour utiliser le maximum de données possibles et contraindre au mieux les corrélations, il a été envisagé d'utiliser également des **mesures indirectes** de la Vs,30. Dans de nombreuses études une colonne de sol précise est établie pour l'évaluation des effets de site lithologiques. Les caractéristiques géomécaniques de ces colonnes sont alors estimées à partir d'essais de type pénétromètre ou

pressiomètre. Il est ensuite possible d'estimer la vitesse des ondes de cisaillement dans chacune des formations étudiées à l'aide de corrélations classiquement utilisées en géotechnique. Les vitesses des ondes dans les différentes couches de sol et par conséquent la vitesse moyenne ( $V_{s,30}$ ) sont ainsi estimées de façon indirectes. L'avantage d'utiliser ce type de données est qu'il est ainsi possible d'enrichir considérablement la base de données initiale constituée uniquement de données dites directes. Le principal inconvénient est bien entendu que les vitesses des ondes sont estimées et non pas mesurées et ainsi des erreurs potentiellement importantes peuvent entacher ces estimations de  $V_{s,30}$ , d'autant plus que les corrélations utilisées sont assez générales et non pas spécifiques à chacune des formations étudiées.

Une synthèse des données directes puis des données indirectes recensées est présentée ci-dessous.

### 3.3.2. Données directes

La  $V_{s,30}$  est calculée à partir de profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement (voir 2.1.1). Nous avons sélectionné des points pour lesquels des mesures des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur étaient disponibles pour la France métropolitaine. Comme il n'existe pas de base de données française pour ce type de mesures géophysiques, nous avons mené une étude bibliographique qui nous a permis de compiler 136 points issus d'études menées au sein du BRGM. Cette liste n'est pas exhaustive, et elle pourrait être complétée ultérieurement par exemple par de nouvelles mesures qui n'étaient à ce jour, soit pas publiées, soit pas dans le domaine public.

Parmi les données dont nous avons disposé, nous avons pu observer une certaine hétérogénéité dans la profondeur maximale des profils de vitesse ( $z_{max}$ ). Pour calculer une valeur de  $V_{s,30}$ , nous avons besoin des valeurs de vitesse des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) jusqu'à une profondeur de 30 mètres. Or la profondeur maximale pour laquelle une valeur de  $V_s$  est disponible est rarement égale à 30 m. Nous avons choisi de calculer les  $V_{s,30}$  en prolongeant la vitesse  $V_s$  de la couche la plus profonde jusqu'à 30 m (voir 3.3.4, p.34).

Dans les cas où plusieurs jeux de mesures sont disponibles pour un même site, la moyenne des  $V_{s,30}$  est calculée.

#### ***$V_{s,30}$ issues d'étude du BRGM mettant en œuvre la méthode SASW***

La plupart des points de mesure des  $V_{s,30}$  qui ont été compilés pour la France métropolitaine dans le cadre de cette étude sont issus de la méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves). Cette méthode permet de déterminer le profil de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol grâce à la dispersion des ondes de surface. La source utilisée pour générer les ondes sismiques qui sont par la suite inversées peut être explosive ou associée à une chute de poids. La méthode SASW a été utilisée par le BRGM dans le cadre de nombreuses études depuis plus d'une dizaine d'année, elle permet d'obtenir des valeurs des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur le long d'un profil. Les points de mesure des  $V_{s,30}$  intégrés dans notre base de données sont localisés au centre de ces profils. Nous avons ainsi

compilé 120 valeurs de  $V_{s,30}$  à partir d'études mettant en œuvre la méthode SASW (Fabriol et al., 1998 ; Lebert, 2002 ; Bitri et al., 2003 ; Lebert et al. , 2004).

### ***$V_{s,30}$ issues du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP)***

Le Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) comprend 126 stations en métropole et dans les DOM-TOM. Il est important de connaître les caractéristiques des sites où sont installés les stations accélérométriques afin d'identifier d'éventuels effets locaux. Dans le cadre du RAP, un groupe de travail a synthétisé les données disponibles pour une partie des stations du RAP (Groupe de travail du RAP : caractérisation géotechnique des stations du RAP, 2007). A ce jour, il n'existe pas un profil de vitesse en fonction de la profondeur pour chacune des stations. Nous avons ici pris en compte les profils de vitesse déterminés pour 16 stations auxquels nous avons accès (Douglas et al., 2009).

### **3.3.3. Données indirectes**

#### ***$V_{s,30}$ issues des études LGV***

##### **• Donnée source**

La donnée utilisée pour le calcul des  $V_{s,30}$  le long des lignes à grande vitesse (LGV) Est et Rhin-Rhône, consiste en des maquettes géotechniques, lesquelles ont été définies sur la base de nombreuses reconnaissances géologiques, géophysiques, géotechniques et topographiques réalisées spécifiquement le long des quelques 250 km cumulés de linéaire que représente le tracé des deux lignes. Ces maquettes ont été ensuite traitées de manière automatique en utilisant les valeurs moyennes d'épaisseur et de vitesses d'ondes de cisaillement  $V_s$  des différentes couches géologiques, le tout avec un pas d'un point d'analyse tous les 50 m.

Dès lors, les résultats ainsi obtenus peuvent être qualifiés « d'indirects », les données de sondages ayant servis à la définition des maquettes géotechniques n'ayant pas été directement utilisées.

##### **• De la signification de $Z_{max}$**

En ce qui concerne les points issus des études LGV, le paramètre  $Z_{max}$  indique non pas la profondeur maximale atteinte par les sondages, mais l'épaisseur totale des couches surplombant le milieu semi-infini sous-jacent (lequel correspond le plus souvent à du substratum sismique). En effet, la  $V_{s,30}$  a été calculée pour ces études à partir d'un traitement automatique des maquettes géotechniques, ce qui induit une perte d'information liée à la profondeur d'investigation effective des sondages.



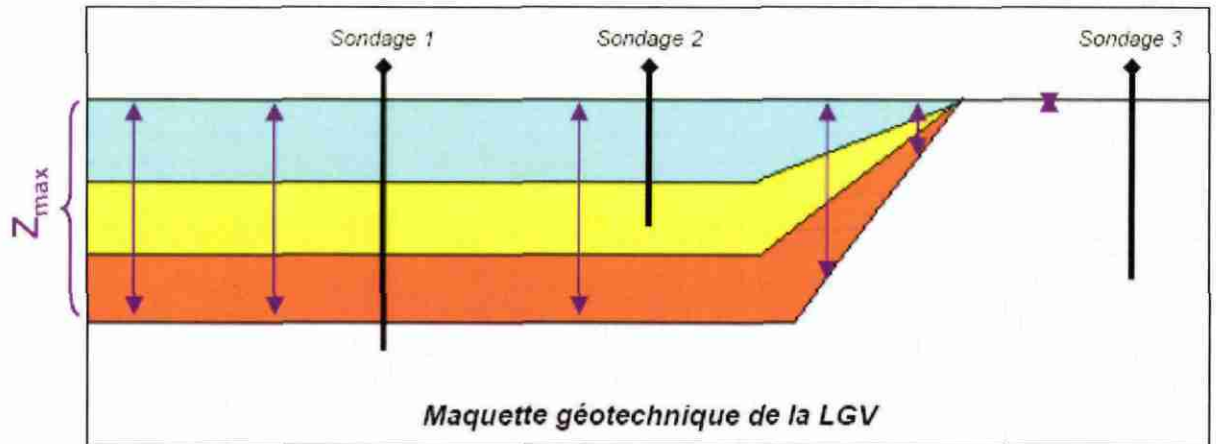


Figure 11 - Notion de  $Z_{max}$  pour les points issus des études LGV

#### • De la représentativité des profils étudiés

Une particularité des tracés des LGV est qu'ils ont été choisis de manière à traverser le minimum de relief, et ce pour des raisons évidentes de coûts et de faisabilité technique (cf. figure ci-dessous).

Dès lors, les pentes associées à une grande majorité des 1918 points de calcul de la  $V_{s,30}$  le long de ces LGV (soit 90% du total des points de la base de données constituées dans le cadre de cette étude), seront associés à des pentes vraisemblablement très faibles. Leur utilisation pour la définition des régressions empiriques entre classe de sol EC8 et la pente, risque donc d'induire un biais d'autant plus fort qu'il ne s'agit pas de données « directes ».

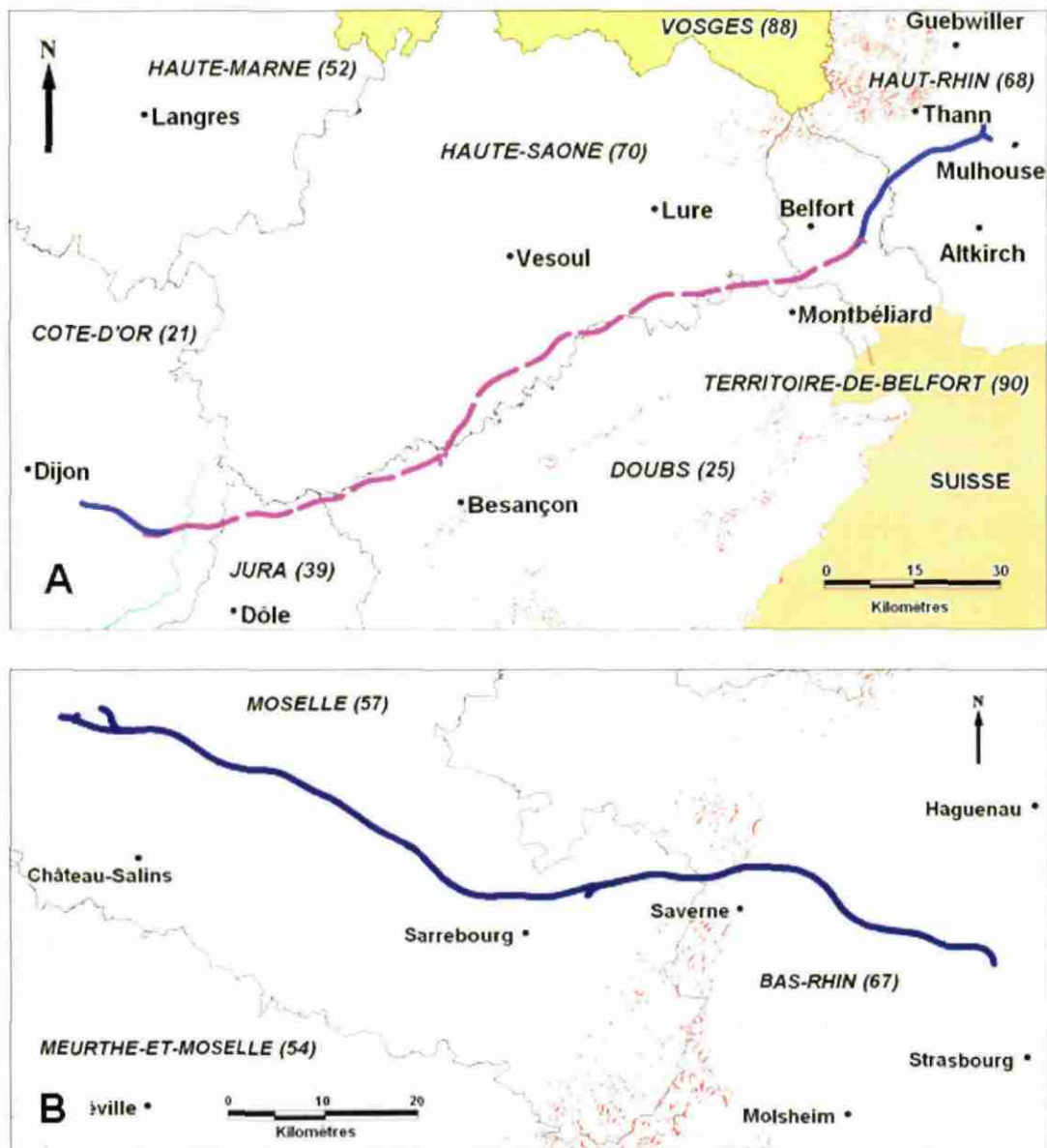


Figure 12 - Représentation du relief le long du tracé des lignes à grande vitesse « Rhin-Rhône » (A) et « Est » (B)

• De la prise en compte des déblais/remblais

Du fait de la nécessité de réduire toute rupture de pente le long de la ligne afin de permettre la circulation de TGV, l'ensemble du linéaire a été nivelé et on note donc sur les maquettes géotechniques la présence des nombreuses zones déblayées/remblayées.

Dans le cadre de la présente étude, les données issues des maquettes géotechniques ne peuvent donc pas être utilisées directement, et il est nécessaire de se rapporter à la situation naturelle des terrains. En effet, si corrélation empirique il y a entre la géologie

(caractérisée par la  $V_{s,30}$ ) et la pente, cela est nécessairement dû à la nature des processus naturels qui façonnent le paysage et qui produisent dans une certaine mesure les mêmes effets (en général : remplissages sédimentaires importants dans les fonds de vallées et au contraire rocher sub-affleurant au niveau des sommets). Dès lors, toute perturbation de cette situation « naturelle » par des modifications anthropiques des propriétés géomécaniques (compactage, déblaiement de formations meubles superficielles...) ou topographiques des sols (remblais/déblais) viennent briser toute potentielle corrélation.

