

Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré

Analytic hierarchy process (AHP) applied to the landslides study in a coastal area of the central Portugal: Figueira da Foz – Nazaré.

Anabela RAMOS¹, Lúcio CUNHA¹ & Pedro P. CUNHA²

Abstract : This study aims to apply the analytic hierarchy process to the study of susceptibility to landslides in a coastal plain located between Figueira da Foz and Nazaré (western central Portugal). This method is an important tool to use in the planning and management of natural risks.

Regionally were distinguished different areas of risk: the limestone hills, the sandy hills, floodplains, coastal plain the coastline and the probable neotectonic structures. The limestone hills are particularly sensitive to mass movements (mainly landslides), the sandy hills are vulnerable not only to movements and fluvial erosion, but also to forest fires. Alluvial plains are vulnerable to floods and overflowing, coastal plain and its aeolian dune field could be very vulnerable to forest fires, the coastline presents high vulnerability to erosion of different types according to morphology of the coast and, finally, the active tectonic structures, particularly those that are related with diapirs, are a source of seismic risk.

Key-words: Coastal plain, Natural risks, Risks areas, Landslides, Susceptibility maps.

Résumé : Ce travail porte sur l'analyse de la susceptibilité de glissements de terrain dans la bordure côtière située entre Figueira da Foz et Nazaré. En employant la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique, nous prétendons élaborer une cartographie de la susceptibilité de glissements qui constituera un outil important pour l'aménagement du territoire et la gestion des risques, permettant de définir des zones prioritaires pour des études détaillées.

Dans la région étudiée, nous pouvons identifier différents types de phénomènes naturels dangereux : séismes, érosion du littoral, inondations, incendies, glissements de terrain, coulées de boue. Ceux-ci touchent différemment les unités territoriales en fonction de leurs caractéristiques physiques ainsi que de l'utilisation de leurs sols : collines calcaires, collines gréseuses, plaines alluviales, champs de dunes éoliennes, zone littorale et zones d'alignements néotectoniques.

Mots-clés: Zone littorale, Risques naturels, Territoires à risques, Glissements de terrain, Cartes de susceptibilité.

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Ce travail porte sur l'analyse de la susceptibilité de glissements dans la zone de la "Plate-forme littorale" (FERREIRA, 1978) et les reliefs calcaires attenants, entre Figueira da Foz et Nazaré (Région Centre Littoral Portugal ; Figure 1). Au nord, à l'est et au sud, respectivement, la « Plate-forme littorale » est limitée par les reliefs calcaires de la montagne de Boa Viagem – Verride et les massifs de Sicó et Estremenho. L'intégration du réseau hydrographique dans la « Plate-forme littorale » pliocène et pléistocène pendant le Quaternaire a déterminé l'existence d'importantes vallées, qui, dans la zone étudiée, inclut les extrémités des zones des bassins hydrographiques des fleuves Mondego et Lis. À cette échelle, il est possible de distinguer différentes unités territoriales à risques qui résultent de l'intégration dynamique de composants plus ou moins homogènes de soutien et de couverture

¹Centre des Études de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Coimbra, Portugal
ana-baia@sapo.pt

¹Centre des Études de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Coimbra, Portugal
luciogeo@ci.uc.pt

²IMAR-CMA, Département des Sciences de la Terre, Université de Coimbra, Portugal
pcunha@dct.ci.uc.pt

intégrant des éléments physiques (géologiques, géomorphologiques, climatiques et de couverture végétale), ainsi que des éléments anthropiques (utilisation des sols, systèmes socio-économiques). Ces éléments sont fondamentaux pour le processus d'analyse et pour l'évaluation du risque, puisqu'ils exercent une influence sur les phénomènes dangereux et donc, sont décisifs dans les équations de la probabilité et du risque.

L'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) permet de calculer les indices utilisés pour simplifier, quantifier et dresser une cartographie des phénomènes complexes à partir de l'insertion de données, ce qui signifie que la méthodologie suivie peut être utilisée afin de réaliser divers travaux de planification, permettant de travailler avec une grande quantité de données à différentes échelles.

