

Probabilité d'occurrence de l'aléa karstique dans le Val de Bou

Novembre 2017

Crédit photo : © Romain Boschel/Cerema



DDT 45 / SLRT / PR



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

**direction départementale
des Territoires**

Elaboration de la carte d'aléa karstique du Val de Bou

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire

Affaire suivie par

David MATHON - Cerema Normandie Centre – Laboratoire de Blois – Unité risques géologiques
Ludovic DORE - Cerema Normandie Centre – Laboratoire de Blois – Unité risques géologiques




Tél. : 02 54 55 49 36 / 02 54 55 49 35

Courriel : david.mathon@cerema.fr / ludovic.dore@cerema.fr

Références

n° d'affaire : C17RB0016

maître d'ouvrage : Direction Départementale du Loiret

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Ludovic DORE et David MATHON	12/12/17	
Contrôlé par	Edouard DURAND	13/12/17	
Validé par	Edouard DURAND	13/12/17	

Résumé de l'étude :

La présente étude a pour but de délimiter un zonage de l'aléa karstique sur les communes de Bou, Chécy et Mardié. Des investigations de terrain couplées à des recherches bibliographiques et des entretiens avec les mairies ont permis de recenser 157 événements karstiques. La localisation de ces événements a servi à définir des critères géographiques influant sur la probabilité de survenue d'un phénomène karstique. Une carte d'aléa a ainsi été dressée, en se basant sur ces critères et en considérant l'intensité du phénomène homogène sur la zone d'étude.

SOMMAIRE

1. LE CONTEXTE DU VAL DE BOU.....	5
1.1 Contexte général.....	5
1.2 Contexte géologique.....	7
1.2.1 Le calcaire de Beauce.....	7
1.2.2 Le Burdigalien.....	8
1.2.3 Les alluvions de la Loire.....	9
1.2.4 Synthèse.....	10
1.3 Contexte Hydrogéologique.....	12
2.LE PHÉNOMÈNE D’EFFONDREMENT KARSTIQUE.....	14
2.1 Le karst dans le Val de Bou.....	14
2.1.1 Réaction chimique-cinétique.....	14
2.1.2 Rôle des discontinuités du massif rocheux soluble.....	14
2.1.3 Remplissage des vides karstiques.....	15
2.2 Les phénomènes de déstabilisation.....	15
2.2.1 Soutirage des matériaux de remplissage.....	15
2.2.2 Chute d’une dalle de toit d’une cavité.....	17
2.2.3 Les variations du débit de la Loire.....	17
2.3 Les conséquences en surface.....	18
2.3.1 Affaissement ou doline.....	18
2.3.2 Fontis ou bîme (effondrement ponctuel).....	19
3.RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES ÉVÉNEMENTS KARSTIQUES DANS LE VAL DE BOU.....	20
3.1 Le recensement des événements.....	20
3.2 Premier critère : l’éloignement par rapport à la Loire.....	22
3.3 Deuxième critère : la présence des paléochenaux.....	24
3.4 Troisième critère : les écoulements sur le coteau.....	28
4.CRÉATION DE LA CARTE DE L’ALÉA KARSTIQUE.....	29
5.CONCLUSION.....	31

Index des illustrations

Figure 1 : Carte de la localisation du val de Bou.....	5
Figure 2 : Carte de la zone d'étude.....	6
Figure 3 : carte géologique simplifiée de la région autour du Val de Bou (source : infoterre.brgm.fr).....	7
Figure 4 : Côte NGF du toit du Calcaire de Beauce.....	8
Figure 5 : Carte du Val de Bou montrant l'extension du Burdigalien dans la zone d'étude.....	9
Figure 6 : Iso-épaisseur des alluvions récentes.....	10
Figure 7 : Iso-épaisseur des alluvions anciennes (déposées sur le Burdigalien).....	10
Figure 8 : Coupe schématique du Val de Bou (source : Cerema Blois).....	11
Figure 9 : Coupe schématique représentant les nappes du Val de Bou (source : Cerema Blois).....	12
Figure 10 : Carte piézométrique de la nappe du calcaire de Beauce.....	13
Figure 11 : Erosion karstique dans un massif rocheux discontinu. (source de l'image : wikipédia).....	15
Figure 12 : Schéma de soutirage de matériaux.....	15
Figure 13 : Schéma d'évolution du soutirage de matériaux.....	16
Figure 14 : Charge hydraulique uniforme.....	17
Figure 15 : Arrivée de la crue.....	18
Figure 16 : Décrue.....	18
Figure 17 : Affaissement observé dans la commune de Bou proche de la Loire.....	19
Figure 18 : Fontis de 2 m de profondeur sur 3 m de diamètre observé sur la rive de la Loire à Bou.....	19
Figure 19 : Nombre d'événements karstiques recensés par source.....	20
Figure 20 : Carte des effondrements du Val de Bou.....	21
Figure 21 : Découpage de la zone d'étude.....	22
Figure 22 : Répartition statistique des distances entre les événements karstiques et la Loire.....	23
Figure 23 : Bande de 600 m autour de la Loire.....	24
Figure 24 : Altitude donnée par le MNT Lidar de la zone d'étude.....	25
Figure 25 : Paléochenaux dessinés grâce au MNT Lidar de la zone d'étude (source : Cerema).....	25
Figure 26 : Coupe des paléochenaux dans la zone d'étude.....	26
Figure 27 : Comparaison entre les emplacements des paléochenaux et ceux des événements.....	27
Figure 28 : Comparaison entre les emplacements des dépressions et ceux des événements.....	28
Figure 29 : Zonage de l'aléa effondrement/affaissement karstique.....	30

1. Le contexte du Val de Bou

1.1 Contexte général

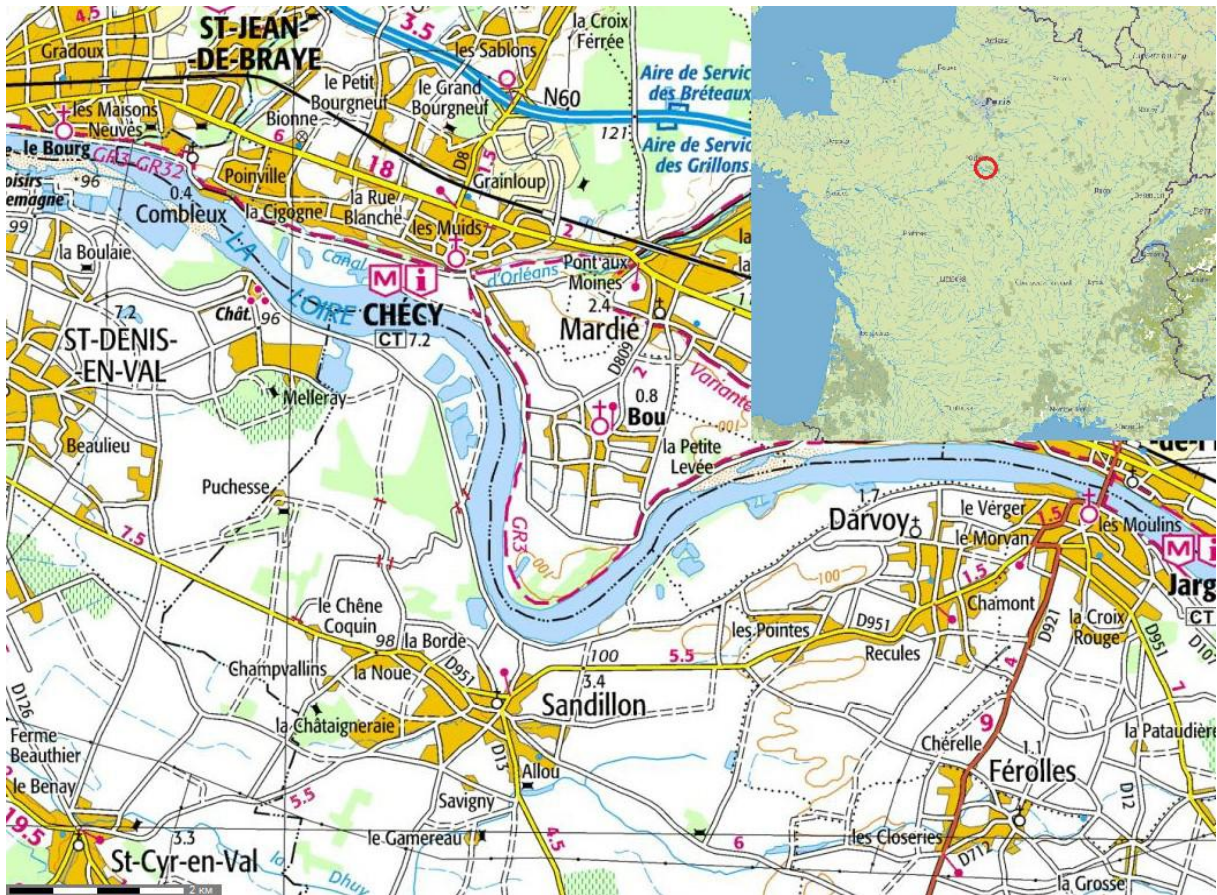


Figure 1 : Carte de la localisation du val de Bou

Le Val de Bou appartient au bassin de l'Oussance qui s'étend sur 312.5 km². Il est en connexion avec le Val d'Orléans qui se situe sur la rive gauche de la Loire et qui a une superficie de 190 km². Le Val de Bou mesure environ 3 à 4 km de long et 5 km de large pour une superficie de 19,6 km². Il se situe à l'intérieur d'un grand méandre de la Loire.

Les limites géomorphologiques du Val sont assez nettes avec, au sud, la Loire et, au nord, le coteau de la forêt d'Orléans.

La Loire s'écoule d'est en ouest et divague en formant des méandres montrant une pente moyenne très faible. Elle est endiguée sur la totalité du Val de Bou.

La carte de la zone d'étude est représentée en figure 2, elle est bornée par les limites des communes et le canal d'Orléans. Le canal d'Orléans a été créé en 1692 pour permettre aux bateaux de naviguer de Nantes à Paris notamment pour le transport de bois et charbon.

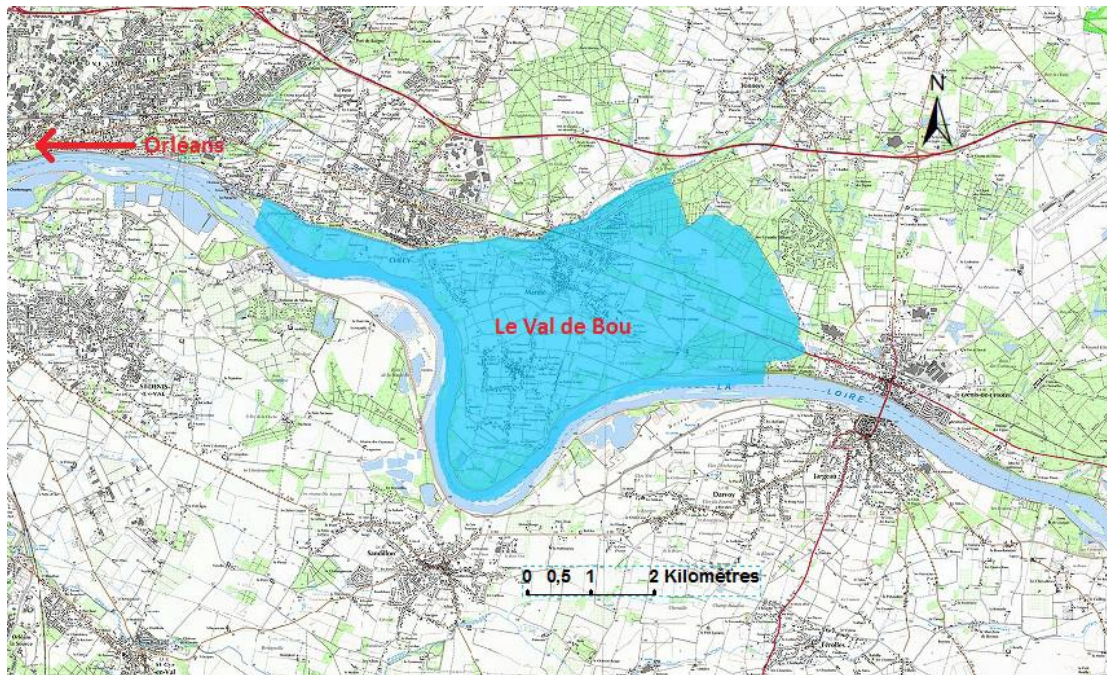


Figure 2 : Carte de la zone d'étude

La zone d'étude concerne trois communes (Chécý, Bou et Mardié), touchées par des phénomènes d'effondrements et affaissements liés à la présence de cavités naturelles. Ces cavités étant d'origine karstique, la zone d'étude est délimitée en tenant compte des circulations d'eau souterraine. Les limites retenues sont les suivantes :

- Au nord, le canal d'Orléans et les limites communales de Mardié
- Au sud, le lit mineur de la Loire

Ces limites sont présentées sur la figure 2.