Pour cette raison, nous avons tenté de nous affranchir des déblais/remblais de la manière suivante :

- **Remblais** : remblais ignorés dans le calcul de la  $V_{s,30}$  ;
- **Déblais** : l'épaisseur des formations déblayées étant renseignée dans les maquettes géotechniques, nous avons ajouté cette épaisseur en toit de colonne en considérant une  $V_s$  supposée égale à la valeur rencontrée dans la première couche naturelle non-déblayée.

### ***$V_{s,30}$ issues des études commerciales BRGM***

#### **• Donnée source**

Les colonnes de sol spécifiques déterminées par le BRGM pour le compte d'industriels ou de bureaux d'études au niveau d'installations industrielles, ont également été intégrées afin d'implémenter la base de données de  $V_{s,30}$ . Chacune de ces colonnes est basée sur l'analyse conjointe de différents types de données tels que des mesures géophysiques (essais cross-hole, profils SASW, mesures H/V, etc.), des mesures géotechniques (sondages carottés, essais pénétrométriques, etc.) et des synthèses géologiques.

#### **• De la prise en compte des remblais**

Pour la même raison que celle évoquée pour les LGV, les remblais renseignés dans les colonnes de sols disponibles n'ont pas été intégrés au calcul de la  $V_{s,30}$ .

### **3.3.4. Limites dans le traitement des données**

A l'issue du traitement de ces données (directes ou indirectes) une synthèse des résultats obtenus a permis de cerner les limites de l'exercice. Ainsi les éléments suivants peuvent être relevés :

- données non traitées pour cette finalité

Les données utilisées sont issues de mesures réalisées dans le cadre de différents projets de recherche, commerciaux et de service public. Dans ces études, l'objectif n'était pas d'estimer une vitesse moyenne de type  $V_{s,30}$  mais d'établir des profils de sol pour des besoins aussi divers que l'hydrogéologie, le stockage souterrain ou les microzonages sismiques. De ce fait, le traitement des données n'est probablement pas optimal pour notre besoin actuel. En effet, nous n'avons en particulier pas accès aux

incertitudes sur les vitesses ou les profondeurs obtenues, deux données qui peuvent avoir une importance notable dans l'estimation de la  $V_{s,30}$ .

- problème de l'extrapolation de la  $V_s$  à 30 mètres

La  $V_{s,30}$  doit par définition être calculée sur les 30 premiers mètres de sol<sup>2</sup>. Or les mesures considérées atteignent rarement cette profondeur. Pour pouvoir établir une moyenne sur les 30 premiers mètres, la solution la plus simple consiste à extrapoler les vitesses des ondes jusqu'à cette profondeur de 30 mètres. Comme l'a montré Boore dans une étude récente (2004), cette méthode induit généralement une sous-estimation de la  $V_{s,30}$  obtenue par rapport à la  $V_{s,30}$  réelle et donc une surestimation des effets de site lithologiques qui en découlent (classe de sol plus pénalisante que la classe réelle). Il existe d'autres méthodes basées notamment sur des extrapolations entre  $V_{s,30}$  et vitesses  $V_{s,d}$  (vitesses moyennes calculées sur les  $d$  premiers mètres,  $d$  étant inférieure à 30 m). Le biais induit par ce type de méthodes est moindre que celui induit par la méthode d'extrapolation à vitesse constante. Cependant, Boore a montré que, quelle que soit la méthode choisie, cela induisait moins de 10% de sites mal classés et que ce taux d'erreur devenait négligeable si le profil de vitesse était connu jusqu'à au moins 25 m. Nous avons donc décidé de garder la méthode d'extrapolation à vitesse constante comme méthode de référence du fait de la simplicité de sa mise en œuvre.

- problème d'homogénéité du traitement des données

Du fait de la période couverte par les données utilisées (1993-2008), le traitement des données n'est pas homogène. La technique SASW est relativement récente et en développement rapide et constant. En fonction de l'année de collecte des données, les logiciels de traitement utilisés ne sont pas les mêmes ce qui implique nécessairement des résultats différents. On constate notamment que les profils SASW les plus anciens sont aussi les plus simples (moins de couches définies). Cela induit inévitablement des différences dans les valeurs de  $V_{s,30}$  obtenues, en particulier pour les sites dont la classification est incertaine (dont la valeur de  $V_{s,30}$  est à la limite entre deux classes). Pour s'affranchir de ceci, l'idéal serait de retraiter l'ensemble des données de façon homogène selon un protocole établi à l'avance et dont la finalité est l'obtention du paramètre  $V_{s,30}$ . Ceci n'a malheureusement pas pu être réalisé dans le cadre de cette étude.

- problème de la localisation exacte des points de mesure

Une autre limite de cette compilation de données est le problème de la localisation exacte des points de mesure. Par exemple, pour les données anciennes, il n'existe pas de localisation GPS des points de mesures. Dans ce cas de figure, la localisation est réalisée sur un plan de masse à partir de Google Earth. Ceci peut induire une

---

<sup>2</sup> Il semblerait que cette notion de  $V_{s,30}$  vienne directement des Etats-Unis, où il est habituel de réaliser des sondages (et donc de mesurer des vitesses) jusqu'à ... 100 pieds (soit environ 30,48 m) car c'est la profondeur qu'on peut forer classiquement en une journée

incertitude de plusieurs dizaines de mètres pour la localisation et la pente calculée ne correspond alors pas exactement au point de mesure du  $V_{s,30}$ .

On peut cependant supposer que cela n'a pas une incidence importante sur les corrélations sauf en cas de changement local brusque de pente. Ceci est en revanche à prendre en compte si on veut établir la cartographie sur un site restreint par exemple.

- pas de données géotechniques, cross-hole, etc...

Enfin, une dernière limite de l'utilisation des données directes est que dans la quasi-totalité des sites de mesures des données géotechniques précises de type cross-hole ne sont pas disponibles pour valider les profils de vitesse établis. De même, dans les cas d'utilisation de mesures indirectes il est extrêmement rare que des données géotechniques complètes permettent d'obtenir une estimation fiable des vitesses des ondes en profondeur, ce qui est pourtant une aide précieuse pour caler les extrapolations entre données géotechniques disponibles (de type essais pressiométriques par exemple) et les vitesses des ondes de cisaillement.

### 3.4. ANALYSE DES DONNEES

#### 3.4.1. Données de $V_{s,30}$

Avant d'essayer de déterminer une corrélation entre pente et  $V_{s,30}$ , il est utile d'examiner la répartition des valeurs de  $V_{s,30}$  collectées (Figure 13). On voit qu'il y a deux classes de vitesses très fréquentes, la première à 400 m/s et la seconde à 800 m/s. Cette dernière correspond à une valeur générique traditionnellement attribuée au rocher.

La distribution cumulée (voir ci-dessous la Figure 13, bas) renseigne sur la proportion relative de données par classe. La médiane des  $V_{s,30}$  collectées a une valeur de 400 m/s. On retrouve par ailleurs 90% des données collectées dans les classes B et C (Figure 13, la ligne bleue claire marque l'écart inter-quantiles 5%-95%). La classe A contient quasiment 10% des observations.

Grâce à ces simples diagrammes, on voit que les données de  $V_{s,30}$  disponibles ne couvrent pas uniformément l'intervalle de vitesse entre 100 et 1000 m/s mais échantillonnent des zones de sol B et C. C'est là que l'application de la réglementation parasismique est importante. L'inégale distribution des  $V_{s,30}$  est susceptible de peser dans l'analyse.

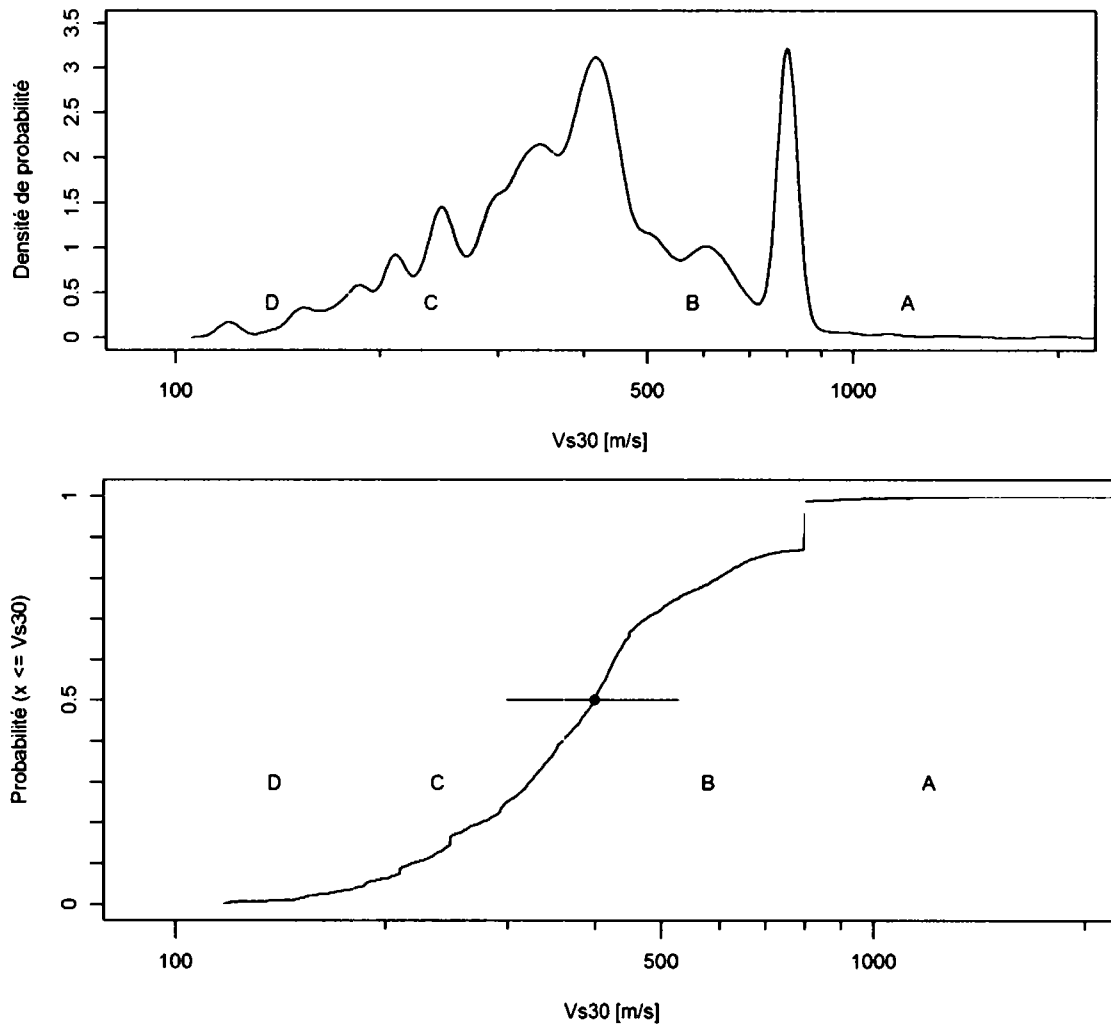


Figure 13 - Répartition des vitesses de Vs,30 collectées. La densité de probabilité (en haut) montre que les vitesses les plus fréquentes ont une valeur de 400 m/s et de 800 m/s. La courbe cumulée reporte la médiane (point bleu foncé) vers 400m/s, l'écart interquartile (ligne bleue foncée) et l'écart interquartile (5% et 95%, ligne bleue claire). 90% des vitesses sont comprises entre 200 et 800 m/s. Les lettres ABCD indiquent les classes de sol EC8 avec leur limites (barres verticales grises)

### 3.4.2. Distribution des pentes

L'examen des pentes est un peu plus complexe puisqu'on a mesuré la pente au droit des points de Vs,30 sur trois MNS différents (ASTER-GDEM, SRTM-3 et SRTM-30Plus). La Figure 14 présente les distributions de pentes rencontrées.

