
Rapport de stage de groupe

4^{ème} année]
PERCIVAL

Entreprise

Adresse

Logo

Tuteur entreprise :

Gildas Noury

— ..

Tuteur académique :

Kamal Serrhini

Ben chikar,
Ernatus

IUT

2018-2019

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à nos tuteurs de stage, M. SERRHINI Kamal, tuteur pédagogique et professionnel, ainsi qu'à M. NOURY Gildas, ingénieur géologue spécialisé en géotechnique, qui nous aidé à comprendre le processus d'effondrement karstique des cavités souterraines.

Nous les remercions pour l'orientation, l'aide et l'accompagnement qu'ils nous ont apporté tout au long de ce stage. Leur expertise quotidienne, leur conseils judicieux, les différents correctifs qu'ils ont apporté à nos activités, ainsi que les travaux dirigés qui nous ont permis de nous performer avec le logiciel ArcMap, et ont contribué à l'avancement de notre stage. Grâce à leur disponibilité et à leur confiance, nous avons sereinement pu accomplir nos différentes missions.

Enfin, nous tenons à transmettre nos remerciements à nos familles respectives qui représentent pour nous une vraie source de motivation.

Introduction

Ce rapport de stage rend compte des activités de deux étudiants ayant travaillé sur le projet PERCIVAL. Un projet sur lequel collaborent le laboratoire CITERES et le BRGM. Ainsi, ce rapport, présente une étude sur la vulnérabilité des enjeux du Val d'Orléans et une étude pour un plan d'évacuation en cas d'inondation.

Le projet PERCIVAL a été lancé après les récents évènements qui ont touchés ce territoire. En effet, en 2016 des précipitations extrêmes ont engendré des inondations et aussi des effondrements de sol liés aux cavités karstiques. Ces effondrements sont bien connus sur le Val mais à la suite de ces pluies leur taux d'apparition a augmenté. En liant les problèmes d'inondations à la notion de cavité et de mouvement de terrain, le risque de vulnérabilité du Val d'Orléans augmente, d'autant plus en cas d'une rupture de digue et d'effondrement sur ces digues.

Plan arbitraire (modifié par kamal) :

* Introduction :

- PERCIVAL
- Organismes d'accueil

* Partie 1 : Diagnostic/ Etat des lieux

- Présentation générale du territoire
- Définition des différents termes et notions utiles à l'étude

* Partie 2 Enjeux et représentation des gouffres

- Enjeux généraux
- Fiches de présentation des gouffres
- Scénarii Sigloy

*Partie 3 : ~~Explication~~ Proposition d'une cartographie multi aléa du Val d'Orléans et vulnérabilités urbaines

- Aléas du Val d'Orléans (inondation, MVT, + Carto)
- Vulnérabilités de la population et du bâti sur le val

Partie 4 : Évacuation

- Acteurs et réglementations
- Ébauche d'un plan d'évacuation

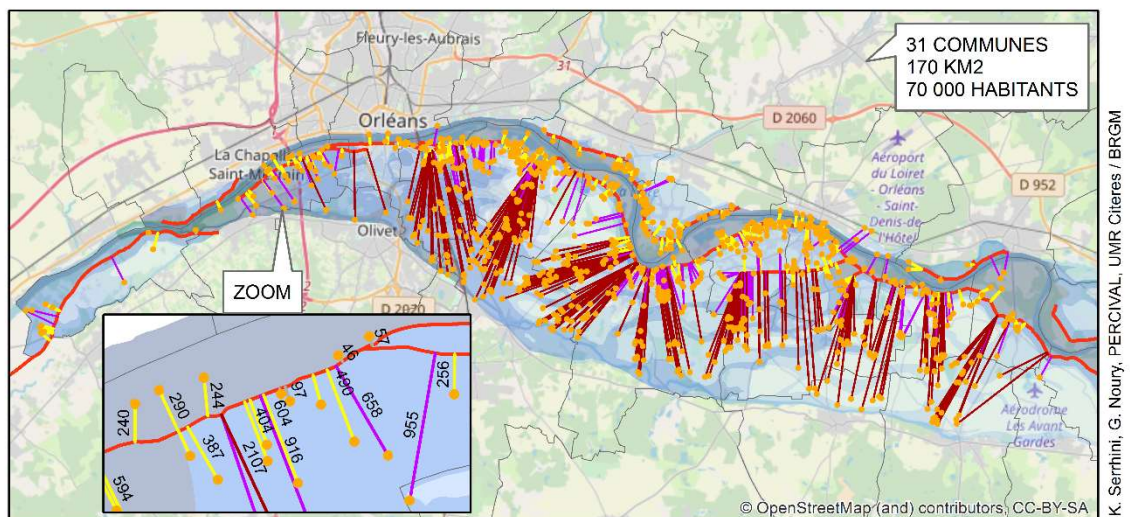
Conclusion/Discussion

Annexes

Le territoire français est soumis à une multitude d'aléas naturels dont les plus connus sont à titre d'illustration l'aléa sismique, l'aléa d'inondation, l'aléa lié aux mouvements de terrain mais aussi la pollution des sols et anciens sites industriels, les cavités souterraines, le retrait ou gonflement d'argile. Ces événements, en absence d'une prévention efficace, peuvent causer d'importants dommages matériels et humains à l'échelle du territoire et détériorer d'une façon quasi irréversible les enjeux de la zone exposée. Ces dommages et détériorations représentent une notion clé et récente des recherches sur les catastrophes actuelles, il s'agit de la vulnérabilité des enjeux du territoire en question (Reghezza, 2005). La perception du risque de la population ou encore la volonté de la population de préserver l'intégrité de son territoire en diminuant sa vulnérabilité et la gravité des conséquences de ces événements naturels représentent les leviers d'élaboration des plans d'évacuation.

Destinés à l'optimisation du cadre de vie de la population, ce document rend compte des démarches préventives et des mesures de protection en cas de survenue d'une catastrophe naturelle. Il demeure néanmoins toujours axé sur la prise en compte d'un seul aléa (Plattard, 2017), bien que le territoire étudié soit touché par un ensemble d'aléas en interactions (Touili, 2017). L'approche multi-aléa qui intègre les interactions entre des multiples aléas et les risques associés sur un même territoire, s'annonce nécessaire afin de protéger au mieux le territoire.

Distance euclidienne entre les indices (915) de mouvement de terrain liés au karst et l'extrémité la plus proche de la digue du Val d'Orléans



Légende :

Classes de distances euclidiennes (discrétisation géométrique) :

- 0 - 173
- 174 - 651
- 652 - 1977
- 1978 - 5652

Aléa inondation (PPRi 2015) :

- Faible (1)
- Moyen (2)
- Fort (3)
- Très fort (4)

0 5 10 km

● Événement karstique

— Digue Val d'Orléans (Loiret - 45)

Sources : BD Cavités et MVT (Géorisques - BRGM)
BD TOPO IGN - OSM 2018

K. Serhini, G. Noury, PERCIVAL, UMR Citères / BRGM

Le Val d'Orléans, notre zone d'étude, s'inscrit dans cette réflexion. En effet, ce territoire à enjeux forts ; densément peuplé (enjeux sociaux), bassin d'emplois (enjeux économiques) (Perrin, 2016) est exposé à des aléas multiples et fortement corrélés. En effet, comme en peut témoigner les fortes crues historiques et les réglementations comme le PPRI, il est sujet à la problématique d'inondation liée à la Loire. Le Val est aussi victime des effondrements de cavités naturelles ou anthropologiques souterraines liée à la circulation des eaux souterraines mais cet aléa figure peu ou pas dans la réglementation. La perception et la gestion préventive du risque associé à ce multi-aléa doivent donc passer par la prise en compte simultanée de ces deux phénomènes naturels afin de réaliser le plan d'évacuation le plus adéquat.

Afin de compléter les études inscrites dans le cadre du projet PERCIVAL, notre stage vise à cartographier la vulnérabilité du territoire au travers de ces enjeux et à réaliser une ébauche d'un plan d'évacuation face au risque du multi-aléa. En guise d'introduction, ce rapport présentera brièvement le projet PERCIVAL et les organismes d'accueil. La première partie consistera en une présentation générale du territoire avec une description des caractéristiques topographiques, géologiques du territoire et d'une définition des différents termes, concepts et paramètres essentiels à la compréhension des aléas.

Puis, dans une deuxième partie seront développés les différents enjeux présents sur un territoire, la méthodologie employée pour l'élaboration d'une fiche de présentation des effondrements ainsi que l'avantage d'étudier un scénario de rupture de digue, sur l'exemple de la commune de Sigloy.

La troisième partie comprendra une explication des aléas auxquels le Val d'Orléans est exposé, leurs particularités ainsi que du multi-aléa. L'élaboration d'une étude ciblée sur la vulnérabilité du Val d'Orléans face au multi-aléa.

Pour finir avec une brève présentation des différents documents de prévention, du rôle et du fonctionnement des institutions, des acteurs impliqués dans la gestion de crise et de la méthodologie d'élaboration d'un plan d'évacuation, dans un premier temps. Puis, une dernière partie consacrée à la planification de l'évacuation. En effet, cette étape basée sur le diagnostic territorial effectuée au préalable est formée de deux composantes : la soustraction de la population des zones de danger et leur acheminement jusqu'aux structures d'accueil.

(A METTRE DANS LA PARTIE RESULTAT OU CONCLUSION)

Les différents résultats auxquels nous avons pu aboutir sont issus de la réalisation de plusieurs tâches qui se résument en :

- La recherche documentaire et le recueil d'informations à partir de la littérature disponible sur internet ou dans le centre bibliothécaire.
- Un libre accès aux bases de données du BRGM.
- L'utilisation de logiciels variés, Excel, QGIS, ArcMap, Word, Python.
- La modélisation cartographique des études et des rendus. Les différents tronçons et zones cartographiés ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcMap. Ces illustrations visent une meilleure visualisation de résultats et permettent une clarté dans l'interprétation des aboutissements.
- Des rencontres avec différents acteurs, un retraité habitant sur le Val d'Orléans et un agent de la DREAL.

- D'une visite de terrain comprenant 4 arrêts clés de gouffres présents sur le Val d'Orléans.

Introduction

a) PERCIVAL

Projet PERCIVAL

Objectifs

Intitulé « PERception des Risques d'effondrements liés aux Cavités et associés aux Inondations en Val de Loire » et sous la direction du BRGM, ce projet a pour but d'améliorer les connaissances sur cet important phénomène d'effondrement karstique et d'améliorer la perception de ce risque mal connu pour de nombreux acteurs (politiques publiques, populations, élus...). Ce projet vise évaluer la prise en compte de l'aléa effondrement karstique, faire un état des lieux des connaissances actuelles sur le sujet, et proposer une amélioration de la gestion globale de ce risque.

