

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

Julien Rey, Agathe Roulle, Thomas Dewez, Audrey Hohmann, Samuel Auclair, Anne Lemoine

▶ **To cite this version:**

Julien Rey, Agathe Roulle, Thomas Dewez, Audrey Hohmann, Samuel Auclair, et al.. Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de surface. 8ème Colloque AFPS, Vers une maîtrise durable du risque sismique, Sep 2011, Champs-sur-Marne, France. 10 p. hal-00613246

HAL Id: hal-00613246
https://brgm.hal.science/hal-00613246

Submitted on 13 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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

Julien Rey* — Agathe Roullé* — Thomas Dewez* — Audrey Hohmann* — Samuel Auclair* — Anne Lemoine*

** Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)*

Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO2

3, avenue Claude Guillemin BP 36009 45060 Orléans Cedex 2

j.rey@brgm.fr

RÉSUMÉ. *L'objectif de cette étude est de tester une méthode de cartographie automatique simplifiée des classes de sol d'après une adaptation au contexte français (métropole) des travaux de Wald et Allen (2007, 2009). Deux étapes ont été réalisées : i) test de la corrélation entre Vs,30 et un paramètre morphométrique issu de Modèles Numériques de Surface (MNS) pour validation en France ; ii) application de la méthode de Wald et Allen sur plusieurs contextes connus. Le travail a été réalisé en utilisant plusieurs MNS (ASTER-GDEM, SRTM-3, SRTM-30plus) et après constitution d'une base de données de profils de vitesses d'ondes S. Les résultats ne montrent aucune corrélation entre les données de Vs,30 et la pente ou l'openness sur la France métropolitaine, quel que soit le MNS considéré. Par ailleurs, pour les quatre zones pilotes considérées, les classes de sol prédites en appliquant la méthodologie proposée par Wald et Allen ne sont correctes qu'à 50%. Les résultats sont très variables selon le MNS choisi et la région étudiée, ce qui rend la méthode peu fiable pour une application en zone métropolitaine. Ce type de méthode peut être utile pour des études globales et/ou pour des zones pour lesquelles on ne dispose d'aucune donnée afin d'établir un zonage préliminaire des classes de sol. Cependant, pour des études fines et/ou locales, il est indispensable de réaliser des investigations détaillées (mesures in situ) pour établir un zonage des classes de sol. Ce type de méthodologie étant de plus en plus utilisé, différentes possibilités d'amélioration sont proposées.*

ABSTRACT. *The objective of this study is to test an automatic method produce maps of site classes using an adaptation to the French context of the approach of Wald & Allen (2007, 2009). Two steps were undertaken: i) test of the correlation between Vs30 and a morphometric parameter coming from a Digital Elevation Model (DEM) for France for validation purposes; and ii) application of the Wald & Allen method to several case studies. The work was realized using several DEMs (ASTER-GDEM, SRTM-3 and SRTM-30plus) and a database of shear-wave velocity profiles. The results show no correlation between Vs30 and the slope or the openness for sites in metropolitan France whichever DEM is used. In addition, for the four case studies site classes predicted by applying the Wald & Allen methodology is correct only half the time. The results are very variable according to the chosen DEM and the region to which the method is applied, which implies that it is unreliable method for France. This methodology could be useful for global studies and\or for previously uninvestigated zones in order establish a preliminary cartography of the site classes. However, for site-specific and local studies, it is indispensable to undertake detailed investigations (in particular field measurements) to establish a map of site classes. Because this methodology is increasingly used, various possibilities for its improvement are also proposed in the conclusion of this study.*

MOTS-CLÉS : *Vs30 , effets de site, Eurocode 8, Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain, classe de sol, France, Lourdes, Mulhouse, Haut-Rhin, Bouches-du-Rhône.*

KEYWORDS: *Vs,30, Eurocode 8, Digital Elevation Model, France, Lourdes, Mulhouse, Haut-Rhin, Bouches-du-Rhône .*