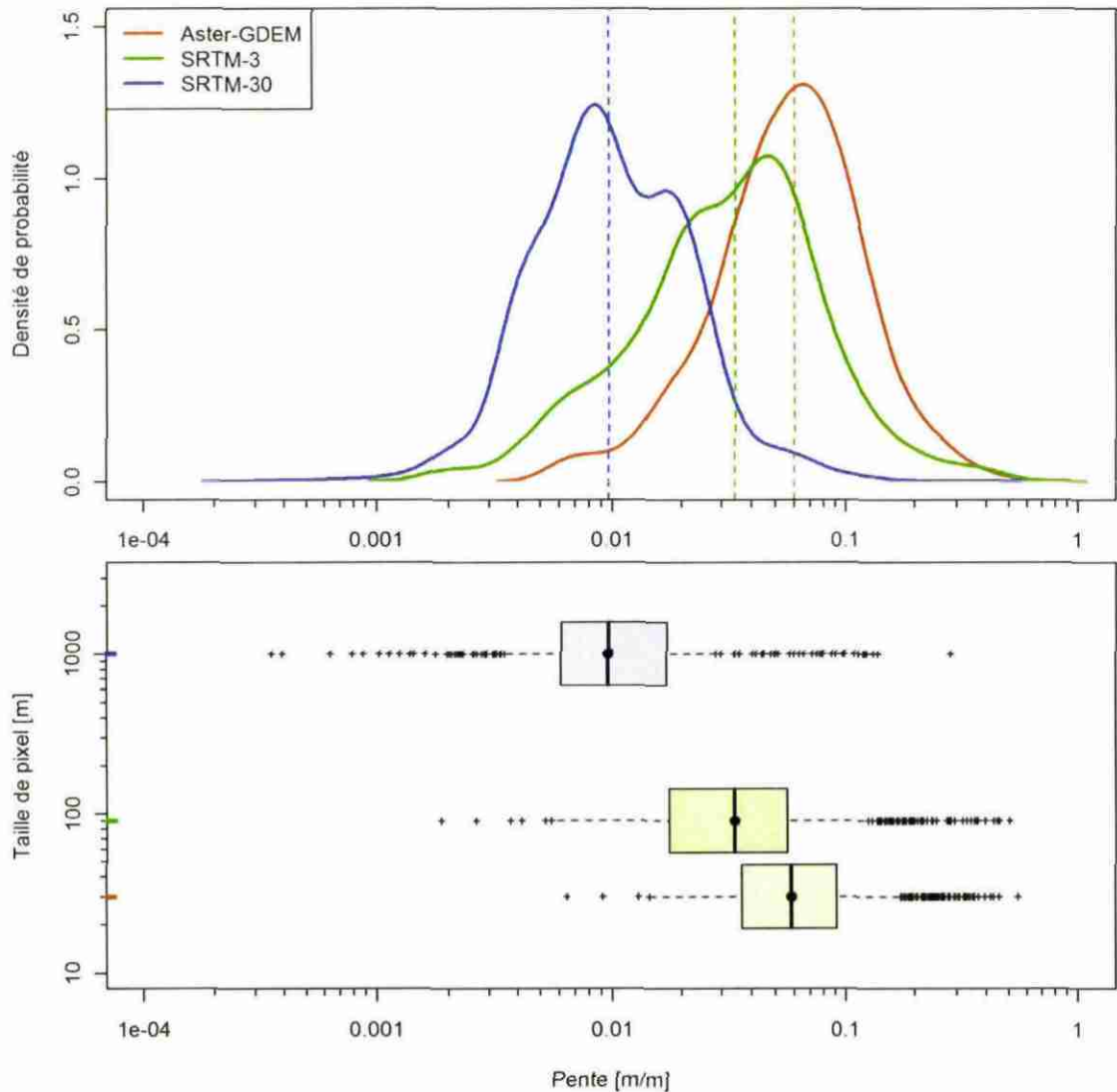


Figure 14 - Répartition des pentes observées au droit des points de mesure Vs,30 sur trois MNS différents : SRTM-30 en bleu, SRTM-3 en vert et ASTER-GDEM en orange. Haut : densité de probabilité représentant une généralisation des histogrammes respectifs. Bas : Boîtes à moustaches représentant l'écart inter-quartiles (pointillés), l'écart inter-quartiles (en couleur) et la médiane (barre verticale noire). On voit clairement que les distributions se décalent progressivement vers des pentes plus raides à cause du changement de résolution du MNS.

Les distributions de pente montrent que le changement de résolution spatiale du MNS conduit à une modification de la valeur de pente. Plus la résolution est fine (ASTER GDEM au pas de 30m) plus les pentes estimées sont fortes. A l'inverse, plus la résolution est faible, plus les pentes estimées sont faibles. Ceci démontre que la résolution du MNA joue le rôle d'un filtre fréquentiel sur le relief. Cependant, la relation point à point entre les différents MNS n'est pas systématique.

Les boîtes à moustache (Figure 14, en bas), qui représentent de manière simplifiée les propriétés de distributions, montrent aussi que la moitié des valeurs de pente sont

assez concentrées autour des médianes respectives. Ceci traduit finalement une forte concentration des pentes dans un petit intervalle parmi toutes les pentes possibles.

Les changements des pentes calculées en fonction de la résolution induisent une modification de seuils tels que ceux proposés par Allen et Wald (2009).

### 3.4.3. Corrélation pente-Vs,30

Le travail de Wald et Allen identifie deux corrélations : la première pour les contextes de tectonique active et la seconde pour les contextes de tectonique passive.

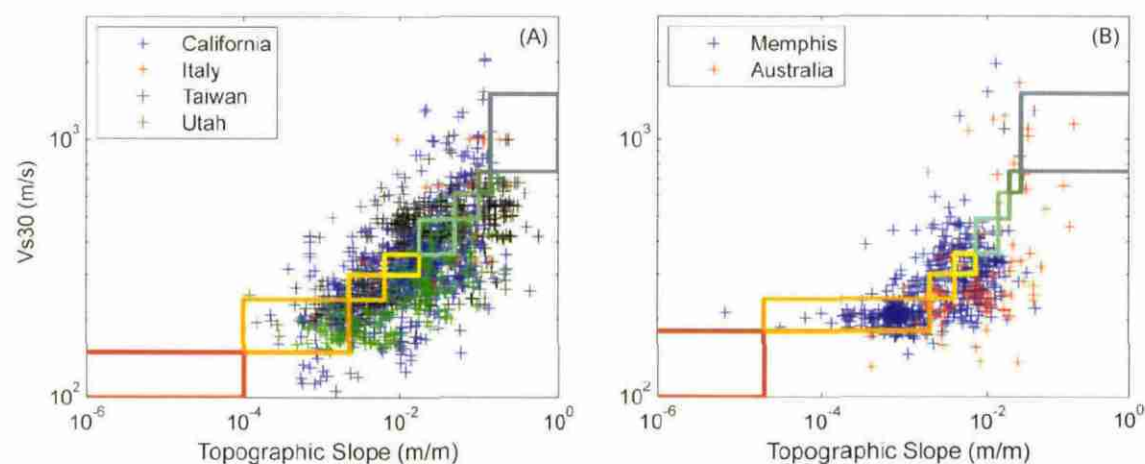


Figure 15 - Corrélation proposées par Wald et Allen 2007 en contexte tectonique actif (gauche) et passif (droite).

Nous avons reporté de la même manière les pentes et Vs,30 pour les trois MNS, du moins résolu au plus résolu, donc de SRTM-30, à SRTM-3 et ASTER-GDEM (Figure 16). Contrairement aux résultats de Wald et Allen, aucune corrélation n'apparaît entre les pentes et les Vs,30. Une même valeur de Vs,30 se retrouve pour toute une série de valeurs de pente, et inversement, une seule valeur de pente prédit toute une gamme de valeur. Donc dans ce cas, on ne peut pas prédire de Vs,30 au départ de la pente, quel que soit le MNS considéré.

Devant ce résultat négatif, nous avons cherché l'origine possible d'une telle situation. On a d'abord suspecté un biais visuel du nuage de points provenant des données de Vs,30 calculées par modèles géotechniques dans les études des lignes ferroviaires à grande vitesse (LGV). Le retrait de ces points de Vs,30 des graphes n'améliore pas la situation (Figure 16, panneaux de droite), aucune relation linéaire n'apparaît.

On a également cherché à retrouver si un paramètre statistique permettant de résumer les distributions ne pourrait pas traduire une relation croissante entre Vs,30 et pente (Figure 17). L'utilisation de la médiane, qui est insensible aux valeurs extrêmes, cependant, ne révèle pas non plus de corrélation entre pente et Vs,30 (Figure 17, panneau de droite). Elles montrent même parfois une très faible relation inverse (sur SRTM-30+).



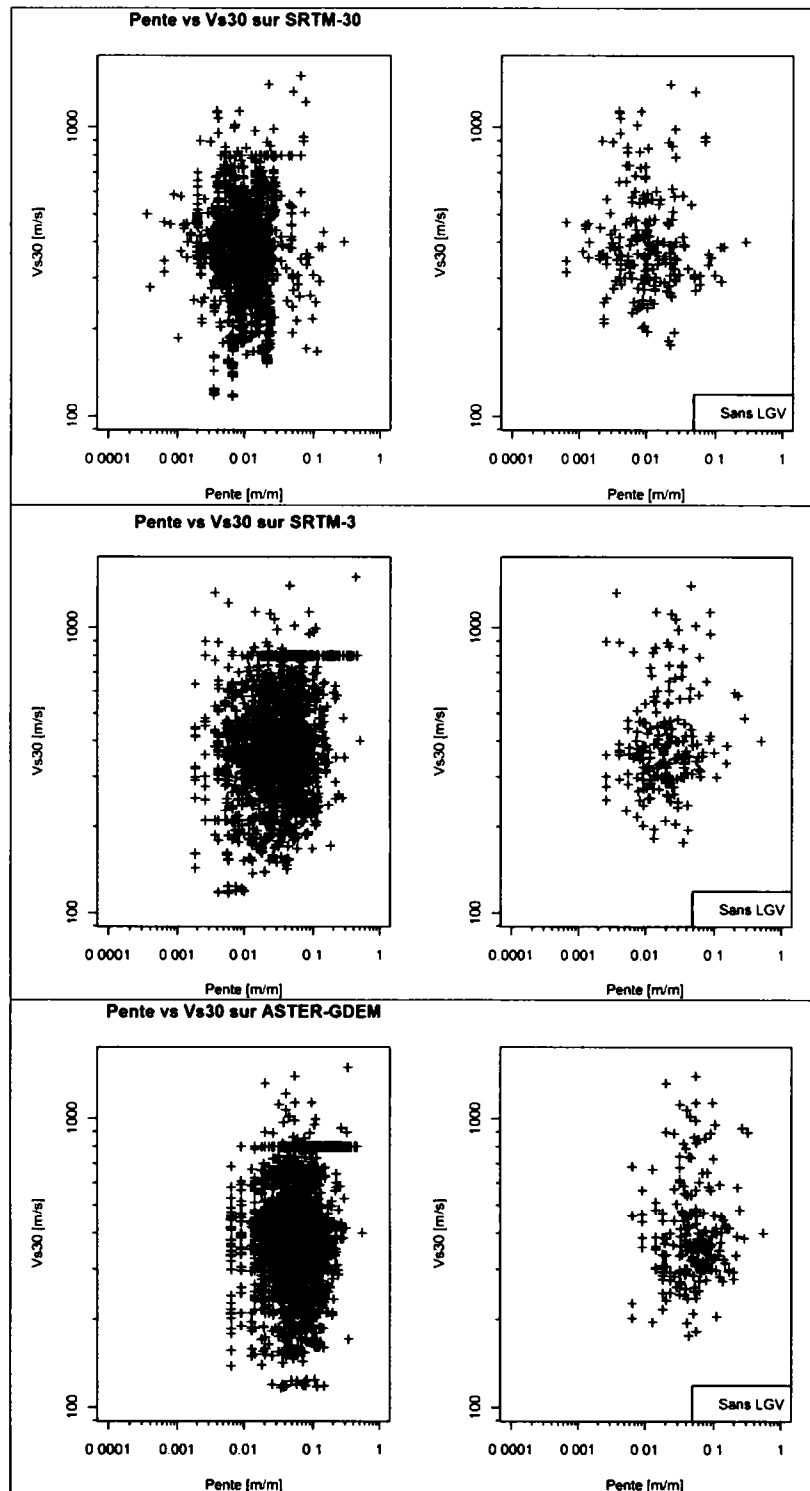


Figure 16 - Distribution des Vs 30 en fonction de la pente. La distribution pente-Vs,30 a également été représentée sans les Vs,30 modélisées pour les tracés des lignes grande vitesse (panneau droit) au cas où celles-ci auraient biaisé l'interprétation. Il n'y a aucune corrélation. Pour une même valeur de pente toute la gamme de Vs,30 a été observée.