La finalité de ce projet PERCIVAL est de s'appuyer sur les conséquences de l'événement climatique de 2016 pour progresser dans la compréhension de d'autres phénomènes liés (inondation, rupture de digues), appréhender davantage le lien de causalité entre ces aléas et les risques associés ainsi que leurs impacts sur les aménités du territoire, de manière à offrir des pistes pour la gestion de crise intégrant à la fois les composantes inondation et mouvements de terrain.

De nombreux acteurs académiques interviennent dans ce projet, à savoir : l'UMR CITERES (rattaché à l'Université de Tours) chargée de la perception du risque, le BRGM-DRP (associé aux directions opérationnelles D3E et DATE Centre Val-de-Loire) traitant le volet géologie, et l'IRSTEA qui est impliquée dans la modélisation numérique de cet aléa. La DDT45, La DREAL et l'Agglo Orléans représentent les partenaires non-académiques engagés dans le projet.

Missions du CITERES

Cette UMR focalise son étude sur la perception du risque et de la vulnérabilité du Val d'Orléans, et met en œuvre des tâches diverses et variées, à titre d'illustration :

- Élaboration d'un état de l'art d'une part sur les effondrements récents de cavités sur l'Orléanais (dates, lieux, dégâts, photos, article de journal) et, d'autre part, sur la prise en compte (ou non) de ce risque dans les documents d'aménagement et de gestion des risques (PPRi, PCS, Dicrim, etc.) ;
- Développement des connaissances sur les processus déclenchant ces effondrements à travers des travaux de modélisation numérique et une étude géologique du site.
- Évaluation de l'aléa mouvements de terrain (MVT) issus de l'effondrement des cavités souterraines selon plusieurs scénarii ;
- Réalisation d'une enquête quantitative auprès des acteurs concernés au sujet de la perception du risque.
- Étude et analyse de la vulnérabilité de la zone d'étude face au risque d'effondrements de cavités (SIG).

b) Organismes d'accueil

Présentation des organismes d'accueil

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

Formé en 1959, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières est un établissement public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) constituant le service géologique national français. Il est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Le BRGM a pour but de répondre à des enjeux majeurs qui concernent la société et plus particulièrement à ceux liés au changement climatique, à la transition énergétique et au développement de l'économie circulaire. Cet acteur important dans le domaine géologique a pour ambition d'accomplir plusieurs objectifs, comme :

- La compréhension du fonctionnement des phénomènes géologiques et les risques associés ;
- Le développement des méthodologies et des techniques nouvelles ;
- La production et la diffusion de données pour la gestion du sol et du sous-sol ;
- La préparation et mise à disposition des informations liées aux risques et aux pollutions, aux politiques et aux acteurs de mitigation du réchauffement climatique.

Disposant d'un centre technique et scientifique basé sur Orléans et appartenant au réseau Carnot, le BRGM emploie plus de 1 000 personnes dont plus de 700 chercheurs et ingénieurs. Doté de 29 implantations réparties sur tout le territoire français (France métropolitaine et Outre-mer), le BRGM mène ses activités afin de répondre à 6 principaux enjeux sociétaux :

- Géologie et connaissance du sous-sol ;
- Données, services et infrastructures numériques ;
- Risques et aménagement du territoire ;
- Gestion des eaux souterraines ;
- Ressources minérales et économie circulaire ;
- Transition énergétique et espace souterrain.

Afin d'atteindre ses objectifs et de parvenir à ses fins scientifiques, le BRGM réalise principalement 5 missions :

- **La Recherche scientifique** : Cette mission consiste en un recueil de données scientifiques dans le but de répondre aux enjeux définis et en particulier aux défis des changements globaux.
- **L'appui aux politiques publiques** : en encourageant la participation des entités décisionnelles, des établissements, des collectivités territoriales et de l'Etat dans les projets à différentes phases d'avancement des études.
- **La coopération internationale** : Le BRGM participe à différents projets internationaux destinés à la protection durable des populations et des ressources (plus de 200 projets chaque année dans 35 pays) ;
- **La sécurité minière** : Cette mission se concrétise avec la surveillance et la mise en place d'actions de prévention contre les pollutions et les risques des anciens sites miniers ;
- **La formation** : Cet établissement joue un rôle de soutien à l'enseignement supérieur dans le domaine des géosciences et contribue à l'initiation et à la formation d'un grand nombre d'étudiants souhaitant apprendre davantage sur le domaine de la géologie et les disciplines associées.

Laboratoire CITERES

Née du regroupement en 2004 de deux Unités Mixte de Recherches et d'une Equipe d'Accueil, l'UMR Cités, TERRitoires, Environnement et Sociétés s'oriente principalement vers l'analyse des dynamiques spatiales et territoriales des sociétés. Confortant le potentiel de recherche de l'Université de Tours en particulier sur la thématique « Villes et Territoires », CITERES réalise des travaux qui concernent des aires culturelles et des périodes historiques distinctes et qui contribuent à cinq principaux domaines de recherche interdisciplinaire :

- La recherche urbaine qui aborde des sujets tels que le « mode d'habiter », les divisions sociales de l'espace, les mobilisations urbaines...
- La recherche environnementale qui est axée sur l'étude des paysages, de la biodiversité, des risques....
- La recherche sur le patrimoine dont les travaux se focalisent sur la protection du patrimoine urbain et sa valorisation.
- La recherche sur les rapports au (x) territoire (s) qui s'articule(nt) autour du territoire et les différentes interactions et modes de développement qu'il peut avoir.
- La recherche sur les effets de recompositions sociales contemporaines qui porte sur les dynamiques des pratiques sociales, les modes de vie des populations....

L'UMR CITERES est organisée en 4 équipes pluridisciplinaires :

- L'équipe Monde arabe et Méditerranée (EMAM). Cette équipe place le monde Arabe et le pourtour Méditerranéen au cœur de ses études et vise l'analyse des relations établies entre ces deux objets d'études ;
- L'équipe Construction Sociale et politique des espaces, des normes et des Trajectoires (CoST). Cette entité s'intéresse au rapport entre espace, politiques et normes sociales ;
- L'équipe Dynamique et Action Territoriales et Environnementales (DATE). Cette équipe vise à travers ses projets d'analyser et d'étudier les transformations (naturelles ou volontaires) des milieux naturels et des espaces aménagés et construits ;
- Le Laboratoire Archéologie et Territoires (LAT). Cette composante du CITERES étudie les relations des sociétés préindustrielles avec leur environnement et avec les multiples territoires dans lesquels elles inscrivaient leurs activités et analyse l'influence de ces milieux dans le changement des pratiques sociales des populations.

Ce stage a été tutoré et encadré par Kamal SERRHINI faisant partie de l'équipe DATE (Dynamique et Action Territoriales et Environnementales) de cette UMR.

Partie I : Etat des lieux

a) Présentation générale du territoire

Diagnostic du territoire

Présentation du Val d'Orléans

- Contexte géomorphologique :

Situé dans le département du Loiret, le Val d'Orléans correspond à la vallée empruntée par la Loire en amont d'Orléans (Gombert, 2014) et est représenté par le lit majeur de la Loire sur une surface de 170 km² (Charlot., 1996) à 190 km² (Cerema et 45, 2014).

La délimitation géomorphologique du Val est assez nette. En effet, le Val correspond à la plaine alluviale située sur la rive gauche de la Loire, découpée au Nord par le coteau de la forêt d'Orléans et au sud par le glacis d'Olivet et le coteau de Sologne (Mathon, Dore, 2014).

Mesurant environ 40km de long pour 4 à 7 km de large, le Val d'Orléans est traversé par la Loire qui s'écoule d'Est en Ouest. Le Val d'Orléans compte 31 communes, visibles sur la carte ci-dessous.

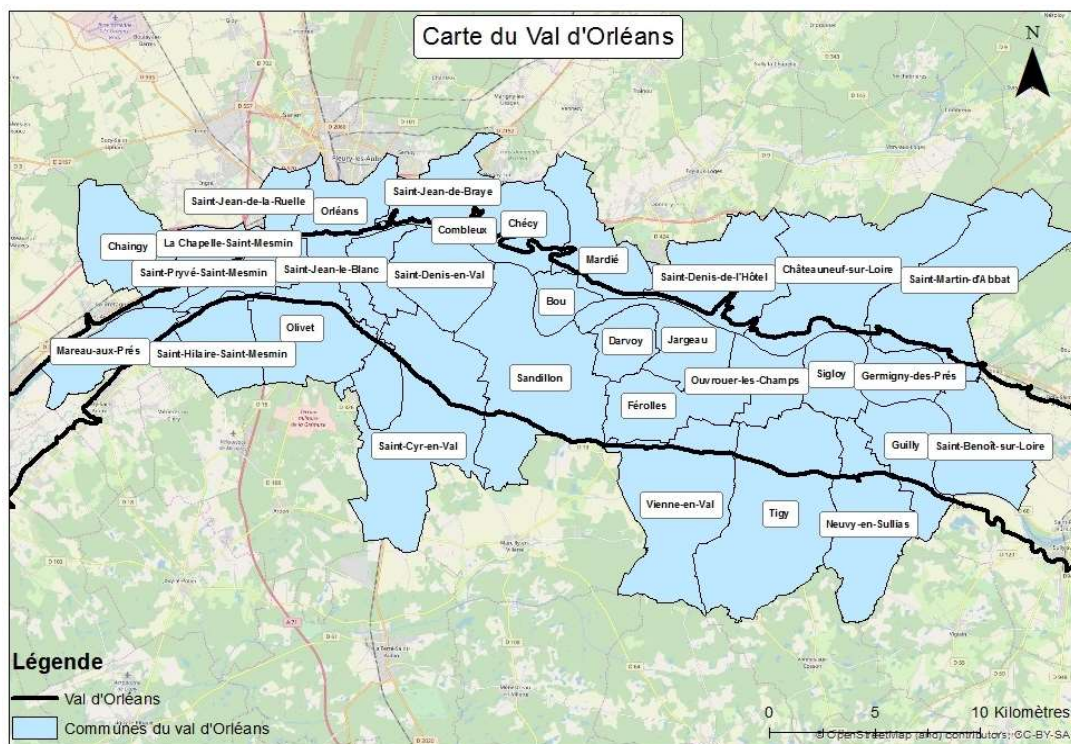


Figure a: Carte du Val d'Orléans

- Contexte hydrologique

- Généralités sur la Loire :

Le Val d'Orléans permet principalement la circulation de la Loire. En effet, étant le plus long fleuve en France, la Loire mesure 1 033km de longueur (Gombert 2014) et accueille sur ses rives environ 4 millions de personnes (Maurin, 2012). Elle est soumise à une variation régulière des débits hydrauliques pouvant atteindre une intensité maximale de 7500 m³/s (YOU, 2018).