1. Introduction

La géologie de surface (entre 0 et 100 m de profondeur généralement) peut modifier localement et de façon importante les mouvements sismiques en surface. En particulier, la présence de sols meubles surmontant un substratum sismique peut induire une amplification du mouvement du sol lors d'un séisme : on parle alors d'effet de site lithologique. Dans les normes parasismiques européennes (Eurocode 8 ou EC8), ce phénomène est pris en compte via des classes de sols auxquelles sont associés des coefficients d'amplification S. En France, ces classes de sol de la nouvelle réglementation publiée fin 2010 sont définies selon les EC8 et sont donc basées à la fois sur le profil stratigraphique et sur d'autres paramètres physiques tel que le paramètre appelé Vs,30 : vitesse moyenne des ondes S dans les 30 premiers mètres[1]. La cartographie classique de ces classes de sol à l'échelle locale (microzonages sismiques, PPR sismique) ou régionale (scénarios sismiques) est coûteuse car elle nécessite souvent des moyens d'investigations géophysiques. Elle ne peut donc pas être mise en œuvre sur l'ensemble du territoire français, en particulier pour les zones d'aléa sismique faible à modéré. Dans ce contexte, l'utilisation d'une cartographie automatique des classes de sol à partir de données morphométriques (et donc de données facilement accessibles via les Modèles Numériques de Surface) et utilisable sur de grandes surfaces, à l'échelle régionale, semble particulièrement intéressante.

L'objectif de cette étude est de tester une méthodologie de cartographie simplifiée des effets de site basée sur l'utilisation des Vs,30 d'après une adaptation au contexte français (métropole) des travaux de Wald et Allen (2007, 2009) 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 Vs,30 (et par conséquent la classe de sol équivalente) 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).

2. Présentation de la méthode de Wald et Allen et application à la France métropolitaine

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).

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 du MNS de travail ;
- 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) ;
- Assignation du paramètre Vs,30 à chaque cellule de la grille de travail à partir de la corrélation pente-Vs,30 choisie ;
- Estimation du coefficient d'amplification empirique du mouvement du sol à partir des classes de sol réglementaires NEHRP.

---

[1] Cette vitesse moyenne des ondes de cisaillement Vs,30 est définie tel que : $V_{s,30} = \dfrac{30}{\sum_{i=1,N} \dfrac{h_i}{V_i}}$

Pour appliquer cette méthode au territoire français, il est nécessaire d'établir les correspondances entre classes de sol NEHRP et EC8. Ces deux types de classes de sol sont basées sur les mêmes paramètres physiques, et en particulier la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de sol (Vs,30). La correspondance entre ces classes de sol et les classes de sol des EC8 (réglementaires en France depuis le 1er mai 2011) est donc simple. Elle est rappelée 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	} non utilisées
		E	

Tableau 1. *Correspondance proposée entre les classes de sol utilisées par Wald et Allen (NEHRP) et les classes utilisées dans la présente étude (EC8)*

Il est à noter que les classes S1, S2 et E n'ont pas été utilisées dans ce travail car elles ne sont pas basées uniquement sur le critère Vs,30. Leur intégration dans la classification automatique est beaucoup trop complexe à ce stade du travail.

Pour l'application de cette méthode à la France métropolitaine, plusieurs tests ont été effectués :

- Choix du MNS ou MNT le plus adapté ;
- Choix du paramètre morphométrique de référence (pente ou openness) ;
- Construction d'une corrélation paramètre morphométrique-Vs,30 à partir de données françaises.

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

3.1. Choix du modèle numérique de terrain ou de surface

La France métropolitaine dans son ensemble est couverte par plusieurs types de Modèle Numérique d'Altitude : SRTM30plus, SRTM3, BD Alti de l'IGN et ASTER-GDEM (Tableau 2).