1.2 Contexte géologique

L'histoire géologique des formations visibles du site débute à l'Ère Tertiaire (Miocène -23 Ma à -5 Ma) et peut être retracée schématiquement ainsi :

- Pendant l'Aquitanien (-23 à -20 Ma), la formation lacustre du Calcaire de Beauce se dépose dans toute la région. Elle constitue le substratum de la zone d'étude.
- Ensuite, au Burdigalien (-20 à -16 Ma), une formation sablo-argileuse (dite « formation de Sologne » ou « formation Orléanaise ») se dépose sur le calcaire de Beauce.
- De -16 à -11 Ma, l'Océan Atlantique s'engouffre dans les terres jusqu'à Orléans, captant la Loire et changeant son orientation de Sud-Nord en Ouest-Est.
- De -11 Ma à aujourd'hui des dépôts alluvionnaires recouvrent les formations antérieures.

Simultanément, le phénomène d'érosion des sols par les cours d'eau (notamment la Loire) entraîne l'apparition de vallées et d'escarpements (coteaux). Ces formations sont présentées sur la carte géologique de la figure 3.

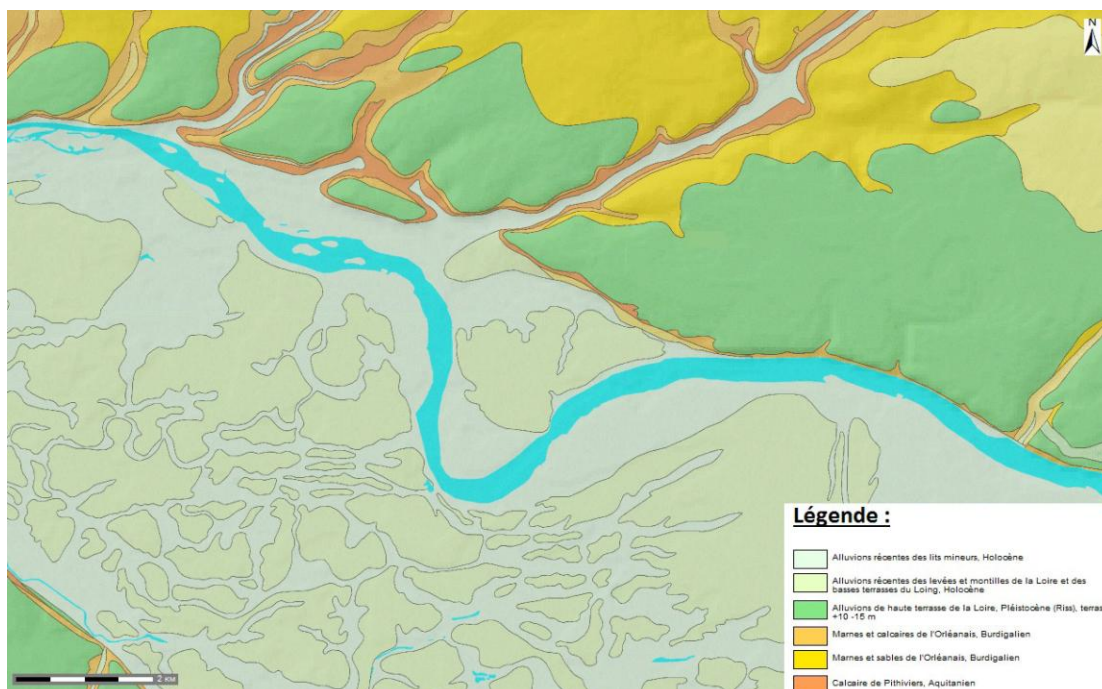


Figure 3 : carte géologique simplifiée de la région autour du Val de Bou (source : infoterre.brgm.fr)

1.2.1 Le calcaire de Beauce

Le Calcaire de Beauce est une formation géologique connue régionalement pour présenter une forte hétérogénéité. En effet, on retrouve des niveaux plus ou moins consolidés, des niveaux marneux et marno-calcaire ainsi que des couches argileuses.

Le calcaire de Beauce est également une formation très fracturée qui fait l'objet d'une karstification intense et présente de nombreuses cavités souterraines. Son épaisseur moyenne est estimée à environ 60 m. La partie sommitale du calcaire de Beauce présente une altération argileuse rougeâtre dont l'épaisseur est très variable (argile de décalcification).

Un modèle géologique du toit de la formation de Beauce, présenté sur la figure 4, a été établi en s'appuyant sur les données de forages de la banque du sous-sol du BRGM et des sondages présents au CEREMA de Blois (40 forages au total). Il suggère un léger pendage en direction du sud-ouest. On remarque également les différences d'altitude du toit du calcaire entre le coteau et le lit majeur de la Loire.

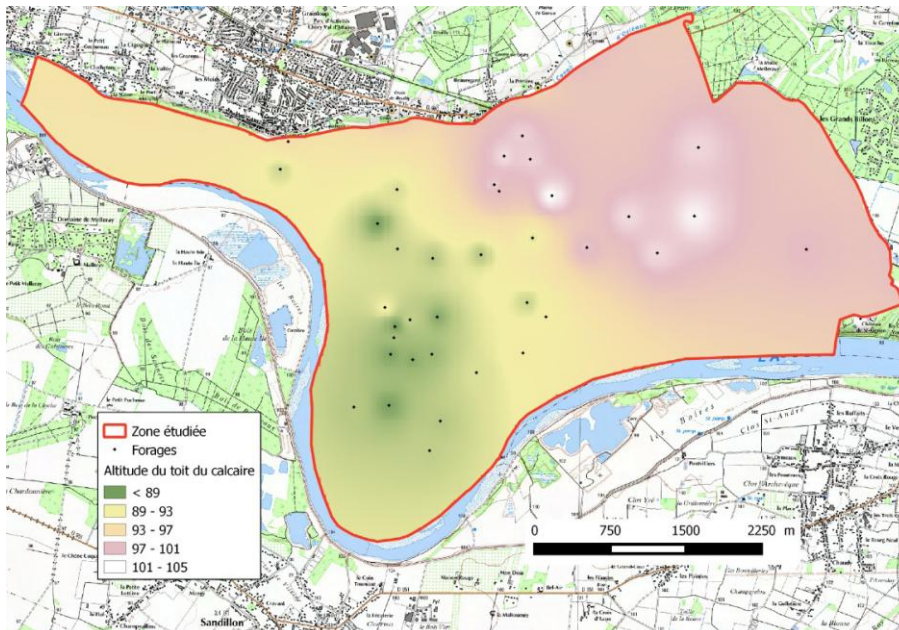


Figure 4 : Côte NGF du toit du Calcaire de Beauce

1.2.2 Le Burdigalien

La formation du Burdigalien se situe au-dessus du calcaire de Beauce. Cependant, cette formation n'est retrouvée que dans la partie Nord de la zone d'étude. Cela s'explique par l'érosion des terrains par la Loire entre le Burdigalien et aujourd'hui. La formation du Burdigalien est composée d'argiles et sables. Elle a une épaisseur comprise entre 5 et 8 m, et est sub-horizontale. Cette couche géologique constitue un contraste de perméabilité entre le calcaire de Beauce et les alluvions sus-jacentes. Des investigations

ont permis de retrouver les manifestations de ce contraste de perméabilité (telles que l'existence d'une ligne de sources caractéristique) sur le terrain et ainsi de préciser le contour de la formation. L'extension géographique de cette couche dans la zone d'étude est représentée sur la figure 5.

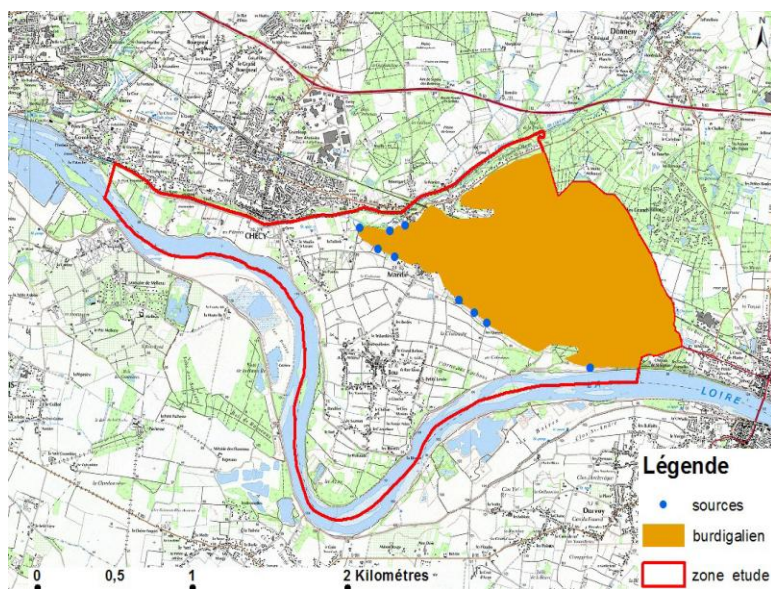


Figure 5 : Carte du Val de Bou montrant l'extension du Burdigalien dans la zone d'étude

1.2.3 Les alluvions de la Loire

Après le Burdigalien, des sédiments alluvionnaires provenant de la Loire se sont déposés sur l'ensemble du Val. Deux dépôts distincts peuvent être distingués par la topographie :

- Les alluvions anciennes, terrasse alluviale sableuse d'une épaisseur entre 3 et 6 mètres, déposée sur la formation Burdigalienne ;
- Les alluvions récentes (à même le calcaire de Beauce), formation sableuse d'une épaisseur entre 5 et 10 mètres.

Un modèle géologique des alluvions a été établi en s'appuyant sur les données de forages de la banque du sous-sol du BRGM et des sondages du Cerema (40 forages au total). Ce modèle ainsi que les emplacements des sondages ayant servi à l'établir sont reportés sur les figures 6 et 7.