À Orléans, le débit moyen de la Loire est de 343 m³/s (Guitierrez, 2010) avec des hautes eaux en Février et des basses eaux en Août. Touché par des événements climatiques océaniques et méditerranéens,

la Loire est susceptible de connaître des crues cévenoles¹, de crues océaniques² ou de crues mixtes résultant de la conjonction des événements océanique et cévenol.

La Loire a connu 3 grandes crues centennales³ au cours du 19^{ème} siècle. Les débits extrêmes variaient de 10 m³/s en étiage (1946) à 7200 m³/s (1856,1866) pendant des crues intenses. Les 3 crues seront brièvement présentées ultérieurement.

○ **Les digues de la Loire et leur importance :**

La population ligérienne a mobilisé de nombreuses stratégies afin de lutter contre l'inondation et de protéger leurs biens et leurs cultures. Avant le recours aux dispositifs de protections, la population faisait appel aux Tertres, des élévations artificielles ou souvent naturelles de terrains caractérisées par un faible risque d'inondation dans une plaine inondable. Considérés sûrs face aux inondations, ces endroits faisaient fonction de zones de constructions privilégiées et de lieu de refuge idéal en cas de crue. Cependant, ces élévations n'étaient plus viables quand il s'agissait de grosses inondations (YOU, 2018).

Afin de pallier ce dysfonctionnement, les ouvrages de protection ont été donc construits avec la création des premières digues appelées les « turcies ». Composées de bois et de terre et caractérisées par une discontinuité spatiale, elles jouaient le rôle de barrages noyés dont la fonction principale se résume à détourner le courant principal afin de protéger la culture du val. Les turcies ont été par la suite renforcées et élevées grâce aux différents matériaux (alluvions sableuses), donnant naissance au terme « levées » (Gombert, 2014). Les levées se transforment progressivement en digues ponctuelles. En effet, avec l'essor du commerce et afin d'optimiser les fins marchandes, la construction des digues se poursuit aboutissant à un endiguement total de la Loire (You, 2018). Ces ouvrages peuvent être de différents modèles. En effet, les bordures de la Loire sont maintenues par un système de digues qui ne possèdent majoritairement pas de renfort (Gombert,2014). Cependant, on peut également trouver des digues renforcées d'un perré maçonné côté Loire ou côté val afin de mitiger le risque d'érosion par submersion. Les digues sont hautes de plusieurs mètres et ont été reconstruites de plus en plus haut à chaque rupture par-dessus les précédentes. De nos jours, le dessous des digues est composé des anciennes structures, elles sont sous surveillance et renforcées par des méthodes plus évoluées et plus adaptées.

¹ Des crues qui résultent de fortes précipitations orageuses d'origine méditerranéenne.

² Des crues consécutives à de longues périodes de précipitations provoquées par des fronts pluvieux océaniques répétés sans intensité particulière.

³ Des crues dont la période de retour est estimée à 100 ans.

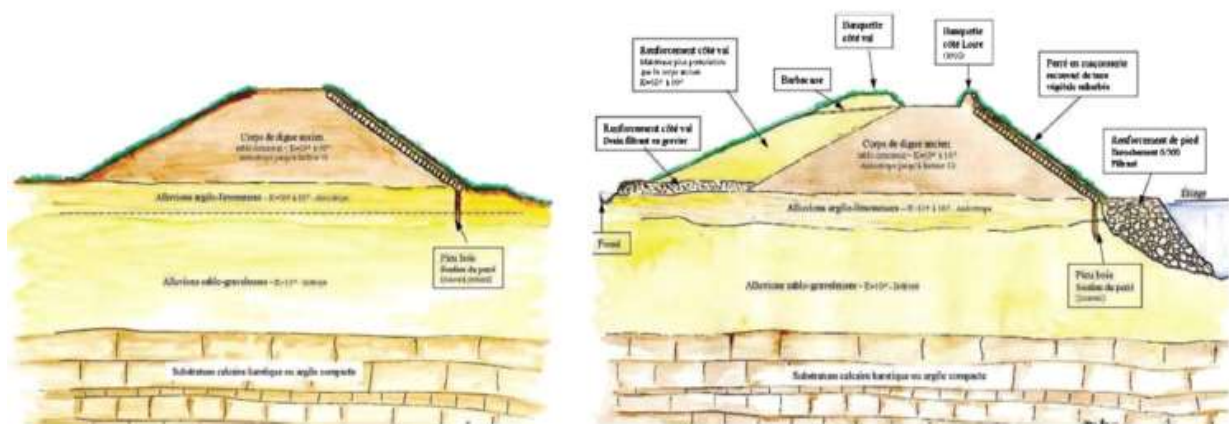


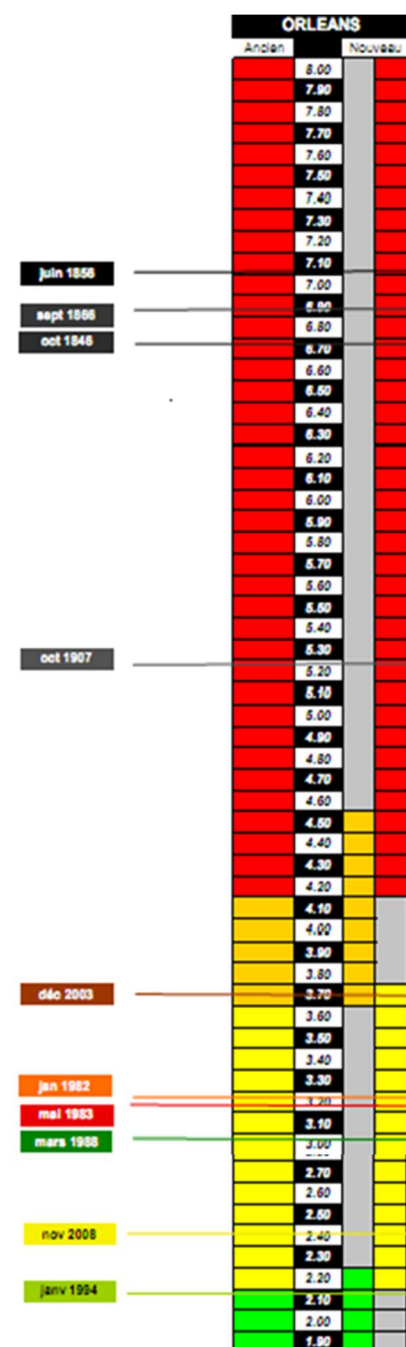
Figure b: Coupes schématiques à travers les digues de Loire (Maurin 2012). a Digue renforcée d'un perré côté Loire, b Digue renforcée côté Loire

En empêchant le fleuve de s'étendre sur les terres arables, cet important endiguement de la Loire augmente la puissance du fleuve et amplifie son débit ce qui le rend plus dévastateur en cas de rupture de digue ; occasionnant ainsi 3 crues majeures dans le Val d'Orléans :

- **1846** : Après une absence séculaire de crues, celle de 1846 a atteint une hauteur maximale de 6,78m (DREAL) provoquant l'ouverture de plusieurs brèches dans les digues. Des banquettes ont été mises en place afin d'appuyer les levées.
- **1856** : Engendrant l'ouverture de 160 brèches pour 23km et causant l'inondation de 100 00 ha du territoire, cette crue a provoqué des dégâts importants au niveau des infrastructures, du bâti et des édifices. La brèche de Jargeau a détruit une partie du village (80 maisons) et causé des désordres multiples. Avec une hauteur de 7,10m (DREAL) la crue de 1856 est la plus haute crue que la Loire ait connu jusqu'à maintenant.
- **1866** : Endommageant principalement la commune de Jargeau à cause de la réouverture de la brèche, cette crue concerne principalement la Loire et est caractérisée par une hauteur de 6,92 (DREAL).

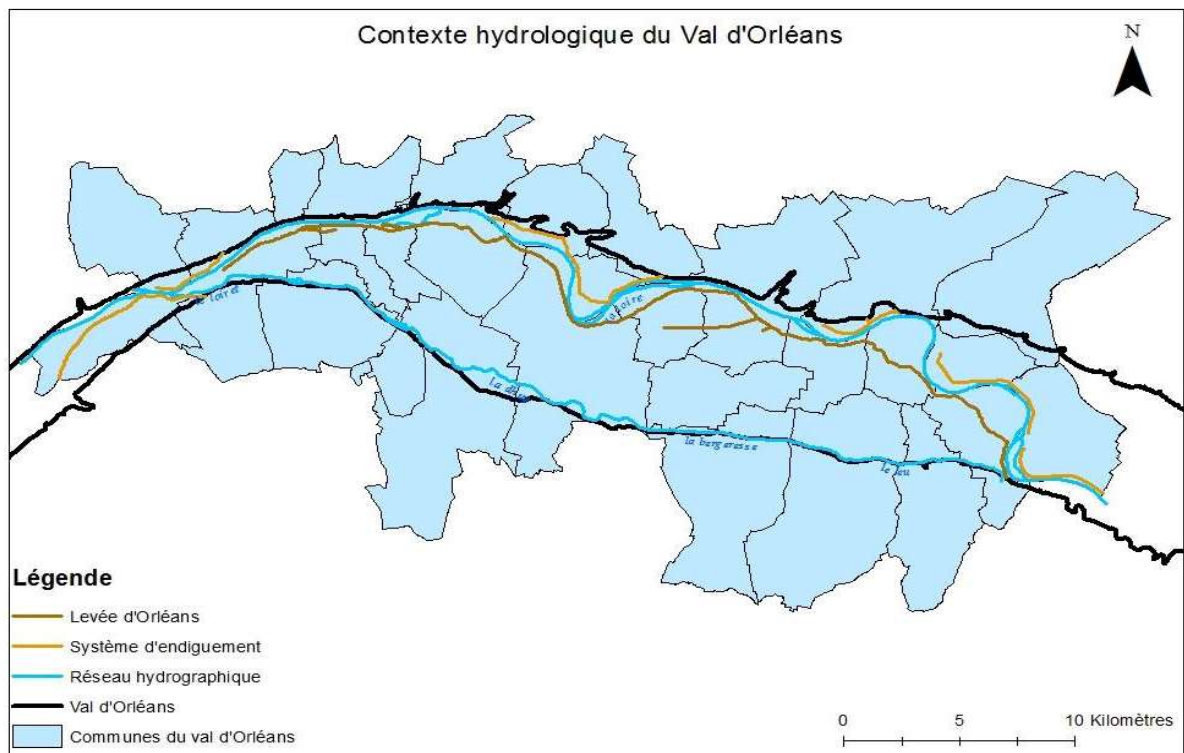
Le schéma ci-contre représente une graduation synthétique des importantes crues que le Val d'Orléans a historiquement connues, avec l'intensité des crues comme paramètre de représentation.