Nous pouvons énoncer, dans la région étudiée, différents types de phénomènes naturels dangereux : séismes, érosion littorale, inondations, incendies, éboulements, glissements de terrain et coulées de boue qui touchent inégalement les différentes unités territoriales, en fonction de leurs caractéristiques physiques et de l'utilisation des sols : montagnes calcaires, collines gréseuses, plaines alluviales, champs de dunes éoliennes, bande littorale, zone d'alignements néotectoniques. L'objectif de ce travail est de discuter un modèle de susceptibilité de glissements construit pour cette région et ainsi, contribuer à la définition de territoires différenciés de risque.

LA ZONE D'ETUDE

La zone étudiée se trouve au bord de l'Atlantique, entre le Cabo Mondego et Nazaré (Figure 1), où affleurent des unités sédimentaires dont l'âge est compris entre le Trias et l'Holocène, composées de roches silico-clastiques et carbonatées, et de quelques roches ignées en affleurements très restreints.

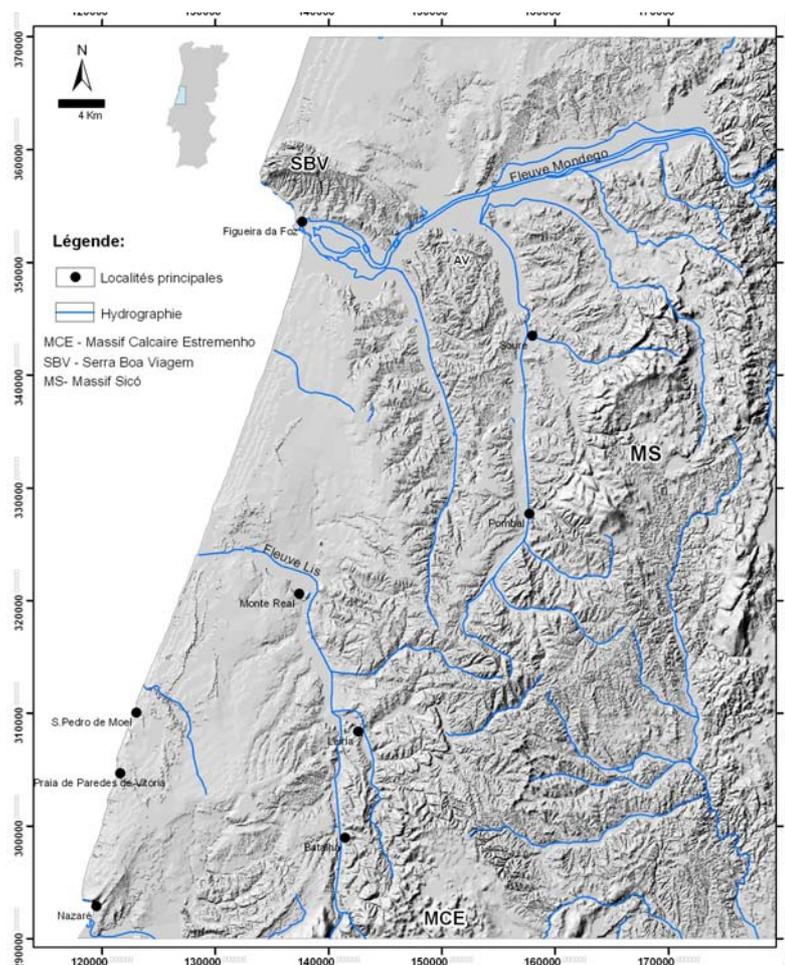


Figure 1 – Localisation de la zone étudiée

La bande occidentale de la région Figueira da Foz – Nazaré présente des altitudes généralement inférieures à 200 m, diminuant successivement vers l'ouest. Elle correspond à un ensemble de reliefs avec de faibles pentes en relation avec la « Plate-forme littorale » (FERREIRA, 1978, 1983), une superficie d'aggradation sédimentaire datant probablement de la fin du Pliocène voire début du Pléistocène, période à partir de laquelle l'insertion du réseau hydrographique aura été réalisée.

