



La susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie : application la méthode de la théorie de l'évidence

Journal:	<i>Geomatica</i>
Manuscript ID	geomat-2019-0025.R2
Manuscript Type:	Research Article
Date Submitted by the Author:	09-Oct-2020
Complete List of Authors:	BYOU, Taoufik; Faculté des lettres et des sciences humaines Sais-Fès, géographie OBDA, Khalid; Faculté des lettres et des sciences humaines Sais-Fès Route Imouzzar, BP, 59, 30000, Fès, MOROCCO, Géographie TAOUS, Ali; Faculté des lettres et des sciences humaines Sais-Fès Route Imouzzar, BP, 59, 30000, Fès, Morocco, Géographie OBDA, Ilias; Faculté des Sciences et Techniques de Fès, B.P. 2202 Route d'Imouzzar Fès MOROCCO, Géologie
Is the invited manuscript for consideration in a Special Issue? :	Not applicable (regular submission)
Keywords:	Système d'information géographique, Théorie de l'évidence, Susceptibilité aux glissements de terrain, Al Hoceima (Maroc)

SCHOLARONE™
Manuscripts

1 **La susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie :**
2 **application la méthode de la théorie de l'évidence**

3 **BYOU Taoufik¹, OBDA Khalid¹, TAOUS Ali¹, OBDA Ilias²**

4 ¹Département de géographie, Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales, d'Aménagement et
5 de Développement Durable, Faculté des lettres et des sciences humaines Sais-Fès, Université Sidi
6 Mohamed Ben Abdellah. Route Imouzzar, BP, 59, 30000, Fès, Maroc. taoufikbyou@gmail.com ;
7 khalidobda@yahoo.fr ; taousali@yahoo.fr.

8 ²Département de géologie, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, B.P. 2202 Route d'Imouzzar
9 Fès Maroc. obdailias@gmail.com

10 Auteur chargé de la correspondance : Taoufik BYOU , Tél : 00212 674169474,
11 taoufikbyou@gmail.com

12 **Résumé :** Le Rif Marocain en général et la ville d'Al Hoceima et sa périphérie urbaine plus
13 particulièrement, connaissent fréquemment des aléas géomorphologiques, notamment les
14 glissements de terrain qui entravent la gestion urbaine. Ce type d'aléa naturel est de grande
15 actualité, aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan médiatique, à cause de l'augmentation
16 de la vulnérabilité, due aux circonstances des changements globaux (réchauffements climatiques)
17 et à la forte urbanisation, souvent irrationnelle. L'objectif de cet article est la mise en place d'une
18 approche objective visant l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville
19 d'Al Hoceima et sa périphérie. La théorie de l'évidence, qui est une méthode probabiliste bivariée,
20 est fondée sur les règles de Bayes qui consistent à calculer la probabilité d'occurrence spatiale de
21 glissements de terrain, en se basant sur la notion de probabilité à priori et de probabilité à posteriori,

22 tout en considérant les glissements de terrain comme variable à modéliser et chaque facteur causatif
23 comme variable prédictive. Le but de ce travail est de procéder à un zonage d'aléa glissement de
24 terrain tout en assurant une bonne prédiction de ce phénomène avec une bonne résolution spatiale.
25 Les résultats de la courbe de ROC (Receiver Operating Characteristic) montre que la confrontation
26 de la carte de susceptibilité, des glissements de terrain à la carte d'inventaire, permet une capacité
27 de prédiction considérable (AUC=0,889). Ceci pousse au constat selon lequel, plus de 2/3 des
28 glissements de terrain inventoriés s'inscrivent dans des classes de susceptibilité élevée et très
29 élevée. Ce produit cartographique peut constituer un puissant outil d'aide permettant la formulation
30 des suggestions, dans le but d'optimiser l'évaluation du risque de glissements de terrain dans les
31 zones exposées à ce phénomène.

32 *Mots clés* : SIG, Théorie de l'évidence, Susceptibilité aux glissements de terrain, Al Hoceima
33 (Maroc)

34 **Abstract:** The Moroccan Rif in general and the city of Al Hoceima and its urban periphery more
35 particularly, frequently experience geomorphological hazards including landslides that hamper
36 urban management. This type of natural hazard is of great topicality not only scientifically, but also
37 on the media because of the increase in vulnerability due to the circumstances of climate changes
38 (global warming) and to the impact of the strength of the irrational urbanization. The objective of
39 this article is to establish an objective approach for assessing landslide susceptibility in the city of
40 Al Hoceima and its periphery. Weight of evidence which is a probabilistic and bivariate approach
41 based on Bayesian probability which consists in calculating the probability of spatial occurrence
42 of landslides, based on the notion of prior probability and posterior probability, and considering
43 landslide as a variable to model each causal factor as a predictor variable. The purpose of the work
44 is to zone landslide hazard while ensuring a good prediction of this phenomenon with a good spatial

45 resolution. The results of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve show that the
46 confrontation of the landslide susceptibility map and the inventory map gives a good predictive
47 ability (AUC = 0.889). This comparison shows that more than 2/3 of inventoried landslides fall
48 into high and very high susceptibility classes. This mapping product can be a tool to help formulate
49 suggestions for optimizing landslide risk assessment in areas exposed to this phenomenon.

50 *Key words:* GIS, weights of evidence, Landslide susceptibility assessment, Al Hoceima (Morocco)

51 **1 Introduction**

52 Les glissements de terrains sont considérés comme l'un des risques naturels les plus dangereux qui
53 peuvent survenir soudainement, entraînant la perte des vies humaines et des dégâts matériels
54 importants. La ville d'Al Hoceima et sa périphérie sont des régions qui ont été fréquemment
55 touchées par des glissements de terrain dans les dernières années (El Khattabi et al., 2013). Les
56 précipitations survenues ces dernières décennies ont mis en évidence la vulnérabilité de l'ensemble
57 de la zone face aux phénomènes des glissements de terrain. Cette vulnérabilité est en perpétuelle
58 augmentation, par le fait de l'intensification de l'occupation du territoire et de l'évolution socio-
59 économique. Le taux d'accroissement a relativement augmenté durant les années 2004-2014, il est
60 évalué à 0.25% dans la zone étudiée, contre 0.1% au niveau national (HCP, 2014). Cela est dû à
61 l'émigration interne des communes rurales limitrophes de la ville d'Al Hoceima. La plupart d'entre
62 elles, ont construit leurs maisons dans des zones non adaptées à la construction, près des cours
63 d'eau ou sur des zones instables. Cela rend la cartographie de la susceptibilité aux glissements de
64 terrain dans la zone étudiée, nécessaire afin d'orienter le développement futur de l'urbanisation.

65 A l'instar des autres risques naturels et anthropiques, la gestion des glissements de terrain est un
66 préalable à tout projet de développement. L'inventaire des aléas, leur caractérisation, leur analyse

67 et leur évaluation, constituent une composante indispensable dans les processus de gestion
68 proactive centré sur la réduction des risques et importante dans l'équation de ce type de risque.
69 Celui-ci est défini comme la probabilité d'avoir des pertes humaines ou des dégâts matériels
70 (conséquences) suite à la survenue de l'aléa glissement de terrain dans une zone et au cours d'une
71 période donnée (Varnes, 1984 ; Van Westen et al., 2006 ; Thiery et al., 2007). Du moment qu'il est
72 souvent difficile d'évaluer fréquemment des conséquences à cause de l'absence des données
73 nécessaires à une analyse complète des éléments à risque, seule l'évaluation de l'aléa à un type de
74 phénomène est analysée. Cette évaluation est basée sur des analyses de susceptibilité et de
75 l'occurrence temporelle, laquelle occurrence temporelle est souvent évaluée par la probabilité de
76 survenance d'un facteur déclenchant, tel que des précipitations intenses ou des sollicitations
77 sismiques. À titre d'exemple, il faut chercher la succession des averses intenses annuelles qui
78 entraînent une surpression néfaste à la stabilité du versant (Maquaire, 2002). Le traitement de ces
79 données permet de calculer la probabilité d'occurrence temporelle (c'est-à-dire période de retour).
80 Ces types de données sont très difficiles à identifier à cause du manque des enregistrements
81 historiques permettant de faire des corrélations entre les glissements de terrain et les facteurs
82 déclenchants. Pour cette raison, nous nous concentrons sur l'évaluation de la susceptibilité aux
83 glissements de terrain dans notre zone d'étude. Ainsi, l'aléa est exprimé sans sa composante
84 temporelle (Mastere, 2011):

$$85 \quad \quad \quad ALEA = SUSCEPTIBILITE$$

86 Les cartes de susceptibilités ont été élaborées par plusieurs méthodes qualitatives et quantitatives.
87 Elles ont été utilisées pour analyser la relation entre les glissements de terrain d'un côté et les
88 facteurs responsables de l'occurrence des glissements de terrain et leur distribution, d'un autre coté
89 (Ayalew et Yamagishi, 2005 ; Thiery et al., 2007). Les méthodes qualitatives sont subjectives et

90 évaluent l'aléa d'une façon descriptive en se basant sur la connaissance d'experts (géographe,
91 géologue, etc.). La relation entre les glissements de terrain et les facteurs de prédisposition est
92 souvent fondée sur la combinaison linéaire des facteurs causatifs en passant par, leur identification,
93 leur seuillage et leur pondération. Cette approche a été utilisé au Maroc à la fin des années soixante
94 par Millies-Lacroix (1968) qui a établi, pour l'ensemble du Rif, une carte prévisionnelle des
95 mouvements de terrain au 1 :1000000. Des auteurs marocains, Fares (1994) et Margaa (1994), ont
96 repris les méthodes de la cartographie ZERMOS, respectivement dans les régions de Taounate et
97 d'Al Hoceima, en définissant des approches qualitatives directes et en se basant sur la connaissance
98 de l'expert. La contrainte de cette approche est subjective au niveau du seuillage et de la
99 pondération des facteurs utilisés dans le processus de mouvements, ainsi, cette approche qualifie
100 les résultats obtenus de différents niveaux d'aléa (élevé, modéré, faible), sans aucune quantification
101 de ces termes. Les approches quantitatives ont obtenu un soutien croissant de la part des
102 établissements universitaires de recherche et des bureaux d'études ces dernières années. Ce fait
103 peut être lié, d'une part à une préoccupation nouvelle et différente, pour le contrôle et la
104 préservation de l'environnement, d'une autre part, au développement et à la diffusion de techniques
105 assistées par ordinateur, qui permet de stocker, de transformer, de traiter et d'analyser de
106 nombreuses quantités de donnés. Ces méthodes sont de deux types : statistiques et déterministes.
107 Les méthodes déterministes se fondent sur l'application des modèles physiques prenant en compte,
108 les données géotechniques, les niveaux d'eau souterrains et le principe de l'instabilité des pentes
109 exprimées en termes de facteurs de sécurité (Maquaire, 2002). Le zonage de l'aléa est applicable
110 lorsque les conditions du sol sont relativement homogènes dans toute la zone d'étude et où les types
111 de glissements de terrain sont connus. Les méthodes statistiques sont basées sur l'analyse de la
112 relation entre des facteurs de contrôle de la localisation des glissements et leur distribution passée
113 et actuelle. Ces méthodes nécessitent la collecte d'une grande quantité de données pour produire

114 des résultats fiables. La prédiction quantitative est faite pour les zones où les glissements de terrain
115 n'ont pas encore eu lieu, mais présentent des conditions environnementales similaires que dans le
116 passé (géologie, géomorphologie, climat, impact des activités humains, etc.). Les méthodes
117 statistiques préconisées sont de type bivariées comme les méthodes bayésiennes (la théorie de
118 l'évidence) ou multivariée à savoir, la régression multiple, la régression logistique, l'analyse
119 discriminante (Carrara et al., 1995).

120 La sélection d'une méthode dépend, de l'échelle de la zone d'étude, des connaissances scientifiques
121 et de l'expérience pratique du chercheur. Dans le cas de la cartographie à grande échelle (petite
122 zone), les approches qualitatives sont souvent un peu fiables, l'utilisation des approches
123 quantitatives telles les approches statistiques et déterministes, est recommandée (Glade, Anderson,
124 & Crozier, 2006). Cette situation nous a motivés pour appliquer un modèle probabiliste bivariée,
125 basée sur le théorème de Bayes (théorie de l'évidence) afin d'étudier l'aléa des glissements de
126 terrain dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie, avec une échelle grande. La disponibilité d'un
127 jeu de données avec des échelles convenables à l'approche utilisée, constitue une motivation en
128 plus. Cette méthode nous a permis d'examiner également la relation entre les facteurs responsables
129 de l'occurrence des glissements de terrain et d'obtenir la combinaison des facteurs causatifs qui
130 pourraient être suffisante pour produire un modèle performant en termes de prévision des endroits
131 où les glissements de terrain sont susceptibles de se produire.

132 Le but de ce travail vise principalement la mise en œuvre d'une approche objective et reproductible
133 pour la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le secteur d'étude.
134 L'analyse de la précision du modèle est réalisée par la courbe de ROC en comparant la carte
135 d'inventaire à la carte de susceptibilité obtenue. Nous présentons dans un premier temps le
136 diagnostic des glissements de terrain survenus dans la zone d'étude à travers, leurs inventaires,

137 leurs cartographies et leurs caractérisations, ensuite, la conception d'une base de données intégrant
138 les facteurs causatifs des glissements de terrain, le calcul et l'interprétation des poids pondérés des
139 facteurs utilisés dans cette analyse, la production de la carte de susceptibilité aux glissements de
140 terrain et la validation des résultats obtenus. Finalement, une discussion sur les résultats obtenus et
141 les avantages de la méthode proposée est réalisée avant de conclure et de proposer quelques
142 recommandations.