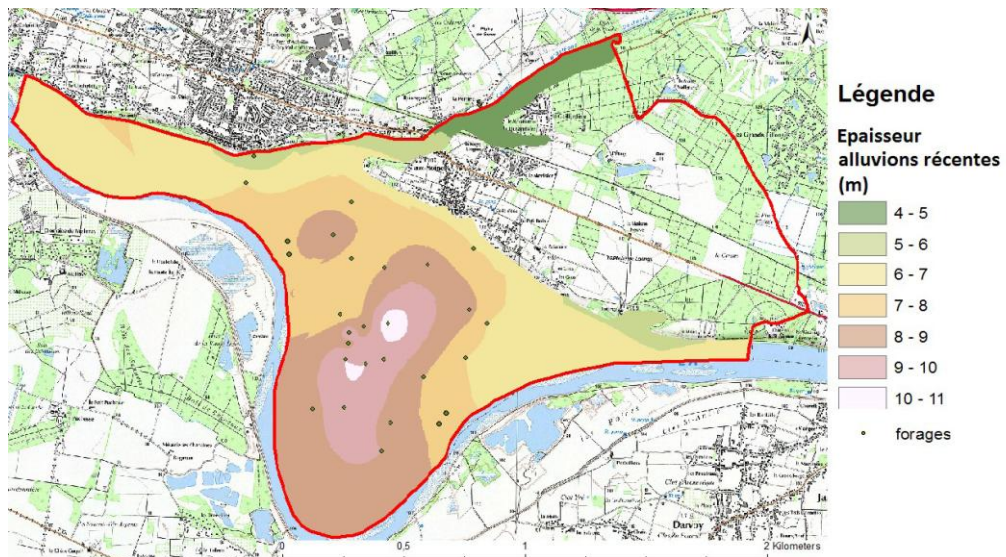


Figure 6 : Iso-épaisseur des alluvions récentes

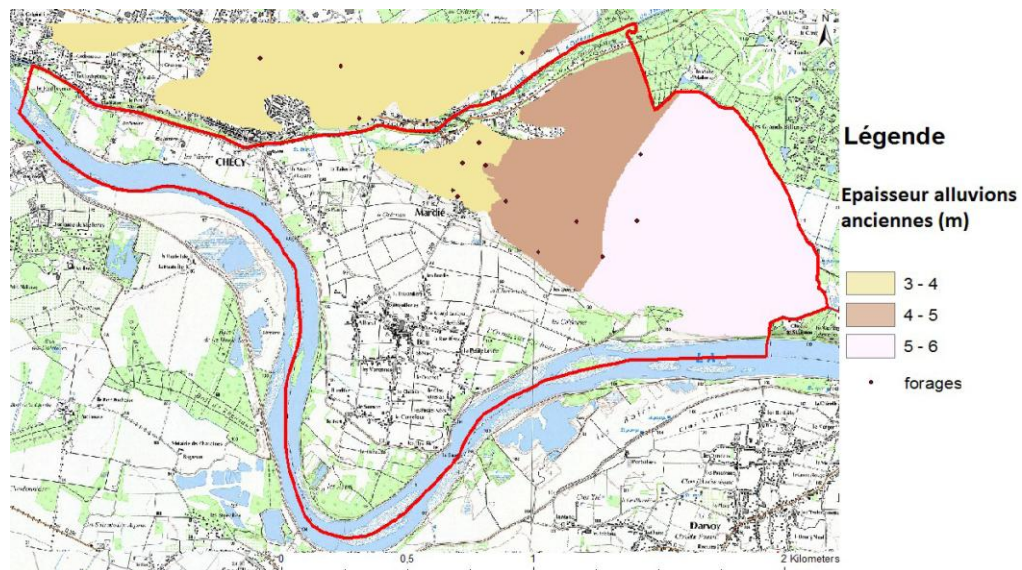


Figure 7 : Iso-épaisseur des alluvions anciennes (déposées sur le Burdigalien)

1.3 Contexte Hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique est établi sur la base d'informations bibliographiques (Étude hydrogéologique du Val d'Orléans – N. Desprez BRGM) et sur les observations de terrain réalisées par le Cerema dans le cadre de cette étude.

Il apparaît ainsi que sur la zone d'étude, trois nappes souterraines distinctes peuvent être observées :

- La nappe de la terrasse alluviale ancienne avec comme mur le toit du Burdigalien faisant office de couche imperméable entre ces alluvions et le calcaire.
- La nappe des alluvions récentes (en contact ou liée avec la nappe du calcaire de Beauce et le niveau de la Loire).
- La nappe du calcaire de Beauce.

Des communications entre la nappe du calcaire de Beauce et les alluvions récentes existent sur toute la surface du Val par le biais de gouffres. Ces communications expliquent que leurs niveaux soient souvent confondus.

La figure 9 présente une coupe schématique des aquifères selon le même profil que sur la figure 8.

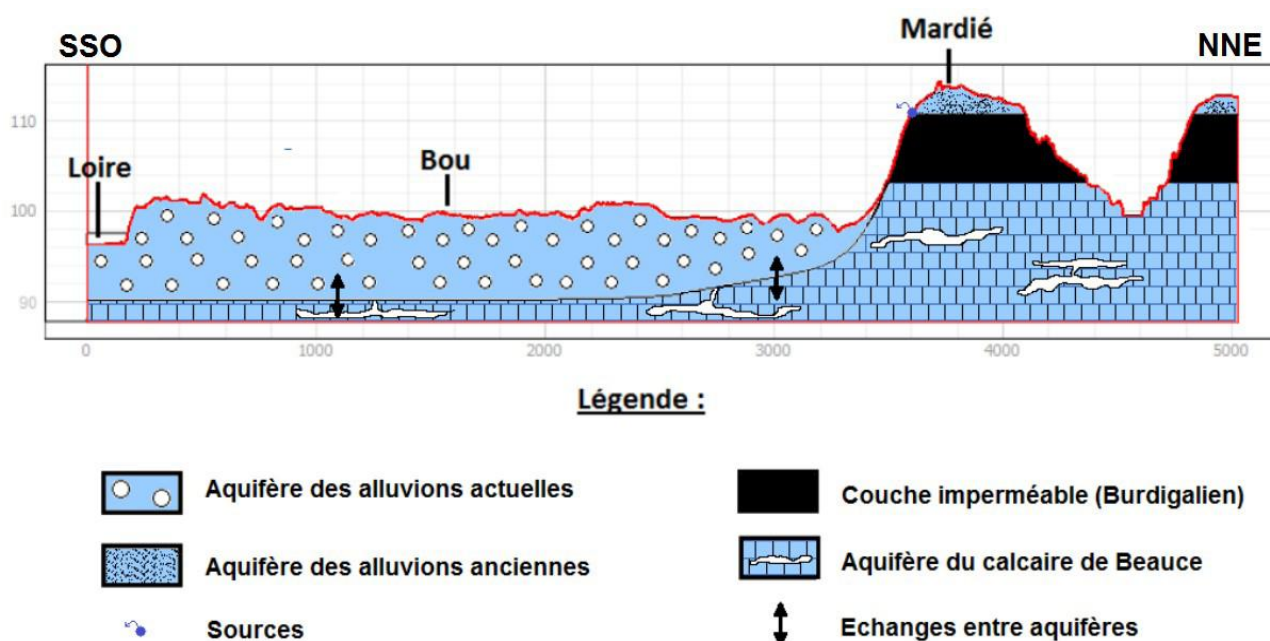


Figure 9 : Coupe schématique représentant les nappes du Val de Bou (source : Cerema Blois)

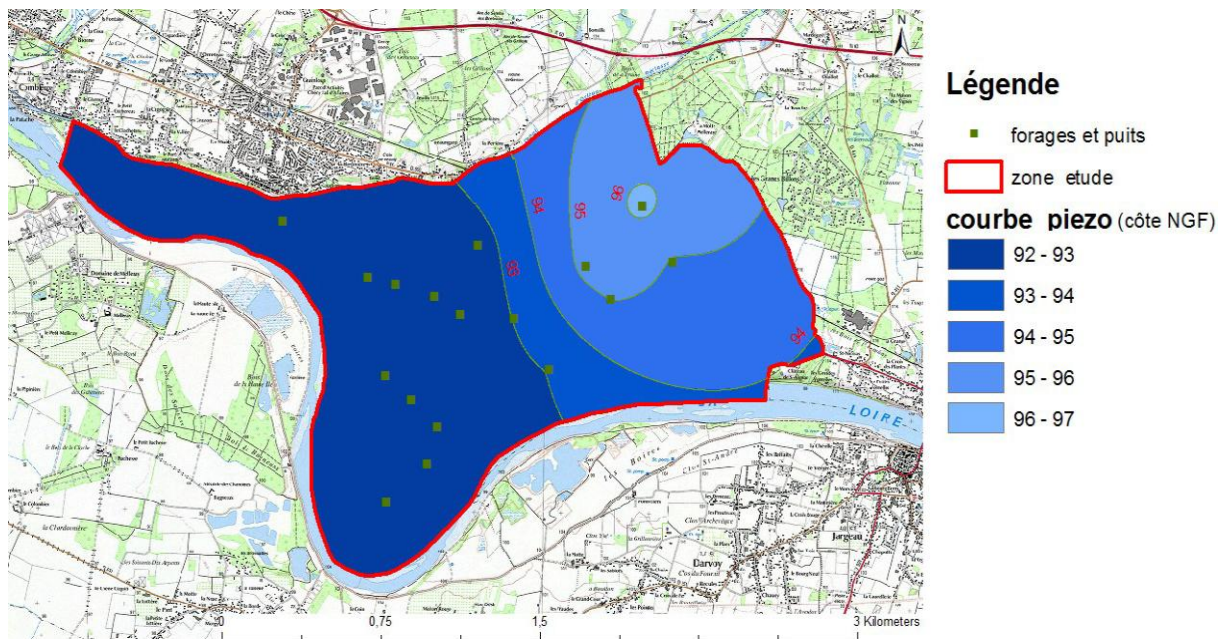


Figure 10 : Carte piézométrique de la nappe du calcaire de Beauce

La figure 10 représente la piézométrie de la nappe du calcaire de Beauce. Il est difficile de distinguer la nappe du calcaire de Beauce et celle des alluvions récentes sur la commune de Bou.

Le relevé piézométrique a été fait les 29 et 30 mai 2017 à la fin de la période des hautes eaux. Cette carte piézométrique montre un écoulement préférentiel en direction du sud-ouest, alimentant la Loire et conforme aux données bibliographiques.

Les nappes sont principalement exploitées par les agriculteurs pour arroser les champs, mais aussi par des particuliers.

2. Le phénomène d'effondrement karstique

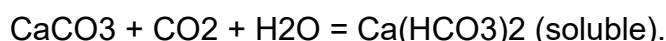
2.1 Le karst dans le Val de Bou

2.1.1 Réaction chimique-cinétique

Le karst est un type de paysage pouvant apparaître dans des formations solubles, telles que les roches carbonatées, évaporitiques ou salines. Dans le cas présent, la formation considérée est carbonatée. La solubilité du carbonate de calcium dans l'eau est relativement faible, mais elle devient beaucoup plus forte en présence de dioxyde de carbone.

La matière organique ou les micro-organismes peuvent jouer un rôle important : ils dégagent du dioxyde de carbone par fermentation, respiration ou dégradation. Pour le Val de Bou, l'impact de la présence de micro-plancton dans la nappe alluviale a été mis en évidence dans l'acidification de l'eau.

Les différentes réactions chimiques mises en jeu peuvent se résumer ainsi :



Il est difficile de donner une cinétique au phénomène. Il dépend, en effet, de plusieurs paramètres, dont l'agressivité de l'eau (c'est-à-dire sa capacité à dissoudre le calcaire) et la rapidité de renouvellement du flux hydrique.

A titre d'exemple, pour des régions tempérées humides, des taux d'ablation spécifique (c'est-à-dire le rapport volume rocheux dissous/surface affleurant) compris entre 25 et 81 mm / 1000 ans ont déjà été observés. Dans le cas du Val de Bou, le renouvellement du flux hydrique est très important, ce qui suggère un taux élevé.