Dans cette zone, outre la « Plate-forme littorale » et les vallées qui s'y trouvent, d'autres reliefs se détachent topographiquement, par leur nature calcaire et la tectonique qui les surhaussement. C'est le cas notamment de la Serra da Boa Viagem (SBV) au nord (257 m), du Massif de Sicó (MS) à l'est (538m ; CUNHA (1988, 1993, 1997) et du Massif calcaire Estremenho (MCE) (680m, au SE et au sud; MARTINS, 1949; RODRIGUES, 2007).

MODELE DE CONCEPTION

Pour créer un modèle d'analyse des risques naturels, il est nécessaire, avant toute chose, de définir de façon brève mais claire, les concepts qui lui servent de base, notamment, les concepts de susceptibilité, aléa, vulnérabilité et de risque, entre autres.

Voici donc, la définition des concepts utilisés dans le modèle de conception que nous suivrons, d'après celle qui est proposée par JULIÃO *et al.* (2009):

Susceptibilité – Représente la prédisposition d'une zone à être touchée par certains phénomènes dangereux, en un temps indéterminé, évaluée à l'aide de critères de prédisposition à ces phénomènes ou actions, sans prendre en compte sa période de retour ou la possibilité de se reproduire.

Aléa – Correspond à la probabilité de l'occurrence d'un phénomène ou d'une action potentiellement destructeurs (ou capable de provoquer des dommages), d'une certaine brutalité, dans une zone et une période de temps données.

Vulnérabilité – Degré de perte d'un élément ou d'un ensemble d'éléments exposés en cas de phénomènes dangereux.

Risque – Possibilité d'occurrence d'un phénomène dangereux (aléa) et estimation respective de ses conséquences sur les personnes et les biens ou sur l'environnement, exprimés en dommages corporels et/ou préjudices matériels et fonctionnels, directs ou indirects (vulnérabilité).

Dans ce travail, nous évaluerons uniquement l'aléa et, à l'intérieur de l'aléa, sa composante spatiale, la susceptibilité.

METHODOLOGIE

Afin d'élaborer la carte de probabilité de glissements, nous avons suivi la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process). Cette méthode, créée par SAATY (1991), est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération. Elle a déjà été utilisée avec succès par exemple dans l'application à l'étude de la transformation potentielle de l'utilisation du sol (FIGUEIREDO, 2001) ou dans l'évaluation de la probabilité de l'érosion hydrique (CORREIA, 2007).

La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée (Tableau I), on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate. SAATY (1991) propose d'utiliser l'échelle indiquée dans le Tableau II. Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre lui correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. La valeur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode.

Tableau I - Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre

Critères	C ₁	C ₂	C ₃	...	C _n	W _i
C ₁	1/ΣC ₁	W ₂₁ /ΣC ₂	W ₃₁ /ΣC ₃	...	W _{n1} /ΣC _n	ΣC ₁ /n
C ₂	w ₁₂ /ΣC ₁	1/ΣC ₂	W ₃₂ /ΣC ₃	...	W _{n2} /ΣC _n	ΣC ₂ /n
C ₃	W ₁₃ /ΣC ₁	W ₂₃ /ΣC ₂	1/ΣC ₃	...	W _{n3} /ΣC _n	ΣC ₃ /n
...
C _n	W _{1n} /ΣC ₁	W _{2n} /ΣC ₂	W _{3n} /ΣC ₃	...	1/ΣC _n	ΣC _n /n
	ΣC ₁	ΣC ₂	ΣC ₃	...	ΣC _n	

Quand w_{ij} représente le jugement quantitatif de la paire de caractéristiques C_i, C_j , il est défini par les règles suivantes :

1. Si $w_{ij}=\alpha$, alors $w_{ji}=1/\alpha, \alpha \neq 0$;
2. Si C_i est considéré comme étant d'une importance relative égale à celle de C_j , alors $w_{ij}=1, w_{ji}=1$ et $w_{ii}=1$, pour tout i .

Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé par la formule suivante :

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{ij} \right)^{1/n}$$

En outre, celui-ci doit être normalisé pour que la somme de ses éléments soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque élément par rapport à l'addition.

$$T = |W_1/\Sigma W_i \quad W_2/\Sigma W_i \quad \dots \quad W_n/\Sigma W_i|$$

Soit T le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère.

Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, SAATY (1977) propose de suivre le procédé suivant :

$$\lambda_{\max} = T \cdot W$$

où w est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons.

On calcule, alors, l'indice de cohérence (IC):

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$$

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation :

$$RC = \frac{IC}{CA}$$

RC est le ratio entre IC et un indice de cohérence aléatoire (CA). L'indice CA, présenté dans le Tableau III, est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives géré de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11.

On considère comme acceptable un ratio de cohérence inférieur à 0,10.

Tableau II - Échelle proposée par SAATY (1991)

Degrés d'importance de chaque caractéristique	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif.
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre.
7	Importance très forte ou attestée	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Tableau III - Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

UNITES TERRITORIALES DE PROBABILITE NATURELLE IDENTIFIEES

Dans la zone étudiée, nous pouvons distinguer six unités géomorphologiques différenciées et également du point de vue des phénomènes naturels dangereux auxquels elles sont soumises (Tableau IV; RAMOS *et al.*, 2011a, b). En ce qui concerne les glissements, d'après leur lithologie, leurs pentes et d'une certaine façon, également le type d'utilisation de leurs sols, les unités où la probabilité semble être la plus forte sont les collines gréseuses et les noyaux diapiriques.

Tableau IV - Unités territoriales et types de phénomènes naturels dangereux associés

Désignation	Altitudes	Pentes	Lithologie	Utilisation du sol	Phénomènes naturels dangereux
Montagnes calcaires	>400 m	Moyennes et élevées	Calcaires	Utilisation agricole et forestière; pâturage; sans agriculture	Écroulement; affaissement/abaissement; Incendies de forêt
Collines gréseuses	20-200 m	Faibles et moyennes	Grès	Utilisation agricole et forestière	Glissements, Coulées, Érosion hydrique; Incendies de forêt
Plaines alluviales	<20 m	Faibles	Alluvions	Utilisation agricole	Inondations
Plaines littorales	<20 m	Faibles	Dunes	Utilisation forestière	Incendies de forêt
Zone côtière/type de côte	0 m	Faibles et élevées	Sables et calcaires	Activités de loisirs	Érosion côtière; Chevauchements
Alignements tectoniques actifs et noyaux diapiriques	Divers	Divers	Divers	Divers	Glissements, Séismes

RESULTATS ET DISCUSSION

Nous montrerons, à présent, les matrices de comparaison (Tableaux V, VI, VII, VIII et IX) et les critères respectifs de pondération obtenus pour les caractéristiques (critères) considérées importantes à l'élaboration de la carte de probabilité de glissements. Les critères utilisés, par ordre de priorité, ont été, respectivement: pente, lithologie, utilisation du sol, fracture, forme des versants et exposition des versants.

Dans le but d'assurer la qualité des données obtenues, différentes matrices ont été construites avec les différentes classes d'un même critère et ensuite entre les différents critères. Ces matrices ont été remplies par des spécialistes expérimentés dans la pratique du thème des glissements.

Pour toutes les matrices, le ratio respectif de cohérence (RC) a été calculé et, comme le recommande SAATY (1991), seulement ceux dont la valeur de $RC < 0,1$ ont été retenus.