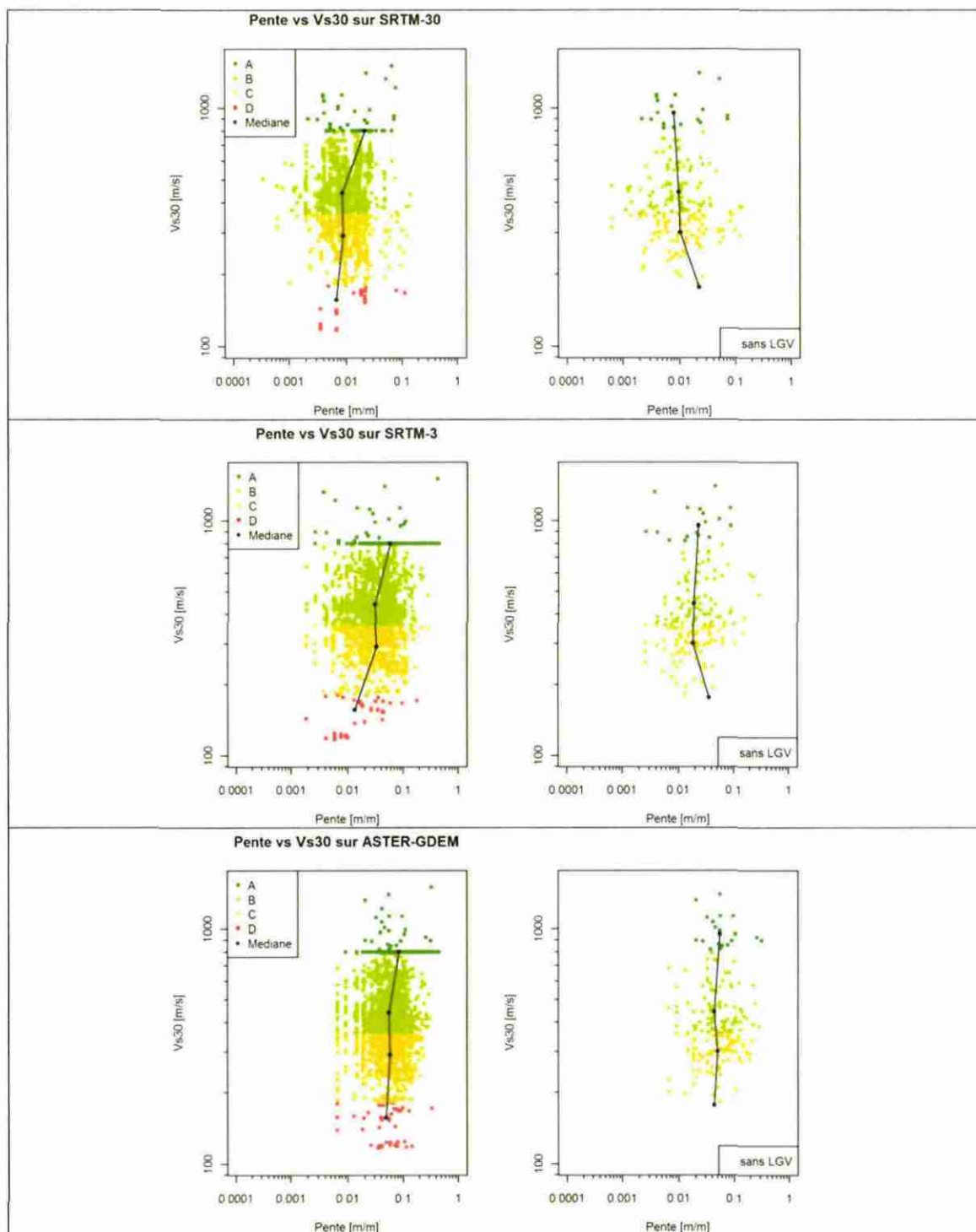


Figure 17 - Distribution des Vs,30 en fonction des pentes sur les trois MNS SRTM-30, SRTM3 et ASTER-GDEM. Le codage coloré indique la classe de sol à laquelle la mesure de Vs est rattachée. Les médianes de pente et Vs pour chaque classe (points noirs) montrent que même en résumant la distribution par une statistique synthétique, aucune corrélation n'apparaît. La corrélation est même inversée dans le cas de SRTM-30.

Enfin, on peut se demander si les distributions de pentes sont séparables au moyen d'un seuil. Pour ce faire on a représenté les distributions cumulées des pentes pour chaque classe de sol connue d'après la  $V_{s,30}$  mesurée (Figure 18). Aucun des trois graphes ne montre de courbe cumulée clairement séparée des autres. Ceci indique que les pentes sont virtuellement inséparables quelle que soit la classe choisie. Ceci est particulièrement vrai pour les courbes des classes B et C.

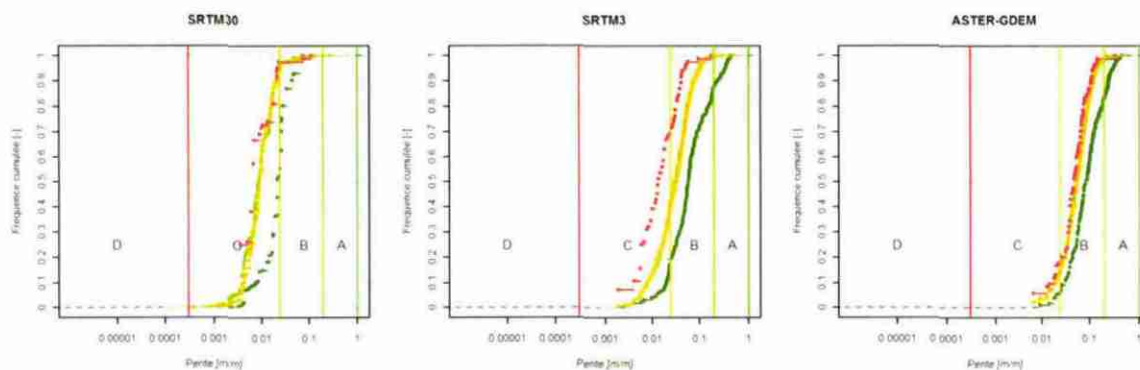


Figure 18 - Distribution cumulées des pentes des points respectivement situés sur des sols de classe A (vert foncé), classe B (vert clair), classe C (orange) et classe D (rouge)

Dans ces circonstances, il semble délicat d'établir une corrélation entre les valeurs de pente et les  $V_{s,30}$ , à la manière de Wald et Allen, sur ces données françaises.

#### 3.4.4. Distribution openness- $V_{s,30}$

L'openness apparaît comme un paramètre pertinent pour évaluer la rugosité du terrain dans un voisinage supérieur à une fenêtre 3x3. Nous explorons ici la distribution de la  $V_{s,30}$  en fonction de l'openness positive et négative.

Ce paramètre morphométrique n'est pas implanté dans ArcGIS pour un traitement facile d'accès. Nous avons programmé cet algorithme dans Matlab et testé sur SRTM-30+ sur l'ensemble de la France.

Sur la Figure 19 suivante les valeurs de l'openness (positive ou négative) ainsi calculées sont représentées en fonction de la  $V_{s,30}$  (avec SRTM-30+).

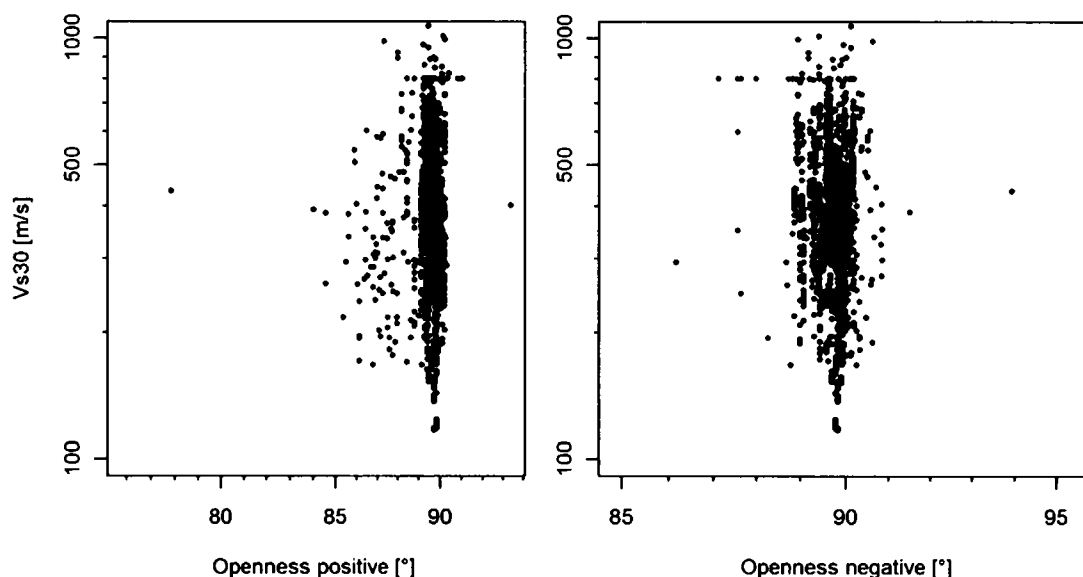


Figure 19 - Vs<sub>30</sub> en fonction de de l'openness positive et négative calculées sur SRTM-30.  
Aucune corrélation ne sort de cette relation.

Les tests réalisés ont ainsi montré l'insensibilité de l'openness vis-à-vis de la Vs<sub>30</sub> (voir ci-dessus). Ainsi il n'a pas été jugé nécessaire de poursuivre dans cette voie exploratoire.

### 3.4.5. Conclusion

Au vu de l'ensemble des résultats présentés ci-dessus il est apparu délicat d'essayer d'établir une corrélation pour la France métropolitaine entre un paramètre morphométrique (pente ou openness) avec les valeurs de Vs<sub>30</sub> de la base de données ainsi constituée.

Il a ainsi été décidé d'utiliser pour le reste de la présente étude les corrélations établies par Wald et Allen dans leurs publications (Wald et Allen, 2007 ; Allen & Wald, 2009).

En particulière les seuils de pentes publiés par Wald et Allen pour les zones actives et passives ont été directement implémentées dans les routines élaborées (voir ci-dessous).

## 4. Développement des routines

Afin de pouvoir croiser les mesures de  $V_{s,30}$  avec des données morphométriques comme ont pu le faire Wald et Allen, nous avons défini, dans un logiciel SIG, une suite ordonnée de géotraitements à exécuter. Cette procédure permet ainsi à partir des données de base disponibles (MNS et mesures  $V_{s,30}$ ) d'affiner l'étude de ces dernières en les employant avec des méthodes d'analyse spatiale.

### 4.1. DESCRIPTION DES DONNEES DE BASE NECESSAIRES A L'OUTIL

#### 4.1.1. Prétraitements réalisés sur les MNS

En amont de l'intégration des données d'élévation dans le workflow, un certain nombre de prétraitements doivent être réalisés sur les MNS afin d'obtenir en sortie des MNS mosaïqués et cohérents géométriquement entre eux. Ces prétraitements sont précisés dans le Tableau 6 ci-dessous :

Prétraitements	SRTM 30 Plus	SRTM 3 (90 m)	ASTER GDEM
Importation des dalles couvrant le territoire métropolitain	1 dalle	8 dalles	120 dalles
Mosaïquage		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Transformation/Projection	Lambert II étendu	Lambert II étendu	Lambert II étendu

Tableau 6 - Présentation des prétraitements opérés sur les MNS

#### 4.1.2. Format de la base de données $V_{s,30}$

Pour cette étude, plusieurs mesures directes et indirectes de  $V_{s,30}$  possédant des coordonnées géographiques ont été rassemblées dans une base de données stockée dans un classeur Excel (voir 3.3.1, 3.3.2 et 3.3.3). Ce classeur contient 4 feuilles distinctes nommées « points », « dico\_donnees », « ref » et « version ». Les points référencés avec leur valeur de  $V_{s,30}$  sont stockés dans la feuille nommée « points ».

La feuille « dico\_donnees » stocke le descriptif de l'ensemble des champs présents dans la base de données sous un tableau à 4 colonnes donnant le nom, le type, la description et des commentaires sur chacun des champs. Il est la référence indispensable pour tout opérateur qui souhaiterait saisir des données dans cette base de données. La feuille « ref » liste les références biblio permettant de connaître l'origine de chaque données  $V_{s,30}$ . Enfin, la feuille « version » permet d'assurer un suivi des modifications de la BD.

## 4.2. ROUTINES D'EXPLOITATION DES DONNEES VS 30 AVEC DES DONNEES MORPHOMETRIQUES

Schéma de fonctionnement de l'outil Carto VS,30

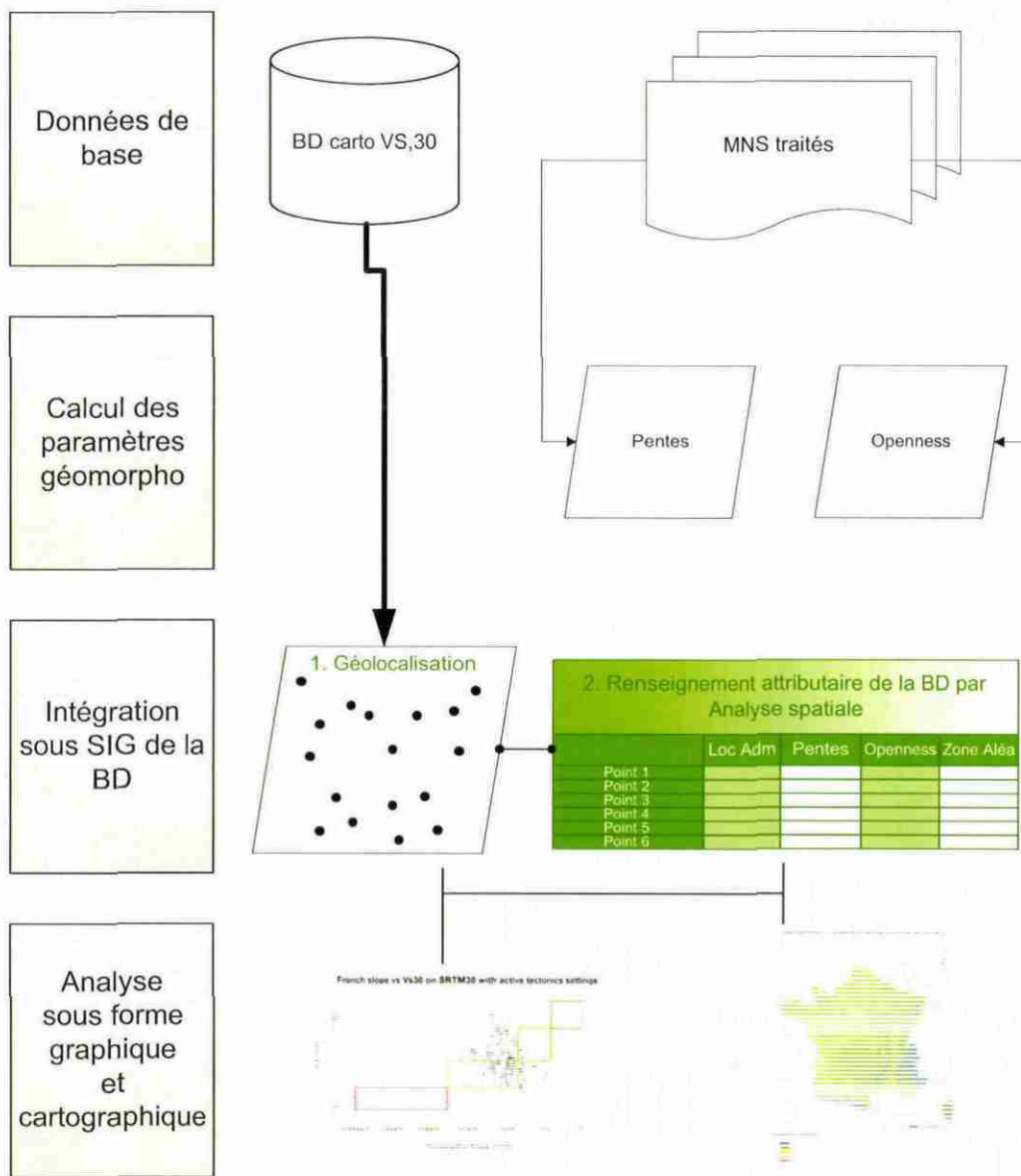


Figure 20 - Procédure d'enchaînement des géotraitements dans le logiciel SIG

La Figure 20 ci-dessus présente les différentes étapes à enchaîner pour parvenir à croiser spatialement les mesures de  $V_s,30$  avec les données morphométriques et aboutir à une mesure du degré de corrélation de ces dernières à la fois sous forme graphique et cartographique.