Désignation du MNA	Type de MNA	Résolution spatiale	Pente limite mesurable	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	http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html
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	http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Elevation_Products
BD alti IGN	MNT	50 m	2.5%	France	NTF Clarke 1880 IGN/ Lambert 2 étendu	Payant	égal à No data	IGN	http://professionnels.ign.fr
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)	http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp

Tableau 2. *Synthèse des modèles numériques d'altitude (MNA) disponibles pour la métropole (MNS = Modèle Numérique de Surface ; MNT = Modèle Numérique de Terrain)*

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 la BD Alti a été écartée de l'analyse et seules les trois sources suivantes de MNS sont utilisées : 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 sont comparées sur la figure ci-dessous.

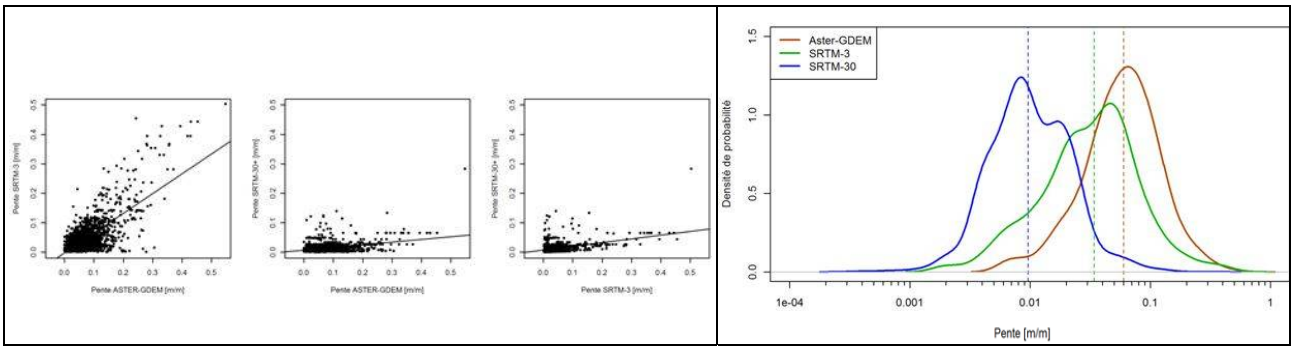


Figure 1. *Comparaison des pentes obtenues pour un échantillon de points à partir des 3 MNS utilisés dans le cadre de cette étude. Sur la figure de droite on observe clairement qu'il n'existe pas de relation linéaire simple entre les pentes calculées avec les différents MNS (SRTM-3 vs ASTER-GDEM à gauche, SRTM-30plus vs ASTER-GDEM au centre et SRTM-30plus vs SRTM-3 à droite). Sur la figure de gauche les distributions des pentes calculées sont représentées. Les valeurs médianes sont ainsi très différentes selon le MNS utilisé.*

3.2. Choix du paramètre morphométrique de référence

Pente

La pente calculée sur un MNA raster correspond à la norme des gradients directionnels d'altitude. Comme les gradients sont évalués entre les altitudes des pixels entourant un pixel central, elle est donc directement dépendante de la résolution spatiale du MNA. En d'autres termes, l'évaluation de la pente, qui est calculée avec la même définition que celle utilisée par Wald et Allen, 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.

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 : 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.

3.3. Constitution d'une base de données Vs,30

Afin d'établir une corrélation morphométrie-Vs,30 adaptée au contexte français, une base de données de Vs,30 géolocalisées a été constituée à partir de données existantes au BRGM. Elle comporte des **mesures directes** de la Vs,30 à partir de profils sismique de type SASW (Spectral Analysis of Surface Waves).

Nous avons ainsi compilé 120 valeurs de Vs,30. A ces données ont été ajoutés les profils de vitesse d'ondes S déterminés pour 16 stations accélérométriques du Réseau Accélérométrique Permanent (Douglas *et al*., 2009).