143 **2 Présentation de la zone d'étude**

144 La ville d'Al Hoceima et sa périphérie se trouve dans la partie orientale du massif des Bokkoya au
145 nord du Maroc. Elle s'étale sur une superficie de 42 Km². Elle est encadrée par les parallèles
146 35,16° et 35,28° N et les méridiens 3,87° et 4,05°W. Limitée au Nord et à l'Est par la méditerranée
147 (mer d'Alboran et baie d'Al Hoceima), elle se termine à l'ouest par la pointe de Boussicour et au
148 sud par oued Isli. C'est une région montagneuse, constituée par des vallées encaissées, séparées
149 par des reliefs modestes avec des pentes fortes. Ces reliefs sont marqués par des crêtes calcaires
150 atteignant 406m à jbel Monte Pamomas, et 300m à Jbel Malmusi, et par de hautes falaises
151 atteignant souvent 100m au niveau de plateau dolomitique « Morro nuevo » et à la baie Al
152 Hoceima. De hauts talus, à l'est de la ville, à Tallayoussef, sont caractérisés par des pentes
153 irrégulières de formes assez molles, en bordure de Mer, avec une altitude supérieure à 130 m (figure
154 1).

155 [Figure 1]

156 Du point de vue géologique, la zone d'intérêt est constituée par empilement de quatre nappes mises
157 en place dès la fin de l'Oligocène, séparées les unes des autres par des contacts anormaux (figure
158 2). La disposition de ces nappes est complexe ; dont les dolomies triasiques et les calcaires à silex

159 qui constituent la nappe de Bousicour et surmontent la nappe éo-oligocène formée principalement
160 par les matériaux marneux. La nappe d'Al Hoceima est essentiellement représentée par les schistes
161 du Silurien et les calcaires du Dévonien en plus des matériaux primaires qui surmontent les nappes
162 précédentes. Enfin, les calcaires blancs du lias de la nappe du jbel Amekrane, surmontent les nappes
163 précédentes sous forme des Klippes. L'ensemble chevauche vers le sud reposant sur les flyschs de
164 l'unité des Tisirène. La nappe éo-oligocène constitue la semelle tertiaire des Bokkoya et une couche
165 savon lorsque les nappes paléozoïques et lias à silex, ont chevauché les Flyshs de l'unité des
166 Tisirène (Mégard, 1963).

167 [Figure 2]

168 La zone d'étude se caractérise par un climat méditerranéen, semi-aride, marqué par des hivers
169 tempérés et des étés chauds. La moyenne des précipitations annuelles atteint 385mm, les pluies
170 caractérisées par l'irrégularité et la brutalité, aggravent l'action des dites pluies sur le sol. La
171 température est influencée par la proximité de la côte méditerranéenne qui atténue l'amplitude
172 thermique, la moyenne minimale du mois hivernale étant douce, elle atteint 10°, alors que la
173 moyenne maximale du mois d'estivale est modérée, elle atteint 29°.

174 **3 Matériel et méthodes**

175 La figure 3 retrace la démarche méthodologique adoptée pour l'analyse de la susceptibilité aux
176 glissements de terrain dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie, sur la base de la théorie de
177 l'évidence. Cette démarche comprend quatre étapes :

- 178 • L'acquisition et la préparation des données relatives aux glissements de terrain et aux
179 facteurs causatifs responsables de l'occurrence de ce phénomène.

- 180 • Calcul des valeurs pondérées des facteurs causatifs.
- 181 • L'évaluation de l'indépendance conditionnelle des facteurs causatifs par rapport aux
- 182 glissements de terrain
- 183 • La modélisation probabiliste de glissements de terrain sur la base de la théorie de
- 184 l'évidence.
- 185 • La validation des résultats obtenus et le choix du meilleur modèle.

186 [Figure 3]

187 **3.1 Préparation de données**

188 *3.1.1 Inventaire des glissements de terrain*

189 Les glissements de terrain ont été inventoriés et cartographiés antérieurement pour toute la ville
190 d'Al Hoceima et sa périphérie. Ces événements sont représentés par des polygones en se basant
191 sur l'inventaire de glissements de terrain et l'interprétation des images satellitaires de Google Earth,
192 ainsi que sur la cartographie mobile GPS (MobileMapper) pour localiser les glissements de terrain
193 et déterminer leurs limites. Ces dernières ont été délimitées à des zones de détachement, mais
194 certains endroits, où il y a des indices d'instabilité de terrain, telles que des fissures de tension ou
195 des arbres inclinés, ont été inclus dans la cartographie. Dans cette analyse, le nombre total des
196 glissements de terrain inventoriés, formant des mouvements rotationnels et translationnels, a été
197 divisé en deux ensembles distincts : 70% (106 événements) les plus âgés sont utilisés pour
198 construire les modèles de la susceptibilité aux glissements de terrain, alors que 30% (45
199 événements) des glissements déclenchés ou réactivés, récents, sont utilisés pour valider ces
200 modèles (Figure 4) (Bui et al., 2011; Neuhäuser & Terhorst, 2007; Vakhshoori & Zare, 2016). Le

201 deuxième ensemble, indépendant du modèle, peut être considéré comme « futur » glissements de
202 terrain, pouvant expliquer comment les modèles et les facteurs causatifs prédisent aux glissements
203 de terrain futurs.

204 [Figure 4]

205 3. 1. 2 *Prédicteurs*

206 Les facteurs causatifs, considérés comme variables prédictives, peuvent être regroupées en six
207 groupes : les facteurs géologiques (faciès lithologiques, fracturation), facteur sismique
208 (microzonage sismique), les facteurs géomorphologiques (hypsométrie, gradient de pente,
209 expositions des versants, courbure de la surface), le facteur hydrologique (densité de drainage),
210 facteur climatique (précipitations), les facteurs anthropiques (occupation du sol, distance aux
211 routes). Le fondement de l'acquisition primaire des données spatiales est représenté par le plan de
212 restitution de la ville d'Al Hoceima et sa périphérie à 1/2000 (édition 2012, projection Lambert
213 zone 1). Un Modèle numérique de Terrain (MNT) a été généré à partir des courbes de niveau
214 restituées dans ce plan (équidistance de 1m) avec une résolution de 5*5m. Il sert à cartographier
215 des couches thématiques de certains paramètres morphologiques : altitude, pente, courbure de la
216 pente et l'exposition des versants. La cartographie de l'occupation des sols a été réalisée pour
217 l'ensemble de la zone d'étude grâce à l'interprétation visuelle des images de Google Earth (édition
218 2016) et à partir de l'interface du logiciel de Google Earth. Cette interprétation nous aide à délimiter
219 les différentes catégories de l'occupation du sol de la zone d'étude, en la numérisant. Les vecteurs
220 issus de la numérisation sont obtenus au format ". kml" (Keyhole Markup Language) qui est
221 converti en ".shp" (Shapefile) via Logiciel ArcGIS. La densité du réseau hydrographique a été
222 réalisé à partir des cours d'eau restitués sur le plan de restitution en utilisant la commande Spatial

223 Analyst Tools “Line density”. Les facteurs géologiques sont considérés comme les facteurs les plus
224 influents dans la cartographie de la susceptibilité des glissements de terrain, en raison de leur
225 influence sur les caractéristiques mécaniques et structurelles des unités lithologiques. Dans cette
226 étude, les cartes de la lithologie et des failles ont été extraites de la carte géologique d’Al Hoceima
227 à 1/50000 (édition 1984). Enfin, pour évaluer le facteur sismique dans cette analyse, nous avons
228 utilisé la carte de microzonage sismique à échelle 1/40000 (édition 2004). Bien que le facteur de
229 précipitation soit considéré comme relativement uniforme, en raison de la présence d’une seule
230 station qui couvre l’ensemble du territoire de la ville d’Al Hoceima et sa périphérie et n’a donc pas
231 été incluse dans l’analyse. La diversité des sources de ces données est un peu variée dans leur
232 échelle, ce qui affecte la précision du modèle de la susceptibilité. Pour être en rapport avec cette
233 diversité des sources des données et des différences dans les échelles, toutes les couches
234 thématiques ont été intégrées dans un système d’information géographique (SIG) en vue de gestion
235 géo référencée par l’intermédiaire de logiciel ArcGis 10.4, puis toutes ces couches thématiques ont
236 été converties à un format raster (figure 5). Le maillage préconisé de toutes les cartes des facteurs
237 causatifs utilisés dans cette analyse, a été fixée à 5*5. Cette dimension est de la taille d’un MNT
238 élaboré pour l’aire d’étude. Le traitement statistique des données a été réalisé à l’aide de logiciel
239 Excel 2016.

240 [Figure 5]

241 **3.2 Description du modèle « théorie de l’évidence »**

242 L’étude vise à évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain grâce au modèle de la théorie de
243 l’évidence. Cette méthode a été appliquée en plusieurs domaines, initialement en médecine (Ezzine
244 et al., 2008 ; Spiegelhater et Kill-Jones, 1984), puis en géologie dans le domaine d’exploration

245 minière (Bonham-Carter, 1994); mais récemment, cette méthode a été utilisée dans de nombreuses
246 études pour l'évaluation du risque des mouvements de terrain, adoptée par plusieurs chercheurs au
247 niveau international (Corominas et al., 2014; Thiery, 2007 ; Agterberg et al., 1993 ; Bonham-Carter
248 et al., 1989; Glade et al., 2006; Mezughi et al., 2011; Mohammady et al., 2012; Neuhäuser &
249 Terhorst, 2007; Ozdemir & Altural, 2013; Pradhan, Oh, & Buchroithner, 2010; Regmi et al., 2010;
250 Ru-Hua et al., 2008; Vakhshoori & Zare, 2016; Van Westen, 1993), Par contre, peu nombreux sont
251 les chercheurs marocains qui ont utilisé cette méthode, notamment dans la région de chafchaouen ;
252 je cite Ezzine et al en 2008 et Master en 2011.

253 Cette méthode est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les phénomènes futurs se déclencheront
254 dans des conditions similaires à celles du passé (Carrara et al., 1995; Orme, 2002; Thiery, 2007).
255 Cette approche considère le phénomène des glissements de terrain comme variable à modéliser (S)
256 et les facteurs causatifs, déclenchant ou réactivant ce phénomène, comme des variables prédictives
257 (B) (Ezzine et al., 2008; Thiery, 2007 ; Mastere, 2011). Elle prend compte des données des
258 événements historiques pour calculer les poids de chaque variable prédictive contribuant à
259 l'apparition des glissements de terrain.

260 Une description détaillée de la formulation mathématique de la méthode se représente comme
261 suit :

262 La probabilité d'occurrence du phénomène (S), selon la théorie de l'évidence, repose sur une
263 version log-linéaire du théorème général de Bayes et sur les concepts de probabilité à priori et de
264 probabilité à posteriori (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994). La probabilité à priori est
265 déterminée par l'apparition d'un glissement de terrain dans la zone A_T (Superficie totale étudiée),
266 sans tenir compte les facteurs causatifs de ces phénomènes :

$$267 \quad P(S) = \frac{A^s}{A^T} \quad (1)$$

268 L'étape suivante consistera à examiner la relation entre l'apparition d'un événement de glissement
 269 de terrain (variable à modéliser) et la présence d'une condition ou d'une évidence d'un facteur
 270 causatif (variable prédictive). La figure 6 montre cette relation entre la variable à modéliser et la
 271 variable prédictive, elle peut être exprimée par les probabilités conditionnelles suivantes :

$$272 \quad P\{S/B\} = \frac{P\{S \cap B\}}{P\{B\}} \quad (2)$$

$$273 \quad P\{S/\bar{B}\} = \frac{P\{S \cap \bar{B}\}}{P\{\bar{B}\}} \quad (3)$$

274 [Figure 6]

275 Par l'intermédiaire de la formule de la probabilité conditionnelle, les dernières équations peuvent
 276 être écrites comme suit :

$$277 \quad P\{S/B\} = P\{S\} \frac{P\{B/S\}}{P\{B\}} \quad (4)$$

$$278 \quad P\{S/\bar{B}\} = P\{S\} \frac{P\{\bar{B}/S\}}{P\{\bar{B}\}} \quad (5)$$

279 Bonham-Carter (1994) a défini ; deux poids pour chaque variable prédictive, un poids négatif (W^-
 280) et un poids positif (W^+) dont leurs valeurs dépendent de la relation entre les événements des
 281 glissements de terrain survenus dans le passé et les variables prédictives. Ces poids sont calculés
 282 selon la probabilité (odds) ou (logit) qui est définie comme suit :

$$283 \quad Odds = \frac{\text{Probabilité qu'un événement se produit}}{\text{Probabilité qu'il ne se produit pas}} = \frac{P}{1 - P} \quad (6)$$

284 Où P est la probabilité a posteriori qu'un événement se produise

$$285 \quad O\{S | B\} = O\{S\} \cdot \frac{P\{B | S\}}{P\{B | \bar{S}\}} \quad (7)$$

$$286 \quad O\{S | \bar{B}\} = O\{S\} \cdot \frac{P\{\bar{B} | S\}}{P\{\bar{B} | \bar{S}\}} \quad (8)$$

$$287 \quad \ln O\{S | B\} = \ln O\{S\} + \ln \frac{P\{B | S\}}{P\{B | \bar{S}\}}$$

$$288 \quad \text{logit}\{S | B\} = \text{logit}\{S\} + w^+ \quad (19)$$

$$289 \quad \ln O\{S | \bar{B}\} = \ln O\{S\} + \ln \frac{P\{\bar{B} | S\}}{P\{\bar{B} | \bar{S}\}}$$

$$290 \quad \text{logit}\{S | \bar{B}\} = \text{logit}\{S\} + w^- \quad (10)$$

$$291 \quad W^+ = \ln \frac{P\{B | S\}}{P\{B | \bar{S}\}} \quad (11)$$

$$292 \quad W^- = \ln \frac{P\{\bar{B} | S\}}{P\{\bar{B} | \bar{S}\}} \quad (12)$$

293 Un poids positif indique la présence d'une condition (facteur B) dans les glissements de terrain (S),
 294 et l'ampleur de ce poids est une indication de la corrélation positive entre la présence de facteur
 295 prédictif et les glissements de terrain. Un poids négatif indique une absence du facteur (B) et

296 l'ampleur de ce poids indique une corrélation négative. Le contraste (C) reflète l'association
 297 spatiale globale entre le facteur prédictif et les glissements de terrain. Il est défini comme suit :

$$298 \quad C = W^+ - W^- \quad (13)$$

299 Si le contraste de poids est positif, le facteur contribue à l'occurrence des glissements de terrain, et
 300 s'il est négatif, il ne contribue pas à l'occurrence des glissements de terrain. Si le contraste de poids
 301 est proche de zéro, cela signifie que le facteur n'a pas de relation spatiale avec l'occurrence des
 302 glissements de terrain (Bonham-Carter et al, 1989 ; Mezughi et al, 2011 ; Pourghasemi et al, 2013
 303 ; Pradhan et al, 2010 ; Regmi et al, 2010 ; Ezzine, 2008).