DIRE LA SOURCE DU SCHEMA



○ La levée d'Orléans

Le département du Loiret est couvert par 96km² de digues réparties sur 13 vals inondables. Mesurant 43,5km de longueur, la levée d'Orléans représente l'ouvrage de protection du Val d'Orléans.



Réalisation: BEN CHIKAR Mohamed - Université de Tours - CITERES - BD TOPO - Juin 2019

Figure c: Réseau hydrographique et digues du Val d'Orléans

Selon la classification réglementaire des digues, la levée d'Orléans correspond à la classe A. Cela s'explique du fait que ce système d'endiguement assure la protection de 63 000 habitants et 15 000 salariés (Maurin, 2012).

Comme toutes les levées de la Loire, la digue d'Orléans résulte des élévations successives de terrains et de constructions artificielles favorisant par conséquent la présence de nombreuses anomalies pouvant influencer la structure de la digue et sa fonction, notamment les banquettes à Loire qui contribuent faiblement au rôle de protection (Maurin, 2012).

La digue d'Orléans est susceptible de subir plusieurs dangers qui relèvent principalement de l'irruption accidentelle d'eau à l'intérieur du val en cas de crue majeure. Plusieurs situations peuvent être à l'origine d'entrées d'eau, on note principalement (Maurin, 2012) :

- L'ouverture d'une brèche au niveau de la digue.
- Un dysfonctionnement ou fonctionnement prématuré du déversoir de Jargeau.
- Une surverse sans brèche par-dessus de la crête de la digue.

Ces différents scénarii représentent des causes à une rupture imminente de la digue, mettant ainsi le territoire en danger d'inondation.

Durant ce stage, 7 scénarii nous ont été transmis par la DREAL. L'étude du scénarii Sigloy sera expliquée ultérieurement dans la partie deux de ce rapport.

L'inadéquation du niveau de protection apparent⁴ et celui de sûreté⁵, inhérents à la digue d'Orléans accélèrent sa défaillance et amplifie le risque d'inondation. Considérée comme ancienne, la levée d'Orléans est caractérisée par un niveau de sûreté inférieur au niveau de protection apparente, négligeant ainsi le risque de rupture de l'ouvrage qui peut se produire avant la surverse ou le fonctionnement du déversoir.

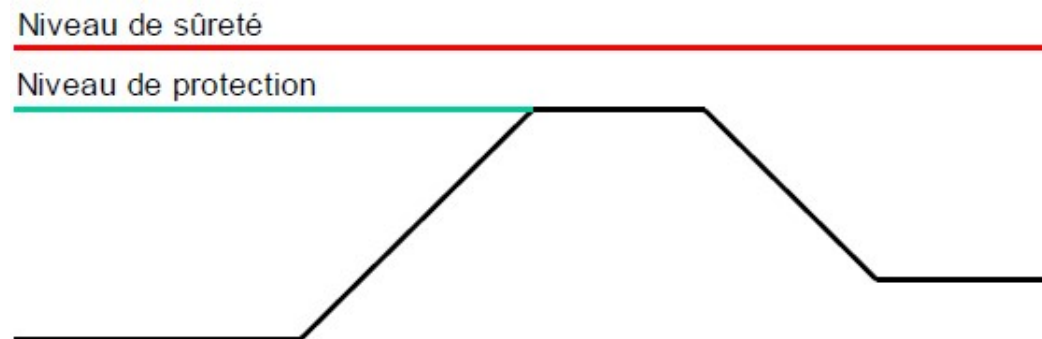


Figure d: Digue fiable

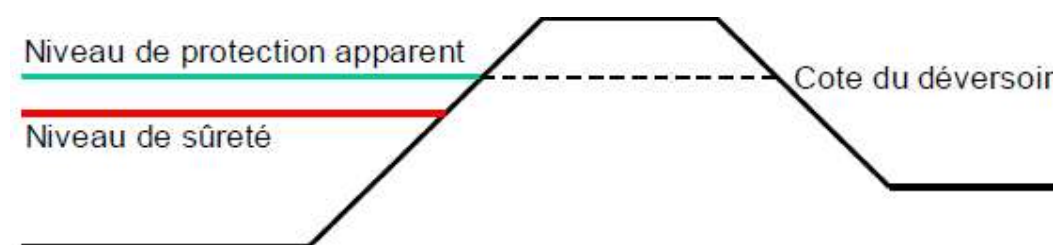


Figure e: Digue non fiabilisée équipée d'un déversoir (Cas de la levée d'Orléans) SOURCE

Cela met en évidence que le système d'endiguement appliqué sur le Val d'Orléans est peu fiable et qu'une levée efficace dispose d'un niveau de sûreté supérieur ou égal au niveau de protection puisque le risque de rupture n'apparaît que lorsque la lame d'eau débordante atteint une hauteur significative ou que lorsque le déversoir atteint sa capacité maximale (Maurin, 2012).

- Contexte géologique

Le substratum du Val est caractérisé par une formation carbonatée hétérogène, appelée « Calcaire de Beauce ». Recouvert des alluvions de la Loire, cette formation s'étend sur une superficie de 10 000 km². Il s'agit de calcaires lacustres soit des formations carbonatées dont la sédimentation a débuté au Stampien et s'est poursuivie à l'Aquitaniien (Gombert, 2014). C'est-à-dire que « ses lacustres se sont déposés au fond d'un grand lac à l'Aquitaniien puis celui-ci s'est progressivement comblé au cours du Miocène pour laisser place à de grandes plaines d'inondation dont les marnes de Blamont, les sables de l'Orléanais et les sables, argiles de Sologne sont issus. Au Pliocène, la compression alpine a entraîné une surrection⁶ à l'origine d'une période d'altération généralisée au sud du bassin parisien. Puis au

⁴ C'est le niveau d'eau au-dessus duquel l'inondation commence à l'emporter sur le territoire par déversement par-dessus de la digue ou un déversoir et sans rupture préalable de la digue.

⁵ C'est le niveau d'eau à partir duquel la propension de rupture de l'ouvrage est importante à prendre en considération. Cette cote constitue le niveau d'eau de référence pour signaler la nécessité de l'évacuation de la population.

⁶ Soulèvement lent et progressif

quaternaire, l'érosion est devenue prédominante ; les formations miocènes ont été progressivement décapées. Dans la région d'Orléans, la Loire a entaillé son lit jusqu'aux calcaires de Beauce, lesquels sont recouverts par des alluvions quaternaires. » (Husson et al., 2019)

Ainsi, nous retrouvons dans cette formation des niveaux divers et variés de calcaires dont l'épaisseur moyenne est de 60m. Cette illustration présente une coupe géologique du Val d'Orléans montrant les différentes couches géologiques composant ce territoire.

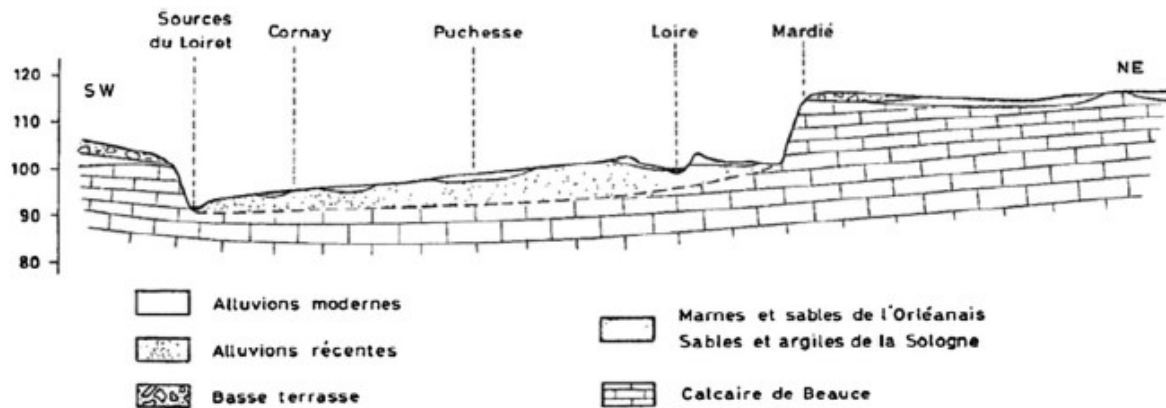


Figure f: Coupe géologique du Val d'Orléans

Cette roche carbonatée a la propriété de se dissoudre lentement au contact de l'eau (Noury, 2017) et la particularité d'avoir une faible résistance mécanique (Perrin, 2016). Au cours du temps géologique, sous l'effet de l'érosion et de dissolution du calcaire, le processus de karstification rentre en jeu et impacte le massif rocheux, créant par la suite des cavités. Le phénomène se poursuit, élargissant par conséquent le réseau de vides souterraines qui se développe sous le sol Orléanais (Mistre-Schaal, 2018). L'expansion de ce réseau et l'amplification de la karstification favorisent l'apparition de désordres karstiques au niveau du Val. On observe facilement des effondrements sur le bord de la Loire liés à des pertes d'eau en amont dans le lit du fleuve, grâce auxquels on observe des résurgences de ces pertes en aval (Noury, 2017). Le BRGM recense également d'autres types de désordres karstiques qui seront expliqués dans la suite du rapport (fontis, dolines, débouillage) (BRGM, 2014).

- Explication du phénomène de Karstification (photo)

Savoir le processus de Karstification du calcaire de Beauce permet de mieux comprendre pourquoi de telles cavités se forment sur le territoire d'Orléans. Tout d'abord, il existe deux plateaux séparés par la Loire, le plateau de Beauce au Nord, très fertile et peu sableux et le plateau de Sologne au sud de la Loire, moins fertile car plus sableux. Le calcaire de Beauce est très karstifié et présente de nombreuses circulations souterraines ainsi que des effondrements karstiques. Le comportement hydrologique est compris mais pas l'origine et le fonctionnement de la karstification dans le Val d'Orléans. Quand ce calcaire est visible, il présente un aspect chaotique avec des creux et des bosses et est couvert de sédiments détritiques. Son altération pendant qu'il est encore couvert est à l'origine de cet aspect. Cette altération correspond à l'altération sous couverture ou encore appelée cryptokarstification. Ainsi, durant cette altération le calcaire devient imperméable (à cause d'un résidu argileux), le toit du calcaire est progressivement dissous jusqu'à provoquer un tassement des couches qui le recouvrent, puis un effondrement. Ces derniers phénomènes sont amplifiés par la circulation des eaux souterraines et l'infiltration des eaux superficielles vers les nappes. Durant, sa trajectoire l'eau soutire altérites,

sables et argiles de manière progressive et localisée (affaissement) dans le karst et ces éléments se retrouvent évacués par celui-ci et abouti à la formation de gouffres, bîmes. (Husson et al., 2019)

- Contexte hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, le Val d'Orléans est composé d'une superposition de deux aquifères souterrains : l'aquifère alluvial de la Loire situé au-dessus et l'aquifère karstique des calcaires de Beauce situé en-dessous. Ces deux aquifères maintiennent une connexion hydraulique sauf en amont de Châteauneuf-sur-Loire, où une couche d'argiles du Burdigalien empêche cette connexion.