Pour utiliser le maximum de données possibles et contraindre au mieux les corrélations, des **mesures indirectes** de la Vs,30 ont également été utilisées. Les caractéristiques géomécaniques des colonnes de sols utilisées dans différentes études sont alors estimées à partir d'essais de type pénétromètre ou pressiomètre. La vitesse des ondes de cisaillement dans chacune des formations étudiées est ensuite estimée à l'aide de corrélations vitesse-paramètre géomécanique classiquement utilisées en géotechnique. Il a ainsi été possible d'enrichir considérablement la base de données même si ces vitesses des ondes peuvent présenter une fiabilité moindre que les mesures dites directes du fait de leur mode de calcul.

Ces données indirectes proviennent d'études commerciales ou de service public réalisées par le BRGM sur la période 2002-2009. Au final près de 2000 données de ce type sont intégrées à la base de données.

Il est à noter que les données ainsi collectées présentent des limites importantes : données non traitées pour cette finalité pour les profils SASW, problème de l'extrapolation de la Vs à 30 mètres, problème d'homogénéité du traitement des données, problème de la localisation exacte des points de mesure, pas validation avec des données fiables de type cross-hole, etc…

3.4. Corrélation morphométrie-Vs,30

Une fois les MNS et les données de Vs,30 collectés sur l'ensemble du territoire métropolitain, nous avons essayé de construire une corrélation entre paramètre morphométrique et Vs,30 adapté au contexte français.

Corrélation pente-Vs,30

Nous avons reporté de la même manière les pentes et Vs,30 pour les trois MNS. Contrairement aux résultats de Wald et Allen, aucune corrélation n'apparaît entre les pentes et les Vs,30 (voir Figure 2).

Un biais visuel éventuel du nuage de points provenant des données de Vs,30 calculées par modèles géotechniques (mesures indirectes) a été envisagé. Cependant aucune relation linéaire n'apparaît lorsqu'on ne considère pas ces points (figures du bas sur la Figure 2).
L'utilisation de la médiane, qui est insensible aux valeurs extrêmes ne révèle pas non plus de corrélation entre pente et Vs,30.

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

Distribution openness-Vs,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 Vs,30 en fonction de l'openness positive et négative avec SRTM-30 (Figure 3). Les tests réalisés ont ainsi montré l'insensibilité de l'openness vis-à-vis de la Vs,30.

Au vu de l'ensemble des résultats présentés ci-dessus il est impossible d'établir une corrélation pour la France métropolitaine entre un paramètre morphométrique (pente ou openness) et le paramètre Vs,30. Nos données étant incomplètes et présentant de nombreuses limites, nous avons néanmoins continué l'exercice **en utilisant les corrélations établies par Wald et Allen** dans leurs publications (Wald et Allen, 2007 ; Allen &Wald, 2009) pour la suite de l'étude.