304 Concernant la cartographie de la susceptibilité ou la probabilité de glissements de terrain, ce
 305 phénomène peut être associé à une ou plusieurs variables prédictives. Par conséquent, il est
 306 nécessaire de combiner les poids positifs de toutes ces variables, mais à condition qu'elles soient
 307 également conditionnellement indépendantes les unes des autres. Les zones qui ont un poids élevé
 308 correspondent à une plus grande probabilité permettant de retrouver (S). L'expression générale
 309 pour combiner « n » facteurs est donnée par l'équation suivante (Bonham-Carter, 1994):

$$310 \quad \text{logit}\{S \mid B_1^k \cap B_2^k \cap B_3^k \dots \cap B_n^k\} = \text{logit}\{S\} + \sum_{i=1}^n W_i^+ \quad (14)$$

311 **3.3 Test d'indépendance conditionnelle**

312 L'application de la théorie de l'évidence suppose que les variables prédictives sont indépendantes
 313 les unes des autres par rapport à la variable à modéliser (glissement de terrain) recensée et intégrée
 314 dans l'analyse (Thiery et al., 2004). Il est donc nécessaire de tester l'indépendance conditionnelle

315 entre toutes les variables prédictives avant de les intégrer pour créer la carte de la probabilité ou de
 316 la susceptibilité aux glissements de terrains.

317 Pour tester l'indépendance conditionnelle entre deux variables prédictives, nous avons utilisé
 318 l'équation suivante :

$$319 \quad N\{B_1 \cap B_2 \cap S\} = \frac{N\{B_1 \cap S\} N\{B_2 \cap S\}}{N\{S\}} \quad (15)$$

320 Le côté gauche de l'équation (15) est le nombre des événements de glissements de terrain observés
 321 dans la zone de recouvrement de deux variables prédictives B1 et B2. Le côté droit est le nombre
 322 prévu d'occurrences des glissements de terrain dans cette zone de chevauchement. Cette relation
 323 est présentée dans une table de contingence pour tester l'indépendance conditionnelle entre ces
 324 deux variables (Tableau 1). Ensuite, le test du chi carré (χ^2) a été appliqué à tous les couples des
 325 variables prédictives pour évaluer la variation entre les fréquences de glissement de terrain
 326 attendues (E_i) et observées (O_i) en utilisant l'équation (16). Puis, la comparaison entre χ^2 réel et
 327 χ^2 théorique pour chaque couple de variables prédictives et pour la variable à modéliser, selon 1
 328 degré de liberté et au niveau de confiance de 99% ($\chi^2 = 6.64$) doivent être déterminés (Dai et Lee,
 329 2002).

$$330 \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (16)$$

331 [Tableau 1]

332 3.4 Validation des résultats

333 Dans la modélisation statistique de la susceptibilité aux glissements de terrain, et en particulier
 334 pour les modèles qui prédisent une mesure quantitative de la susceptibilité, la courbe de ROC
 335 (receiver operating characteristic) est bien recommandée pour évaluer la performance d'un modèle
 336 prédictif, en comparant la validité des prévisions des phénomènes des glissements de terrain, avec
 337 d'autres événements observés sur le terrain (Begueria, 2006 ; Frattini et al., 2010). Il permet
 338 également de comparer un modèle avec d'autres, ou même avec d'autres ensembles de variables
 339 prédictives. Ce mode de représentation est basé sur les valeurs de seuils qui séparent les terrains
 340 stables et instables. Cette courbe montre en abscisse la "spécificité" et en ordonnée la "sensibilité".
 341 La "sensibilité" (ou taux de vrais positifs) représente la proportion de pixels affectés par des
 342 glissements correctement classés comme instables. La "spécificité" (ou 1- taux de faux positifs)
 343 représente la proportion de pixels non affectée par des glissements correctement classés comme
 344 stables (Fressard, 2013). Plus la proportion des glissements de terrain, correctement classés est
 345 élevé, plus la proportion des glissements de terrain non correctement classé est faible, et plus la
 346 courbe résultant, se rapproche du coin supérieur gauche de la courbe de ROC. Le calcul de la
 347 sensibilité et de la spécificité, associées aux différentes valeurs de seuils est exprimé par les
 348 formules suivantes :

$$349 \quad \text{Sensibilité} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (17)$$

$$350 \quad \text{Spécificité} = 1 - \text{taux de faux positifs} = 1 - \frac{FP}{FP + TN} \quad (18)$$

351 TN : nombre de pixels correctement classés hors classe ; FP : nombre de pixels non correctement
 352 classés dans la classe ; FN : nombre de pixels non correctement classés hors classe ; TP : nombre
 353 de pixels correctement classés dans la classe

354 L'aire sous la courbe de ROC ou AUC (Area Under Curve) peut être utilisée comme mesure pour
 355 évaluer le pouvoir discriminant du modèle. Les valeurs de AUC peuvent varier entre 0 et 1 (1 =
 356 discrimination parfaite, 0.5 = modèle aléatoire) tandis que les valeurs supérieures à 0.7 sont
 357 généralement considérées comme acceptable (Dumlao, 2015 ; Hosmer et al., 2013). AUC est
 358 calculée selon la totalité des surfaces des polygones situés entre les différents seuils (Beguería,
 359 2006):

$$360 \quad AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 * (y_i + y_{i+1})}}{2} \quad (19)$$

361 Où x_i est la spécificité et y_i est sensibilité au seuil i .

362 4 Résultats

363 4.1 Calcul et interprétation des valeurs pondérées

364 L'application de la méthode de la théorie de l'évidence a été réalisée en suivant les étapes qui ont
 365 été résumées dans les paragraphes précédents. Les poids positifs et négatifs ainsi que leurs
 366 contrastes ont été calculés pour chaque classe de variables prédictives. Les résultats de la relation
 367 spatiale entre les glissements de terrain et les facteurs causatifs, sont présentés dans le tableau 2.
 368 Dans ce tableau, les contrastes des pentes montrent que, plus la pente est élevée, plus l'occurrence
 369 des glissements de terrain est élevée. Par exemple, en dessous de 20%, le contraste est très faible,
 370 il atteint -2.141, et au-dessus de 20% jusqu'à 50%, le contraste est supérieur à 0.58. Lorsque la
 371 pente augmente, la contrainte de cisaillement dans le sol ou d'autres matériaux, non consolidés,
 372 augmente. Les pentes faibles, comme prévu, ont une faible fréquence des glissements de terrain à
 373 cause de faible contrainte de cisaillement. Dans le cas des facteurs géologiques, tels que la

374 lithologie et les failles : la lithologie a montré un effet très fort sur les glissements de terrain. La
375 valeur de contraste positive a été notée dans des zones très sensibles aux glissements de terrain
376 ($C=2.03$ pour les schistes du silurien, $C= 1.50$ pour les marnes d'Eo-oligocène et $C= 1.086$ pour
377 les grès et les argilites rouges du trias). La plupart des glissements de terrain se produisent
378 principalement le long des failles. La valeur de contraste est positive à une distance inférieure à
379 150m de la faille ($C > 0.22$), indiquant une zone favorable pour les glissements de terrain, par
380 contre, à une distance supérieure à cette valeur, le contraste devient négatif, ce qui indique une
381 zone défavorable pour les glissements de terrain. Cela signifie que la probabilité de glissement de
382 terrain est plus élevée à proximité des failles. Ceci est confirmé par l'étude réalisée par El khattabi
383 et al en 2013 qui montre l'effet des failles actives sur la réactivation des glissements de terrain dans
384 la ville d'Al Hoceima. Les valeurs obtenues par l'analyse du facteur de drainage montrent que les
385 zones affectées par les glissements de terrain sont caractérisées par une densité très élevée du réseau
386 hydrographique ($>8\text{km}/\text{km}^2$ ou $80\text{m}/\text{Ha}$). Cela peut être attribué au fait que la modification des
387 terrains est provoquée par le ravinement et l'érosion des berges, constituant des facteurs importants
388 de déséquilibre des pentes et provoquant des phénomènes de glissements de terrain. Dans le cas
389 des courbures en profil et en plan, la valeur de contraste est positive dans la morphologie concave
390 ($C= 0.429$ et $C= 0.252$, respectivement), par contre, elle est négative dans la morphologie convexe
391 et dans les zones planes. La raison est que, la morphologie concave conserve l'eau de pluie plus
392 longtemps et favorise l'apparition des glissements de terrain. Dans le cas de l'exposition du versant,
393 les glissements de terrain sont très abondants sur les versants nord ($C= 0.930$), nord-est ($C= 0.208$)
394 et nord-ouest ($C= 0.220$). Ceci en raison de l'influence des perturbations d'origine
395 méditerranéenne. L'aire humide provenant du nord et du nord-est, vient de buter sur les versants
396 exposés ; ce qui peut générer des pluies orageuses et par conséquent, amplifier le déclenchement
397 ou la réactivation des glissements de terrain. Par contre, la fréquence des glissements de terrain est

398 très faible dans les autres versants qui sont à l'abri de ces perturbations. Cela est expliqué par des
399 valeurs des contrastes négatifs. Dans le cas de l'occupation du sol, les valeurs des contrastes les
400 plus élevées se trouvent dans les zones des sols nus ou avec un peu de végétation ($C= 0.63$) et dans
401 les zones des végétations arborées, arbustives ou herbacées ($C= 0.471$). Cela est dû à des pressions
402 anthropiques liées au surpâturage et à la dégradation du sol, par les processus d'érosion hydrique.
403 En ce qui concerne le microzonage sismique, pour l'intervalle (1.30- 1.70), le contraste est égal à
404 0.455. Ceci explique que l'occurrence des glissements de terrain est très élevée dans cet intervalle
405 par rapport aux autres intervalles qui montrent des valeurs des contrastes négatifs. Il s'agit d'une
406 zone des glissements de terrain anciens fortement fracturés, avec des pentes fortes caractérisées par
407 des dépôts à structure lâche et non consolidée. Ces conditions constituent les principaux éléments
408 perturbateurs de l'équilibre des talus, face aux événements sismiques. Dans le cas de l'altitude, la
409 valeur de contraste est positive à une altitude inférieure à 200m ($C>0.88$). Alors qu'elle est négative
410 dans les altitudes supérieures à 200m. Ceci peut être dû à la dominance d'une lithologie sensible
411 aux glissements de terrain et à une densité de drainage très forte, qui favorise une grande possibilité
412 d'occurrence des glissements de terrain. Dans le cas de la distance aux routes, le contraste est positif
413 à une distance supérieure à 100m. cela signifie que le nombre des glissements de terrain situés à la
414 proximité des routes est relativement faible, en comparaison à celui des autres glissements qui se
415 situent dans la zone d'étude. Cela indique qu'il existe d'autres facteurs intervenant dans
416 l'apparition de ces phénomènes.

417 [Tableau 2]

418 **4.2 Évaluation de l'indépendance conditionnelle**

419 Avant de procéder aux calculs des probabilités d'occurrence des glissements de terrain, un test chi-
420 carré χ^2 a été calculé, pour évaluer l'indépendance conditionnelle entre les variables prédictives.
421 Ce calcul a été réalisé en tenant compte qu'un pixel représentant le barycentre de chaque glissement
422 (Thiery et al., 2004). Dans cette étape, toutes les variables prédictives utilisées dans cette analyse,
423 ont été converties en une configuration binaire, (présence ou absence des glissements de terrain)
424 sur la base des poids positifs et négatifs calculés pour chaque variable (Mezughi et al., 2011; B.
425 Pradhan, Oh, & Buchroithner, 2010; Regmi et al., 2010). Les classes des facteurs qui ont des poids
426 positifs, ont été considérées comme des facteurs de présence d'un événement du glissement, et les
427 classes qui ont des poids négatifs sont considérées comme un facteur d'absence d'un phénomène
428 de glissement.