La **première étape** consiste à calculer pour chacun des MNS prétraités les deux paramètres morphométriques à analyser.

Nous utilisons ici le même paramètre de pente que celui utilisé par Wald et Allen (2007). Ces auteurs ont utilisé une des commandes de GMT nommée « *grdgradient* » faisant référence à l'algorithme de pente proposé par Horn (1981)<sup>3</sup>. C'est ce même algorithme qui est implémenté dans ArcGIS pour calculer la pente d'un raster.

Le calcul de l'openness n'est pas implémenté dans ArcGIS pour un traitement facile d'accès. Nous avons programmé cet algorithme dans Matlab et testé sur SRTM-30+ sur l'ensemble de la France et dans des zones restreintes avec ASTER-GDEM et SRTM 3. La gestion de la mémoire s'est révélée être un problème insurmontable pour appliquer le calcul en routine à l'ensemble des couvertures SRTM-3 et ASTER-GDEM.

La **seconde étape** consiste à importer les points de la base de données dans ArcGIS sous forme de couche de points géolocalisés (shapefile), puis, à renseigner neuf attributs de cette couche de points par des méthodes d'analyse spatiale.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	PHD	lieu	long	lat	VS30	Zmax	sourceVS	ECB	ref ID	operateur	slpSR30	slpSR3	slpAST30	cprposSR30	openegSR30	zone alea
2	1	Haut-Clocher	6.940102	48.788815	400	34	indirecte	B	1	SA	0.00	0.00	0.00			
3	2	Haut-Clocher	6.940572	48.788490	400	32	indirecte	B	1	SA	0.00	0.00	0.00			
4	3	Haut-Clocher	6.941044	48.788167	400	28	indirecte	B	1	SA	0.00	0.00	0.00			
5	4	Haut-Clocher	6.941522	48.787845	400	24	indirecte	B	1	SA	0.00	0.00	0.00			
6	5	Haut-Clocher	6.942001	48.787528	316	22	indirecte	C	1	SA	0.00	0.00	0.00			
7	6	Haut-Clocher	6.942486	48.787212	215	20	indirecte	C	1	SA	0.00	0.00	0.00			
8	7	Haut-Clocher	6.942975	48.786899	316	20	indirecte	C	1	SA	0.00	0.00	0.00			
9	8	Haut-Clocher	6.943467	48.786588	308	22	indirecte	C	1	SA	0.00	0.00	0.00			
10	9	Haut-Clocher	6.943961	48.786281	308	22	indirecte	C	1	SA	0.00	0.00	0.00			

Figure 21 - Extrait de la base de données des  $V_s,30$  au format Excel

<sup>3</sup> Ref de la commande GMT : <http://gmt.soest.hawaii.edu/gmt/doc/gmt/html/man/grdgradient.html>

### Types de mesures des différents points de la BD carto VS30

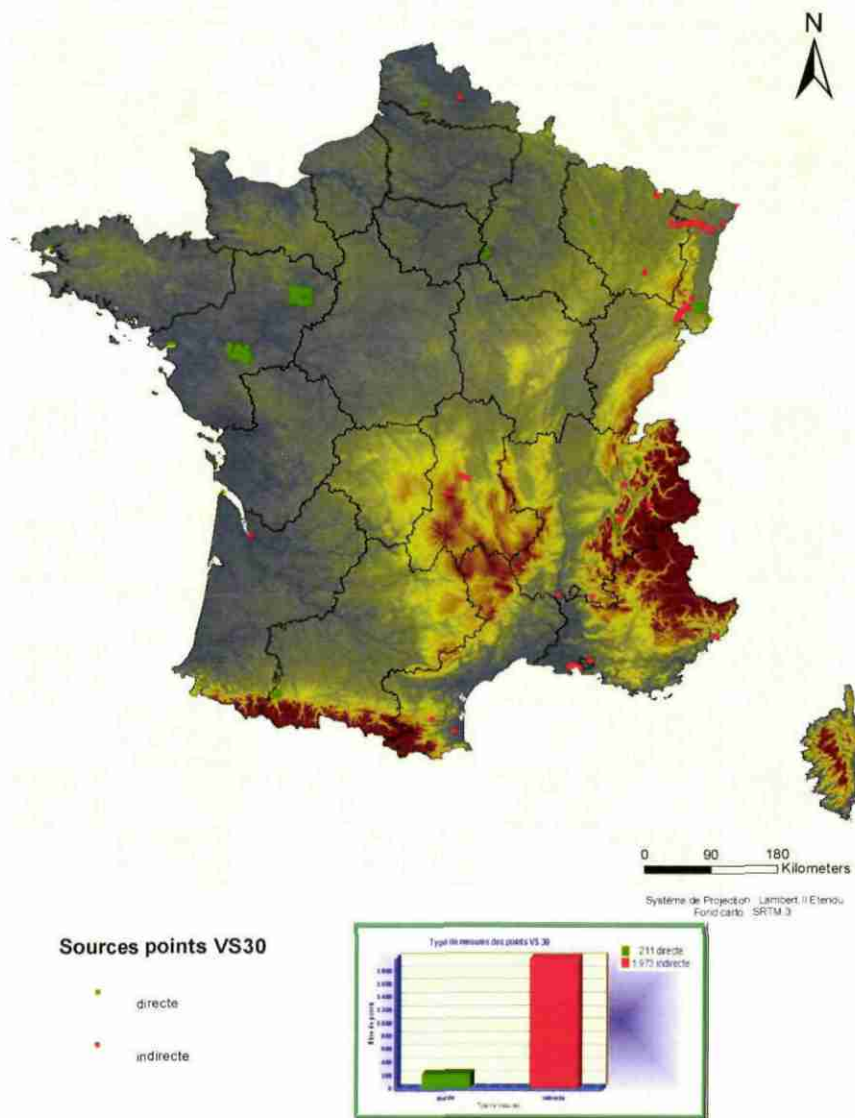


Figure 22 - Visualisation sous forme cartographique et graphique des points de mesures Vs,30 après leur importation dans le SIG. Sur cette carte a été réalisée une analyse thématique sur la proportion des types de mesures disponibles dans la Base de données.

L'étape d'intégration de la base de données dans le SIG étant réalisée à chaque nouvelle réalimentation de cette dernière, une routine a été créée sous ArcGis permettant un enchaînement semi-automatisé des différents processus de géotraitements (Renseignement pour chacun des points des attributs de localisation, valeur de pentes et d'openness au droit des points, zone aléa concernée).



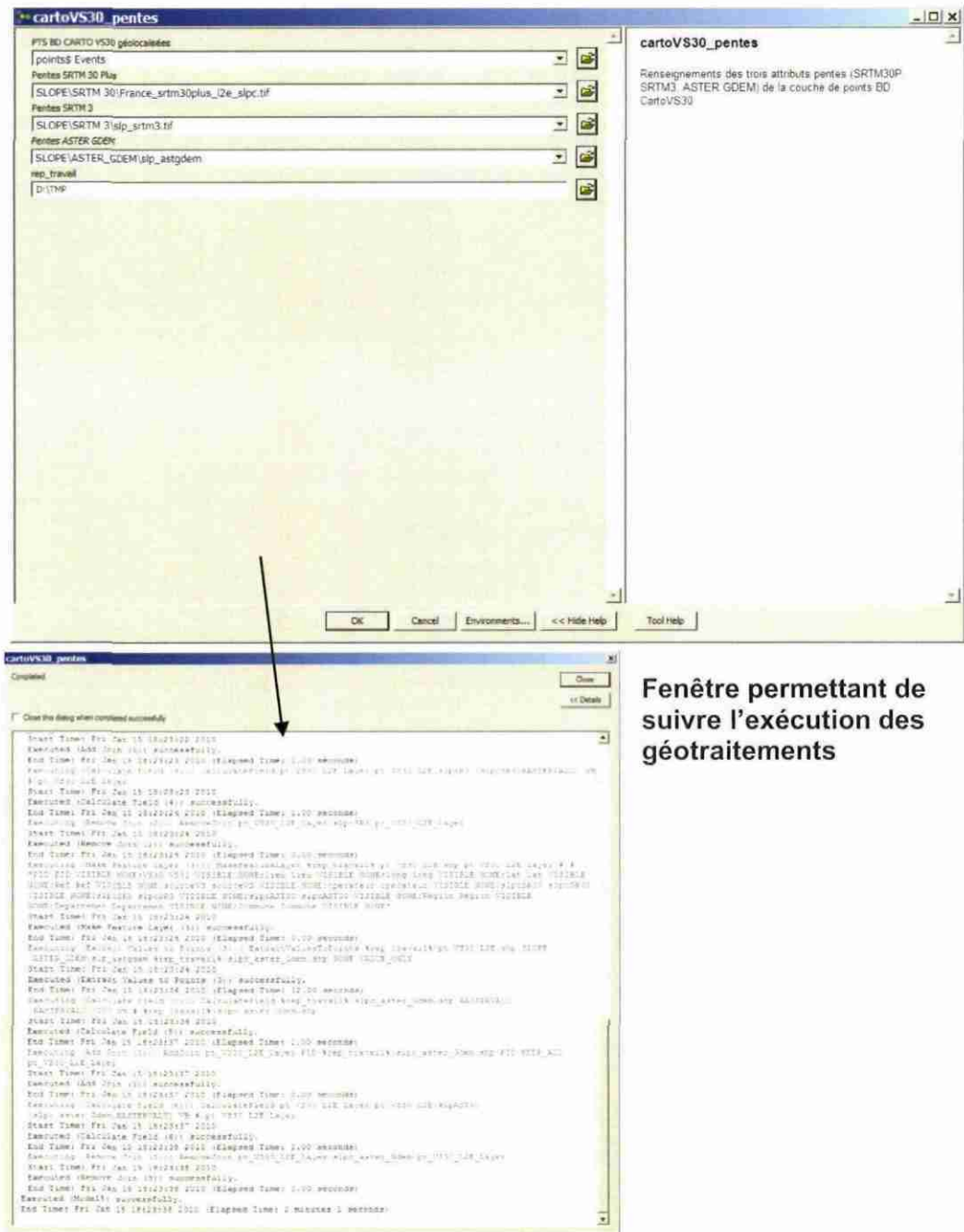


Figure 23 - Une des interfaces de l'outil permettant le renseignement de 3 attributs pentes (SRTM 30, SRTM 3, ASTER GDEM) de la couche de points Vs,30

La **troisième étape** intervient une fois que l'ensemble des données attributaires du shapefile sont complétées. Il est alors possible de corréler les données de mesures de Vs,30 avec des données morphométriques et de faire une analyse sous forme graphique et/ou cartographique des valeurs obtenues.

### **4.3. LIMITES DANS LE TRAITEMENT DES DONNEES**

#### **4.3.1. Calcul des paramètres morphométriques**

En ce qui concerne le calcul de pente sur les MNA à haute résolution spatiale, nous sommes arrivés à la limite des ressources matérielles dont nous disposions, nous avons donc été obligés d'employer une grappe de serveurs pour parvenir à obtenir un résultat.

Les grilles d'openness ont, quant à elles, été calculées sous MATLAB gérant ici les rasters, produits sous ArcGIS, comme des matrices. Le problème avec ce logiciel est qu'il stocke les valeurs des matrices dans des blocs de mémoire contigüe (non fragmentée) ce qui est très pénalisant en quantité de mémoire disponible en vue du stockage d'une matrice.

Dans notre cas, cela nous a contraints à devoir choisir des zones plus réduites pour les MNA autres que le SRTM30plus. Il aurait donc pu être intéressant de passer ce code de calcul MATLAB sous un autre langage informatique où l'espace de stockage d'une variable peut être fragmenté, par exemple le C.