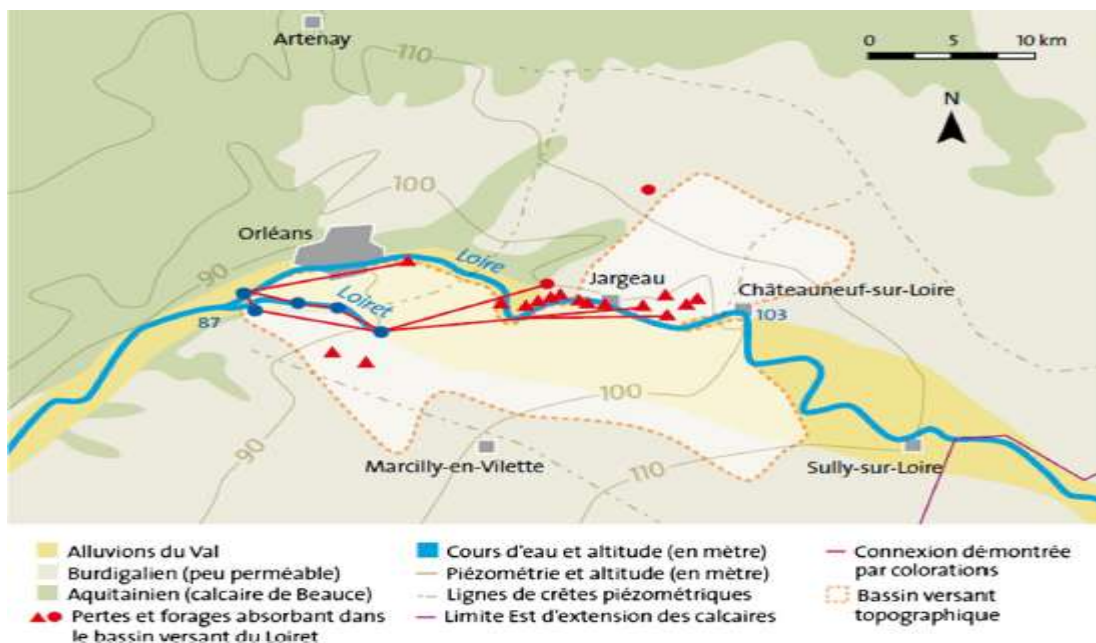


Figure 9: Formations géologiques du Val d'Orléans

L'aquifère karstique est principalement alimenté par l'impluvium de la forêt d'Orléans au nord de la Loire, ainsi que par des pertes sur ce fleuve et sur certains ruisseaux. Ces pertes, s'infiltrant dans le sol et effectuant un parcours souterrain. À la sortie de ce parcours, ces pertes finissent comme source de cours d'eau, tel le cas du Loiret (Gutierrez, 2010).



Figure h: Topographie des conduits karstiques

En effet, l'eau issue des pertes sur la Loire transite par les conduits karstiques, donnant naissance par la suite au Loiret. Les sources de cet affluent d'eau sont donc une résurgence karstique de la Loire (Gutierrez, 2010).

b) Définition des différents termes

Notions fondamentales

Notre site d'étude est soumis à un ensemble de risques en interaction continue (inondation – effondrement karstique). Avant d'étudier la vulnérabilité de la zone d'étude et d'entamer la phase d'évacuation, il convient d'expliquer les concepts liés à notre problématique. En effet, les termes choisis à définir correspondent aux éléments qui jouent un rôle incontournable dans le fonctionnement global du multi-aléa inondation, effondrement karstique.

○ Territoire :

Dérivé du latin territorium, un territoire représente une étendue de terre occupée par un groupe humain dans lequel s'exerce une autorité d'une entité administrative (Etat, province, collectivité territoriale, etc.) (Toupictionnaire, 2003). Dans le domaine de l'aménagement, la notion de territoire renvoie au territoire national qui constitue l'objet des politiques d'aménagement actuelles (Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement).

○ Enjeux :

Les enjeux du territoire représentent les éléments physiques qui sont exposés à un phénomène d'origine naturelle ou anthropique et susceptibles de subir des dommages et des préjudices.

On différencie plusieurs types d'enjeux sur un territoire, notamment : les enjeux économiques correspondant au potentiel de développement du territoire, à la nature/valeur des biens et des activités, les enjeux structurels qui renvoient aux bâtiments, aux infrastructures de transport et de services et à tout type de structure construite. Le territoire compte également des enjeux sociaux

(localisation et importance de la population) et des enjeux liés à l'environnement (patrimoine naturel, paysager et architectural) (Anguis, 2005).

Les enjeux constituant le territoire représentent les éléments fondamentaux à protéger en cas de survenue d'une catastrophe et à prendre en compte fortement dans les démarches d'évacuation.

- Vulnérabilité :

Généralement, la vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel (aléa) sur des enjeux (l'Homme et ses activités) (PPR-Guide Méthodologique, 1999) et évalue la sensibilité d'un système socio-spatial face aux effets néfastes des aléas que les enjeux d'un territoire subissent. La vulnérabilité est une notion polysémique qui peut être traitée sous différentes approches complémentaires. (Reghezza-Zitt, 2005).

On distingue tout d'abord la vulnérabilité physique. Elle renvoie à l'endommagement physique potentiel des éléments exposés et décrit le degré d'exposition d'un enjeu à un aléa défini. On note aussi la vulnérabilité fonctionnelle traitant spécifiquement les enjeux structurels « bâti » et qui désigne la sensibilité de leur utilisation et de la population qu'ils accueillent (Beck, ...).

L'approche sociale de la vulnérabilité, quant à elle, vise à déterminer les conditions de l'endommagement et la capacité de réponse de l'enjeu à un aléa. Cette approche met l'accent sur les facteurs internes des enjeux matériels et souligne que les pertes humaines sont des résultats de la défaillance de ces biens (Reghezza- Zitt, 2005). Elle précise par ailleurs que les propriétés internes de l'enjeu conditionnent son endommagement et son exposition à l'aléa.

L'analyse de la vulnérabilité s'appuie sur une étude descriptive de l'impact du dommage (S. Tabarly, 2010). La réponse de l'enjeu aux effets néfastes produits par un aléa défini sont diverses et variées et changent en fonction de la nature de l'enjeu/ aléa. Parmi ces « stratégies » réactives, on note : la capacité de résistance⁷, la mesure d'adaptation, le degré de dépendance et la résilience⁸.

La réduction de la vulnérabilité implique la diminution des enjeux exposés et vise de limiter l'exposition de biens futurs aux conséquences désastreuses de l'aléa (Anguis, 2015). Cette « mitigation » se traduit par la mise en œuvre de procédures visant l'atténuation des dommages associées à une crise sur un territoire défini. Par exemple, le développement des infrastructures et des axes routiers pour optimiser l'évacuation et assurer un retour à la normale plus rapide, la prise en compte des risques naturels dans les normes de construction appliquées sur le bâti et l'augmentation de la capacité de résistance physique des enjeux structurels face aux aléas à intensité élevée. La réduction de la vulnérabilité s'appuie également sur la sensibilisation de la population et la préparation des personnes à la crise en effectuant des exercices de simulation et en améliorant les systèmes d'alerte, afin de renforcer la capacité de la société à faire face aux événements catastrophiques, de limiter les dommages et de garantir une évacuation efficace.

Cette démarche axée sur l'atténuation de la vulnérabilité des enjeux constituant un territoire diffère de la logique de réduction de l'aléa qui se base sur l'application de politiques d'aménagement et de

⁷ La capacité de résistance représente la sensibilité physique de l'enjeu aux dommages provoqués par un aléa.

⁸ La résilience est la capacité d'un système, après une perturbation, de conserver son état d'équilibre correspondant à un état suffisamment éloigné de la crise pour permettre la reprise normale de l'activité du système (différent de l'état initial).

gestion orientées vers les ouvrages de protection (renforcement de dispositifs de protection face au multi-aléa, restauration et entretien du lit des cours d'eau...) (Anguis, 2005).

- Aléa :

Un aléa correspond à la probabilité d'occurrence d'un phénomène physique naturel, difficilement prévisible et contrôlable par l'homme sur un territoire défini (Mistre-Schaal, 2018). Il désigne tout événement naturel pouvant y avoir lieu et se caractérise par : une occurrence, une nature, une intensité, une étendue spatiale (expansion spatiale), une fréquence et une durée.

En occurrence, notre territoire d'étude est soumis à plusieurs aléas en interaction permanente, à savoir : l'aléa de mouvements de terrains (effondrements karstiques liés aux cavités souterraines), l'aléa associé aux ruptures de digues et l'aléa inondation qui résulte dans la plupart du temps des effets domino⁹ déclenchés par le précédent aléa (Touili, 2016).

Partie II : Enjeux et représentation des gouffres

- a) Enjeux en général
- b) Fiche de représentation
- c) Etude de Scénarii Sigloy

⁹ Effets domino désigne une séquence d'évènement interdépendants progressant par cause à effet. Ce terme est souvent associé aux « effets en cascades » ou « évènements en cascades » (Touili, 2016).

Partie III : Proposition d'une cartographie multi aléa du Val d'Orléans et vulnérabilités urbaines

a) Aléas du Val d'Orléans

■ Aléa inondation

Qu'est-ce qu'une inondation ?

L'inondation est un phénomène rapide ou lent qui se traduit par la submersion d'une zone habituellement hors d'eau. Elle résulte de la sortie de l'eau de son lit d'écoulement habituel générée par l'augmentation du débit d'un cours d'eau. Cette amplification du débit est due à des processus divers et variés : le ruissellement des eaux pluviales issues des averses violentes et leur concentration dans le cours d'eau générant ainsi des crues torrentielles, la remontée de la nappe phréatique provoquant la saturation du sol et l'affleurement de la nappe.

Il existe ainsi plusieurs types d'inondation. On note à titre d'illustration : le débordement d'un cours d'eau, la submersion marine, la remontée de la nappe phréatique...