429 La lecture du tableau 3 permet de dégager le test d'indépendance entre toutes les paires des
430 variables prédictives binaires. La valeur de chi-carré χ^2 calculée, pour chaque couple, est comparée
431 à la valeur de table pour 1 degré de liberté au niveau de confiance de 99% (6.64). Les valeurs de
432 chi-carré χ^2 , supérieures à cette valeur, indiquent la présence d'une dépendance conditionnelle
433 entre les deux variables. C'est le cas du facteur « l'altitude » avec les facteurs « la densité du
434 drainage », « la lithologie » et « le microzonage sismique », c'est aussi le cas de la courbure
435 transversale avec la pente et la courbure longitudinale, comme c'est le cas de la densité du réseau
436 hydrographique avec la distance aux routes. Ces couples de facteurs ne peuvent pas être intégrés
437 dans le processus de modélisation. Toutefois, il est recommandé de les combiner pour créer une
438 néo-variable prédictive (Ezzine et al., 2008; Mastere, 2011; Thiery, 2007). Dans notre cas, la
439 combinaison entre la densité des réseaux hydrographiques et les distances aux routes est
440 impossible, car ils sont conditionnellement dépendants. Compte tenu du fait que ces deux variables
441 sont parmi les facteurs les plus importants dans le déclenchement des glissements de terrain dans

442 la ville d'Al Hoceima et sa périphérie, nous proposons de les introduire dans l'analyse spatiale
443 comme étant une néo-variable « densité du réseau hydrographique + distance aux routes ». Ainsi,
444 le regroupement de classes des deux variables s'est fait comme suit :

- 445 • Classe1 : densité de 0 à 2 km/km² + distance à la route supérieure à 200m
- 446 • Classe2 : densité de 2 à 4 km/km² + distance à la route entre 150-200m
- 447 • Classe3 : densité de 4 à 6 km/km² + distance à la route entre 100-150 m
- 448 • Classe4 : densité de 6 à 8 km/km² + distance à la route entre 50-100
- 449 • Classe5 : densité supérieure à 8 km/km² + distance à la route inférieure à 50m

450 Ces deux variables combinées ont été testées par le test du V de Cramer pour définir le niveau
451 d'association entre eux. La valeur obtenue de V de Cramer est égale à 0.29, cela indique que nous
452 pouvons alors regrouper ces variables et les introduire dans cette analyse. (Stafford & Bodson,
453 2006).

454 [Tableau 3]

455 **4.3 Combinaisons des cartes des facteurs et validité du modèle**

456 Pour examiner l'influence de chaque facteur sur le pouvoir prédictif de notre carte d'aléa, nous
457 avons choisi huit combinaisons de différents facteurs indépendants (Tableau 4) (Mezughi et al.,
458 2011; B. Pradhan et al., 2010 ; Thiery et al., 2004 ; Mastere, 2011), représentant les facteurs
459 topographiques, hydrologiques, géologiques, sismiques et l'occupation du sol (Regmi et al., 2010
460 ; Mezughi et al., 2011). Ensuite, la probabilité finale de chaque maille et pour chaque modèle (ou
461 chaque combinaison) est calculée en utilisant l'équation de la probabilité à postériori (14)
462 (Bonham-Carter, 1994 ; Pimiento Chamorro, 2010). Ceci permet de cartographier huit cartes de la

463 susceptibilité aux glissements de terrain, dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie, en utilisant la
464 commande ArcGIS Spatial Analyst (figure 7).

465 [Tableau 4]

466 [Figure 7]

467 La capacité de la prédiction ou de la discrimination de chaque modèle est déterminée par l'aire
468 sous la courbe (AUC) (figure 8). Sur la base de ces valeurs, on constate que les modèles 1 et 8
469 fournissent de bons résultats. Donc ils prévoient plus de glissements de terrain dans la zone de forte
470 susceptibilité, que les autres modèles. En revanche, on remarque une diminution des valeurs de
471 AUC pour les autres modèles. Le modèle 7 représente la valeur la plus petite ; cela est dû aux
472 variables de la densité des réseaux hydrographiques, à la lithologie et au microzonage sismique qui
473 ne sont pas pris dans l'analyse. En outre, les secondes valeurs des AUC pour les modèles 4, 5 et 6,
474 sont relativement supérieures à celle du modèle précédent, où les facteurs de la lithologie, la
475 distance aux failles et la microzonage sismique, ne sont pas introduits dans l'analyse. L'absence de
476 ces facteurs dans ces quatre modèles, contribue à la diminution de leurs pouvoirs prédictifs. Aussi,
477 on voit que la distribution des classes de probabilité présente une perturbation dans notre zone
478 d'étude (figure 7 : M4, M5, M6 et M7), qui se traduit par des zones sensibles aux glissements de
479 terrain qui s'inscrivent dans les formations carbonatées de la chaîne de Bokkoya. Ainsi
480 l'élimination du facteur de pente dans le modèle 3, des facteurs d'exposition des versants et de la
481 courbure longitudinale dans le modèle 2, contribue à diminuer la valeur de AUC lorsqu'on compare
482 cette valeur avec la valeur du modèle 1. Cela signifie que les facteurs topographiques ont une
483 influence sur la genèse des glissements de terrain. Toutefois, la valeur de AUC du modèle 8 permet
484 de déduire que la néo-variable formée par « la densité du réseau hydrographique et la distance aux

485 routes contribuent relativement à l'amélioration du pouvoir prédictif du modèle 8. Ceci indique
486 l'importance du réseau hydrographique et l'impact des routes sur la genèse des glissements de
487 terrain.

488 Parmi les 8 combinaisons représentatives des différents facteurs déclenchants des glissements de
489 terrain dans la zone d'étude, il existe une seule combinaison à haute capacité de prédiction. Il s'agit
490 de la combinaison du modèle 1 avec un taux élevé de surface sous la courbe (AUC= 0899). Cette
491 valeur a été constatée à partir de l'intégration de cinq facteurs contribuant à améliorer le pouvoir
492 prédictif de modèle responsables des glissements de terrain dans la ville d'Al Hoceima, à savoir la
493 lithologie, les failles, la pente, le réseau hydrographique et la sismicité.

494 [Figure 8]

495 **4.4 Zonage de l'aléa**

496 Afin de faciliter la lecture et l'interprétation de la carte de l'aléa, nous avons adopté une méthode
497 fréquemment utilisée par plusieurs auteurs (Mastere, 2011; Thiery et al., 2004; Van Den Eeckhaut
498 et al., 2009) et à partir de laquelle nous choisirons les classes d'aléa glissement de terrain. Cette
499 méthode reclassifie la carte en plusieurs gammes en se basant sur les changements brutaux de la
500 courbe cumulative de probabilité à postériori, représentés ici par des seuils. Comme dans la courbe
501 cumulée ci-dessus (figure 9), trois seuils de probabilité ont été identifiés sur la courbe où les limites
502 des classes de susceptibilité ont été définies : faible (0 – 0.005), modérée (0.005 - 0.014), élevée
503 (0.014 - 0.108) et très élevée (0.108 – 0.719). Le zonage de l'aléa glissements de terrain a été
504 réalisé dans la ville d'Al Hoceima et sa périphérie à partir de ces classes (figure 10).

505 [Figure 9]

506 [Figure 10]

507 Selon cette classification, le pourcentage de surface de chaque classe de l'aléa a été calculé. Comme
508 le montre le tableau 5, 76.77% de la surface de la zone d'étude, est désignée pour être une zones
509 d'aléa nul ou faible. Les zones d'aléa moyen couvrent seulement 4.15% de la zone d'étude. Par
510 contre les zones d'aléa élevé et très élevé représentent respectivement 9.21% et 9.86%. La
511 comparaison entre la carte de l'aléa obtenue et la répartition des glissements de terrain dans la zone
512 d'étude montre que 61.69% des glissements de terrain se localisent dans une zone d'aléa très élevé,
513 29.14% s'inscrivent dans une zone d'aléa élevé, 6.19% se situent dans une zone d'aléa moyen et
514 2.98% dans une zone d'aléa nul ou faible.

515 Selon cette classification, une grande partie de la zone d'étude se trouve dans des zones
516 de susceptibilité très faible, mais certaines parties centrales de la ville d'Al Hoceima, au niveau du
517 massif de Bokkoya, montrent quelques zones de susceptibilité moyennes. Les zones de
518 susceptibilités élevées et très élevées se localisent principalement au nord de la ville au sein des
519 glissements anciens de grandes ampleurs.

520 [Tableau 5]

521 **5 Discussion et conclusion**

522 Afin d'obtenir un bon modèle de susceptibilité des glissements de terrain, la sélection des facteurs
523 causatifs, de ces phénomènes, a été une étape importante dans la méthode de la théorie de
524 l'évidence (méthode bayésienne bivariée). La connaissance préalable de ces facteurs, responsables
525 des déclenchements des glissements de terrain, est nécessaire pour la cartographie de la
526 susceptibilité aux glissements de terrain. De nombreux chercheurs ont utilisé un nombre varié de

527 facteurs de déclenchement pour produire la carte d'aléa glissements de terrain (Carrara, 1983; Lee,
528 2005 ; Pradhan et al., 2010 ; Mohammady et al., 2012 ; Devkota et al., 2013 ; Dumlao & Victor,
529 2015; Ozdemir & Altural, 2013; Vakhshoori & Zare, 2016 ; Bai et al., 2010). Ces facteurs ont été
530 utilisés fréquemment selon la disponibilité et l'accessibilité de l'information. Ces facteurs peuvent
531 être sélectionnés en se basant, d'une part sur la connaissance de leurs mécanismes impliqués dans
532 le déclenchement des glissements de terrain et leur distribution spatiale, d'autre part, sur le
533 processus de sélection quant aux variables prédictives adéquates pour le modèle de susceptibilité.
534 À titre d'exemple, plusieurs combinaisons ont été sélectionnées en respectant la condition de
535 l'indépendance entre les variables prédictives ; nos résultats ont montré qu'un grand nombre de
536 facteurs n'obtient pas nécessairement une meilleure précision de prédiction. Nous avons constaté
537 que la combinaison n°8 ne peut aboutir à de bons résultats, même si elle comporte un nombre
538 supérieur de facteurs (AUC= 0.897). Tandis que, la combinaison du modèle 1 contient moins de
539 facteurs et aboutit à une précision de prédiction élevée (AUC= 0.898).

540 La plupart des facteurs identifiés dans l'analyse ont une forte corrélation avec les glissements de
541 terrain survenue. Les résultats montrent que les conditions géologiques, la lithologie et les failles,
542 peuvent avoir une influence positive sur le déclenchement des glissements. À titre d'exemple,
543 comme le montre les résultats, les glissements sont concentrés dans la lithologie dominée par, les
544 marnes, les schistes, les argilites, les grès rouges ou par la proximité des failles. Le dernier résultat
545 est confirmé sur le terrain par de nombreux glissements de terrain observés à l'abord de la faille
546 active d'Ajdir traversant la ville d'Al Hoceima. En outre, le réseau hydrographique et les pentes
547 fortes constituent un effet significatif sur l'occurrence de ces phénomènes. Ils sont suivis par
548 l'influence modérée des autres facteurs : tels que l'action anthropique et le microzonage sismique
549 qui ont un effet moyen sur la survenance de ces événements.

550 La superposition des glissements de terrain réservés à la validation avec la carte de probabilité a
551 postérieure (carte de susceptibilité) permet de classer la majorité des mailles de glissements de terrain
552 observés, dans des classes d'aléa élevé et très élevé (plus de 2/3 des glissements de terrain observés
553 s'inscrivent dans des classes de susceptibilité élevée et très élevée). Ces zones se localisent
554 principalement au sein des glissements anciens, de grandes ampleurs, par conséquent celles-ci sont
555 marquées par d'importants glissements de terrain et une forte érosion régressive, souvent
556 spectaculaires, mettant en évidence le degré de dégradation très avancée de la surface.

557 La carte finale d'aléa glissements de terrain obtenue, peut constituer un outil pour les pouvoirs
558 publics chargés de l'aménagement du territoire. Elle permettra aux décideurs locaux de focaliser
559 leurs efforts pour diminuer le risque dans ces zones de susceptibilité élevée, en donnant la priorité
560 à ces zones, quant aux autres enquêtes d'investigation permettant de suggérer des aménagements
561 de protection.

562 Comme recommandation finale, les résultats obtenus montrent que le modèle suivi dans la présente
563 étude présente des performances satisfaisantes. Cette performance dépend non seulement de la
564 méthodologie suivie, mais aussi de la qualité des données disponibles et de l'inventaire effectué
565 sur le terrain. Cependant, sans oublier que les résultats finaux obtenus peuvent être améliorés si on
566 dispose d'une part, de données qui ont une relation directe avec l'apparition des glissements de
567 terrain dans la zone d'étude, telles que : les données des pluies, les données géotechniques et les
568 données hydrogéologiques, réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, et d'autre part, d'une carte
569 lithologique de la zone étudiée à grande échelle, permettant, la définition pétrographique des roches
570 intermédiaires qui ne sont pas définies dans la carte géologique actuelle d'Al Hoceima (échelle
571 1/50000). Pour cette raison, si la qualité des données augmente, la performance des cartes de
572 susceptibilités produites augmente et permet de créer des modèles suffisamment pertinents.

573 En outre, pour évaluer l'aléa de tous les types de mouvements de terrain dans la ville d'Al Hoceima
574 et sa périphérie, on pourrait adopter la même procédure de la méthodologie de modélisation
575 statistique par la théorie de l'évidence de cartographie de l'aléa. Ces méthodes peuvent être
576 appliquées à chaque type de mouvements de terrain menaçant la ville d'Al Hoceima telles que les
577 coulées de débris et les chutes du bloc, en prenant en considération les conditions
578 environnementales locales d'un type de mouvement donné (Thiery et al.,2004).