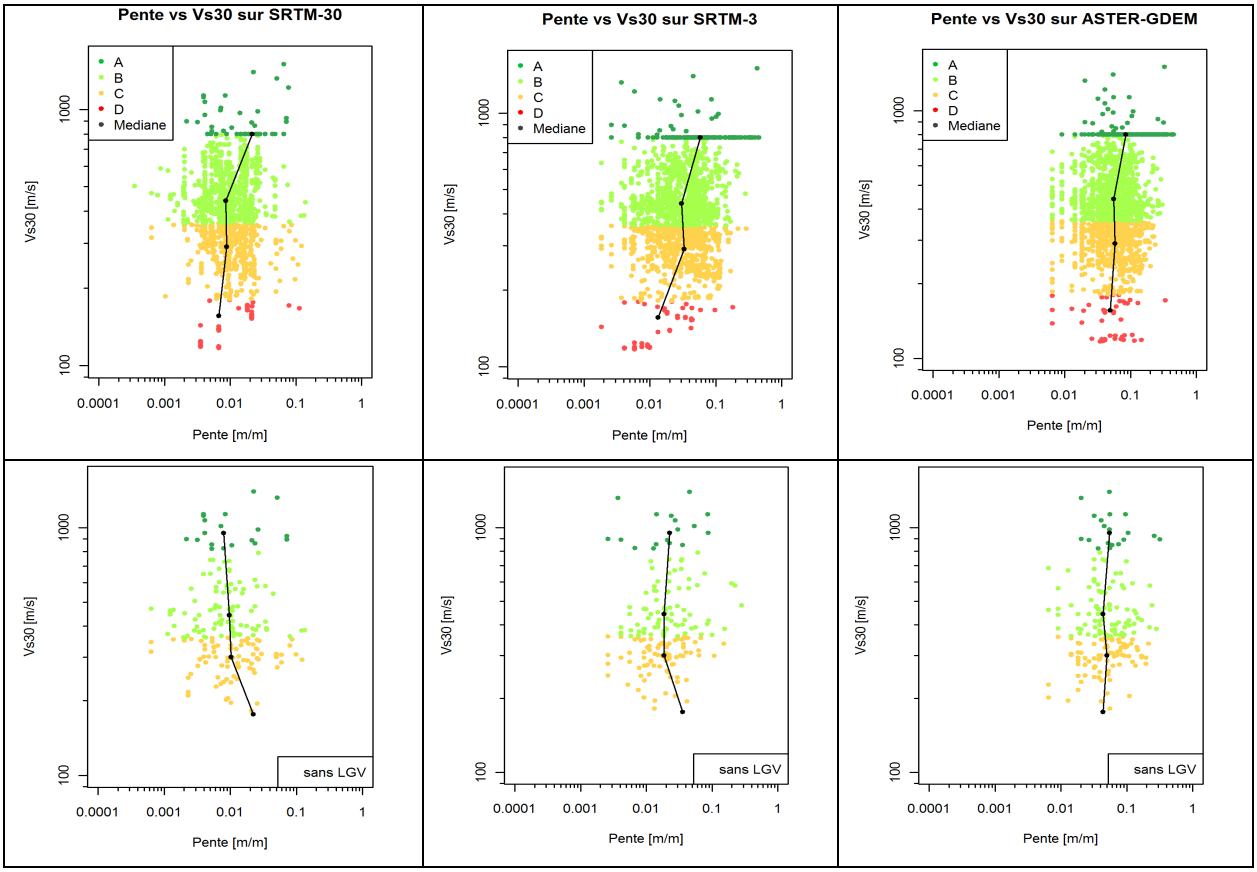


Figure 2. *Distribution des Vs,30 en fonction des pentes sur les trois MNS : SRTM-30 (gauche), SRTM3 (milieu) et ASTER-GDEM (droite). Le codage coloré indique la classe de sol à laquelle la valeur de Vs,30 est rattachée. Les médianes de pente et Vs,30 pour chaque classe (points noirs) montrent qu'aucune corrélation n'apparaît (la corrélation est même inversée dans le cas de SRTM-30). Dans les figures du haut, l'ensemble des données de Vs,30 sont représentées alors que, dans les figures du bas, seules les données directes sont représentées.*