Il apparaît toutefois que la création de nouveaux vides par dissolution karstique n'est pas un risque à considérer à l'échelle de temps de la « vie » d'une construction (100 ans).

2.1.2 Rôle des discontinuités du massif rocheux soluble

La dissolution du calcaire se produisant au contact des eaux souterraines chargées en CO_2 , l'étude de leur circulation préférentielle au sein du massif peut permettre d'identifier les zones susceptibles d'avoir été érodées.

Même si la circulation de l'eau peut se faire via la porosité primaire de la roche, elle se fait préférentiellement dans les fractures du calcaire et le long des joints de stratification. C'est donc en général dans les zones de discontinuités rocheuses que les cavités karstiques se développent. La figure 11 présente un schéma de l'érosion karstique.

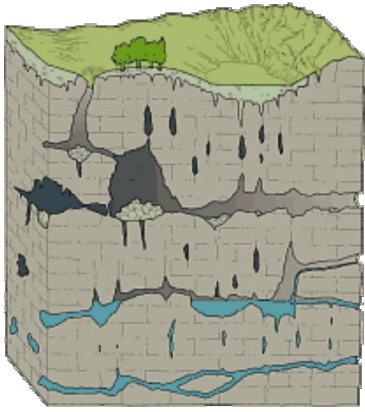


Figure 11 : Erosion karstique dans un massif rocheux discontinu. (source de l'image : wikipédia)

2.1.3 Remplissage des vides karstiques

Du fait de l'organisation géologique des couches, des matériaux d'origine alluvionnaire (limon sableux et petits galets) peuvent être entraînés dans les conduits karstiques du calcaire. À la faveur des variations de charge hydraulique, ces matériaux se déposent dans les cavités et peuvent, dans certains cas, totalement obturer le vide (allant parfois jusqu'à modifier les écoulements au sein des drains karstiques).

2.2 Les phénomènes de déstabilisation

2.2.1 Soutirage des matériaux de remplissage

Le soutirage est le déplacement en profondeur d'éléments fins déposés dans les vides karstiques et entraînés par les circulations d'eau. Classiquement, ce phénomène se présente dans les zones d'infiltration gravitaire. Les matériaux sont emportés en profondeur dans le réseau karstique, recréant un vide (cf figure 12).

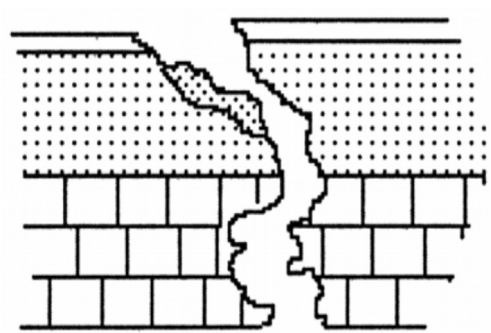


Figure 12 : Schéma de soutirage de matériaux

Le soutirage permet l'évacuation des matériaux vers un exutoire des eaux souterraines.

Dans le cas du Val de Bou, la configuration hydrogéologique implique une circulation des

eaux souterraines selon une direction quasi-horizontale (l'infiltration gravitaire et les écoulements verticaux ont bien sûr toujours un impact dans le soutirage des matériaux). Le bureau d'études Hydratec, missionné à propos d'effondrements situés à proximité de la digue à Bou (en rive droite de la Loire) a proposé en 1993, le schéma d'évolution suivant (figure 13) :

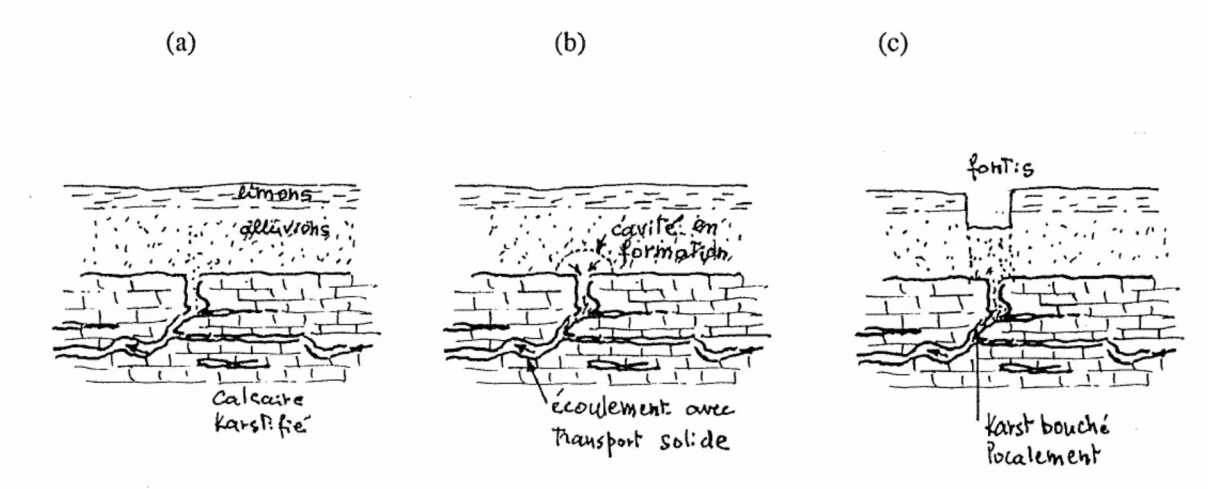


Figure 13 : Schéma d'évolution du soutirage de matériaux

Le schéma (a) correspond à la situation initiale : vide rempli, existence d'une circulation d'eau dans le conduit karstique ;

Le schéma (b) illustre le soutirage des matériaux du conduit et de la cheminée et l'apparition d'un vide résultant de la décompression au sein des alluvions ;

Le schéma (c) montre la situation finale correspondant à la montée en surface d'une cloche de fontis (évolution verticale ascendante plus ou moins rapide d'une déstabilisation des terrains meubles). La nappe alluviale joue un rôle aggravant dans la stabilité des matériaux alluvionnaires limono-sableux.

Si le soutirage horizontal des matériaux se situe dans une zone sans contact avec les alluvions (pas de cheminée verticale), il implique :

- une modification de l'équilibre des contraintes dans le massif rocheux : les matériaux emportés ne soutiennent plus les matériaux calcaires sus-jacents.
- un renouvellement du flux hydrique à proximité des éléments « porteurs » des vides (c'est à dire la voûte et les éventuels piliers calcaires). La dissolution est donc réactivée bien que sa cinétique soit lente.

Ces conditions sont favorables à l'effondrement du toit des cavités concernées (voir partie suivante).

Du point de vue de la cinétique du phénomène, l'intensité (donc la vitesse) du soutirage des matériaux est liée au débit traversant les conduits karstiques. La décompression des matériaux alluvionnaires suite à la survenance du vide (situations (b) et (c)) est, elle, quasi instantanée (matériaux sans cohésion et sous eau). L'apparition du fontis en surface est donc presque contemporaine de la fin du phénomène de soutirage.

2.2.2 Chute d'une dalle de toit d'une cavité

La chute d'une dalle de toit d'une cavité karstique s'apparente à une chute de toit dans une cavité anthropique. Les ouvrages traitant des instabilités des carrières et caves étant nombreux, nous ne développerons pas ici les mécanismes en cause (efforts de cisaillement, moment fléchissant...).

La présence de la nappe amplifie la sensibilité du calcaire à l'effondrement (diminution des caractéristiques mécaniques).

Aucun élément bibliographique ne permet de statuer sur la cinétique d'évolution des caractéristiques mécaniques d'une dalle de toit rocheuse d'une cavité. Toutefois, dès que la contrainte de traction limite est atteinte, la rupture se produit et la décompression des matériaux alluvionnaires sus-jacents est, comme pour le mécanisme précédent, immédiate.

2.2.3 Les variations du débit de la Loire

Les aquifères du calcaire de Beauce et des alluvions récentes sont alimentés en majeure partie par la Loire (le reste étant apporté par les précipitations du Val). La présence de drains karstiques dans l'aquifère calcaire confère à ce dernier une diffusivité plus grande que celle des aquifères des alluvions.

Les figures 14, 15 et 16 ci-dessous présentent les conséquences de ce contraste de diffusivité sur les phénomènes d'effondrement.

La figure 14 représente la situation lorsque la charge hydraulique est uniformément répartie. Dans ce cas, les deux nappes ne présentent pas de différence de charge.

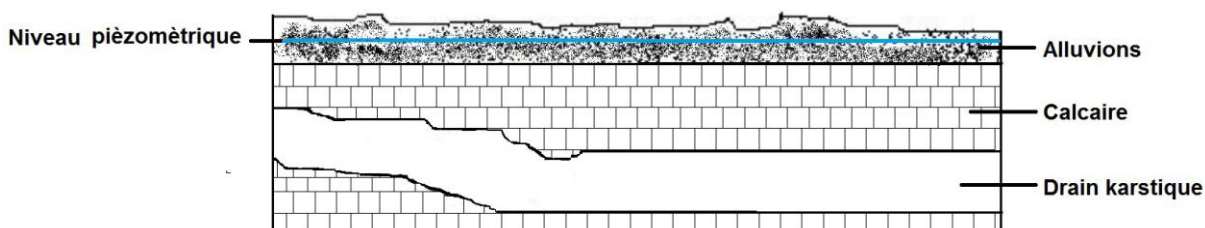


Figure 14 : Charge hydraulique uniforme

La figure 15 représente la situation à l'arrivée de la crue. La diffusivité des drains karstiques étant plus forte, l'augmentation de charge se répercute plus vite dans ces drains. Ainsi, un gradient de charge temporaire entre les deux nappes se crée.

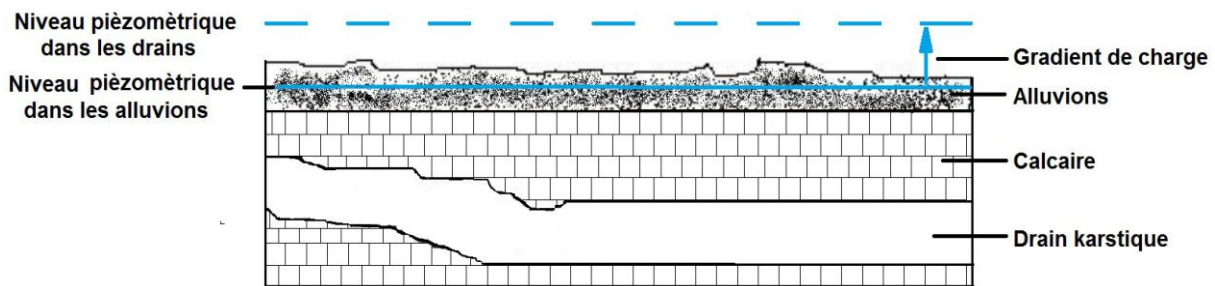


Figure 15 : Arrivée de la crue

Enfin, la figure 16 représente la situation lors d'une décrue. Cette fois-ci la charge est plus faible dans les drains. Un gradient hydraulique se crée, en sens inverse de celui présent en période de crue. Ce gradient favorise également les effondrements

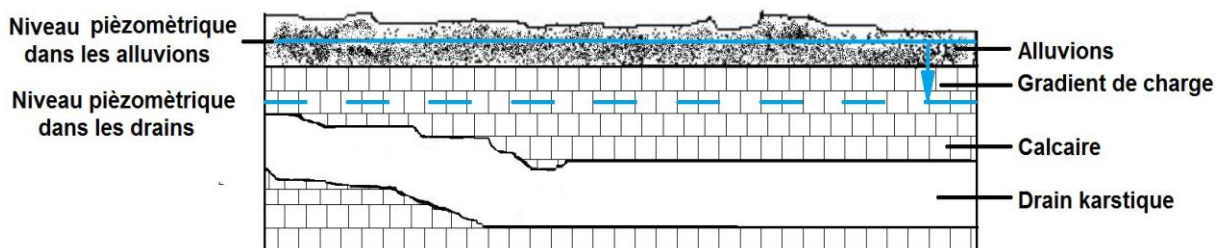


Figure 16 : Décrue

La multiplication de ces variations de gradient agit donc comme des phénomènes de « coups de bélier » (terme probablement abusif compte tenu des valeurs de gradient impliquées) sur les dalles supérieures du calcaire de Beauce.