Tableau V - Calcul de la pondération du critère "pente"

Pentes (°)	>30	15-30	5-15	2-5	0-2	Wi
>30	1					0,37
15-30	0,50	1				0,27
5-15	0,25	0,50	1			0,14
2-5	0,17	0,25	0,33	1		0,07
0-2	0,11	0,14	0,25	0,33	1	0,04

RC=0,03

Tableau VI - Calcul de la pondération du critère "lithologie"

Lithologie	Marne	Grès incohérent	Grès mal consolidé	Calcaire mal consolidé	Roches consolidées	Wi
Marnes	1					0,49
Grès non cohérent	0,50	1				0,27
Grès mal consolidé	0,25	0,33	1			0,14
Calcaire mal consolidé	0,20	0,20	0,33	1		0,07
Roches consolidées	0,13	0,17	0,20	0,33	1	0,04

RC=0,06

Tableau VII - Calcul de la pondération du critère "utilisation du sol"

Utilisation du sol	Terrassements	Zones d'extraction	Agriculture	Urbain	Forêt	Eau	Wi
Terrassements	1						0,32
Zones d'extraction	0,50	1					0,25
Agriculture	0,33	0,33	1				0,10
Urbain	0,50	0,50	3,00	1			0,20
Forêt	0,33	0,33	2,00	0,33	1		0,12
Eau	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1	0,02

RC=0,07

Tableau VIII - Calcul de la pondération du critère "forme des versants"

Forme des versants	Concave	Rectiligne	Convexe	Plat	Wi
Concave	1				0,50
Rectiligne	0,50	1			0,31
Convexe	0,25	0,33	1		0,14
Plat	0,11	0,14	0,20	1	0,04

RC=0,05

Tableau IX - Calcul de la pondération du critère “exposition des versants” par la méthode de comparaison de paires

Exposition des versants	NE-NW	NE-SE	SE-SW	Wi
NE-NW	1			0,52
NE-SE	2,00	1		0,27
SE-SW	3,00	2,00	1	0,21

RC=0,01

Une fois les matrices réalisées, nous avons eu besoin de relativiser le comportement des différentes classes, les unes par rapport aux autres. Les poids (Wi) exprimés par les matrices ont été ultérieurement annexés aux différentes cartes sous le format *raster* grâce à l’opération de reclassification de l’extension *Spatial Analyst* du *software ArcGis9.3*.

Ensuite, nous avons construit la matrice de comparaison entre les différents facteurs décisifs (Tableau X), ainsi que le facteur de pondération de chacun, lors de glissements.

Tableau X - Calcul de la pondération des différents critères

Critères	Pente	Lithologie	Utilisation sol	Fracturation	Forme des versants	Exposition des versants	Wi
Pente	1						0,40
Lithologie	0,50	1					0,25
Utilisation du sol	0,33	0,67	1				0,12
Fracturation	0,20	0,20	0,20	1			0,07
Forme des versants	0,20	0,20	0,17	0,50	1		0,05
Exposition des versants	0,17	0,17	0,14	0,33	0,5	1	0,03

RC=0,07

En utilisant l’algèbre des cartes (TOMLIN, 1991), nous avons obtenu la carte de probabilité de glissements pour la zone entre Figueira da Foz et Nazaré (Figure 2). Pour finir, nous avons procédé à la vérification sur le terrain des glissements les plus récents pour les zones de susceptibilité les plus élevées (Figure 3).