579 Sur la base de nos résultats, l'analyse effectuée à l'aide de l'approche bivariée fondée sur le
580 théorème de Bayes (Théorie de l'évidence ou *Weight of evidence*) a montré les contributions et les
581 limites suivantes :

582 *Les contributions*

- 583 • La méthode utilisée permet de calculer le poids positif ou négatif et leur contraste relatif à
584 chaque modalité d'une variable prédictive. Ces poids et ces contrastes sont calculés
585 séparément pour chaque zone d'étude. Ainsi, elle permet d'obtenir des poids différents pour
586 les mêmes variables prédictives, dans différents secteurs d'études.
- 587 • La méthode permet aussi de calculer la valeur pondérée de chaque variable prédictive en se
588 basant sur des formules statistiques et en évitant ainsi le choix subjectif des facteurs de
589 pondérations.

590 *Les limites*

- 591 • La méthode ne convient pas pour les zones où les différents types de mouvements de terrain
592 se produisent.
- 593 • La méthode a besoin d'informations précises et fiables sur les glissements de terrain passés.

- 594 • Le poids de chaque modalité d'une variable prédictive dépend du nombre des glissements
595 de terrain utilisés dans l'analyse et la superficie de la zone de cette modalité.
- 596 • Lorsque l'analyse bivariée est constituée de plusieurs variables prédictives, la sélection de
597 la combinaison appropriée devient compliquée en raison des nombreuses combinaisons
598 possibles.

Draft

Références bibliographiques

- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., Cheng, Q. M., & Wright, D. F. (1993). Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. *Computers in Geology*, p. 13–32.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1), 15-31.
- Azzouz, O., El Fellah, B., et CHalouan, A. 2002. Processus de glissement dans le Massif de Bokoya (Rif interne, Maroc) : exemple de Cala Bonita. *Bulletin de l'Institut scientifique*. 24 : 33-40. Disponible à l'adresse <http://www.israbat.ac.ma/>.
- Bai, SB., Wang, J., Lü, GN., Zhou, PG., Hou, SS., et Xu, SN. 2010. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*. 115(1),23-31.Doi: 10.1016/j.geomorph .2009.09.025.
- Beguería, S. 2006. Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management. *Natural Hazards*. 37(3), 315-329. Doi: 10.1007/s11069-005-5182-6.
- Bonham-Carter, G. F. (1991). Integration of geoscientific data using GIS. In: Goodchild MF, Rhind DW, Maguire DJ (eds) *Geographic information systems: principle and applications*. Longdom, London, pp 171–184
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., & Wright, D. F. (1989). Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential. *Geological Survey of Canada*, p. 171 -183.
- Bonham-Carter, GF. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon Press, Ottawa, pp.302-328.

- Bui, D. T., Lofman, O., Revhaug, I., et Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59(3), 1413-1444. doi: 10.1007/s11069-011-9844-2.
- Carrara, A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3),403-426. doi: 10.1007/bf01031290.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). Gis technology in mapping landslide hazard, in: carrara, a., guzzetti, f. (eds.), *geographical information systems in assessing natural hazards, advances in natural and technological hazards research*. springer netherlands, pp. 135–175
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Smith, et J. T. 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263. doi: 10.1007/s10064-013-0538-8.
- Dai, F., et Lee, C. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3), 213-228. doi:10.1016/S0169-555X(01)00087-3.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., et Althuwaynee, O. F. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65(1), 135-165. doi: 10.1007/s11069-012-0347-6.
- Dumlao, A., et Victor, J. 2015. GIS-aided Statistical Landslide Susceptibility Modeling And Mapping Of Antipolo Rizal (Philippines). Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 26 (2015) 012031. doi:10.1088/1755-1315/26/1/012031.

- El Khattabi, M., El Garouani, A., & Plotto, P. (2013). Les mouvements de terrain dans la zone urbaine de la ville d'Al Hoceima (Maroc Nord-Central): Impact sur les infrastructures routières. *Revue des études appliquées en sciences de la terre, géographie et aménagement - Geomagheb*, 9, 47-55
- ESRI, 2016. ArcGIS Desktop : version 10.6. Institut de recherche sur les systèmes environnementaux, Redlands, Californie, Etats-Unis.
- Ezzine, H., Merrouni, F. E., et Mansour, M. 2008. Modélisation probabiliste de la susceptibilité aux mouvements de terrain par la théorie de l'évidence. Cas du contexte complexe du Rif Marocain. *GEO OBSERVATEUR*, Numéro 17, 47-63.
- Fares, A., Rollet, M., et Broquet, P. 1994. Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. *Revue française de géotechnique*. 69, 63-72. Doi : 10.1051/geotech/1994069063.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology* 111, 62–72. doi:10.1016/j.enggeo.2009.12.004
- Fressard, M. 2013. Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation. Thèse de doctorat, *Laboratoire LETG - Caen - Géophen UMR 6554 CNRS*. Université de Caen Basse-Normandie.
- Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (2006). *Landslide hazard and risk*: John Wiley & Sons.
- Gorsevski, P. V., Donevska, K. R., Mitrovski, C. D., et Frizado, J. P. (2012). Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: a case study using ordered weighted average. *Waste Manag*, 32 (2), 287-296. doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.023.

- HCP, (2014). Caractéristiques démographiques et socio-économiques, recensement général de la population et de l'habitat 2014, haut commissariat au plan, Direction provinciale d'Al Hoceima, 75p.
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S., Sturdivant, R.X. (2013). Applied logistic regression, Third edition. ed, Wiley series in probability and statistics. Wiley, Hoboken, New Jersey
- Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1477-1491. doi: 10.1080/01431160412331331012.
- Maquaire, O. (2002). Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain). Processus, Fonctionnement, Cartographie. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219p.
- Margaa, K., et Abdelgader, A. (1998). Une méthodologie de cartographie des zones potentiellement instables Application à la région d'Al Hoceima (Maroc). *Canadian geotechnical journal*, 35(3), 460-470. doi: 10.1139 / cgj-35-3-460.
- Mastere, M. (2011). La susceptibilité aux mouvements de terrain dans la province de Chefchaouen (Rif Central, Maroc) : Analyse Spatiale, Modélisation Probabiliste Multi-Echelle & Impacts sur l'Aménagement et l'Urbanisme. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00679623>.
- Mégard, F. (1963). La partie orientale du massif des Bokoya : études géologiques. Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie.
- Mezughi, T., Akhir, J. M., Rafek, A. G., & Abdullah, I. (2011). A multi-class weight of evidence approach for landslide susceptibility mapping applied to an area along the E–W highway (Gerik–Jeli), Malaysia. *EJGE*, 16, 1259-1273. Disponible à l'adresse :

<https://ukm.pure.elsevier.com/en/publications/a-multi-class-weight-of-evidence-pproach-for-landslide-susceptib>.

- Millies-Lacroix, A. (1968). Les glissements de terrains. Présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de masse dans le Rif (Maroc septentrional). *Mines et Géologie*, 27, 45-55.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 221-236. doi:10.1016/j.jseaes.2012.10.005.
- Netra R. Regmi, John R. Giardino, John D. Vitek. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, *Geomorphology*, 115, 172-187, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>.
- Neuhäuser, B., & Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1), 12-24. doi:10.1016/j.geomorph.2006.08.002.
- Orme, A.R. (2002). Shifting paradigms in geomorphology: the fate of research ideas in an educational context. *Geomorphology* 47, 325–342.
- Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197. doi:10.1016/j.jseaes.2012.12.014.
- Pimiento Chamorro, E. (2010). Shallow landslide susceptibility: modelling and validation. Thèse de doctorat. Département de géographie physique et de science des écosystèmes. Université Ehime, Japon. Disponible à l'adresse <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3559066>.
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., Moradi, H.R. (2013). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in

landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arab J Geosci* 6, 2351–2365.

<https://doi.org/10.1007/s12517-012-0532-7>

Pradhan, B., Oh, H.-J., et Buchroithner, M. (2010). Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(3), 199-223. doi: 10.1080/19475705.2010.498151.

Regmi, N. R., Giardino, J. R., et Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1–2), 172-187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>.

Reza Pourghasemi, Hamid & Goli Jirandeh, Abbas & Pradhan, Biswajeet & Xu, Chong & Gokceoglu, Candan. (2013). Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran 2. *Journal of Earth System Science*. 122. doi :10.1007/s12040-013-0282-2.

Ru-Hua, S., Hiromu, D., Kazutoki, A., Kurokawa, U., & Sumio, M. (2008). Modeling the potential distribution of shallow-seated landslides using the weights of evidence method and a logistic regression model: a case study of the Sabae Area, Japan. *International Journal of Sediment Research*, 23(2), 106-118.

Spiegelhater, D., Kill-Jones, R.P., 1984. Statistical and knowledge approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology. *Journal of the Royal Statistical Society*, 147, 35-77.

Thiery, Y. (2007). Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux mouvements de versant : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de doctorat. Département *Géographie Physique et Environnement*. Université de Caen. Disponible à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00259135>.

- Thiery, Y., Sterlacchini, S., Malet, J.-P., Puissant, A., et Maquaire, O. (2004). Modélisation spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain. Paper presented at the Conférence CASSINI-SIGMA 2004 : Géomatique et Analyse Spatiale, Grenoble, p. 1-13.
- Vakhshoori, V., & Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5), 1731-1752. doi: 10.1080 / 19475705.2016.1144655.
- Van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., & Poesen, J. (2009). Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 507-521. Doi:10.5194/nhess-9-507-2009.
- Van Westen, C. J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. Ph-D Dissertation, Technical University Delft. ITC-PublicationNumber 15, ITC, Enschede, The Netherlands, pp. 160-167.
- Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J. and Soeters, R. (2006) Landslide Hazard and Risk Zonation— Why Is It Still so Difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167-184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287. doi: 10.1016/j.catena.2011.01.014.

Tableaux

Tableau 1 : Tableau de contingence pour l'indépendance conditionnelle des tests.

		Variable B1		
		Absence	Présence	Total
Variable B2	Absence	$O_1 = \{\overline{B_1} \cap \overline{B_2} \cap S\}$ ($E_1 = \{\overline{B_1} \cap S\} * \{\overline{B_2} \cap S\} / \{S\}$)	$O_3 = \{B_1 \cap \overline{B_2} \cap S\}$ ($E_3 = \{B_1 \cap S\} * \{\overline{B_2} \cap S\} / \{S\}$)	$\{\overline{B_2} \cap S\}$
	Présence	$O_2 = \{\overline{B_1} \cap B_2 \cap S\}$ ($E_2 = \{\overline{B_1} \cap S\} * \{B_2 \cap S\} / \{S\}$)	$O_4 = \{B_1 \cap B_2 \cap S\}$ ($E_4 = \{B_1 \cap S\} * \{B_2 \cap S\} / \{S\}$)	$\{B_2 \cap S\}$
	Total	$\{\overline{B_1} \cap S\}$	$\{B_1 \cap S\}$	$\{S\}$

Tableau 2 : Corrélation spatiale entre les facteurs causatifs et les glissements de terrain.

W+: Poids positif; **W-** : Poids négatif; **C** : Contraste.

Facteur causatif (variable prédictive)	Total de pixels de chaque classe	Pixels de glissements dans chaque classe	W+	W-	C
Distance aux failles (m)					
0-75	397524	5583	0.147	-0.080	0.228
75-150	300746	4392	0.187	-0.070	0.257
150-225	201797	2445	-0.002	0.000	-0.003
225-300	128301	1488	-0.047	0.005	-0.052
300>	184309	818	-1.014	0.109	-1.123
Exposition des versants					
nord	223551	5314	0.684	-0.247	0.930
nord-est	188615	2716	0.173	-0.035	0.208
est	158663	1094	-0.571	0.064	-0.635
sud-est	132108	835	-0.659	0.058	-0.717
sud	107835	451	-1.074	0.063	-1.137
sud-ouest	84852	332	-1.141	0.050	-1.191
ouest	122311	1164	-0.246	0.024	-0.271
nord-ouest	194100	2820	0.182	-0.039	0.220
PLAT	642	0		0.001	
Hypsométrie (m)					
0-100	368813	7527	0.528	-0.357	0.884
100-200	311388	6676	0.578	-0.310	0.888
200-300	259872	503	-1.847	0.209	-2.056
>300	272604	20	-5.121	0.257	-5.378
Densité du réseau hydrographique (km/km²)					
0-2	444850	767	-1.963	0.410	-2.372

2-4	254135	1354	-0.831	0.141	-0.971
4-6	202485	723	-1.233	0.134	-1.367
6-8	135173	1361	-0.189	0.021	-0.211
>8	176034	10521	1.643	-1.105	2.748
Lithologie					
calcaire et dolomie	713233	247	-3.569	0.887	-4.456
schiste silurien	216223	9044	1.267	-0.762	2.030
marne Eo-oligocène	101143	4168	1.252	-0.248	1.500
grès et argilites rouges	28906	973	1.042	-0.045	1.086
sable dunaire consolidé	104548	197	-1.874	0.078	-1.951
sable dunaire non consolidé	26346	81	-1.383	0.017	-1.399
alluvion	22278	16	-2.839	0.018	-2.857
Microzonage sismique (période)					
0.10s- 0.50s	123850	1362	-0.100	0.011	-0.111
0.50s- 0.90s	226727	2000	-0.323	0.062	-0.385
0.90s- 1.30s	214488	1905	-0.316	0.057	-0.373
1.30s - 1.70s	647612	9459	0.187	-0.267	0.455
Occupation du sol					
Zone urbanisée ou bâtie	215858	348	-2.030	0.174	-2.204
Végétation arborée ou arbustive et/ou herbacée	92886	1716	0.426	-0.045	0.471
Terrain cultivé	110238	1445	0.077	-0.008	0.085
Sol nu, sans ou avec peu de végétation	766033	11217	0.190	-0.440	0.629
Forêt	27662	0		0.023	
Gradient de pente (degré)					
0°-10°	287072	525	-1.904	0.237	-2.141
10°-20°	406521	3950	-0.225	0.097	-0.323
20°-30°	352762	6230	0.380	-0.209	0.589
30°-40°	128107	3448	0.811	-0.157	0.968
40°-50°	24843	571	0.649	-0.019	0.668
>50°	13372	2	-4.409	0.011	-4.420
Courbure en plan					
Concave	474926	7301	0.239	-0.190	0.429
plat	181680	1147	-0.660	0.082	-0.742
convexe	556071	6278	-0.074	0.059	-0.132
Courbure en profil					
concave	526951	7308	0.135	-0.117	0.252
plat	144874	899	-0.677	0.065	-0.742
convexe	540852	6519	-0.008	0.006	-0.014
Distance aux routes (m)					
0-50	256957	2272	2.053	0.071	-0.084

50-100	167548	2217	1.878	-0.015	-0.044
100-150	118957	1569	1.880	-0.010	0.010
150-200	93084	1506	1.791	-0.028	0.035
>200	576131	7162	1.905	-0.022	0.079

Tableau 3 : Résultats de l'évaluation de l'indépendance conditionnelle. E : Exposition des versants, A : Hypsométrie, DRH: Densité du réseau hydrographique, L: Lithologie, OS: Occupation du sol, GP: Gradient de pente, CL: Courbure longitudinale, CT: Courbure transversale, DF: Distance aux failles, DR: Distance aux routes, MS: Microzonage sismique. Les valeurs en gras indiquent une dépendance conditionnelle entre deux facteurs. Le test de khi2 est réalisé avec 1 degré de liberté et au niveau de confiance de 99% ($\chi^2=6.64$).