#### **4.3.2. Exploitation de la base de données**

Sachant que la base de données a la possibilité d'être réalimentée avec de nouvelles mesures Vs,30, l'étape de l'intégration des points de mesures dans le SIG est à répéter autant de fois que la base de données est mise à jour. Une phase importante est à réaliser en amont de la géolocalisation de ces points qui est le contrôle de la qualité des données saisies par les opérateurs (erreurs de saisie, respect des règles du dico de données, types des différents champs...). Cette phase de contrôle permet de prévenir de toute erreur qui pourrait survenir lors du lancement des routines.

## 5. Validation et application de la méthode en France métropolitaine

Une fois développé, l'outil cartographique a été validé puis appliqué à plusieurs zones pilotes, afin de vérifier la pertinence des résultats obtenus.

### 5.1. LES ZONES PILOTES PROPOSEES

La validation a été réalisée sur des zones pour lesquelles on dispose d'une cartographie des classes de sol EC8 basée sur des données géologiques et éventuellement géophysiques et géotechniques. Ces zones ont été définies en fonction des données disponibles au BRGM et ont été validées préalablement par le MEEDDM (réunion d'avancement du 18 janvier 2010).

En ce qui concerne l'application de la méthode en France métropolitaine, deux zones ont ainsi été définies dans un premier temps :

- Le département des Bouches-du-Rhône, qui a fait l'objet d'un scénario départemental (Sedan *et al.*, 2008, BRGM/RP-55415-FR) et donc d'une cartographie des formations superficielles à partir des cartes géologiques. Cette zone permettra de tester i) la faisabilité d'une cartographie à échelle régionale et ii) la pertinence de la cartographie des sols selon les EC8 à partir des pentes.
- La commune de Lourdes qui a fait l'objet d'un microzonage sismique (Bernardie *et al.*, 2006, rapport BRGM/RP-53846-FR) et pour laquelle nous disposons d'informations précises sur les paramètres géophysiques des couches superficielles. Cette commune est particulièrement intéressante de par la présence, sur une petite surface, de topographies assez raides et de zones alluviales planes. Ce test permettra notamment de valider la méthode à échelle locale et d'en tester les limites.

Remarque : Il a été évoqué avec le MEEDDM l'application sur un site restreint (à l'échelle d'un quartier ou d'une installation industrielle par exemple). Cependant il n'a pas été possible de proposer un site. En effet pour réaliser ce type de validation il convient d'identifier un site situé dans une zone pour laquelle des données géophysiques d'une part ainsi que les données MNT ou MNS au pas de 10 m d'autre part sont disponibles. Un tel site n'ayant pu être identifié cette possibilité a été écartée et deux autres sites de validation ont été proposés :

- Le département du Haut-Rhin, qui a fait l'objet d'un projet INTERREG entre 2004 et 2006 (*Microzonage sismique de la région du Rhin Supérieur Sud*, réalisé en partenariat avec des instituts suisses et allemands, BRGM/RP-53712-FR)
- La commune de Mulhouse, qui a été traitée en détail dans le cadre du projet cité ci-dessus.

Dans ces différentes études un zonage a été réalisé en utilisant les données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles mais également en utilisant les sondages et mesures réalisées à l'occasion de ces études. Ces zonages restituent des classes de sol selon la classification indiquée par les PS92 d'une part et les EC8 d'autre part (voir 2.1).

Comme on l'a vu, les classes de sol  $S_1$ ,  $S_2$  et E définies dans les EC8 ne reposent pas exclusivement sur une définition utilisant la  $V_s,30$ . Afin d'être cohérents avec les résultats obtenus avec l'outil de cartographie automatique, qui ne permet de différencier que les classes de sol A, B, C et D (voir 2.1), les classes de sol identifiées à l'occasion de ces différentes études ont été adaptées. Ainsi les zones identifiées comme des sols de classe E ont été requalifiées de sol de classe C ou D à l'aide des données disponibles dans ces études. De même lorsque plusieurs classes de sol étaient proposées (« sol C-D » dans les zonages utilisés dans les scénarios par exemple), une classe de sol unique a été proposée à l'aide des vitesses des ondes estimées. A l'issue de ce travail d'homogénéisation, les zones pilotes sont ainsi uniquement constituées de zones de classes de sol A, B, C ou D selon la définition des EC8.

## 5.2. METHODOLOGIE DE LA VALIDATION

La méthode de validation a consisté à calculer les classes de sols prédits par la relation d'Allen et Wald (2009) et à les comparer avec les données de référence citées ci-dessus. Les limites de classe appliquées aux pentes sont celles proposées par Allen et Wald (2009) dans leur tableau I. On a retenu les seuils de pente s'appliquant aux régions tectoniquement actives puisque tous les secteurs sélectionnés pour la validation sont situés en zone d'aléa modéré à moyen.

Allen et Wald (2009) proposent des seuils de pente d'une part pour le MNS SRTM-30 et pour le MNT NED9 (à un pas de 270 m). Puisque nous ne disposons pas d'un moyen pour adapter les seuils de pente à des MNS à résolution plus fine, nous avons appliqué les seuils NED9 aux MNS SRTM-3 (à pas de 90 m) et ASTER-GDEM (à pas de 30 m). Nous verrons que cette approximation ne conduit pas à un biais systématique.

Classe de sol	Valeur numérique	Vs,30 (m/s)	Limites de pente NED9 appliquées à SRTM-3 et ASTER-GDEM (m / m)	Limites de pente SRTM-30 appliquées à SRTM-30plus (m / m)
D	1	< 180 m/s	< $3 \cdot 10^{-4}$	< $3 \cdot 10^{-4}$
C	2	[ 180 – 360 [	[ $3 \cdot 10^{-4}$ – 0.024 [	[ $3 \cdot 10^{-4}$ – 0.018 [
B	3	[ 360 – 800 [	[ 0.024 – 0.04 [	[ 0.018 – 0.14 [
A	4	≥ 800	≥ 0.04	≥ 0.14

Tableau 7 - Seuils de pentes appliqués pour reclasser automatiquement les pentes en classes EC8. Ces seuils sont tirés littéralement du tableau I de Allen et Wald (2009).

Les classes ont été converties en valeurs numériques (Tableau 7) puis différenciées numériquement pixel à pixel ( *prédit* – *référence* ). Ceci produit d'une part une carte de différences et d'autre part une table de contingence indiquant la proportion de pixels correctement classés et les pixels mal classés.

Le Tableau 8 indique les zones testées ainsi que les MNS utilisés :

Zone / Région	ASTER-GDEM	SRTM-3	SRTM-30plus
Lourdes	X	X	
Mulhouse	X	X	
Bouches du Rhône		X	X
Haut-Rhin		X	X

Tableau 8 - Synthèse des zones validées et des MNS utilisés pour la classification automatique. Au total 8 configurations ont été testées

### 5.3. RESULTATS

Huit comparaisons ont été effectuées (Tableau 8) et synthétisées sous forme de cartes, de tableau (Tableau 9) et de figures (Figure 28, Figure 29).

Sur l'ensemble de ces tableaux et figures une différence positive signifie que la classe prédite par l'algorithme est supérieure à la classe donnée par les études antérieures (classe de référence) : par exemple si une classe B est prédite et que la classe de référence est D, la différence sera indiquée comme étant de +2. Dans ce cas la classe prédite est un sol plus raide que la classe de référence et ainsi l'effet de site prédit est moins important. Ainsi cette prédiction peut se révéler être dangereuse dans le cas d'un dimensionnement car les effets de site sont sous-évalués.

Au contraire, si une classe C est prédite par l'algorithme et que la référence est un sol B on obtiendra une différence de -1. Dans ce cas la classe de sol prédite correspond à un sol moins raide que la classe de sol de référence. Les effets de site sont alors surestimés et le dimensionnement sera pénalisant.

Dans l'ensemble des tableaux et figures, les différences positives sont donc indiquées dans des tons plus ou moins rosés (dangereux) et les différences négatives sont indiquées dans des tons bleutés (pénalisant).

En carte, il apparaît généralement une erreur de classification liée à la morphologie du terrain. Ainsi dans le cas du Haut-Rhin classé avec SRTM-3 (Figure 25, Figure 26, Figure 27), environ la moitié des pixels sont identifiés dans la bonne classe EC8. Ce sont les pixels qui se situent sur les terrasses du Rhin et dans la vallée de l'Ill (Figure 27). La pente dans la plaine alluviale du Rhin amène à classer cette zone en C alors que dans la réalité elle est classée en sols de type B. Cela est dû au fait que l'effet de site constaté sur la zone n'est pas lié aux formations les plus superficielles mais à des remplissages Tertiaire sous-jacents. Il s'agit donc d'un cas particulier non soluble par une classification automatique. Par ailleurs, la prédiction des types de sols sur le massif des Vosges est plus nuancée que la carte de référence (Figure 26).

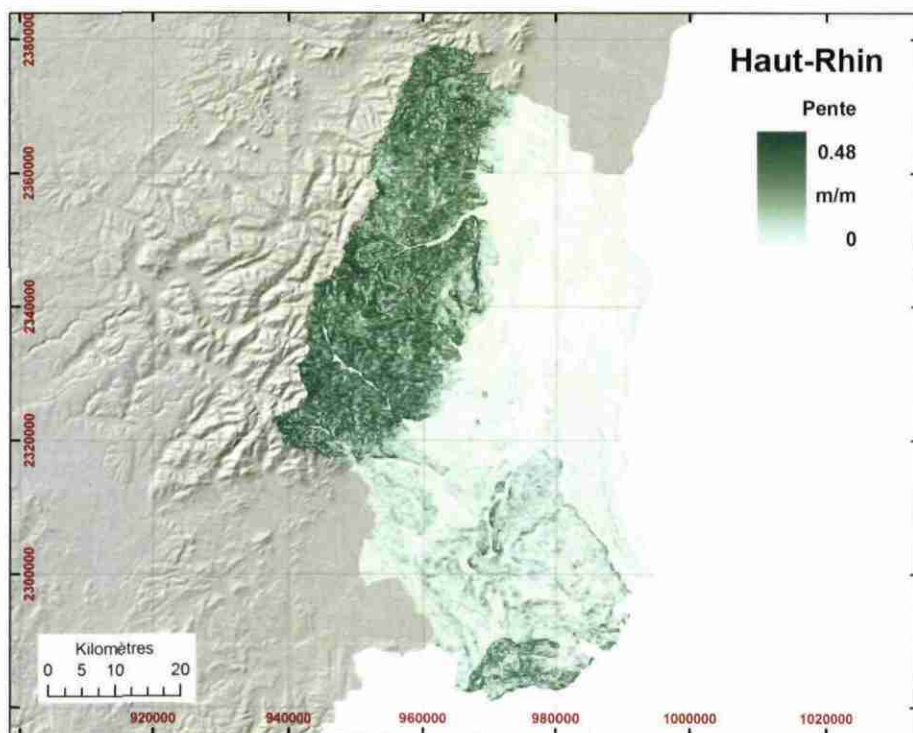


Figure 24 - Haut-Rhin : Carte des pentes calculées sur SRTM-3.

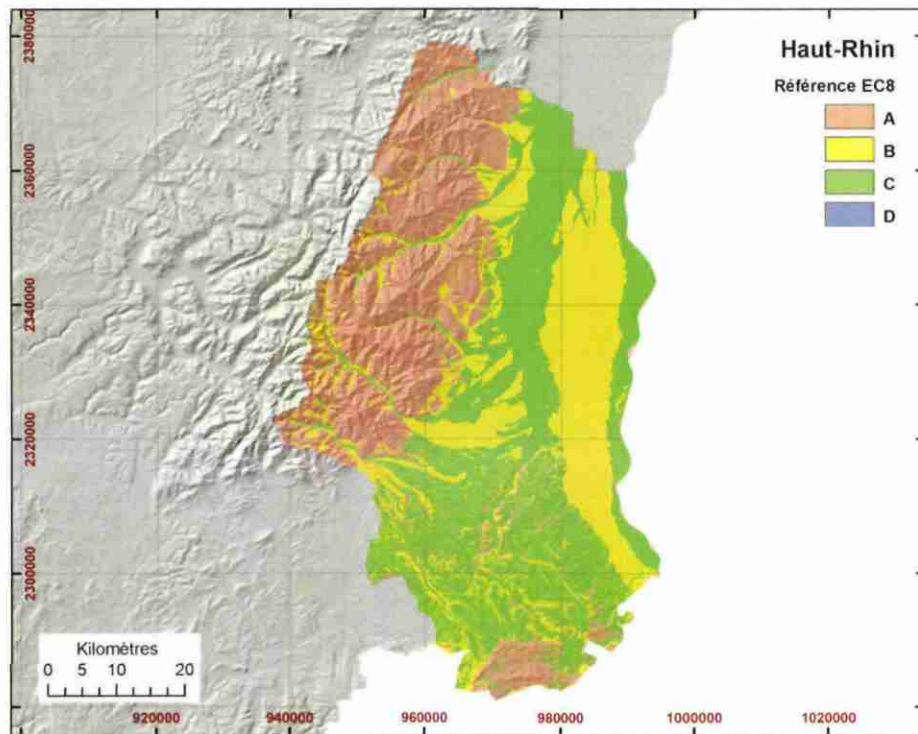


Figure 25 - Haut-Rhin : Carte de référence des sols EC8 (Roullé et al., 2007).