Selon l'Atlas des Zones Inondables du site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Prim.net, l'intensité d'aléa d'inondation est définie en fonction de la hauteur d'eau submergeant une zone et la durée de submersion. Le tableau suivant présente les différents niveaux d'aléa d'inondation.

Hauteur/Durée de submersion	<0,5 mètres (m)	Entre 0,5m et 1m	Entre 1m et 1,5m	>1,5m
Inférieure à 48heures	Faible	Faible si $v < 1,5\text{m/s}$ Moyen si $v > 1,5\text{m/s}$	Moyen	Fort
Entre 2 et 8 jours	Faible	Moyen	Moyen si $v < 0,5\text{m/s}$ Fort si $v > 1,5\text{m/s}$	Fort si $v < 1,5\text{m/s}$ Très Fort si $v > 1,5\text{m/s}$
Entre 8 et 15 jours	Faible si $v < 1,5\text{m/s}$ Moyen si $v > 1,5\text{m/s}$	Moyen	Fort	Très Fort
Supérieure à 15 jours	Moyen	Moyen si $v < 0,5\text{m/s}$ Fort si $v > 0,5\text{m/s}$	Fort si $v < 1,5\text{m/s}$ Très Fort si $v > 1,5\text{m/s}$	Très Fort

Le scénario de référence :

En ce qui concerne l'aléa d'inondation, le scénario de référence retenu correspond aux Plus Hautes Eaux Connues (PHEC). Ce scénario correspond à la crue historique cinq centennale qui a eu lieu en 1856. Ce choix a été effectué afin de se projeter dans une situation critique en vue d'optimiser ainsi la démarche d'évacuation et de garantir de bons résultats en cas de survenue d'une crue dont l'intensité est moins élevée. Il est important de signaler qu'il n'est en aucun cas garanti que le niveau d'eau ne dépasse pas celui enregistré aux PHEC.

○ L'aléa inondation dans le Val d'Orléans :

Le Val d'Orléans a été victime à travers l'histoire d'intenses crues dévastatrices (décrites précédemment) occasionnant d'importantes inondations désastreuses endommageant tout type d'enjeu que comprend le territoire. La carte (Figure i) correspond à la modélisation des aléas de références enregistrés lors des crues historiques ayant lieu à la moitié du 19^{ème} siècle et représente la hauteur de submersion croisée avec la vitesse de développement de ce phénomène. Elle indique bel

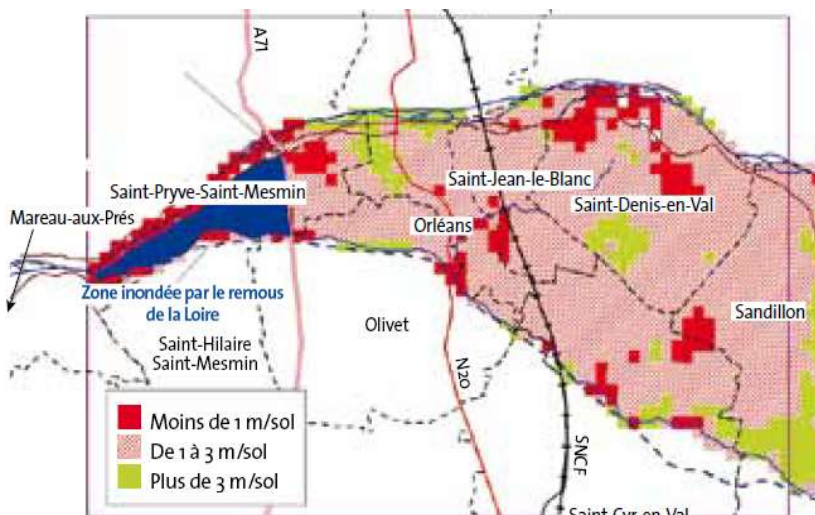


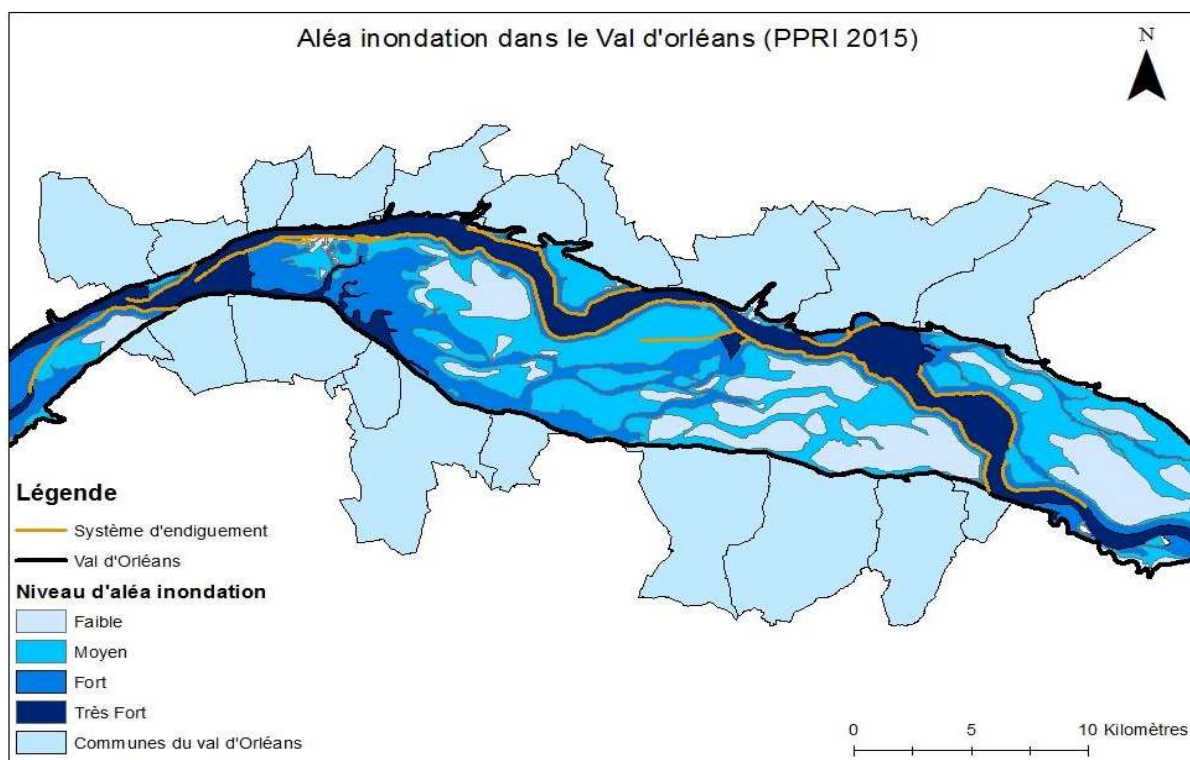
Figure i: Différence du niveau de la nappe par rapport au sol selon les territoires de la zone urbanisée située entre la Loire et le Loiret

et bien que le Val d'Orléans est fortement touché par l'aléa inondation, particulièrement à l'amont.

À ces inondations de surface, s'ajoutent les possibilités d'inondation par remontée de la nappe par laquelle le Val d'Orléans est également susceptible d'être touché. En effet, les infiltrations des eaux issues des pertes de la Loire augmentent le débit d'eau stockée en profondeur, ralentissent par conséquent

l'écoulement de la nappe en période de hautes eaux et renforce la probabilité de la zone de subir une inondation, par surverse ou par rupture des digues.

Pour avoir une représentation visuelle des différentes zones inondables du Val d'Orléans, nous avons discrétisé l'aléa inondation en 4 niveaux, allant de faible à très fort. La carte suivante représente la variation de ces différents niveaux dans le Val d'Orléans.



Récemment, notre territoire d'étude a été marqué par une inondation d'origine karstique en fin Mai 2016 (Noury, 2017). En effet, le ruissellement des eaux provenant de pluies anormalement élevées et leur association aux eaux souterraines qui transitent à travers les conduits karstiques ont déclenché le mardi 31 Mai (Noury, 2017) une forte inondation endommageant notamment la ville de Gidy en scindant en deux les axes de communications entre le nord et le sud de la ville et mettant en danger plus de 400 des 700 bâtiments que compte cette commune. Ces intempéries accouplées par la forte charge hydraulique stockée au sein du réseau karstique favorisent la présence d'aléa inondation et amplifient l'apparition d'effondrements de sol.

Sur la commune de Gidy, 90% des effondrements ont fait leur apparition dans la zone inondée, dont certaines n'étaient pas d'origine anthropique, menaçant les habitations et d'autres enjeux. Sur la zone de Chécy, 24 fontis sont survenus dont la majorité dans les zones inondées avec un taux moyen d'effondrement s'élevant de 0,02-0,03 à 470 effondrements de cavités / km² / an sur la période de 10 jours qui a suivi l'inondation. Soit une accélération par 15 000 à 23 000 (Noury, 2017).

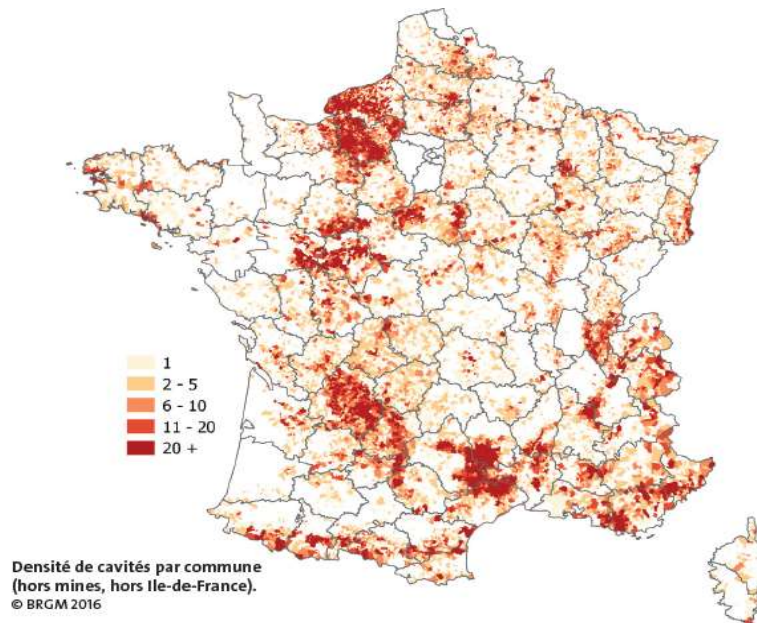
▪ L'aléa mouvements de terrain :

Selon le site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, les mouvements de terrain concernent l'ensemble des déplacements du sol ou du sous-sol, naturels ou anthropiques. On distingue plusieurs phénomènes caractérisant cet aléa géologique, à savoir :

- Le retrait-gonflement des argiles : Le fonctionnement de ce phénomène se traduit par la génération de gonflements pendant des périodes humides et des tassements pendant des périodes sèches, due aux variations de la quantité d'eau présente dans certains terrains argileux.
- Les glissements de terrain : Évènement ayant lieu généralement au niveau des sols saturées en eau causant le déplacement de terrain le long d'une pente.
- Les effondrements de cavités souterraines : Principal phénomène d'étude de ce rapport ; les cavités souterraines sous l'action de processus divers et variés subissent des effondrements au niveau de leur toit, provoquant en surface une dépression de différentes formes.