	EV	H	DRH	L	OS	GP	CL	CT	DF	DR	MS
EV		1.034	0.654	5.090	0.193	0.592	1.875	0.158	0.911	0.863	1.976
H			8.321	7.128	2.195	0.027	3.99	0.596	3.317	5.653	7.847
DRH				1.210	5.936	2.736	1.497	2.194	0.361	9.299	0.110
L					0.599	0.027	2.023	0.596	3.317	2.927	3.447
OS						0.149	0.159	0.214	2.630	0.113	0.824
GP							0.399	7.323	0.019	2.604	1.275
CL								14.75	0.067	5.164	0.281
CT									0.030	0.011	0.581
DF										0.318	4.962
DR											1.023
MS											

Tableau 4 : Combinaisons des variables prédictives et leurs résultats des AUC

Combinaisons de facteurs	AUC
M1= GP+EV+CL+DRH+L+DF+OS+MS	0.899
M2= GP+ DRH+ L+DF+OS	0.889
M3= EV+ CL+DRH+L+DF+OS+MS	0.891
M4= GP+EV+CL+DRH+DF+OS+MS	0.829
M5= GP+EV+CL+DRH+OS	0.822
M6= GP+EV+CL+DF+DR+OS	0.824
M7= GP+EV+CL+DF+DR+OS	0.769
M8= GP+EV+CL+NV(DRH+DR)+L+DF+OS+MS	0.897

Tableau 5 : Caractéristiques des quatre classes de la susceptibilité aux glissements de terrain

classe	valeurs de l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain reclassifié	Classe de susceptibilité	Nombre total de pixels	% des surfaces des classes	Nombre de pixels des glissements de terrain	% des surfaces des glissements de terrain
1	0 – 0.005	Nulle/ faible	930912	76.77	708	2.98
2	0.005 - 0.014	Moyenne	50361	4.15	1467	6.19
3	0.014 - 0.108	Élevée	111894	9.21	6907	29.14
4	0.108 – 0.719	Très Élevée	119510	9.86	14622	61.69

Draft

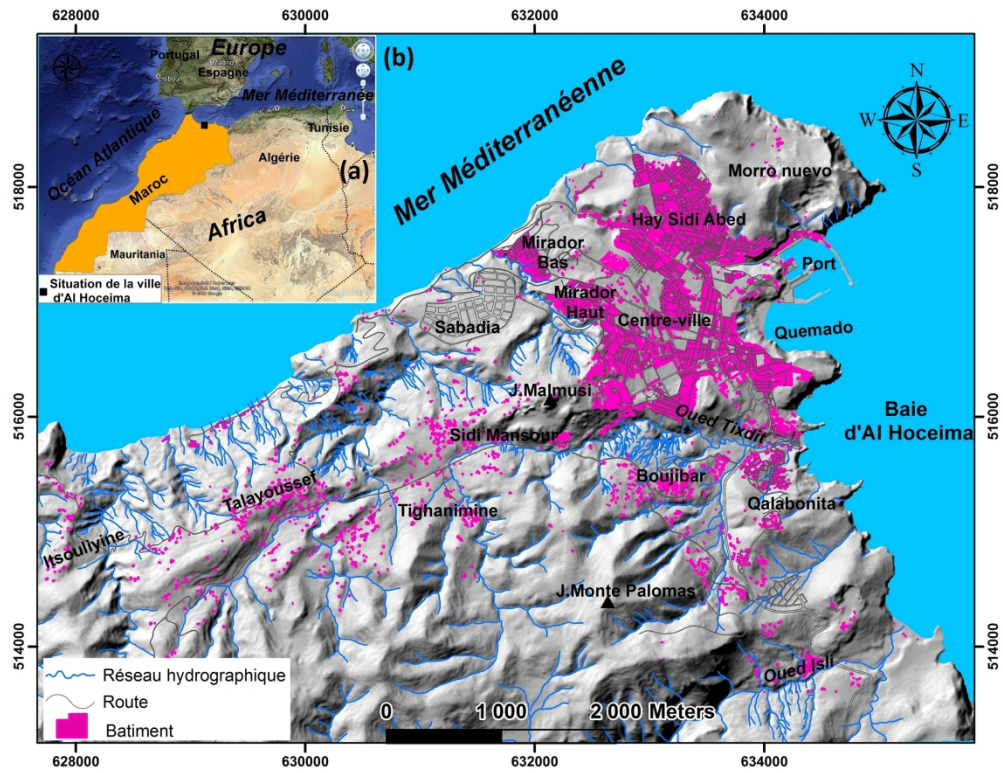


Figure 1 : Situation de la ville d'Al Hoceima et sa périphérie : (a) emplacement géographique du site d'étude au niveau du Maroc et du continent africain (© 2020 Google), (b) zoom sur de la ville d'Al Hoceima et sa périphérie. Carte créée à l'aide d'ArcGIS 10.4.1. Les données représentées proviennent de la carte topographique d'Al Hoceima, échelle 1/25000.

205x157mm (300 x 300 DPI)

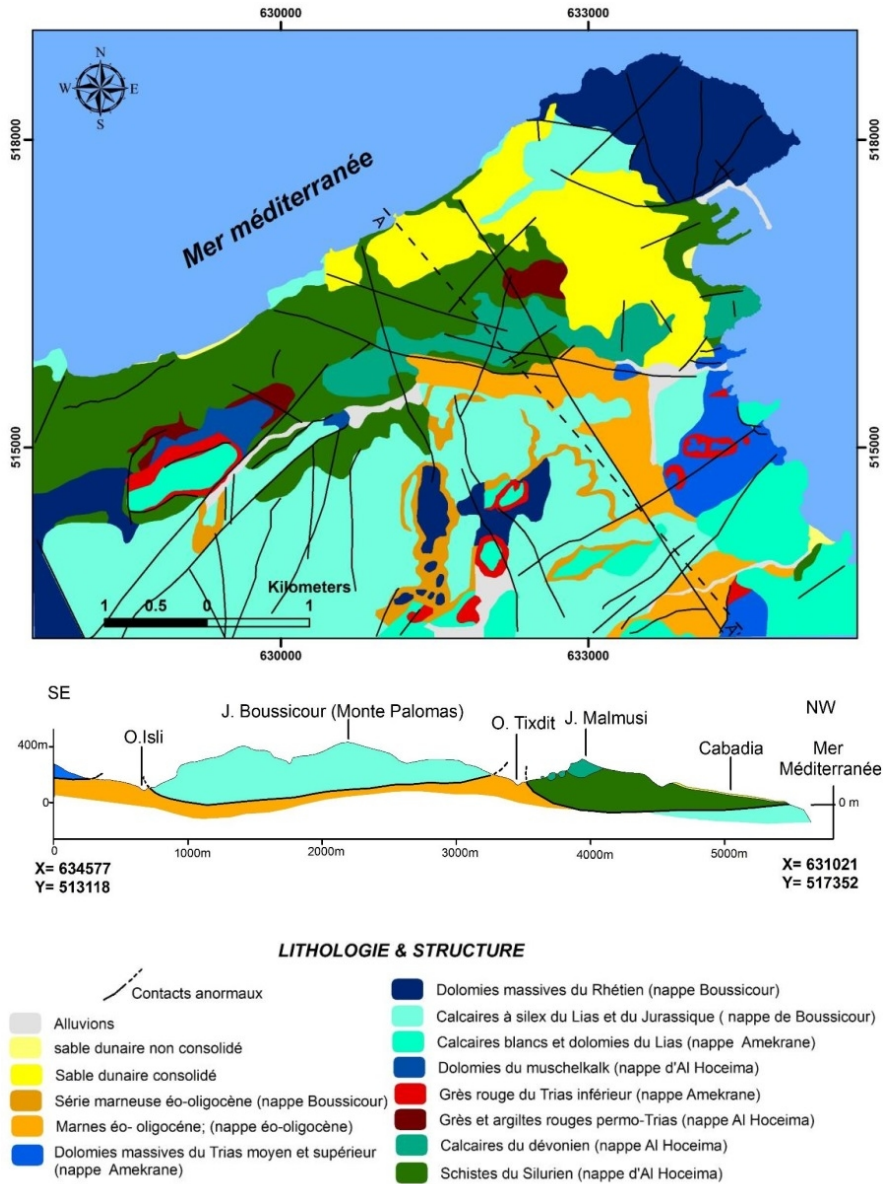


Figure 2 : Carte et coupe géologiques montrant la lithologie et la structure du massif de Bokkoya au niveau de la ville d'Al Hoceima et périphérie. Les données représentées proviennent de la carte géologique d'Al Hoceima, échelle 1/50000. Carte et coupe créés à l'aide d'Arcgis 10.4.1.

268x322mm (96 x 96 DPI)

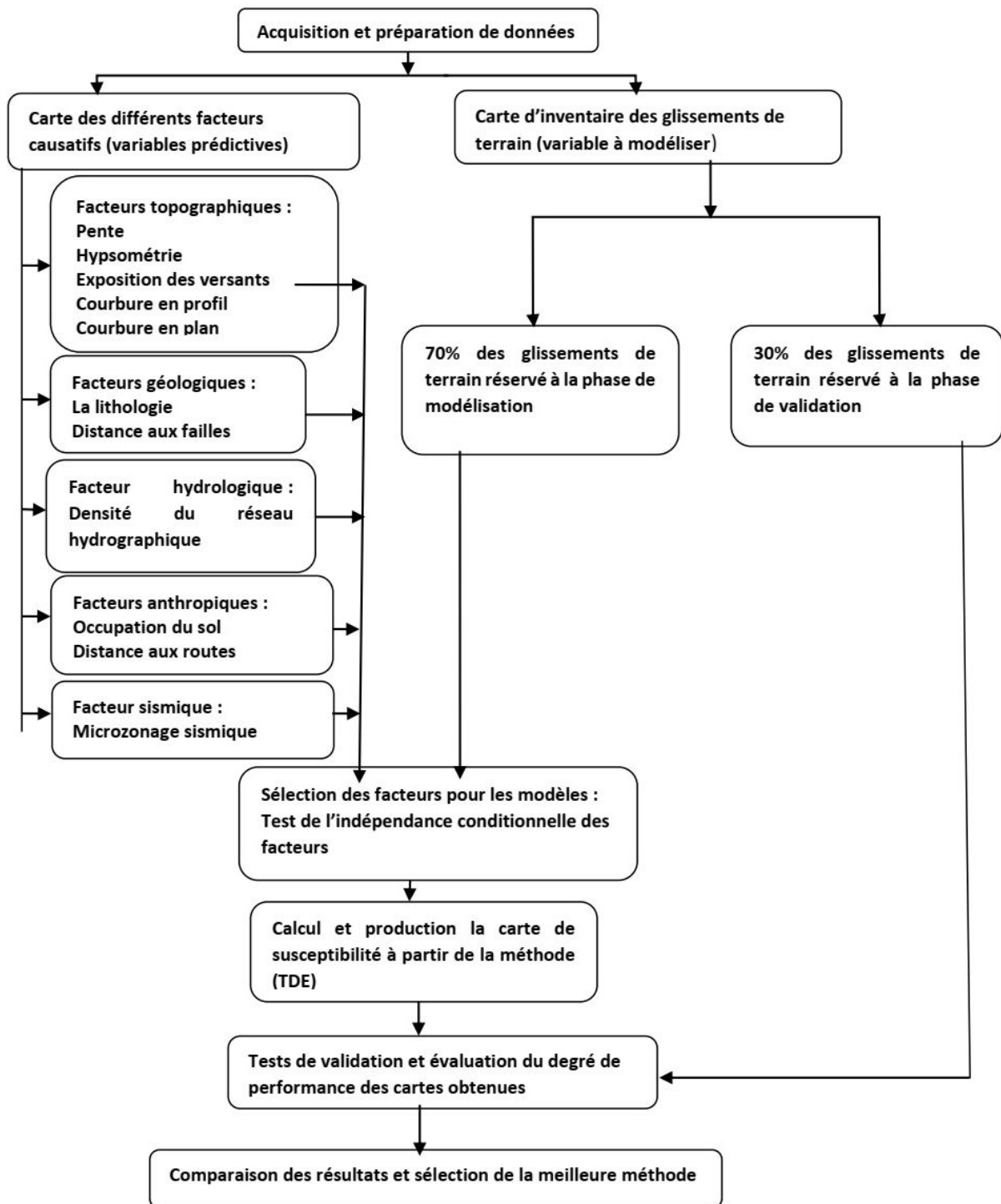


Figure 3: Organigramme montrant les données sources et les démarches prises pour produire les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain.