Les contrastes de diffusivité peuvent donc être une explication au fait que les effondrements se produisent généralement suite à de fortes variations de débit de la Loire. Ils expliquent également le comportement des gouffres : une fois formés, ils se comportent alternativement en perte ou en résurgence selon le régime de la Loire.

2.3 Les conséquences en surface

Généralement, la ruine d'une cavité en profondeur se traduit par une modification topographique en surface. Selon la profondeur du vide initial, son volume et la nature des matériaux constituant le recouvrement (le recouvrement correspond aux matériaux situés entre la surface et le toit de la cavité considérée), cette manifestation aura la forme d'un affaissement ou d'un effondrement.

2.3.1 Affaissement ou doline

Un affaissement se manifeste par une dépression topographique en forme de cuvette à fond plat et bords fléchis, consécutive à l'effondrement partiel ou total d'un vide souterrain. La figure 17 présente un exemple d'affaissement. L'apparition d'un affaissement implique que les terrains de recouvrement se déforment souplement. Dans la typologie associée aux phénomènes karstiques, un affaissement est également appelé doline.



Figure 17 : Affaissement observé dans la commune de Bou proche de la Loire

2.3.2 Fontis ou bîme (effondrement ponctuel)

Un fontis est un effondrement brutal provoqué par l'arrivée à la surface d'une cloche de fontis. Il prend la forme d'un entonnoir ou celle d'un cratère pseudo-circulaire. Un exemple est présenté sur la figure 18. Lorsque les terrains de recouvrement sont plutôt meubles (cas du Val de Bou), on constate une évolution du diamètre dans le temps. Les parois du fontis initialement subverticales auront tendance à s'adoucir pour atteindre un angle correspondant à la pente d'équilibre des terrains. Dans un modelé karstique, le terme s'approchant du fontis est le gouffre, l'aven ou encore la doline. Localement (dans le Val de Bou), on parle de « bîme ».



Figure 18 : Fontis de 2 m de profondeur sur 3 m de diamètre observé sur la rive de la Loire à Bou

3. Répartition géographique des événements karstiques dans le Val de Bou

3.1 Le recensement des événements

Les principales sources de données concernant la localisation des événements karstiques sont les réunions effectuées avec les trois communes du secteur. En effet, de nombreuses personnes présentes lors de ces réunions ont contribué au recensement de ces événements. La deuxième source de données provient des investigations de terrain, qui ont permis de localiser (à l'aide d'un GPS) et de photographier certains effondrements. Enfin la troisième source de données est la bibliographie, dont les principales références sont d'anciennes affaires du CEREMA dans ce secteur.

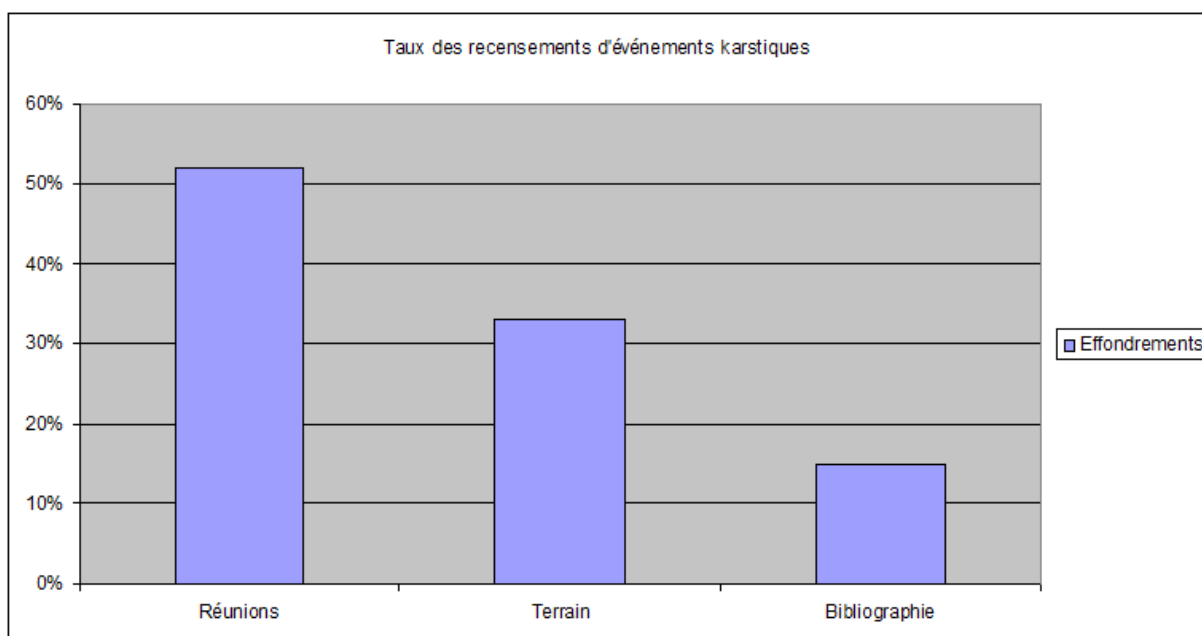


Figure 19 : Nombre d'événements karstiques recensés par source

Le graphe de la figure 19 montre l'importance d'une concertation rapprochée avec les mairies dans ce type d'étude puisque les témoignages constituent plus de la moitié des données de l'étude.

Les données recueillies sont la plupart du temps assez sommaires : l'emplacement est connu, mais la date d'apparition, le diamètre, la profondeur et même le type de phénomène (effondrement ou affaissement) ne le sont pas. C'est pourquoi le terme d' « événement karstique », qui désigne à la fois les effondrements et affaissements, a été utilisé. Le manque de données empêchant, également, de quantifier l'intensité des phénomènes observés, elle sera supposée homogène sur la zone d'étude.

Au total ce sont 157 événements qui ont été répertoriés sur l'ensemble du Val de Bou entre 1686 et aujourd'hui. La fréquence théorique est estimée à 5 événements par an (il s'agit d'un minimum, la plupart des événements mineurs n'étant pas signalés). La figure 20 présente leur localisation.

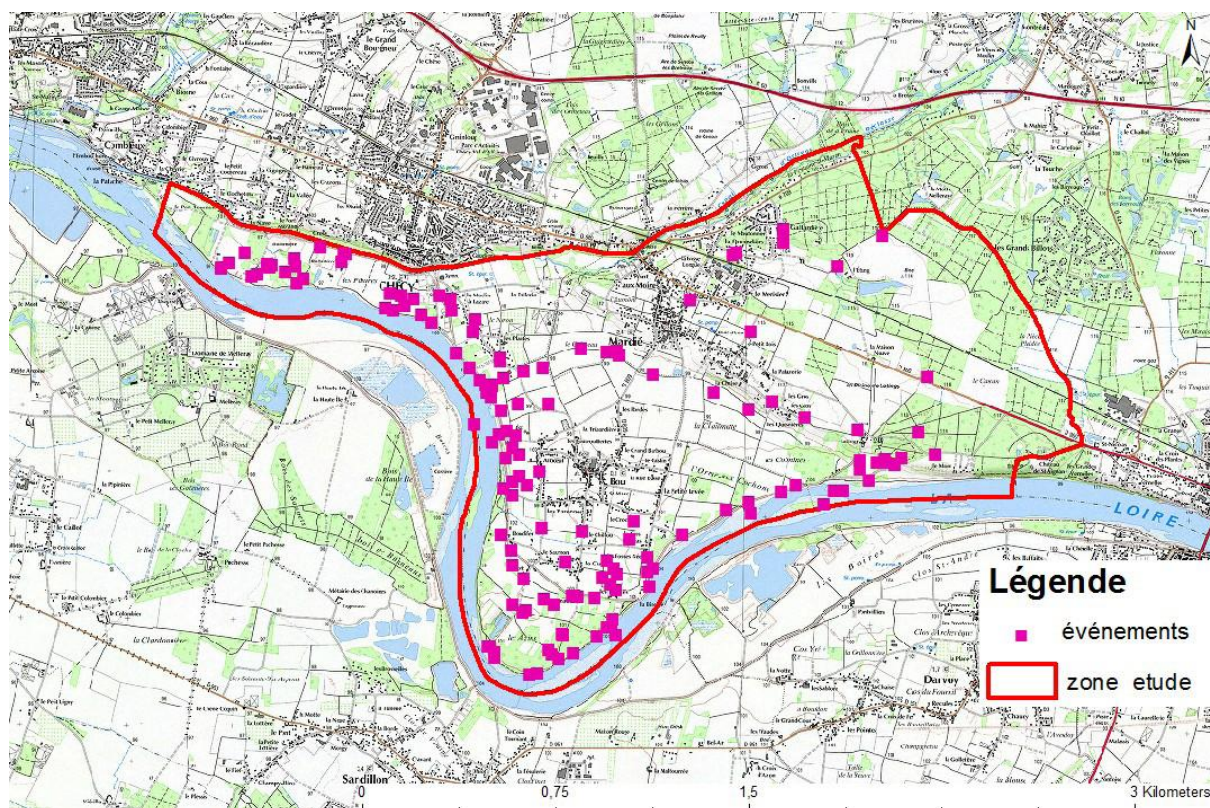


Figure 20 : Carte des effondrements du Val de Bou

Un rapport intitulé « L'aléa effondrement lié à des phénomènes karstiques dans le Val d'Orléans – approche bibliographique » (L. DORE) a été rédigé par le Cerema en 2014. Il s'agit d'une étude réalisée à plus grande échelle, sur tout le Val d'Orléans et excluant le Val de Bou.

Cette étude proposait plusieurs critères géographiques ayant une influence sur la répartition des événements karstiques dans le Val d'Orléans. Ces critères ont été adaptés au contexte particulier du Val de Bou.

Les éléments présentés dans le chapitre 2 montrent l'importance capitale des écoulements d'eau dans la survenue des événements. Les critères utilisés pour déterminer les zones de forte concentration d'effondrements seront donc liés aux circulations d'eau. Le chapitre 1 explique que, de ce point de vue, la zone d'étude peut être divisée en deux :

- Une première zone de basse altitude qui comprend le sud et l'ouest et qui correspond au lit majeur de la Loire. Elle occupe la majeure partie du secteur étudié. Ici, les écoulements seront essentiellement influencés par la Loire.
- Une seconde zone plus haute, au nord-est. Elle correspond au coteau et comprend

la nappe de la terrasse alluviale ancienne, qui est isolée de la nappe du calcaire de Beauce par la présence d'une couche imperméable (le Burdigalien). Ici, les écoulements principaux seront liés aux dépressions topographiques et aux petits cours d'eau observés en surface. La séparation de ces deux zones est effectuée grâce à un modèle numérique de terrain. Elle est présentée sur la figure 21 ci-dessous.



Figure 21 : Découpage de la zone d'étude

Les critères étudiés ne seront pas les mêmes d'une zone à l'autre.

3.2 Premier critère : l'éloignement par rapport à la Loire

Ce critère concerne la zone du lit majeur. L'existence d'un réseau karstique étant directement liée à l'érosion provoquée par l'écoulement des eaux de la Loire sur le calcaire de Beauce, on peut supposer que ce réseau est plus développé à proximité du fleuve. L'éloignement de chacun des 157 événements répertoriés à partir du centre du lit mineur de la Loire a été mesuré. La figure 22 présente la répartition statistique des distances obtenues.