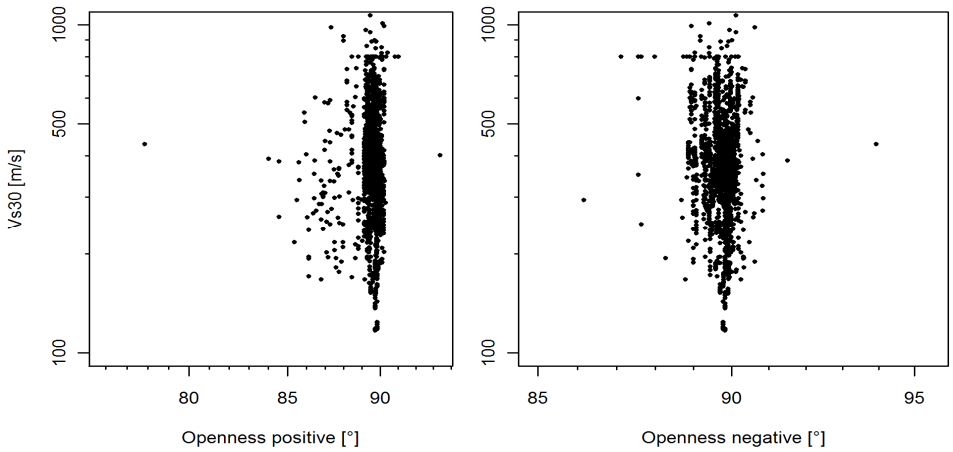


Figure 3. *Vs,30 en fonction de de l'openness positive et négative calculées sur SRTM-30. Aucune corrélation ne sort de cette relation.*

4. Validation et application de la méthode en France métropolitaine

La méthode de validation a consisté à calculer les classes de sols prédites par la relation d'Allen et Wald (2009, tableau I, tectonique active) et à les comparer avec des données de référence pour 4 sites de référence et pour 2 des 3 MNS (8 configurations sont donc testées au total) :

- 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. Il a été testé avec le MNS SRT3 et SRTM30plus ;
- 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 des informations précises sur les paramètres géophysiques des couches superficielles sont disponibles. Cette commune a été testée avec le MNS ASTER-GDEM et SRTM3 ;
- le département du Haut-Rhin, qui a fait l'objet d'un projet INTERREG piloté par l'IPGS et réalisé en partenariat avec des instituts suisses et allemands entre 2004 et 2006 (*Microzonage sismique de la région du Rhin Supérieur Sud,* BRGM/RP-53712-FR). Il a été testé avec le MNS SRT3 et SRTM30plus ;
- la commune de Mulhouse, qui a été traitée en détail dans le cadre du projet cité ci-dessus a été testée avec le MNS ASTER-GDEM et SRTM3.

Les deux sites « départementaux » permettent de tester la faisabilité d'une cartographie à échelle régionale et la pertinence de la cartographie des sols selon les EC8 à partir des pentes alors que les deux sites « communaux » permettent notamment de valider la méthode à échelle locale et d'en tester les limites.

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 EC8 qui servent de références. Les zones classées en classes de sol S_1, S_2 et E ont été ré-analysées et leur classification a été adaptée pour que les formations superficielles soient classées uniquement selon les 4 classes de sol A, B, C ou D.

Lors de ces validations, 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 sous alors surestimé et le dimensionnement sera pénalisant.

Il apparaît généralement une erreur de classification liée à la morphologie du terrain. Ainsi dans le cas du Haut-Rhin classé avec SRTM-3, 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. 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, les types de sols prédits sur le massif des Vosges sont plus variés que sur la carte de référence (voir Figure 4 ci-dessous).