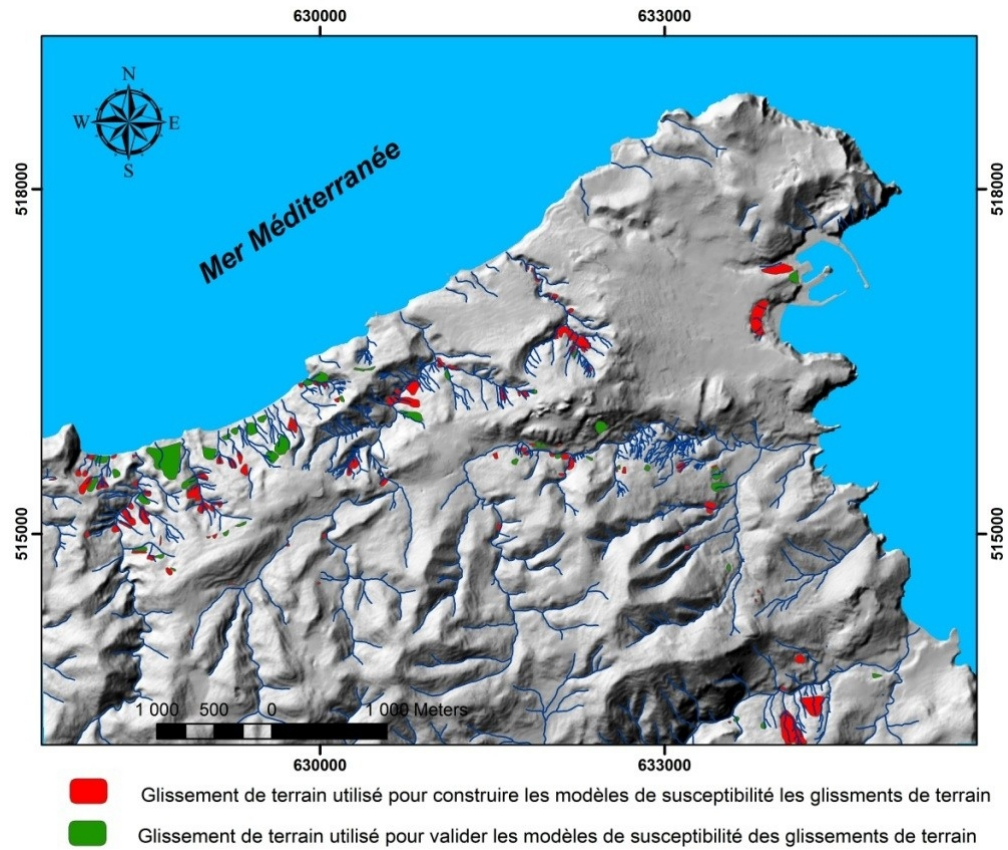
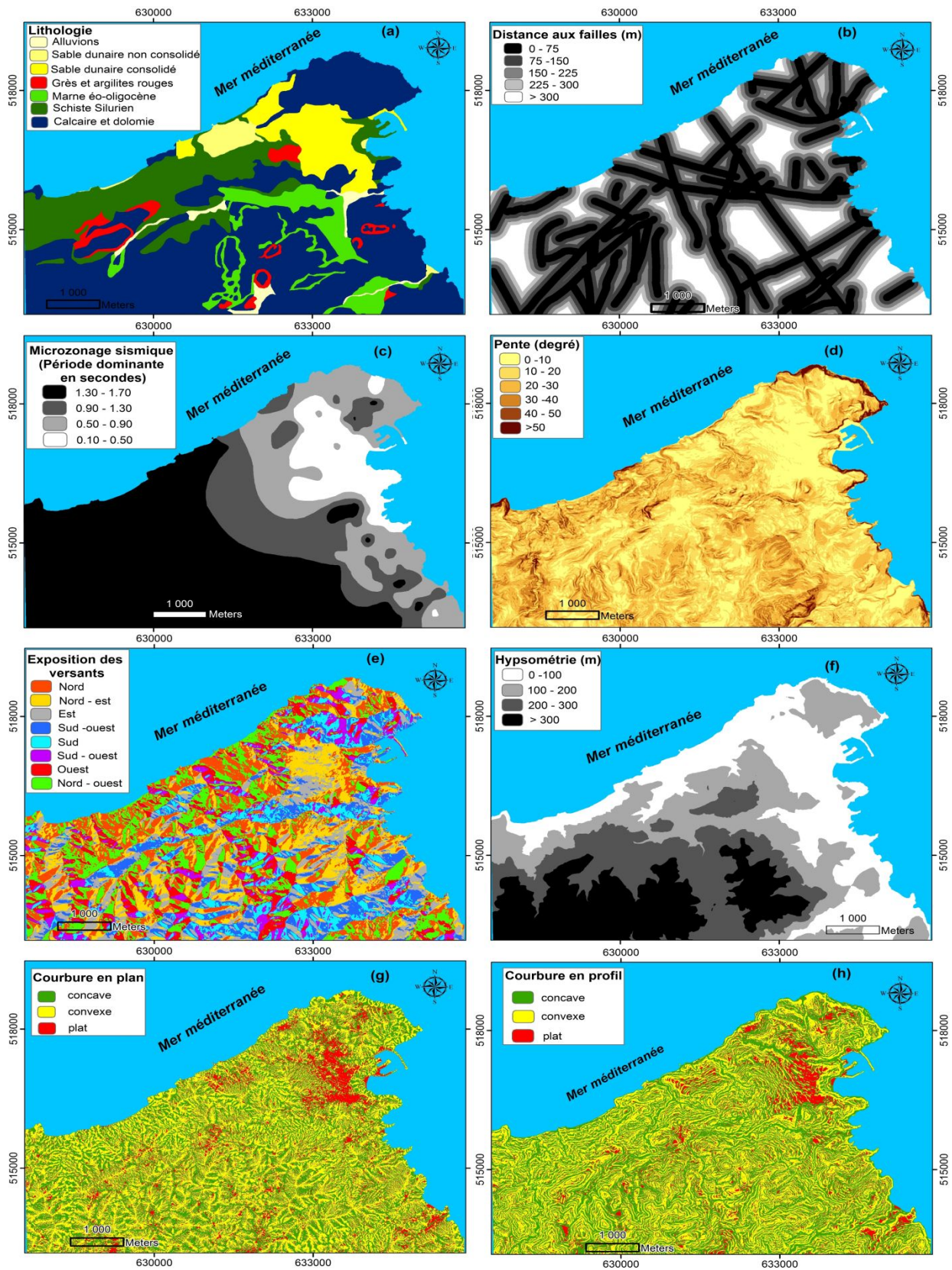


Figure 4 : Carte d'inventaire des glissements de terrain montrant deux ensembles des glissements de terrain utilisés dans l'analyse de susceptibilité. Carte créée à l'aide d'Arcgis 10.4.1.

115x99mm (220 x 220 DPI)



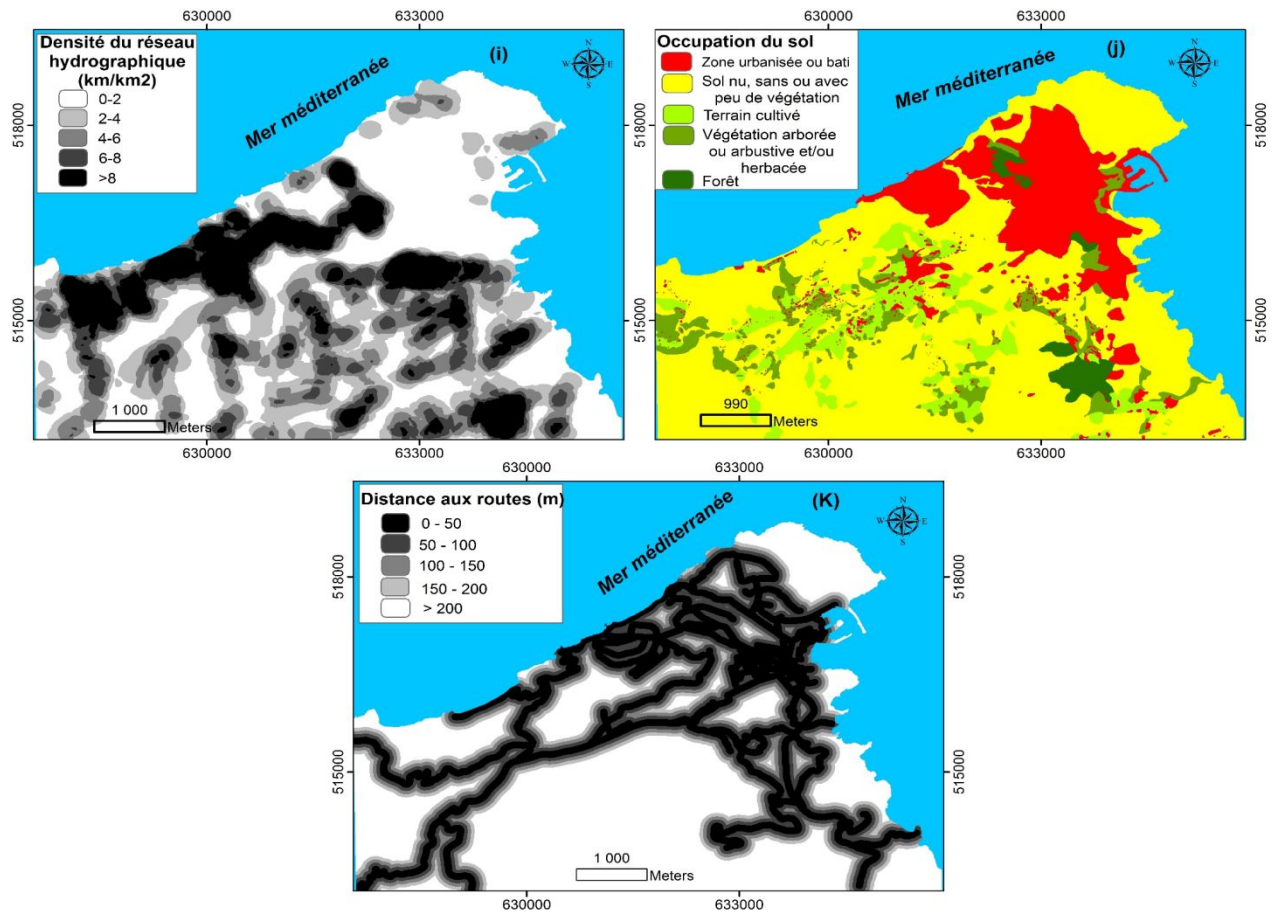


Figure 5 : Facteurs causatifs des glissements de terrain : a) lithologie, b) distance aux failles, c) micro-zonage sismique, d) pente, e) aspect, f) élévation, g) courbure en plan, h) courbure en profil, i) densité de drainage, (j) utilisation du sol, k) distance des routes. Cartes créées à l'aide d'ArcGIS 10.4.1.