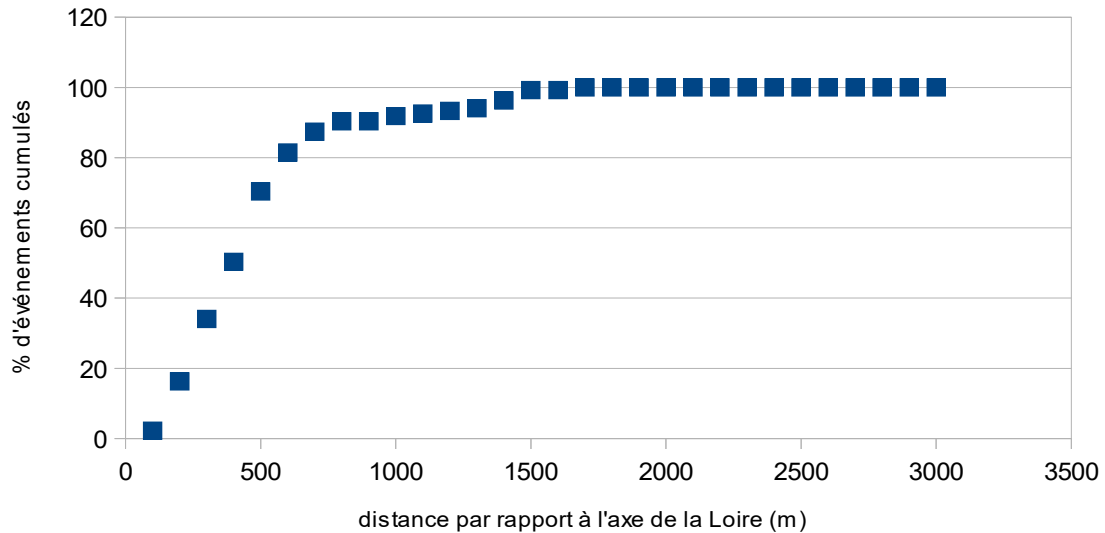


Figure 22 : Répartition statistique des distances entre les événements karstiques et la Loire

On remarque que plus de 80 % des événements se sont produits dans une bande de 600 mètres depuis le centre du lit mineur de la Loire. Au-delà, le nombre d'événements est de moins en moins important. Le faible nombre d'événements entre 0 et 100 mètres (à partir du centre du lit mineur de la Loire) s'explique par le fait que cette distance correspond au lit mineur de la Loire, zone dans laquelle il est difficile de relever les effondrements et affaissements. La figure 23 montre le tracé de la bande de 600 m depuis le centre de la Loire dans la zone du lit majeur. Les points jaunes correspondent aux événements compris dans cette bande, les bleus ceux en dehors. La densité y est d'environ 16,7 événements par kilomètre carrés, contre 5,1 dans le reste du lit majeur. Ces résultats montrent que la probabilité d'occurrence est significativement plus élevée à proximité de la Loire.

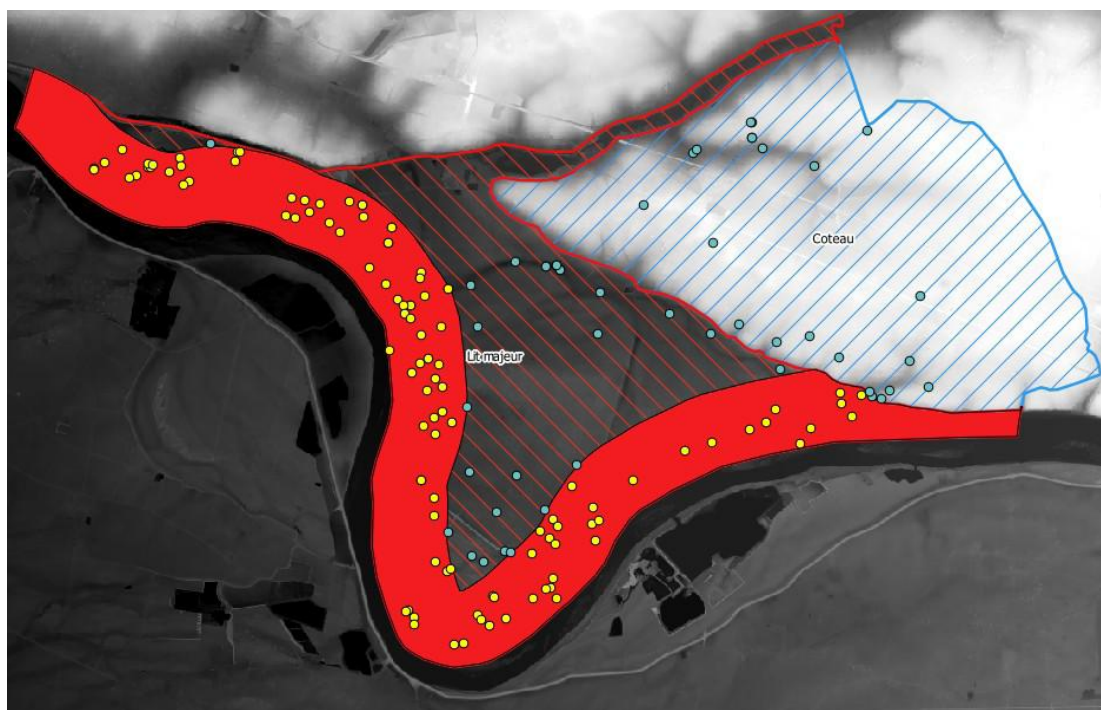


Figure 23 : Bande de 600 m autour de la Loire.

3.3 Deuxième critère : la présence des paléochenaux

Un paléochenal est un ancien (paléo) canal (chenal) par lequel ont transité des sédiments. C'est un ancien cours d'eau « fossilisé » par un remplissage sédimentaire. Les paléochenaux peuvent être mis en évidence par un changement dans la topographie causé par l'érosion. Dans le cas présent, les paléochenaux sont liés à la circulation passée de la Loire. Ce critère n'est donc pertinent que dans la zone du lit majeur. On peut voir sur la figure 24 le modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude, dont les différentes variations topographiques mettent en évidence différents paléochenaux. Le MNT en question a été réalisé par LIDAR par l'IGN en 2014 avec une précision de l'ordre du millimètre.



Figure 24: Altitude donnée par le MNT Lidar de la zone d'étude

Les paléochenaux se manifestent par des zones de moindre altitude. Leur tracé est reporté sur la figure 25.

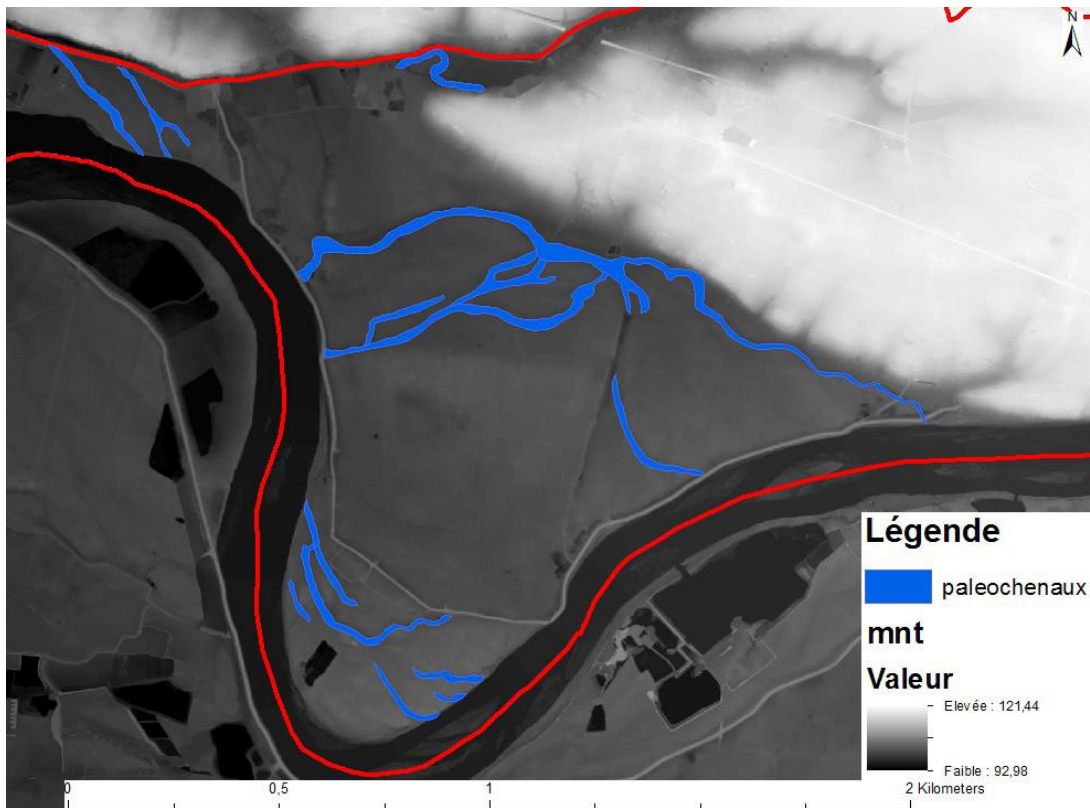


Figure 25 : Paléochenaux dessinés grâce au MNT Lidar de la zone d'étude (source : Cerema)

Des coupes topographiques, réalisées grâce au logiciel QGIS, ont permis de délimiter

finement les paléochemaux. L'une de ces coupes est présentée sur la figure 26.

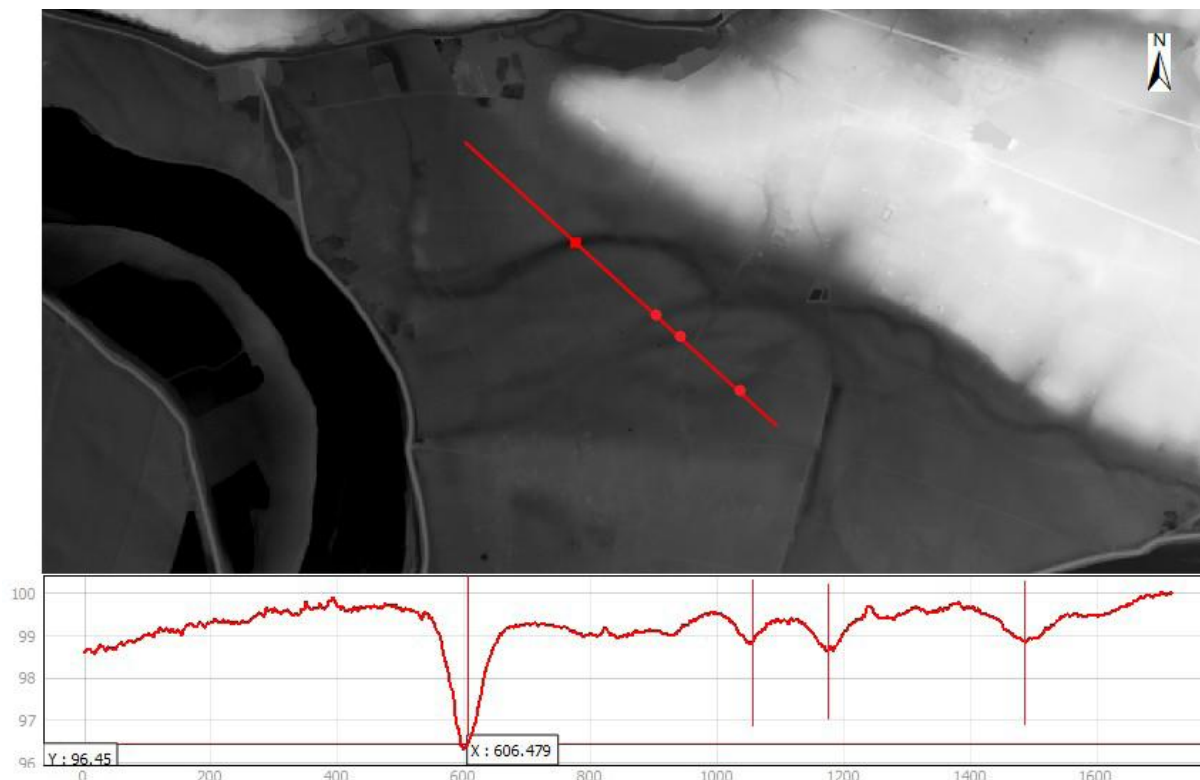


Figure 26 : Coupe des paléochemaux dans la zone d'étude

Sur cette coupe, quatre paléochemaux sont visibles. Il est également possible de voir leur largeur. Le point le plus bas indique leur centre. Pour déterminer leur largeur, on a considéré comme « paléochemal » toute la surface dont la côte est inférieure à la côte moyenne.