Afin de bien comprendre l'aléa d'effondrement karstique des cavités souterraines, l'origine de ce phénomène, son fonctionnement, les différents processus qui interviennent pour le favoriser ainsi que ses conséquences néfastes répertoriés sur les territoires touchés seront étudiés.

Les cavités souterraines



La France compte aujourd'hui près de 500 000 cavités souterraines (BRGM, 2014), le Val d'Orléans, quant à lui, en possède 915 (Noury, Serrhini, 2019), l'équivalent d'un peu plus de 70/km² (Noury, 2017).

Ces cavités sont présentes dans le sous-sol et peuvent être anthropiques ou naturelles. En effet, les ouvrages civils de forage, les caves, les minières, les structures associées aux carrières représentent des sources de

génération des cavités anthropiques.

Tandis que les cavités naturelles, particulièrement présentes dans le Val d'Orléans, résultent principalement de l'érosion du sol. Ces cavités sont en général recensées dans les régions calcaires – anciens lieux de dépôts sédimentaires-. Ce matériau se dissout donc dans l'eau, au travers d'un réseau karstique et forment des cavités.

Qu'est-ce qu'un karst ?

La karstification est le phénomène qui consiste à la dissolution du calcaire par des circulations d'eaux souterraines afin de produire ce que l'on appelle le karst (Mathon, 2010). D'origine slovène et emprunté du nom donné à un plateau calcaire du Nord-Ouest de la Yougoslavie (Gill,), le karst désigne un relief façonné par l'eau dans les roches carbonatées (Figure h). Il est donc également un aquifère puisque l'eau souterraine est totalement impliquée dans sa formation et dans son fonctionnement. Ainsi, le karst est constitué par un ensemble de formes souterraines et de surface et de conditions d'écoulements souterrains qui interagissent les unes sur les autres (gouffres, surfaces de drainage, de circulations souterraines, de résurgence...).

Les zones karstiques intéressent environ 50 % du territoire français et représentent près de 15 % des affleurements rocheux de la planète. Elles accueillent 1,5 milliard d'habitants. On distingue principalement 2 types de terrains karstiques :

- Calcaire couvert par une couche d'un autre matériau.
- Terrain nu avec la présence en surface de la roche calcaire particulièrement dur et des sables issus de l'altération.

La karstification s'appuie sur deux concepts fondamentaux ; la notion d'énergie – en quelque sorte, le carburant qui fait fonctionner la karstification (énergie hydrodynamique, énergie chimique et énergie mécanique), et les conditions du milieu – le cadre dans lequel se réalise cette karstification (calcaire, discontinuités de la roche et la continuité de l'aquifère). (Rodet, 2002).

Ainsi, pour que se produise la karstification, outre l'écoulement de l'eau à l'intérieur de la roche, il faut qu'ait lieu la dissolution de la roche dans l'eau à l'aide d'un acide résultant de la dissolution du dioxyde de carbone (CO₂) produit par la végétation dans les sols. Cet acide accélère la dissolution qui se produit selon l'équation suivante.

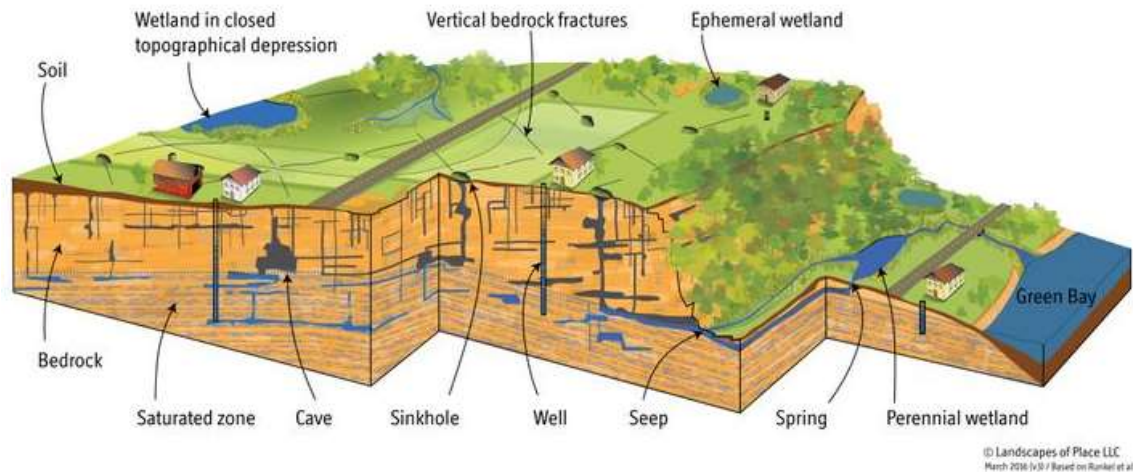


Figure j: Modèle d'un relief karstique

La karstification génère la création de petits vides qui se lient entre eux pour créer des conduits karstiques s'organisant en un réseau karstique hiérarchisé de l'amont (les points d'infiltration d'eau dans la roche) vers l'aval (la source). Cette organisation karstique (réseau de drainage) constitué d'une interconnexion hydraulique d'axes de drainage se fait à la manière de celle des fleuves et des rivières, en fonction de la pente générale et de la résistance opposée par la roche (perméabilité) ; elle peut être plus ou moins linéaire et simple, ou très complexe (Gottemberg,...)

Le Val d'Orléans doté d'un substratum caractérisé par la formation du calcaire de Beauce connaît sous l'effet des eaux acides de la Loire la formation d'un réseau karstique particulièrement développé. Avec l'évolution des cavités, ce système karstique témoigne divers désordres karstiques, à savoir les dolines, les bîmes, les fontis...

Les phénomènes associés aux cavités souterraines et leurs conséquences :

Avec le temps, du fait de la fragilité du sol ou à défaut de leur entretien, les cavités souterraines subissent une dégradation continue dès leur création. Outre les facteurs internes de la cavité (nature du matériau, discontinuités), l'eau représente un facteur externe principal dans le déclenchement ou l'aggravation de l'altération des cavités (BRGM, 2014). En effet, sous l'action de l'eau, un soutirage¹⁰ progressif de matériau comblant les cavités va se faire au fond du réseau karstique, drainant ainsi ces alluvions de recouvrement par la cavité karstique située dans le calcaire sous-jacent et créant des vides. Les effondrements peuvent également avoir lieu sans l'intervention de l'eau : la gravité peut

¹⁰ Fait d'extraire des sédiments au moyen d'eau

causer des altérations au niveau des cavités initiées par les conditions hydro climatiques (Gombert, 2014).

Cette déstabilisation peut se présenter sous plusieurs formes :

- **Les affaissements :**

Cette altération consiste en une déformation souple et progressive de la surface du sol qui se traduit en une dépression en forme de cuvette. Ce désordre a lieu souvent sur des constructions et provoque peu de victimes physiques du fait du développement lent du phénomène (Géorisques,2017). L'illustration schématique ci-dessous présente le processus d'un affaissement.

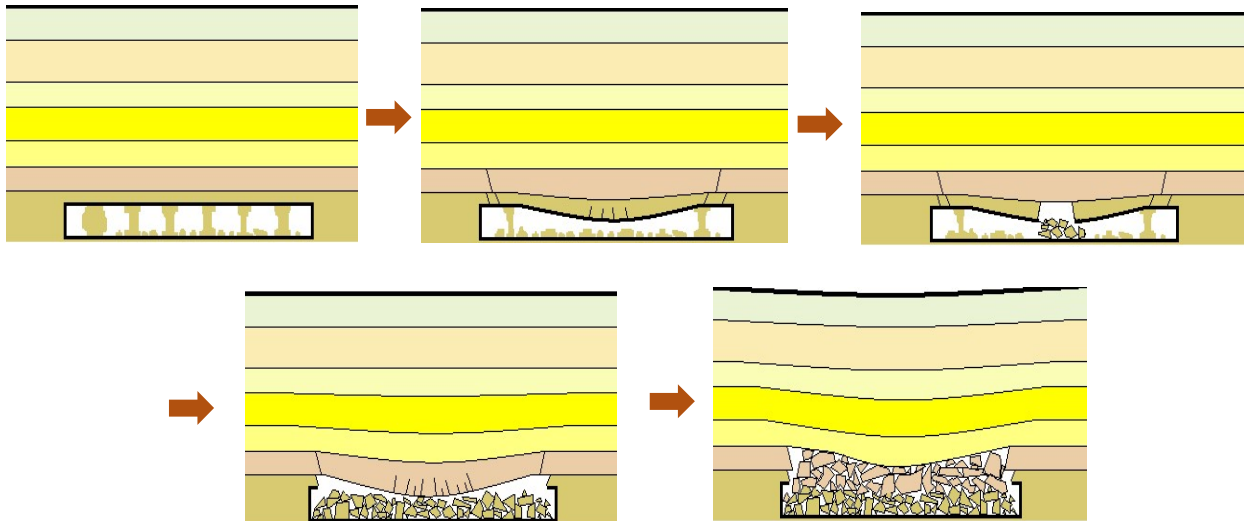


Figure k: Processus d'un affaissement karstique

- **Les effondrements localisés**

Il s'agit d'une apparition brusque en surface d'un désordre doté d'un diamètre en surface pouvant atteindre plusieurs mètres. Ce phénomène est brutal même si parfois il prépare pendant des années, par une remontée progressive du vide vers la surface. Les désordres consécutifs à ce phénomène sont les suivants :

La remontée de cloche de fontis :

Cette forme d'effondrement localisé correspond à un effondrement brutal sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère (Géorisques,2017). Le toit de la cavité subit donc une rupture favorisant l'érosion du sol en esquissant la forme d'une cloche qui remonte progressivement vers la surface et provoque un effondrement brutal en surface.