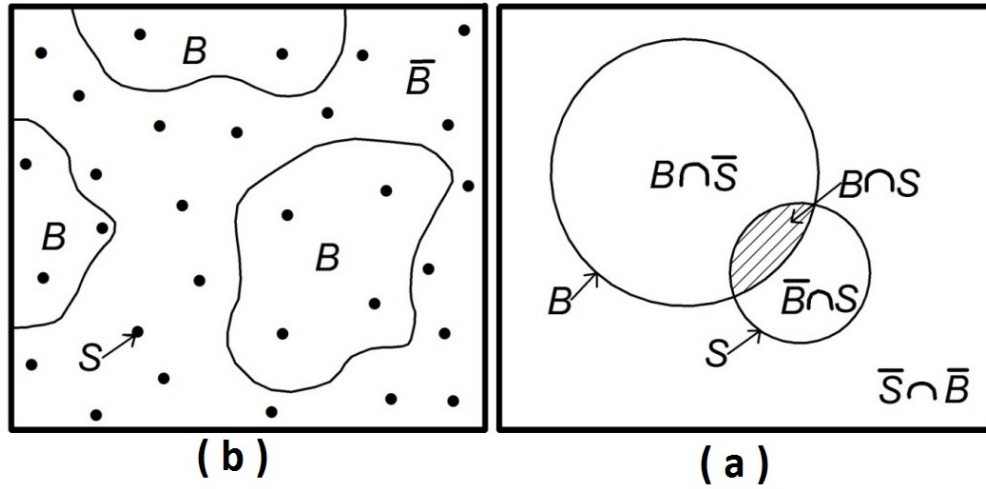
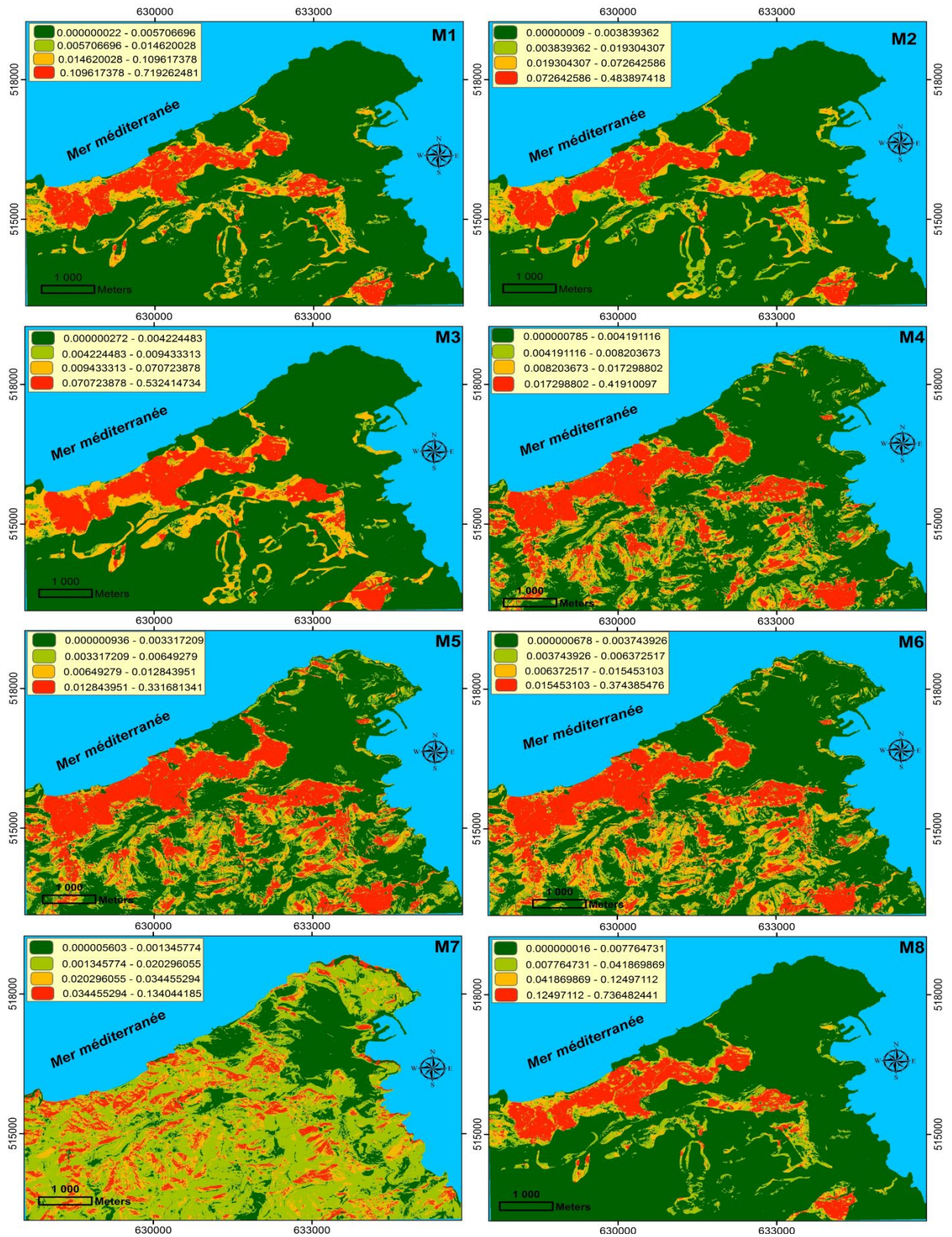


Figure 6 : Relation entre la variable à modéliser (S : glissement de terrain), et la variable prédictive (B : facteur causatif) : (a) diagramme de Venn illustre la présence et l'absence de la variable prédictive (B) en relation avec les glissements de terrain (B, Présence de la variable prédictive; \bar{B} , Absence de la variable prédictive; S, Présence de la variable à modéliser; \bar{S} , Absence de la variable à modéliser (Bonham-Carter, 1994)). (b) présentation de la relation spatiale entre ces deux variables en utilisant un schéma interprétatif.

222x108mm (120 x 120 DPI)



Figures 7 : Cartes de la probabilité ou de la susceptibilité aux glissements de terrain réalisées à partir de huit combinaisons étudiées. Cartes créées à l'aide d'ArcGIS 10.4.1.

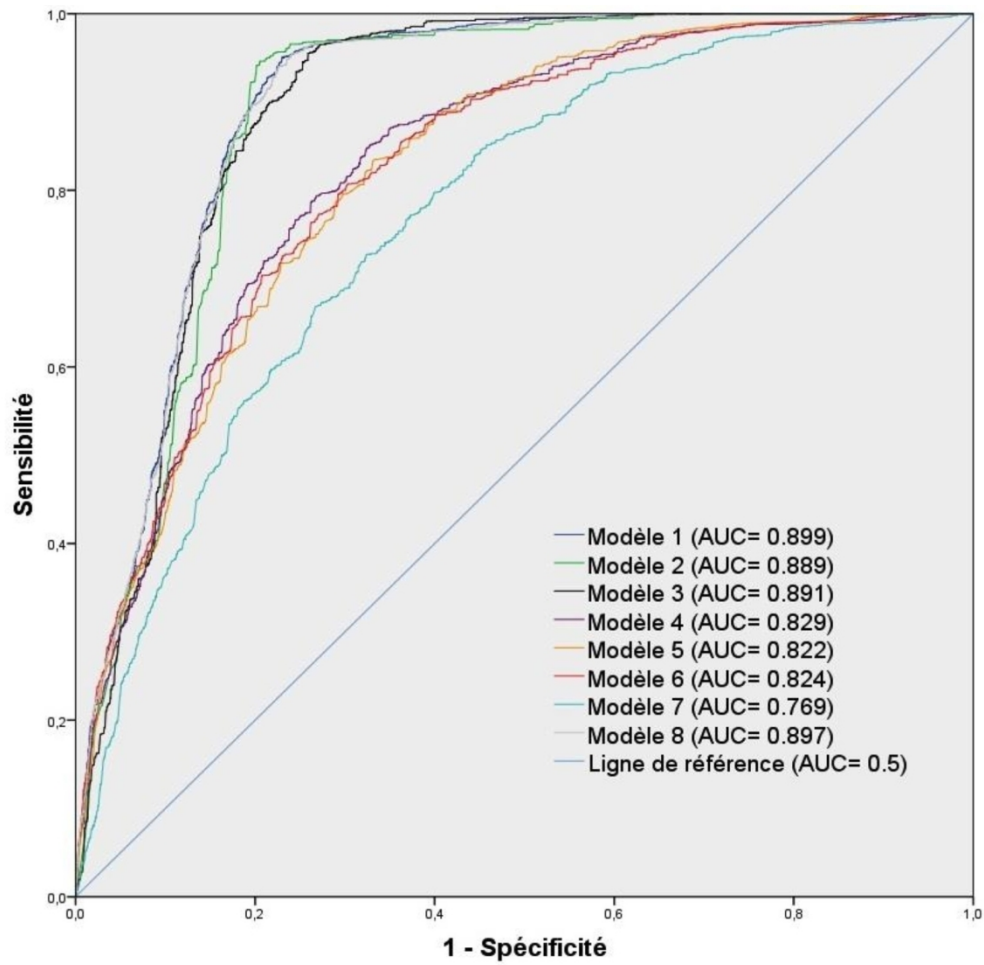


Figure 8: Courbes ROC obtenues par les huit modèles étudiés

432x416mm (96 x 96 DPI)

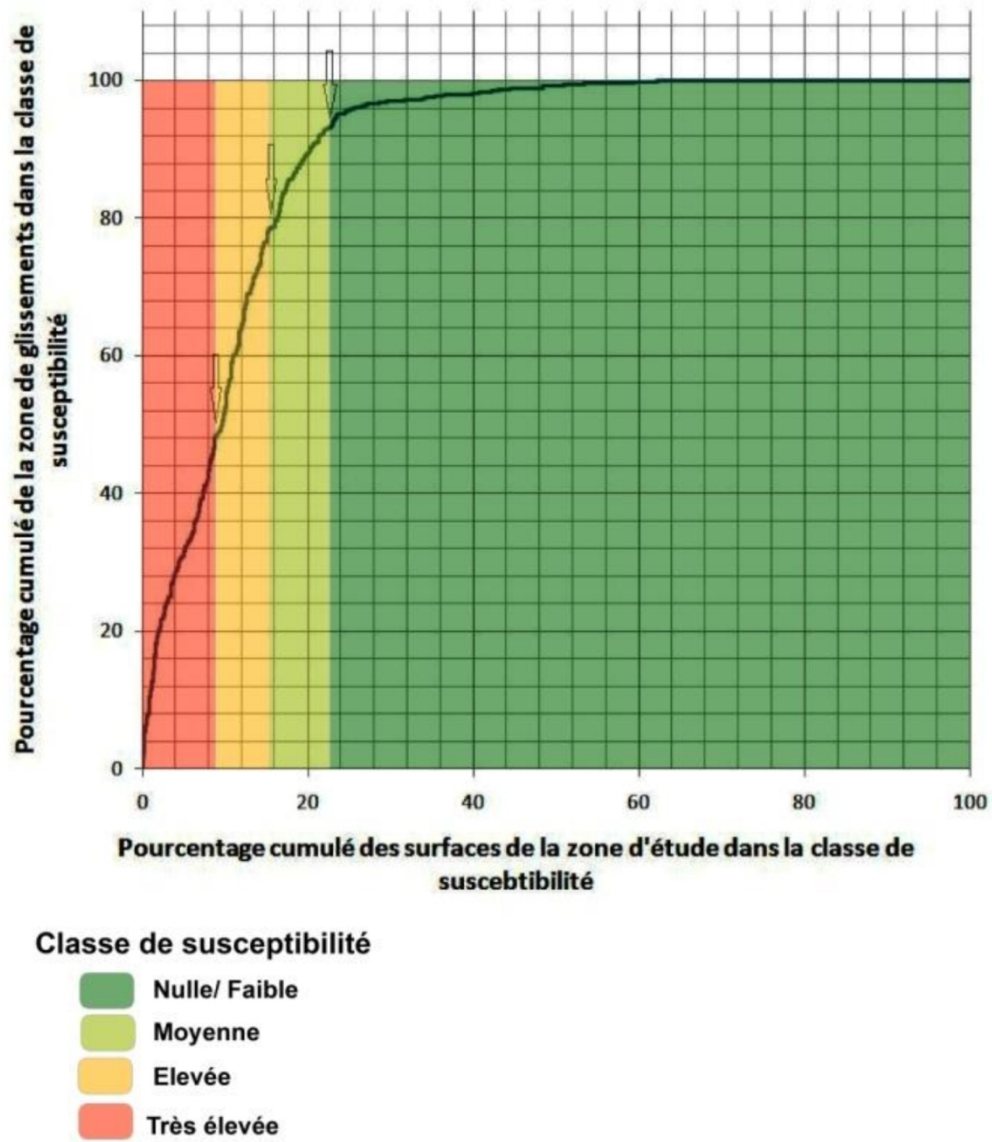


Figure 9: Courbe cumulative de probabilité a posteriori de l'aléa glissements de terrain et définition des limites de classes de susceptibilité selon les ruptures observées.

442x510mm (96 x 96 DPI)

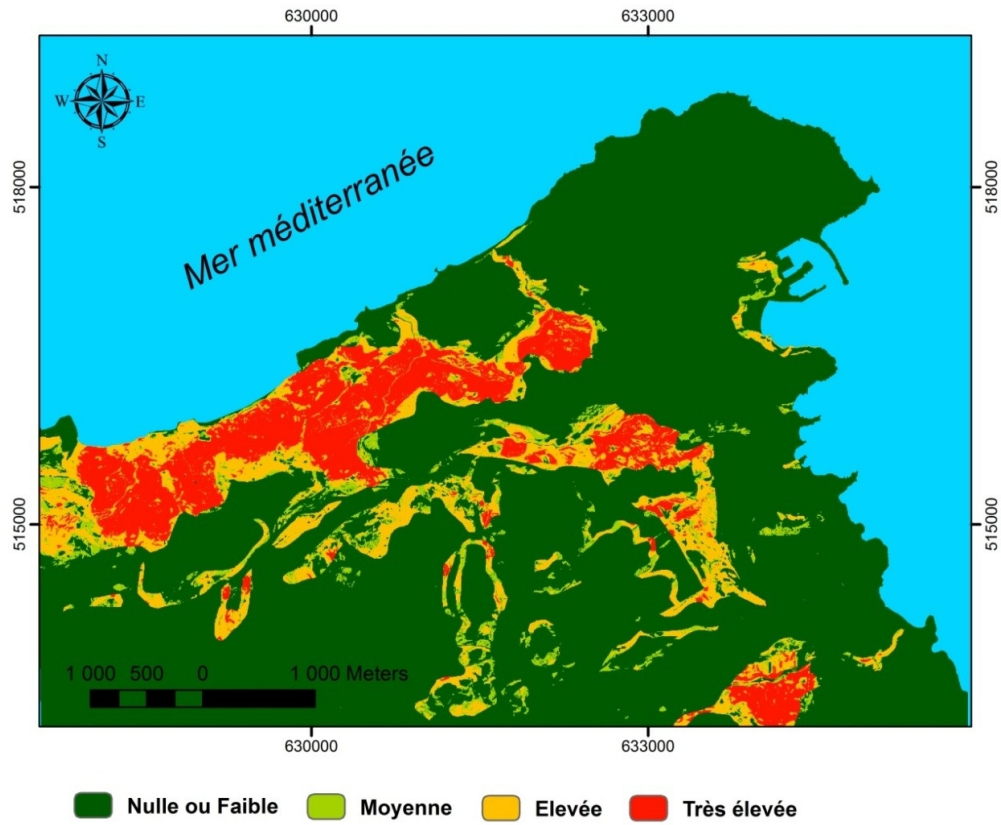


Figure 10 : Carte de la susceptibilité aux glissements de terrain dérivée à travers la carte de probabilité du modèle1. Carte créée à l'aide d'Arcgis 10.4.1.

143x120mm (220 x 220 DPI)