Les paléochemaux de la Loire traduisent la présence de circulations d'eau préférentielles. Ces circulations pouvant potentiellement favoriser la survenue d'événements karstiques, le tracé des chemaux a été comparé avec la répartition spatiale des événements.

La figure 27 superpose les événements sur les tracés des paléochemaux (pour tenir compte de l'incertitude sur leur tracé, une bande de 10 m autour de ces paléochemaux a été représentée). Les points jaunes correspondent aux événements survenus dans un paléochemal, les points bleus à ceux se trouvant en dehors.

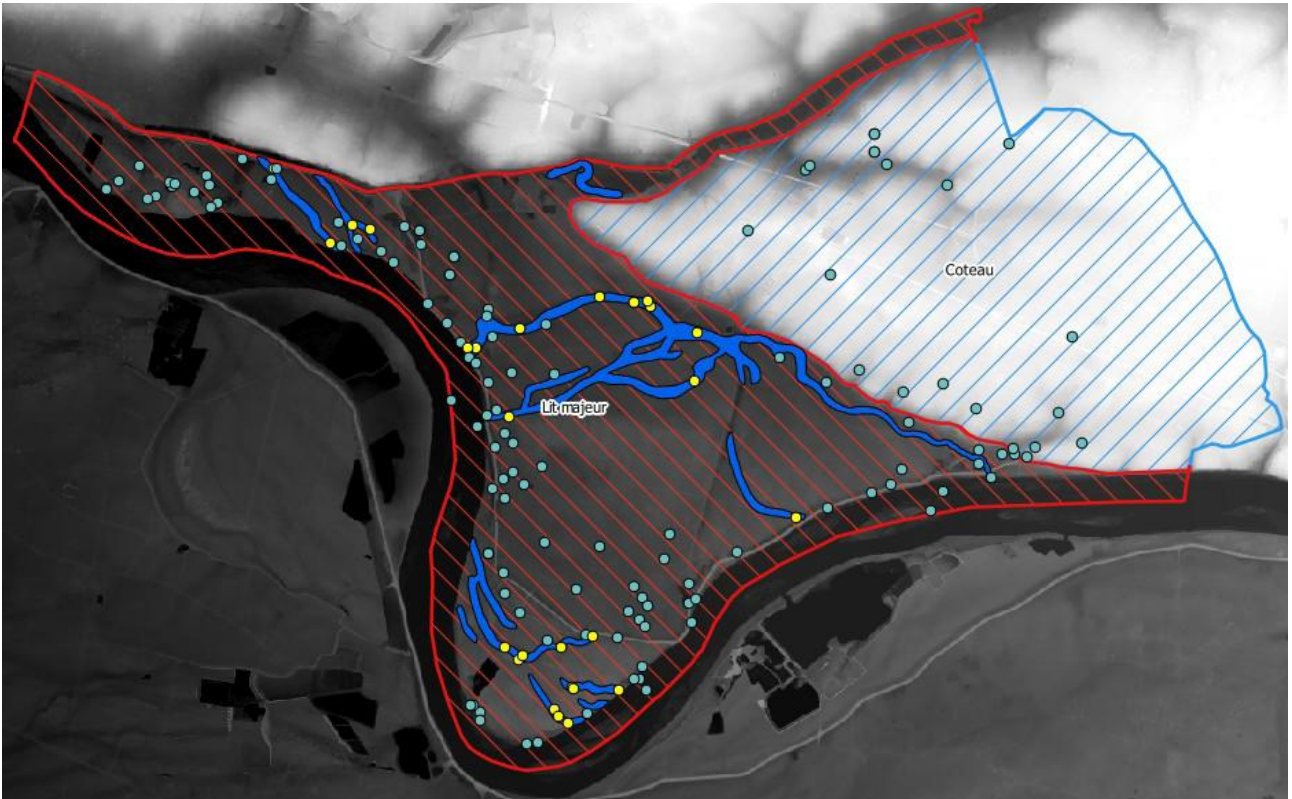


Figure 27 : Comparaison entre les emplacements des paléochenaux et ceux des événements

On remarque que 31 événements se sont produits dans un paléochenal. Cela représente 22 % des événements du lit majeur, alors que la surface occupée par les paléochenaux n'est que de 7 %. La densité au sein des paléochenaux est d'environ 37,35 événements par kilomètre carré, contre 9,6 pour le reste du lit majeur. La probabilité d'occurrence est donc nettement plus forte dans ces zones.

3.4 Troisième critère : les écoulements sur le coteau

En raison de la configuration topographique et de la présence d'une couche argileuse imperméable d'âge Burdigalien, la zone du coteau est relativement protégée de l'influence de la Loire. Les événements karstiques y sont nettement moins nombreux. Toutefois, on remarque la présence de dépressions topographiques traduisant à la fois une érosion accentuée et une concentration des écoulements. Cette configuration suggère une plus grande probabilité de survenue d'événements karstiques, c'est pourquoi la densité d'événements dans ces dépressions a été étudiée. La figure 28 présente les dépressions en vert et la position des événements karstiques. Les événements survenus dans une dépression sont figurés en jaune.

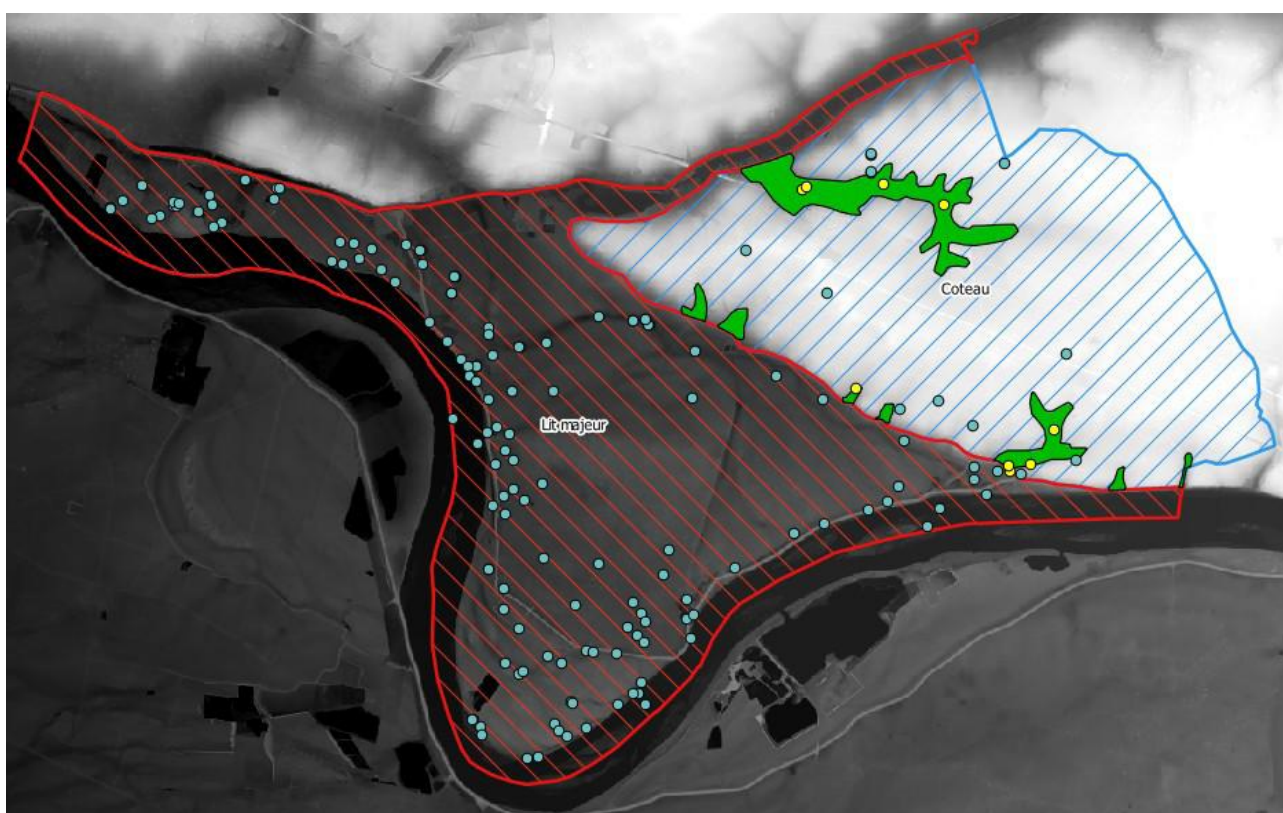


Figure 28 : Comparaison entre les emplacements des dépressions et ceux des événements

On observe qu'environ 41 % des événements du coteau se situent dans une dépression, alors qu'elles n'occupent que 7,6 % de la surface. La densité dans ces dépressions est de 14,7 événements par km² contre 1,75 dans le reste du coteau. La probabilité d'occurrence est donc significativement plus élevée dans les dépressions.

4. Création de la carte de l'aléa karstique

La carte d'aléa a été dessinée en se basant sur les critères et les densités d'événements présentés dans le chapitre 3 : une densité d'événement forte dans une zone donnée a été considérée comme une zone de forte probabilité d'occurrence. Compte-tenu du manque d'information sur l'intensité des phénomènes (diamètre et profondeur des fontis et affaissements), seule la probabilité d'occurrence est prise en compte. La densité est donnée par critère, et non pour chaque zone : par exemple, une zone correspondant à une dépression topographique du coteau ne contenant pas d'événements karstique se verra attribuer une densité correspondant à la densité moyenne dans les zones de dépression, et non une densité de zéro. Cette façon de procéder a été choisie car le but de cette carte est d'estimer, en se basant sur des critères physiques, les endroits où les événements ont plus de chance de se produire et non de décrire uniquement les endroits où ils sont déjà survenus. Cependant, les interactions entre critères ont été prises en compte : ainsi, un tronçon de paléochenal situé à moins de 600 m de la Loire se verra attribuer une densité différente de celle d'un tronçon situé plus loin. 6 types de zone ont ainsi été déterminées :

- Les paléochenaux à moins de 600 mètres de la Loire. Il s'agit de la configuration la plus exposée, avec 58,8 événements par km². L'aléa est considéré très fort.
- Les paléochenaux à plus de 600 mètres de la Loire, où la densité est de 22,4 événements par km². L'aléa est considéré fort.
- Les dépressions topographiques dans le coteau, qui présentent une densité de 14,7 événements par km². L'aléa est considéré fort.
- La partie de la bande de 600 mètres autour de la Loire ne comportant pas de paléochenaux, où la densité est de 14,4 événements par km². L'aléa est considéré fort.
- Le lit majeur de la Loire situé à plus de 600 mètres du fleuve et ne comportant pas de paléochenaux, avec une densité de 3,2 événements par km². L'aléa est considéré moyen.
- Et enfin la partie du coteau sans dépression topographique, dont la configuration favorable permet une densité de seulement 1,75 événements par km². L'aléa est considéré faible.