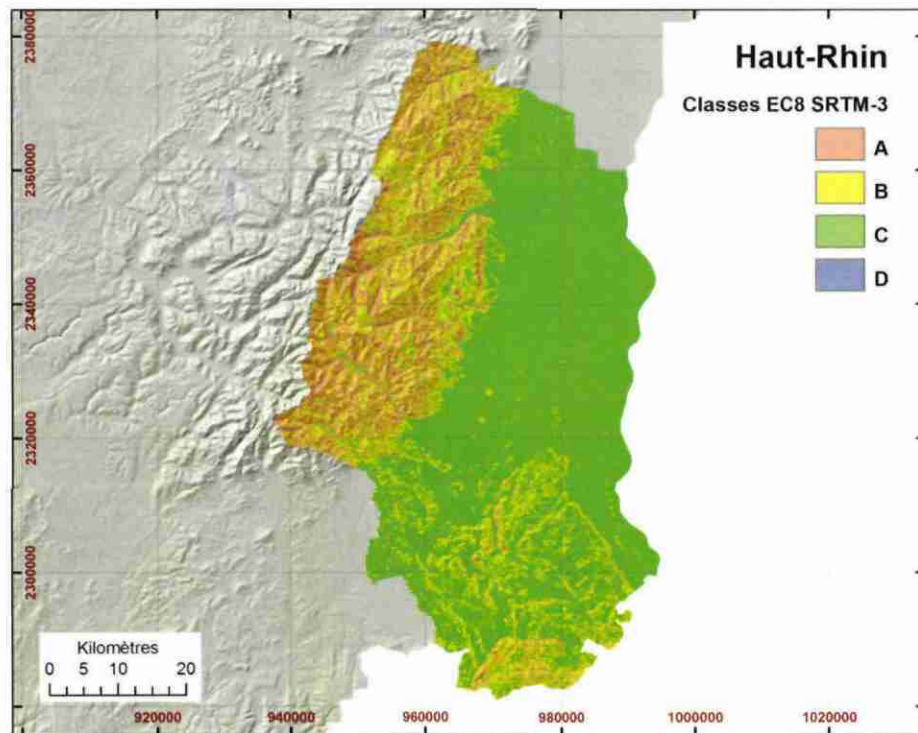


Figure 26 - Haut-Rhin : Classification automatique des sols EC8 sur SRTM-3 par la méthode de Allen et Wald (2009).

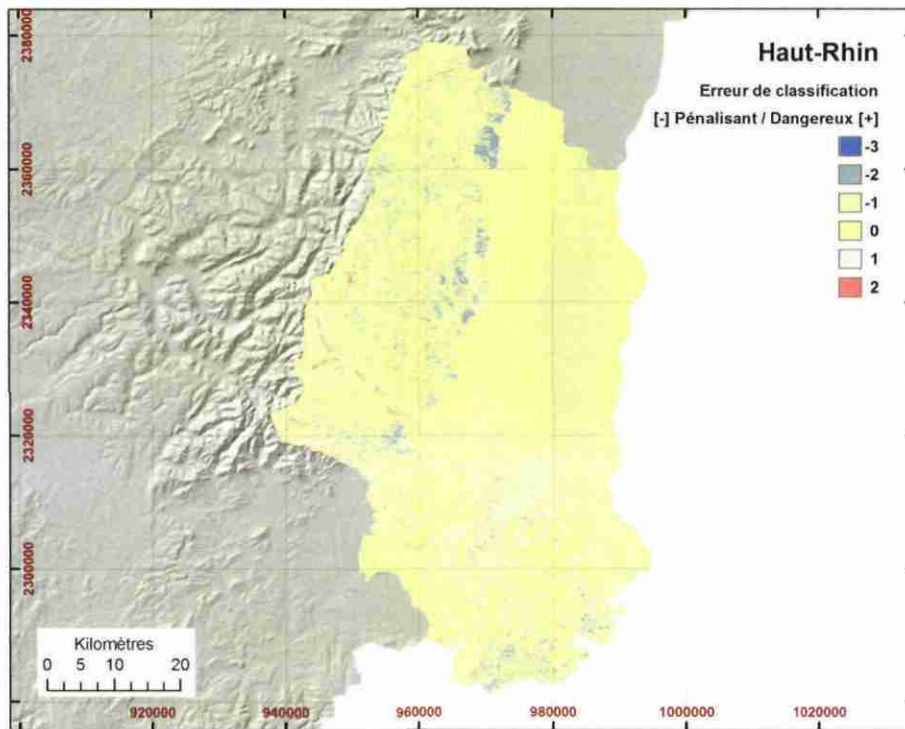


Figure 27 - Haut-Rhin : Erreurs de classification des sols EC8 induite par l'application de la méthode automatique d'Allen et Wald (2009).

Les résultats obtenus pour les huit comparaisons effectuées (Tableau 8) sont synthétisées dans le Tableau 9 et sur les Figure 28 et Figure 29.

Le Tableau 8 indique que seules deux classifications sur huit (Lourdes sur ASTER-GDEM et Mulhouse sur SRTM-3) ont *plus de la moitié* des pixels correctement classés. Par ailleurs, dans tous les cas sauf un (Lourdes SRTM-3) la classe la plus fréquente est fautive en décalage au maximum d'une classe EC8. Les cas des Bouches du Rhône sur SRTM-3 et SRTM-30Plus montrent un biais systématique de -1 (soit un décalage d'une classe EC8 vers les sols mous). Dans les deux cas, presque la moitié des pixels appartenant à la classe -1, ceci indique que la vitesse moyenne prédite est plus faible que dans la réalité. Cela suggère qu'il faudrait abaisser les seuils de pente pour cette région. Enfin, pour les deux régions utilisant la classification automatique sur SRTM-30plus (Bouches de Rhône et Haut-Rhin), la majorité des pixels ont également une classe sous-évaluée.



[Prédit - observé]	-3	-2	-1	0	1	2	3
Lourdes ASTER-GDEM	0	1	9	<b>66</b>	20	5	0
Mulhouse ASTER-GDEM	0	1	9	32	<b>42</b>	15	1
Bouches du Rhône SRTM-3	0	37	<b>49</b>	13	1	0	0
Haut-Rhin SRTM3	0	5	40	<b>48</b>	6	1	0
Lourdes SRTM3	0	0	7	13	25	<b>36</b>	18
Mulhouse SRTM3	0	2	30	<b>54</b>	13	1	0
Haut- Rhin SRTM30	0	1	<b>47</b>	43	9	0	0
Bouches du Rhône_ SRTM30	0	18	<b>63</b>	17	3	0	0

Tableau 9 - Synthèse des comparaisons de classification EC8. Les chiffres expriment le pourcentage de pixels pour chaque classe d'erreur. Une erreur de 0 indique que la classe EC8 prédite est conforme à la réalité. Une classe d'erreur négative (bleue) traduit une vitesse moyenne prédite plus faible que la réalité. Une erreur positive (rouge) traduit une vitesse moyenne prédite plus importante qu'en réalité. Les valeurs maximales sont indiquées en gras.

Une autre manière de représenter les erreurs de classifications est de ne pas tenir compte du signe de l'erreur mais uniquement de son amplitude. On s'aperçoit ainsi qu'au moins 82% des pixels sont correctement classés à une classe près dans six classifications sur huit (Tableau 10). La plus mauvaise classification est clairement celle de Lourdes avec le MNS SRTM-3.

Zone/ Erreur de classification	0	1	2	3
Lourdes ASTER-GDEM	66	95	100	100
Mulhouse ASTER-GDEM	32	83	98	100
Bouches du Rhône SRTM-3	13	63	100	100
Haut-Rhin SRTM-3	48	94	100	100
Lourdes SRTM-3	13	46	82	100
Mulhouse SRTM-3	54	97	100	100
Bouches du Rhône SRTM-30+	17	82	100	100
Haut-Rhin SRTM-30+	43	99	100	100

Tableau 10 - Synthèse des erreurs de classification EC8 en pourcentages cumulés. Les cellules représentent le pourcentage de pixels en fonction des erreurs de classe. Pour Lourdes sur ASTER-GDEM par exemple, 66% des pixels sont classés correctement (0 erreur), 95% des pixels sont contenus dans l'intervalle de +/-1 classe d'erreur et 100% à 2 classes d'erreur. Le plus mauvais classement automatique est celui de Lourdes sur SRTM-3 et le meilleur est celui de Lourdes sur ASTER-GDEM.

Enfin, on peut représenter graphiquement les résultats soit sous l'angle de la région analysée en comparant les MNS (Figure 28) soit sous l'angle du MNS utilisé en comparant les régions (Figure 29).

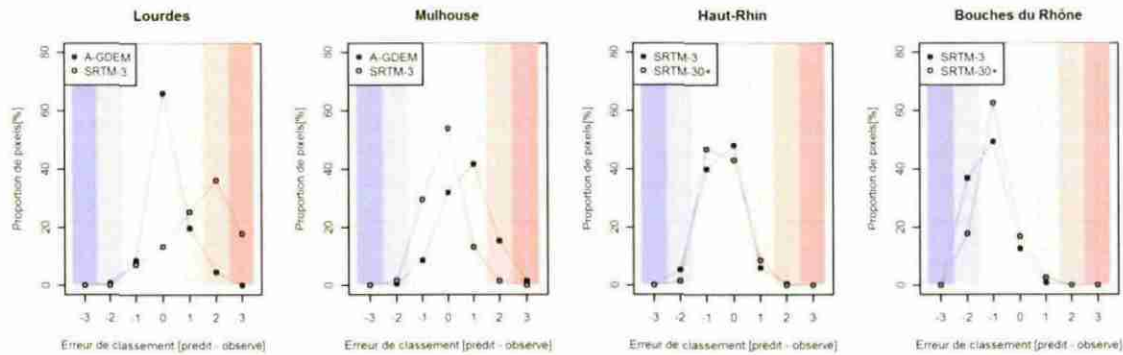


Figure 28 - Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparées par région. Une courbe centrée sur 0 indique que la majorité des pixels sont correctement classés. Une valeur négative indique une prédiction de Vs,30 plus lente que la réalité, ce qui est pénalisant. Une valeur positive indique une prédiction de Vs,30 plus rapide que la réalité, ce qui est dangereux pour la construction.

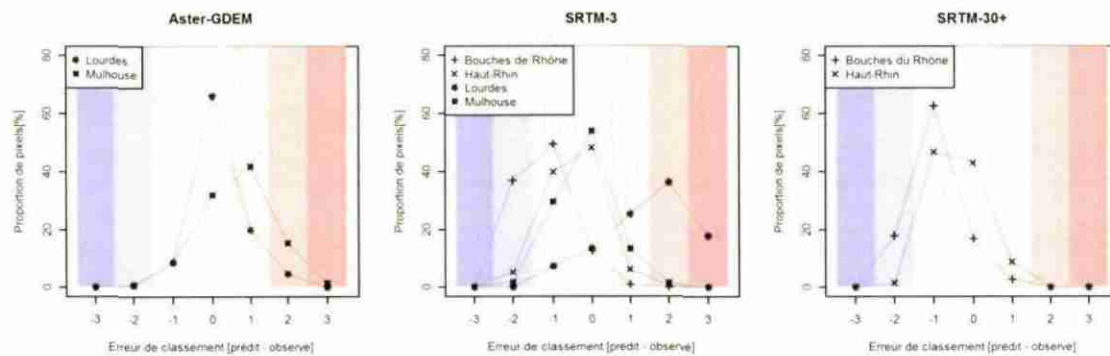


Figure 29 - Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparée par type de MNS. Une courbe centrée sur 0 indique que la majorité des pixels sont correctement classés. Une valeur négative indique une prédiction de Vs,30 plus lente que la réalité, ce qui est pénalisant. Une valeur positive indique une prédiction de Vs,30 plus rapide que la réalité, ce qui est dangereux pour la construction.

#### 5.4. SYNTHÈSE DE CES VALIDATIONS

Il ressort de l'analyse des résultats qu'aucune classification automatique (issues du choix de l'un des 3 MNS utilisés) n'est parfaite. Le choix d'un MNS particulier a permis d'obtenir de bons résultats sur certaine(s) région(s) mais pas sur d'autres. Aucune région n'affiche systématiquement un bon score quel que soit le MNS utilisé. Une synthèse de ces résultats est présentée sur le Tableau 11 ci-dessous. Les résultats biaisés sont indiqués ainsi que le sens du biais constaté (vers les valeurs positives ou négatives).

Zone \ MNS	ASTER-GDEM	SRTM-3	SRTM-30plus
Lourdes	<b>Bon</b>	Biaisé -	
Mulhouse	<b>Biaisé +</b>	<b>Bon</b>	
Bouches du Rhône		<b>Biaisé -</b>	<b>Biaisé -</b>
Haut-Rhin		<b>Bon</b>	<b>Biaisé -</b>

Tableau 11 - Synthèse des zones validées et des MNS utilisés pour la classification automatique. Au total 8 configurations ont été testées

On remarque cependant qu'on obtient des résultats totalement aberrants pour aucune des configurations testées. En effet les résultats obtenus sont globalement notoirement tous meilleurs que ceux qui auraient par exemple été obtenus avec une répartition totalement aléatoire des classes de sols prédites, à l'exception d'un cas (Lourdes avec SRTM-3). Ceci tend à démontrer que même si tous les processus physiques qui sont en jeu en arrière-plan de cette méthodologie ne sont pas bien connus (voir §6) une corrélation peut exister – globalement – entre les pentes calculées et les classes de sols prédites, dans certains cas.