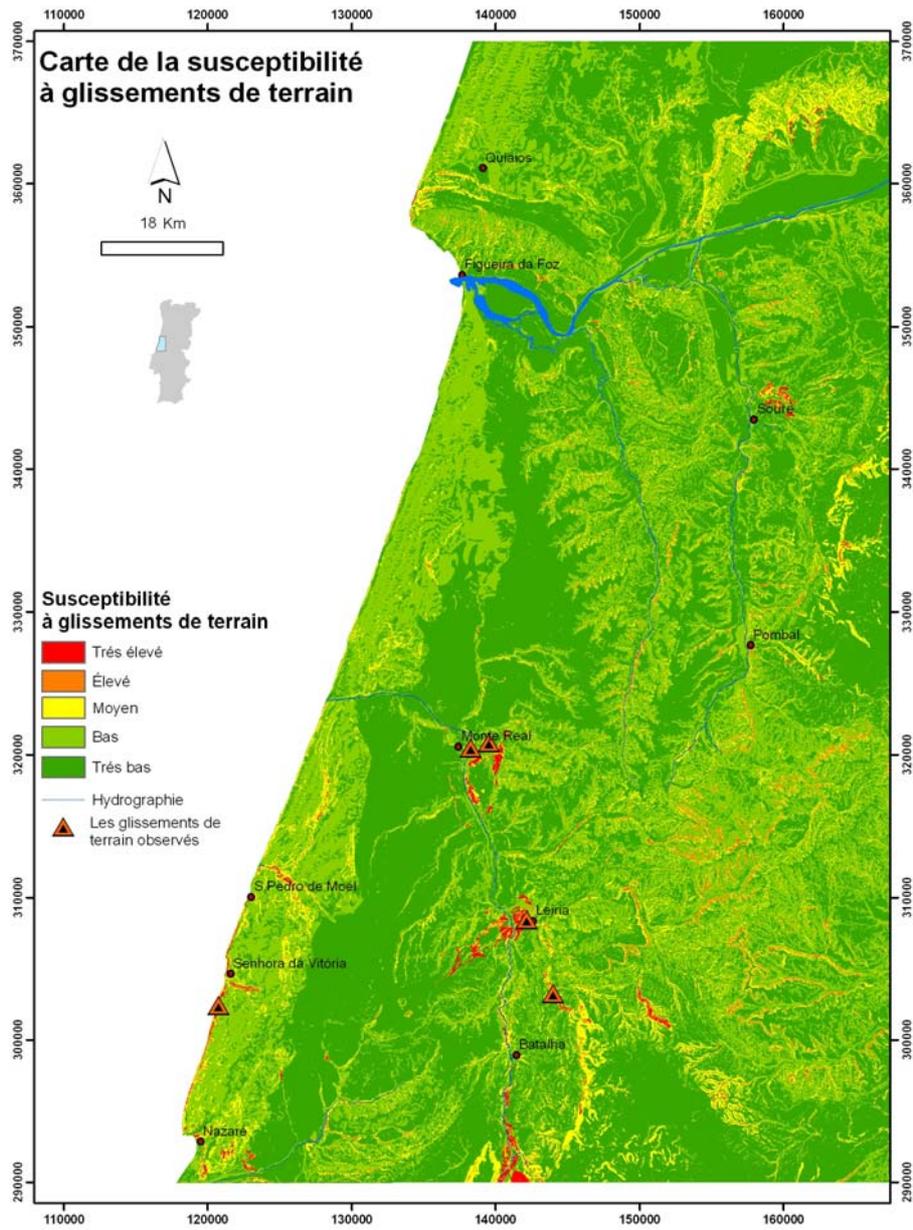


Figure 2 – Carte de probabilité de glissements pour la zone entre Figueira da Foz et Nazaré.



Figure 3 – Glissement de terrain au sud de Leiria (Février, 2014)

CONCLUSIONS

En partant du Tableau IV, où les différentes unités territoriales de risque ont été individualisées, nous confirmons que ce sont bien les territoires auparavant définis : les collines gréseuses ainsi que les noyaux diapiriques, qui sont révélés comme ayant une plus grande probabilité de glissements. Cette première individualisation des unités territoriales et l'association respective à différents types de phénomènes naturels dangereux est basée sur la connaissance de la zone, en ce qui concerne les critères qui ont été choisis comme décisifs: pente, lithologie, utilisation des sols, fracture, forme des versants et exposition des versants.

L'utilisation de la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (SAATY, 1991) pour le calcul de la pondération à attribuer à chaque critère utilisé, affiche des résultats plutôt fiables pour l'échelle de la zone étudiée, confirmant ainsi, ce que nous avons affirmé précédemment sur les territoires de risque. Nous pouvons identifier deux grands ensembles dont la probabilité de glissements est élevée. Le premier, d'une certaine manière, limité aux noyaux diapiriques liés aux grands accidents tectoniques. En effet, dans ces territoires, la lithologie affleurante correspond à la **Formation des Marnes de Dagorda** d'âge hettangien, dont la composition (marnes gypsifères) présente un comportement plastique, glissant facilement sur un terrain incliné. Le second, se situe le long de la côte sableuse, où la combinaison de lithologie sableuse, bien que solide, et de pentes raides constituent les facteurs décisifs du glissement.