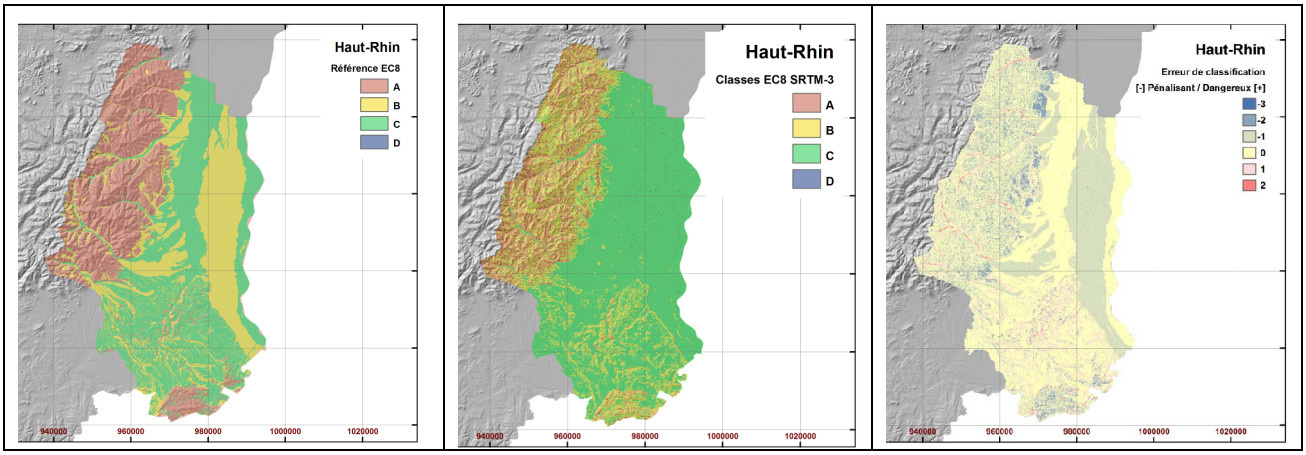


Figure 4. *Exemple de validation pour le Haut-Rhin. Figure de gauche : carte de référence des sols EC8 (Roullé et al., 2007). Figure du centre : classification automatique des sols EC8 sur SRTM-3 par la méthode d'Allen et Wald (2009). Figure de droite : erreurs de classification des sols EC8 induite par l'application de la méthode automatique d'Allen et Wald (2009).*

Au final, seules deux classifications sur les huit testées (Lourdes sur ASTER-GDEM et Mulhouse sur SRTM-3) ont *plus de la moitié* des pixels correctement classés. Par ailleurs, la classe la plus fréquente n'est souvent pas la classe de référence (plusieurs courbes ne sont pas centrées sur la valeur 0). 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. (Figure 5)

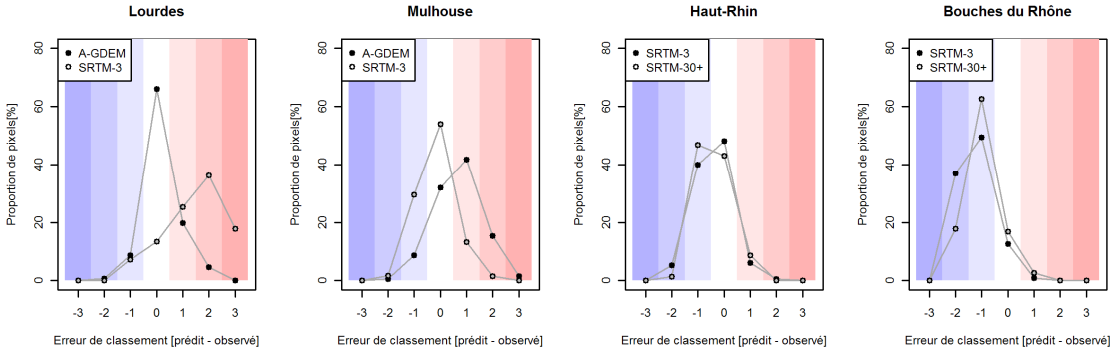


Figure 5. *Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparées par région. Une courbe centrée sur 0 indique que la majorité des pixels sont correctement classés. Une valeur négative indique une prédiction de Vs,30 plus lente que la réalité, 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.*