Ce découpage est présenté sur la carte d'aléa de la zone d'étude (figure 29). Cette carte figure également en annexe 1.

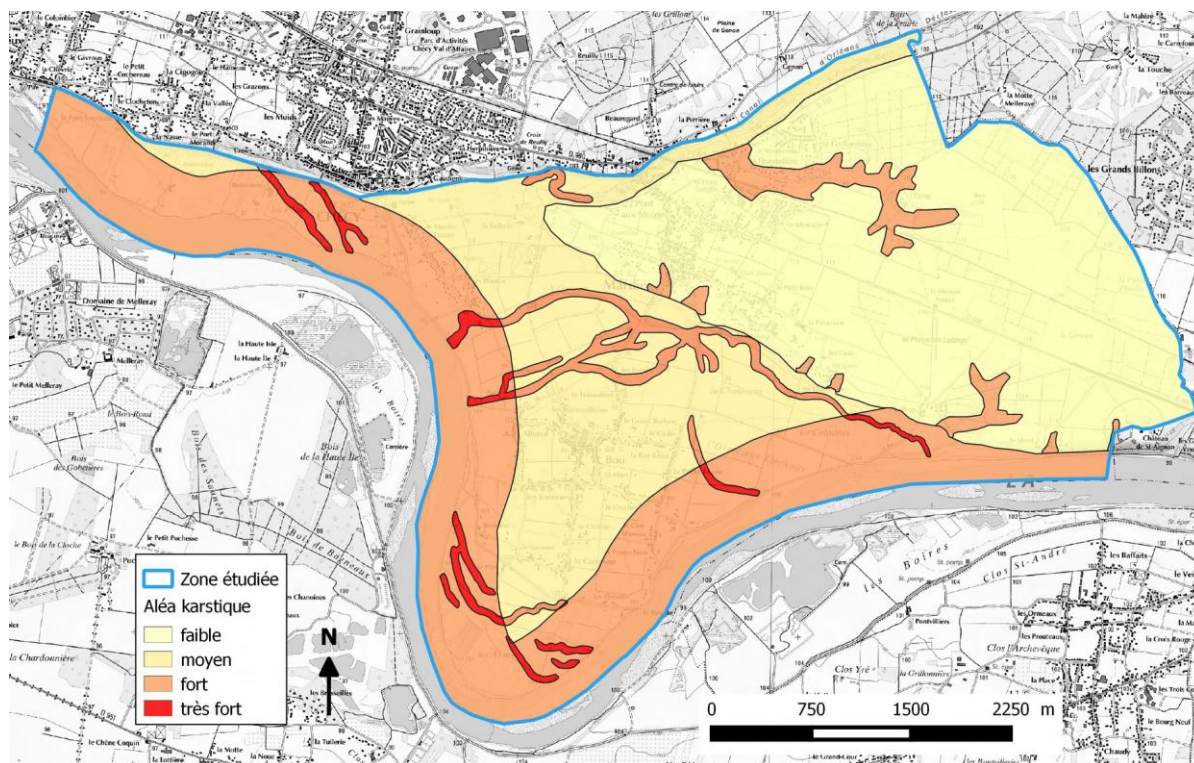


Figure 29 : Zonage de l'aléa effondrement/affaissement karstique

La proportion d'événements s'étant produits dans les zones délimitées s'élève à 82 %. Il y a donc environ 18 % (ce qui représente 28 événements) des événements répertoriés qui n'ont pas pu être rattachés à un critère physique. Il est donc impossible de délimiter des zones parfaitement protégées dans lesquels la probabilité d'occurrence est nulle. Toutefois, les densités mettent en évidence des différences importantes d'une zone à l'autre : ainsi, on répertorie environ 33 fois plus d'événements au kilomètre carré dans les zones les plus sensibles que dans les zones les moins exposées.

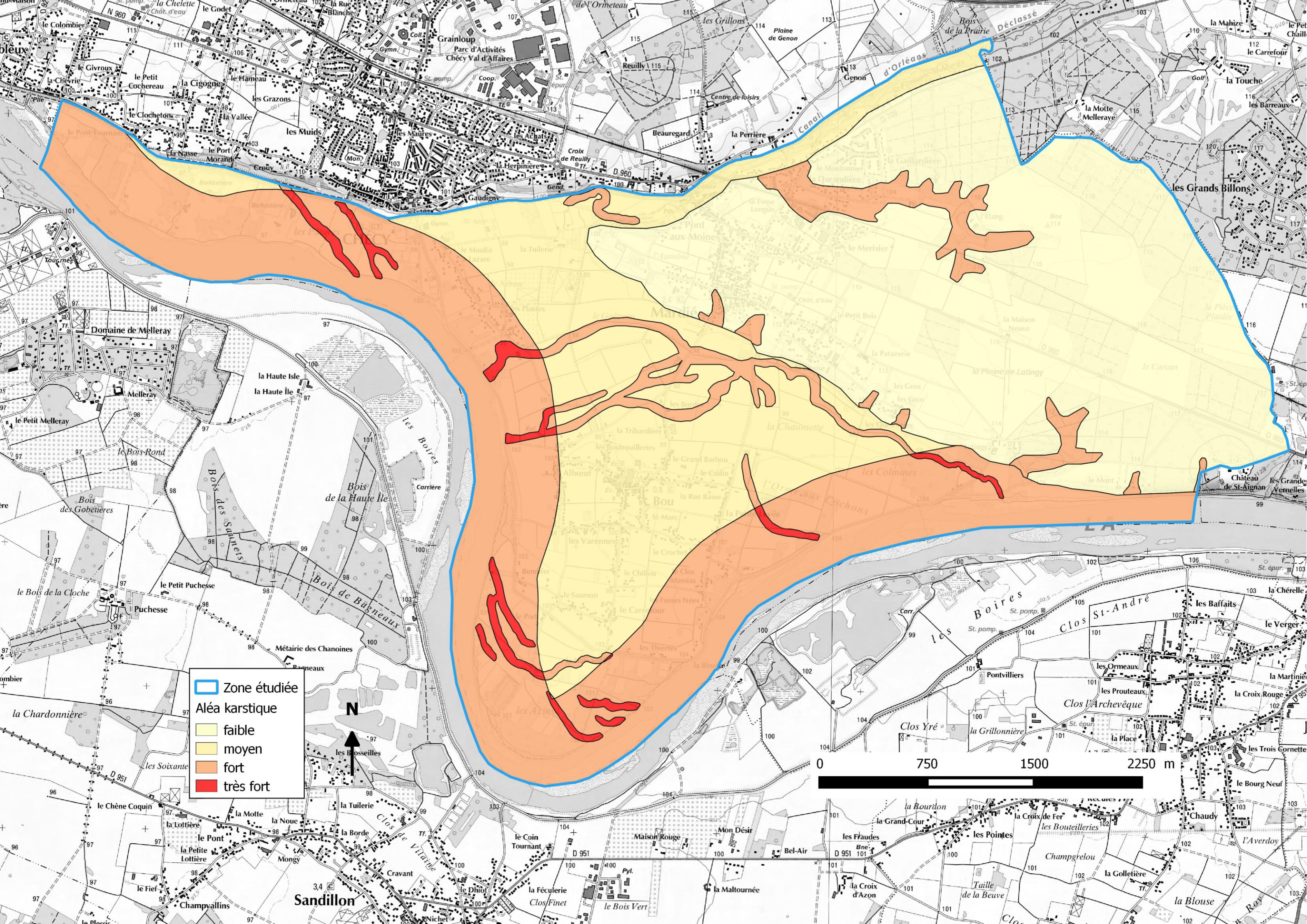
5. Conclusion

Cette étude a révélé un certain contraste concernant la connaissance de l'aléa karstique sur le Val de Bou : on remarque que si le contexte géologique du Val, les mécanismes de l'apparition d'un événement karstique et les conséquences possibles sont bien connus, la connaissance des événements eux-mêmes reste parcellaire. En effet, les données recueillies ne concernent, pour la plupart, que la localisation des événements : leurs autres caractéristiques (taille, profondeur, date d'apparition), pourtant cruciales pour l'évaluation du risque, ne sont pas connues. Les quelques informations à ce sujet mettent toutefois en évidence l'hétérogénéité des phénomènes karstiques : outre la différence entre effondrements et affaissement, on constate que leur diamètre est très variable : il peut aller de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres.

Les connaissances sur les mécanismes d'apparition des événements karstiques permettent d'émettre des hypothèses sur les zones les plus sujettes à cet aléa. La première délimitation, basée sur des critères géologiques et géographiques, sépare le coteau du lit majeur de la Loire. En effet, le coteau semble occuper une position privilégiée : une couche imperméable, le Burdigalien, permet une certaine protection vis-à-vis de la nappe du calcaire de Beauce. Dans cette zone, les endroits les plus sensibles devraient être les dépressions creusées par les petits cours d'eau de surface, qui concentrent les écoulements. A l'inverse, le lit majeur est plus exposé à cet aléa, particulièrement à proximité de la Loire et dans ses paléochenaux. L'étude géostatistique de la localisation des événements karstiques valide ces hypothèses : on trouve significativement plus d'événements au km² dans les paléochenaux, dans une bande de 600 mètres autour de la Loire et dans les dépressions du coteau que dans le reste de la zone d'étude. 82 % des événements sont concernés par au moins un de ces critères. Il reste donc 18 % des phénomènes qui ne peuvent être rattachés à un critère, ce qui traduit une certaine imprévisibilité et empêche de définir des zones totalement protégées. Malgré cette incertitude, les contrastes de densité entre zones sont importants : ainsi, les zones les plus exposées (les paléochenaux à moins de 600m de la Loire) voient survenir en moyenne 58,8 événements par kilomètre carré, contre seulement 1,75 dans les zones les moins exposées (les parties du coteau en dehors des dépressions topographiques).

Une carte d'aléa a été dessinée à partir de la densité d'événements dans ces zones. En raison du peu d'information sur les événements en eux-mêmes, elle ne tient pas compte de leur intensité.

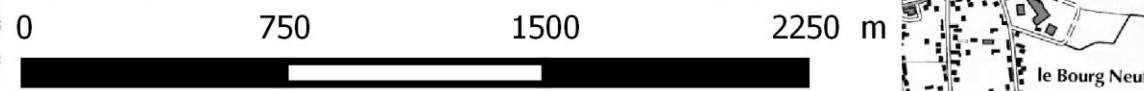
Annexe : Carte d'aléa karstique de la zone d'étude



Zone étudiée

Aléa karstique

- faible
- moyen
- fort
- très fort



Résumé de l'étude

La présente étude a pour but de délimiter un zonage de l'aléa karstique sur les communes de Bou, Chécy et Mardié. Des investigations de terrain couplées à des recherches bibliographiques et des entretiens avec les mairies ont permis de recenser 157 événements karstiques. La localisation de ces événements a servi à définir des critères géographiques influant sur la probabilité de survenue d'un phénomène karstique. Une carte d'aléa a été dressée en se basant sur ces critères et en considérant l'intensité homogène.



Cerema Normandie-Centre – site de Blois

11 rue Laplace – CS 32912 – 41029 Blois Cedex

Tel : 02 54 55 49 00 – mel : dternc@cerema.fr

www.cerema.fr