Dans un cas comme dans l'autre, nous avons pu valider en partie la méthode sur le terrain. Dans le cas des **Marnes de Dagorda**, nous avons identifié plusieurs glissements le long de la Circulaire externe de Monte Real. Dans le second cas, un glissement circulaire sur la plage de Vale Furado (au sud de Sr^a Vitória) a été constaté.

Nous allons poursuivre le relevé d'occurrences, sur le terrain, afin d'optimiser la validation de la carte produite, ainsi que la méthode à partir de laquelle elle a été réalisée.

RÉFÉRENCES

- CORREIA, R. B. 2007 - Modelação cartográfica em ambiente SIG de suscetibilidade à erosão hídrica dos solos, caso da bacia da Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo Verde). Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. 162 p.
- CUNHA, L. 1988 - As Serras Calcárias de Condeixa – Sicó – Alvaiázere. Estudo de Geomorfologia. Tese de Doutoramento. Faculdade de Letras. Univ. Coimbra, 329 p.
- CUNHA, L. 1993 – “A paisagem cársica das Serras Calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere. Alguns argumentos a favor da sua protecção”. *Algar*, 4 : 3-12.
- CUNHA, L. 1997 – “Alguns problemas geomorfológicos no sector oriental do Baixo Mondego. O confronto de morfologias nas áreas de Coimbra e de Condeixa”. *Actas do Seminário “O Baixo Mondego - Organização Geossistémica e Recursos Naturais”*. Coimbra ;, 41-49.
- FIGUEIREDO, R. F. 2001 – Modelação cartográfica em ambiente SIG para apoio à decisão: aplicação ao estudo da afectação potencial de usos do solo no sector Norte do Maciço Marginal de Coimbra. Dissertação de Mestrado. Univ. Coimbra. 204p.
- FERREIRA, A. BRUM 1978 – “Planaltos e Montanhas do Norte da Beira-Estudo de Geomorfologia”. *Memórias do Centro de Estudos Geográficos*, 4 : 379 p.
- FERREIRA, A. BRUM 1983 – “Problemas da evolução geomorfológica quaternária do noroeste de Portugal”. *Cuadernos do Laboratório Xeológico de Laxe*, 5 : 311-332.
- JULIÃO, P. R.; NERY, F.; RIBEIRO, J.L.; BRANCO, M.C. & ZÊZERE, J.L. 2009 - Guia metodológico para a produção de cartografia Municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. 93p.
- MARTINS, A. F. 1949 - O Maciço Calcário Estremenho – contribuição para um estudo de Geografia Física. Univ. Coimbra. 248p.
- RAMOS, A. M.; CUNHA, L. S. & CUNHA, P. P. 2011a – “Diferenciação territorial e caracterização dos riscos naturais na área entre a Figueira da Foz e a Nazaré”. *Atas do VIII Congresso da Geografia Portuguesa*, Lisboa. CD-Rom. 6p. APG Edts.
- RAMOS, A. M.; CUNHA, L. S. & CUNHA, P. P. 2011b – “Área da Figueira da Foz – Nazaré (Portugal central): Diferenciação espacial e caracterização de riscos naturais”. *Atas do 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*. S. Paulo. CD-Rom. 10p.
- RODRIGUES, M. L. 2007 – “O Património Geomorfológico e o Maciço Calcário Estremenho”. *Simp. Ibero-Am. sobre Patrim. Geol., Arqueol. e Min. em Regiões Cársicas*, 28Jun.a 1Jul.,Batalha, 2 p.

- SAATY, T. L. 1991 - *Método de Análise Hierárquica*. São Paulo, McGraw-Hill, Makron. 367p.
- TOMLIN, C. D. 1991 – “Cartographic Modelling. In: GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D. e RHIND, D. (Eds.) - *Geographical Information Systems: Principles and Application*. Harlow, Essex, UK: Longman Group, Ltd., 361-370