Si on observe les résultats plus en détail on peut conclure que les modèles qui sembleraient *a priori* les plus adaptés pour une zone donnée ne donnent pas forcément les meilleurs résultats. On pourrait ainsi s'attendre à ce qu'un modèle fin (type ASTER-GDEM) donne des meilleurs résultats qu'un modèle plus grossier (comme SRTM-3) pour une zone restreinte comme une commune. On note cependant que dans l'exemple de la ville de Mulhouse les résultats sont paradoxalement meilleurs avec le modèle SRTM-3 qu'avec ASTER-GDEM. Au contraire, à l'échelle d'un département comme le Haut-Rhin le modèle le moins fin (SRTM-30plus) donne des résultats moins pertinents qu'un modèle plus fin (SRTM-3). Mais ce modèle SRTM-3 ne donne pas les meilleurs résultats dans toutes les configurations testées car les résultats les moins convaincants sont par ailleurs obtenus avec ce modèle pour la ville de Lourdes.

Ces observations montrent qu'il semble délicat d'appliquer « en aveugle » un MNS donné pour une zone donnée (département ou ville par exemple). En effet les résultats indiquent qu'on ne peut prédire à l'avance quel est le MNS qui sera le plus adapté. Le contexte sismotectonique général (zone au relief tourmenté ou au relief globalement calme par exemple) semble avoir une influence mais certains autres facteurs rentrent très certainement également en ligne de compte.

**Au final cette méthode ne semble donc pas applicable telle qu'elle est présentée par Wald et Allen (avec un unique MNS) sur le territoire français.**



## 6. Conclusions et perspectives

### 6.1. CONCLUSIONS

L'étude menée dans le cadre de ce projet, et en particulier les tests de validation réalisés, permettent d'établir les conclusions suivantes :

- Il s'est révélé impossible de corrélérer les données françaises de  $V_{s,30}$  (métropole) avec les deux paramètres morphométriques testés : pente et openness ;
- Des routines pour calculer « en automatique », pour différents MNS (ASTER-GDEM, SRTM-3, SRTM-30plus), des prédictions de classes de sol, selon les corrélations établies par Wald et Allen, ont été programmées ;
- Les résultats obtenus pour 4 zones-tests (2 communes : Mulhouse et Lourdes et deux départements : Haut-Rhin et Bouches-du-Rhône) en utilisant les corrélations établies par Wald et Allen pour un contexte de sismicité « actif », sont assez variables selon le MNS choisi : pour la même zone (par exemple Lourdes) les résultats peuvent être relativement convainquants avec un MNS (ASTER-GDEM) mais très biaisés avec un autre (SRTM-3) ; la méthode de Wald et Allen appliquée de façon automatique n'est donc pas fiable ;
- La méthodologie proposée par Wald et Allen et programmée dans le cadre de cette étude peut cependant permettre de classer correctement les sols (selon les classes proposées par les EC8) pour certaines zones et pour peu qu'on choisisse le MNS le plus adapté (cf. exemple de Lourdes avec ASTER-GDEM) ;
- L'ensemble des phénomènes physiques en jeu ne sont cependant pas totalement connus et cette méthodologie ressemble encore assez à une « boîte noire » qu'il convient de manier avec précaution. De même il semble impossible à ce stade de développer un outil en ligne qui calculerait directement les classes de sol à partir d'un MNS donné comme ce qui est proposé par Wald et Allen sur le site de l'USGS. En effet comme le choix du MNS semble être très important, selon les zones étudiées les résultats pourraient se révéler biaisés voire aberrants.
- Ce type de méthode donne des informations de « niveau 0 ». Comme indiqué par les auteurs eux-mêmes, cette méthodologie est donc adaptée pour des études globales à une grande échelle et/ou pour des zones pour lesquelles on ne dispose d'aucune données (carte géologique, sondages, mesures géophysiques, ...). Néanmoins, il convient de noter que pour des études fines et/ou locales, il demeure indispensable de réaliser des investigations détaillées pour établir un zonage des classes de sol plutôt que d'utiliser ce type

de méthodologie qui, à l'échelle locale d'une ville ou même d'un département, peut donner des résultats très biaisés, qui peuvent aller parfois dans le sens de moins de sécurité (classes de sol établies plus raides que la réalité et donc sous-estimation des effets de site, cf. test réalisé à Mulhouse avec ASTER-GDEM) ;

- Etant donné que cette méthodologie est actuellement utilisée de plus en plus dans le monde et en Europe pour des études globales d'aléa (on peut citer les projets européens SHARE, NERIES ou le projet GEM, Global Earthquake Model), il est nécessaire de bien en connaître les limites dont certaines ont été relevées par la présente étude.

## 6.2. PERSPECTIVES

Cette méthodologie étant prometteuse et de plus en plus utilisée dans le monde de la sismologie appliquée, il nous a semblé important de proposer plusieurs pistes de recherche qui pourraient permettre de mieux contraindre les modèles utilisés et de proposer éventuellement une méthode mieux adaptée au contexte national. Ces différentes possibilités d'approfondissement sont mentionnées ci-dessous :

- Afin de d'établir des corrélations fiables entre  $V_{s,30}$  (ou autre proxy de classe de sol) et paramètre morphométrique, il est nécessaire de compiler plus de données de  $V_{s,30}$  pour la France métropolitaine et également d'uniformiser le processus de calcul de ce  $V_{s,30}$  à partir de mesures directes de vitesses d'ondes de cisaillement telles les données de SASW ;
- Pour établir des corrélations pour des zones plus ou moins actives il conviendrait de classer les points selon qu'ils se trouvent en zone de tectonique active et passive, comme ce qui a été réalisé par Wald et Allen. Ceci est en cours de réalisation dans le projet européen SHARE par exemple. On peut également envisager de définir plus de deux zones ou de classer les données selon un autre paramètre pouvant représenter les processus physiques en jeu. A l'issue de ce travail les seuils de pentes doivent ainsi être adaptés au(x) contexte(s) sismotectonique(s) français métropolitain afin de définir pour la métropole des « boîtes » analogues à celles établies par Wald et Allen ;
- Des limites importantes d'utilisation de la méthode dues au choix des MNS sont apparues. Il est noté à l'issue des validations réalisées que les seuils de pentes sont en fait sans doute à adapter pour les différents MNS choisis. Des corrélations devront ainsi être établies en amont pour plusieurs MNS à des échelles plus ou moins fines ;
- Le paramètre morphométrique d'openness a montré qu'il était peu sensible à la  $V_{s,30}$ . Cette faible sensibilité résulte au moins en partie de son mode de calcul. L'openness traduit la moyenne des gradients maximum ou minimum autour d'un point. Si on prenait une métrique plus sensible que la moyenne aux valeurs extrêmes, telle que le maximum ou le minimum des gradients, l'indicateur montrerait peut-être davantage de sensibilité à la  $V_{s,30}$ .

- D'une façon générale, il apparaît nécessaire d'essayer de caractériser en amont les zones où des effets de site sont possibles, comme les remplissages sédimentaires, avec des paramètres géomorphologiques quantitatifs. Ceci pourrait être réalisé en analysant par exemple les processus physiques mis en œuvre pour la formation de ces zones de remplissage sédimentaire ;
- Le travail présenté au point précédent pourrait amener à utiliser des paramètres morphométriques mieux corrélés aux classes de sol. On peut citer par exemple le paramètre « surface texture » décrit par Iwahashi *et al.* (2010) qui semble être bien corrélé aux valeurs de  $V_{s,30}$  pour un grand nombre de site au Japon ;
- Comme il est très probable qu'un seul paramètre morphométrique ne pourra permettre d'établir des corrélations satisfaisantes avec le  $V_{s,30}$  (ou un autre proxy de la classe de sol), une piste serait l'utilisation de critères multi-paramètres (cf. Iwahashi *et al.*, 2010, ou les travaux réalisés dans le cadre du projet européen NERIES en 2007). La pondération à adopter pour les différents paramètres devra être déterminée par exemple à partir de tests sur des zones dans des contextes différents ;
- Le développement d'une « analyse emboîtée » serait ainsi sans doute intéressant : la pente pourrait être utilisée dans un premier temps uniquement pour définir les zones à effets de site potentiels et les zones sans effets de site (rocher). Ensuite, une analyse sur les zones identifiées comme étant « à effet de site possible » pourrait être menée en utilisant des paramètres à définir selon les caractéristiques de formation des roches (on peut citer par exemple une carte du régolithe à l'échelle du millionième réalisée par le BRGM) ;
- Ces propositions supposent que l'on reste sur l'hypothèse d'une corrélation simple entre le paramètre  $V_{s,30}$  (lui-même proxy des effets de site lithologiques) et un paramètre morphométrique (pente ou autre). Une autre réflexion plus amont est peut-être nécessaire pour aborder le problème afin de mieux connaître les processus de genèse des formations à effet de site afin de définir des proxys plus « physiques » pour définir ces effets de site ;
- Ainsi, une réflexion plus large sur l'utilisation d'autres proxys que le  $V_{s,30}$  pour estimer les effets de site serait à mener, de nombreuses études montrant que le proxy  $V_{s,30}$  n'est pas adapté pour de nombreux effets de site particuliers (remplissages profonds, prise en compte des effets 2D ou 3D, ...)

Toutes ces pistes de recherche pourront être développées dans le cadre d'autres projets d'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle régionale et globale en cours (on peut citer par exemple le projet INTERREG SisPyr sur la zone Pyrénées ou le projet SHARE pour l'Europe).





## 7. Bibliographie

**Allen T. I. and Wald D. J.** (2009) - On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 2A, pp. 935–943.

**Bernardie S., Delpont G., Dominique P., Le Roy S., Negulescu C., Roullé A.** (2006) – Microzonage sismique de Lourdes. 235 p., 87 fig., 35 tabl., 12 pl. hors texte., Rapport BRGM/RP-53846-FR.

**Bitri A., Lebert F., Richalet G.** (2003) - Evaluation de répartition en profondeur de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement par la méthode SASW - Mise en œuvre dans l'agglomération grenobloise. Rapport BRGM/RP-52716-FR.

**Boore D. M.** (2004) - Estimating Vs(30) (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depths  $\leq$  30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 2, pp. 591–597.

**BSSC** (1997) - NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, Part 1 — Provisions. 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.: 337 pp.

**Douglas, J. Gehl, P., Bonilla, L.F., Scotti, O., Renier, J., Duval, A.M. and Bertrand, E.** (2009) - Making the most of available site information for empirical ground-motion prediction, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), 1502-1520, doi: 10.1785/0120080075.

**Fabriol H., Bitri A., Lebrun B., Baltassat J.M.** (1998) - Application de la méthode SASW (Analyse Spectrale des Ondes de Surface) dans le district d'Annecy - Rapport BRGM/R 40392.

**Gallant, J.C., Wilson, J.P.,** (2000) - Primary topographic attribute, in: Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 51-85.

**Groupe de travail RAP : caractérisation géotechnique des stations du RAP** (2007) – Reconnaissance géotechnique des stations du RAP, 176 pp.

**Horn, B.K.P.** (1981) - Hill-Shading and the Reflectance Map, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 69, No. 1, January 1981, pp. 14-47. (<http://people.csail.mit.edu/bkph/papers/Hill-Shading.pdf>)

**Iwahashi J., Kamiya I., Matsuoka M.** (2010) - Regression analysis of Vs30 using topographic attributes from a 50-m DEM, *Geomorphology* 117 (2010) 202–205.

**Lebert, F.,** (2002)- Mesures de SASW à Chemillé- communication personnelle.

**Lebert F., Mathieu F., Richalet G.** (2004) - Caractérisation des formations géologiques superficielles par sismique réfraction et SASW dans la Sarthe (Carte géologique à 1/50 000 du Mans) - Rapport BRGM/RP-53571-FR.

**Network of Research Infrastructures for European Seismology - NERIES** (2007) - Soil Conditions from Topographic Slope, *workpackage JRA-3*, sous la direction de NORSAR et avec la collaboration du Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute.

**NF P 06-013** (1995) – Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. *Paris, norme française*, AFNOR.

**NF En 1998-1** (2005) – Eurocodes 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (P06-030-1), AFNOR.

**Roullé A., Bitri A., Mathieu F., Richalet G.** (2007) - Microzonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le BRGM. Rapport BRGM/RP-53712-FR.

**Sedan O., Terrier M., Negulescu C., Winter T., Douglas J., Roullé A., Rohmer J., S. Bès De Berc, C., De Martin F., Arnal C., Dewez T., Fontaine M.** (2008) - Scénario départemental de risque sismique - Méthodologie et processus de réalisation. *Rapport BRGM/RP-55415-FR*, 455p, 96 fig., 45 tabl., 25 annexes

**Wald D. J. and Allen T. I.** (2007) - Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1379–1395

**Yokoyama R., Shirasawa M., Pike R. J.** (2002) – Visualizing Topography by *Openness* : A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, n°3, pp. 257-265.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
**Service Risques Naturels et Sécurité du stockage de CO2**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34