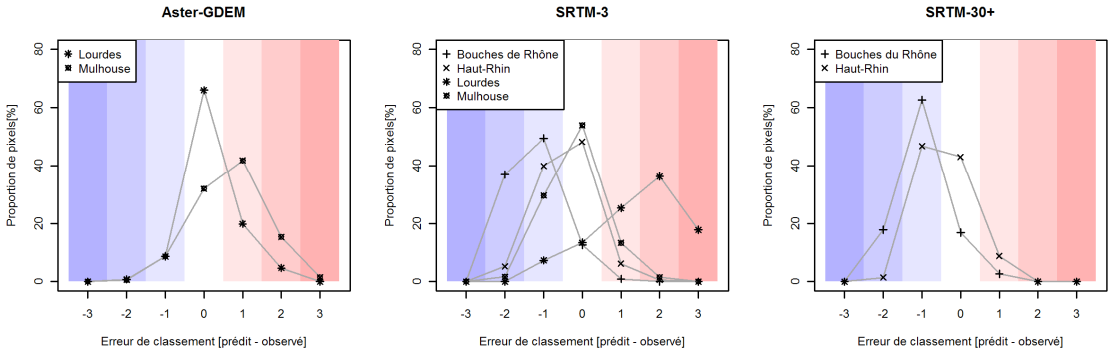


Figure 6. *Synthèse des erreurs de classification engendrées par l'application de la corrélation automatique Pente/Vs,30 comparée par type de MNS..*

Il ressort de l'analyse des résultats qu'aucune classification automatique issues du choix de l'un des 3 MNS utilisés n'est fiable (voir Figure 6). 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 (voir Figure 5).

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

5. Conclusions et perspectives

Conclusions

- Les données françaises de Vs,30 collectés au BRGM (métropole) ne sont pas corrélées avec les deux paramètres morphométriques testés : pente et openness ;
- Les résultats obtenus pour 4 zones-tests sont assez variables selon le MNS choisi : pour la même zone les résultats peuvent être relativement convaincants avec un MNS mais très biaisés avec un autre. La méthode de Wald et Allen appliquée de façon automatique n'est donc pas systématiquement fiable, même si elle peut cependant permettre de classer correctement les sols pour certaines zones et pour peu qu'on choisisse le MNS le plus adapté ;
- L'ensemble des phénomènes physiques en jeu ne sont cependant pas totalement connus et cette méthodologie ressemble encore à une « boîte noire » qu'il convient de manier avec précaution. Il semble impossible de développer un outil qui calculerait directement les classes de sol à partir d'un unique MNS (comme proposé par l'USGS sur son site internet). En effet comme le choix du MNS est 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 donnée (carte géologique, sondages, mesures géophysiques, …). Néanmoins, 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 peuvent aller parfois dans le sens de moins de sécurité ;
- Etant donné que cette méthodologie est actuellement utilisée pour des études globales d'aléa (SHARE, NERIES, Global Earthquake Model, …), il est nécessaire de bien en connaître les limites dont certaines ont été relevées par la présente étude.

Perspectives

Le concept même de corrélation entre paramètre morphométrique et caractérisation des sols paraît intéressant malgré les résultats décevants obtenus à l'issue de cette étude. Une analyse plus poussée semble donc nécessaire, en particulier sur les points suivants (de façon non exhaustive) :

- Utilisation de la pente pour réaliser un zonage binaire (susceptibilité à effet de site ou non) ;
- Etablissement d'une base de données géophysiques et géotechniques pour la France métropolitaine pour valoriser l'ensemble des données existantes à l'échelle régionale ;
- Utilisation de paramètres morphométriques mieux corrélés aux classes de sol comme par exemple la « surface texture » définie par Iwahashi *et al.* (2010) qui semble être bien corrélé aux valeurs de Vs,30 pour un grand nombre de site au Japon ;
- Utilisation de critères multi-paramètres (cf. Iwahashi *et al.*, 2010 ou NERIES). La pondération à adopter pour les différents paramètres devra être déterminée par exemple à partir de tests sur des zones dans des contextes différents ;
- Réflexion plus large sur l'utilisation d'autres proxys que le Vs,30 pour estimer les effets de site, le Vs,30 n'étant pas adapté pour de nombreux effets de site particuliers tels emplissages profonds, prise en compte des effets 2D ou 3D, ...

6. 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.

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.

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

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

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.