Figure l: Exemple de fontis de différents diamètres

La création d'un fontis est expliquée schématiquement dans la figure ci-dessous :

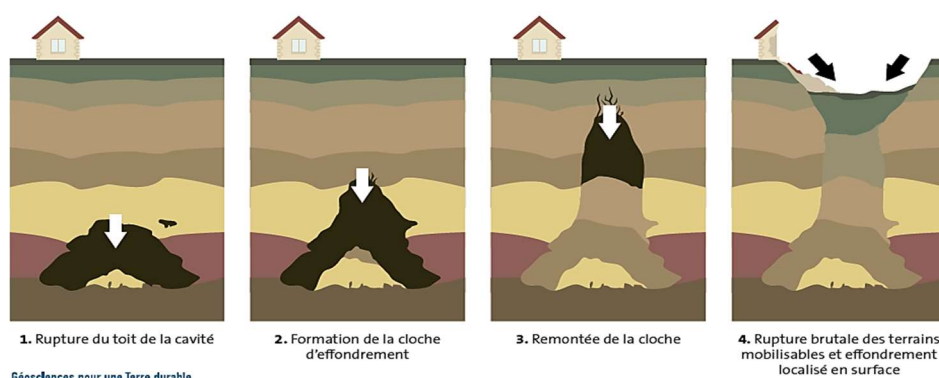


Figure m: Génération d'un fontis à l'issue d'un effondrement localisé



Figure 14: Visite d'un fontis sur un champ agricole de Darvoy- Noury, 2019

Le débouillage :

Ce phénomène correspond à l'entraînement gravitaire de matériau de comblement des cavités souterraines, provoqué la plupart du temps par des circulations d'eau massive (Géorisques, 2017).

La forte charge hydraulique en profondeur favorise le soutirage de matériau de la cavité provoquant la création de vide en surface, généralement d'assez petite dimension.

C'est le désordre à risque qui touche le plus les réseaux naturels dans les régions calcaires.

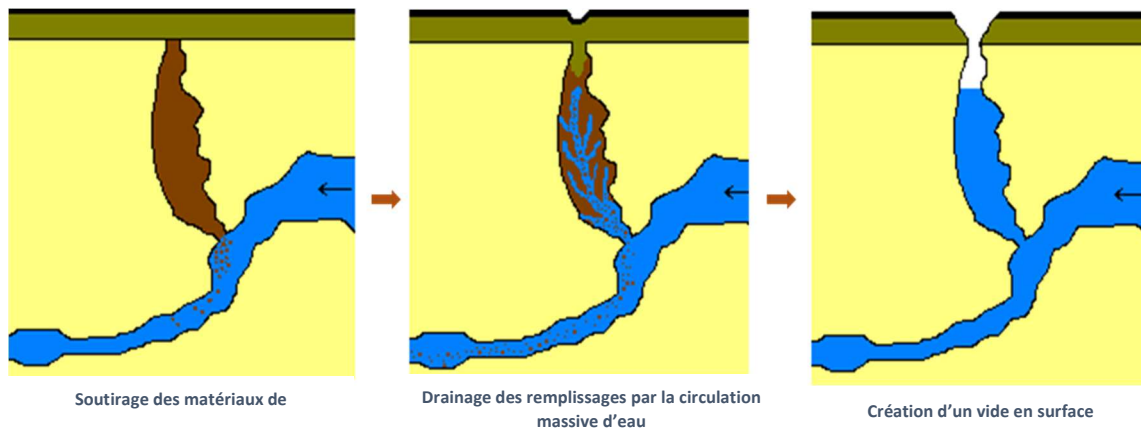


Figure o: Processus de débouillage

La suffosion :

Ce phénomène se résume en l'entraînement des particules selon leur granulométrie (d'abord assez fines puis les particules épaisses) dans la masse du sol en raison de circulations rapides d'eau en profondeur. Le terrain soumis à ce phénomène se grignote progressivement, créant ainsi de véritables boyaux. A mesure que l'érosion se poursuit, la taille des vides s'amplifie aboutissant éventuellement – lorsque les vides deviennent grands- à des effondrements brutaux de terrain. Le processus est expliqué ci-dessous :



Figure p: Effondrement de terrain par suffosion

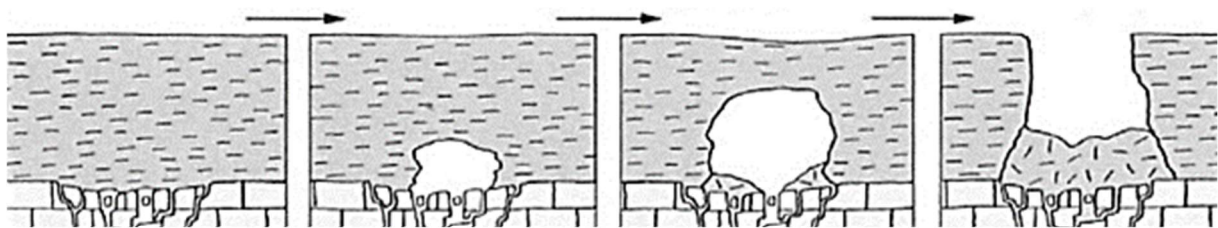


Figure q: Processus de l'effondrement par suffosion

- Les effondrements généralisés :

Cette altération concerne particulièrement les cavités anthropiques et consiste à un fort abaissement brutal et spontané de la surface sur des profondeurs allant de plusieurs hectares à quelques mètres.

Initié par la rupture du toit de la cavité et son effet cascade sur les couches au-dessus, l'effondrement est grandement brutal faisant écrouler la surface violemment en masse.

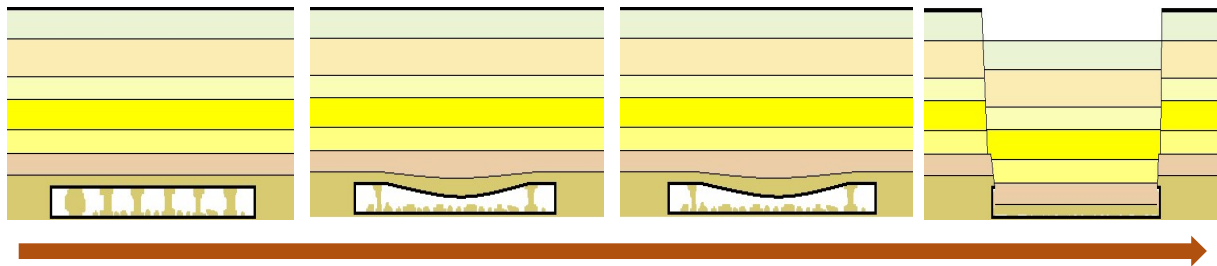


Figure r: processus de l'effondrement généralisé

- Les gouffres :

Il s'agit des conséquences provenant d'effondrements de cavités qui ont déjà subi un effondrement auparavant. En effet, une fois la cavité s'effondre, elle fait l'objet de remplissage par de matériaux afin de couvrir les ouvertures apparues dans la surface du sol et rendre la gouffre inactive. En désactivant uniquement le gouffre sans supprimer le conduit karstique, es vides récemment remplies sont susceptibles de reformer un effondrement de terrain. En cas de forte pluie ou inondation provoquant une saturation du sol en eau, un soutirage de matériau pourra s'opérer, réactiver le gouffre et donner lieu à un effondrement. L'illustration ci-dessous décrit la reformation d'un gouffre :

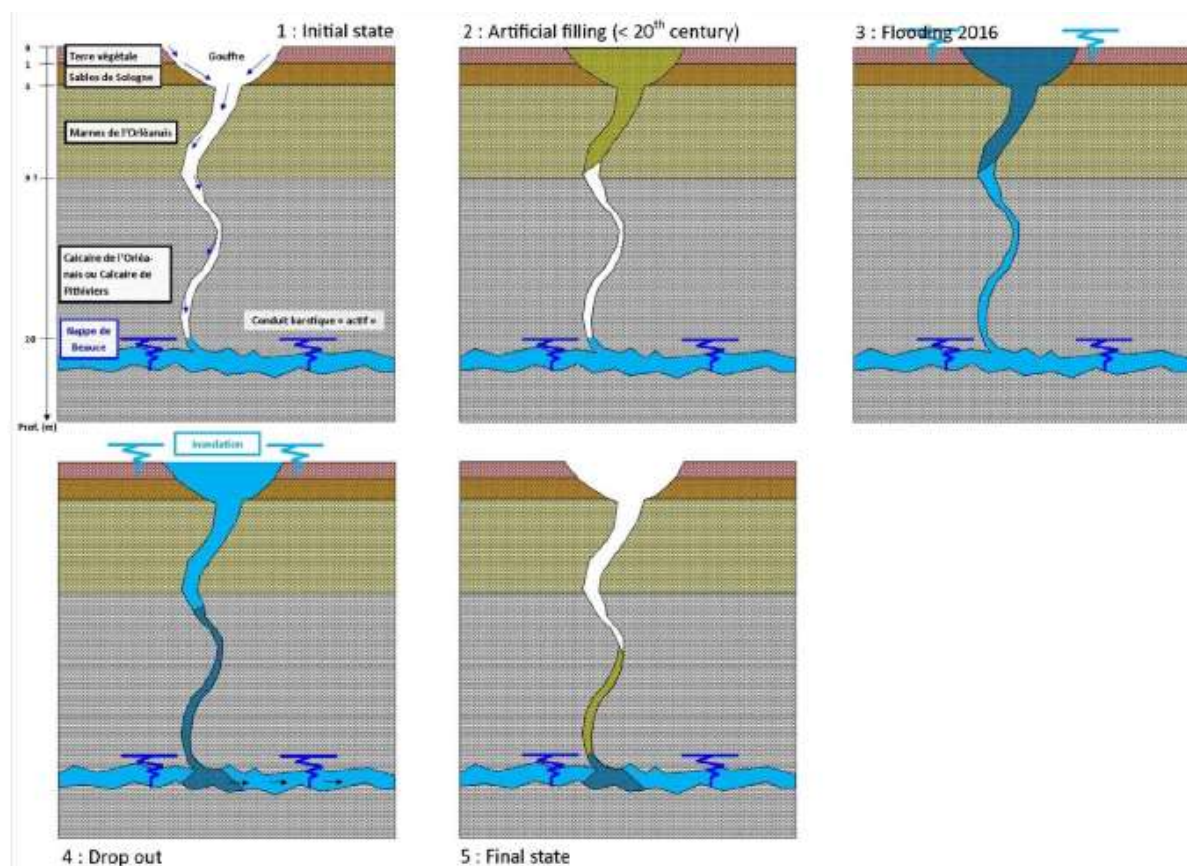


Figure s: Processus de reformation d'un gouffre

○ L'aléa karstique dans le Val d'Orléans

Le Val d'Orléans est considéré comme la zone répertoriant le plus de désordres karstiques au sein de l'Orléanais. Grâce à la base de données du BRGM et de Géorisques, nous avons pu cartographier la répartition des cavités souterraines (CV) et des mouvements de terrain (MVT) présents dans le Val d'Orléans.

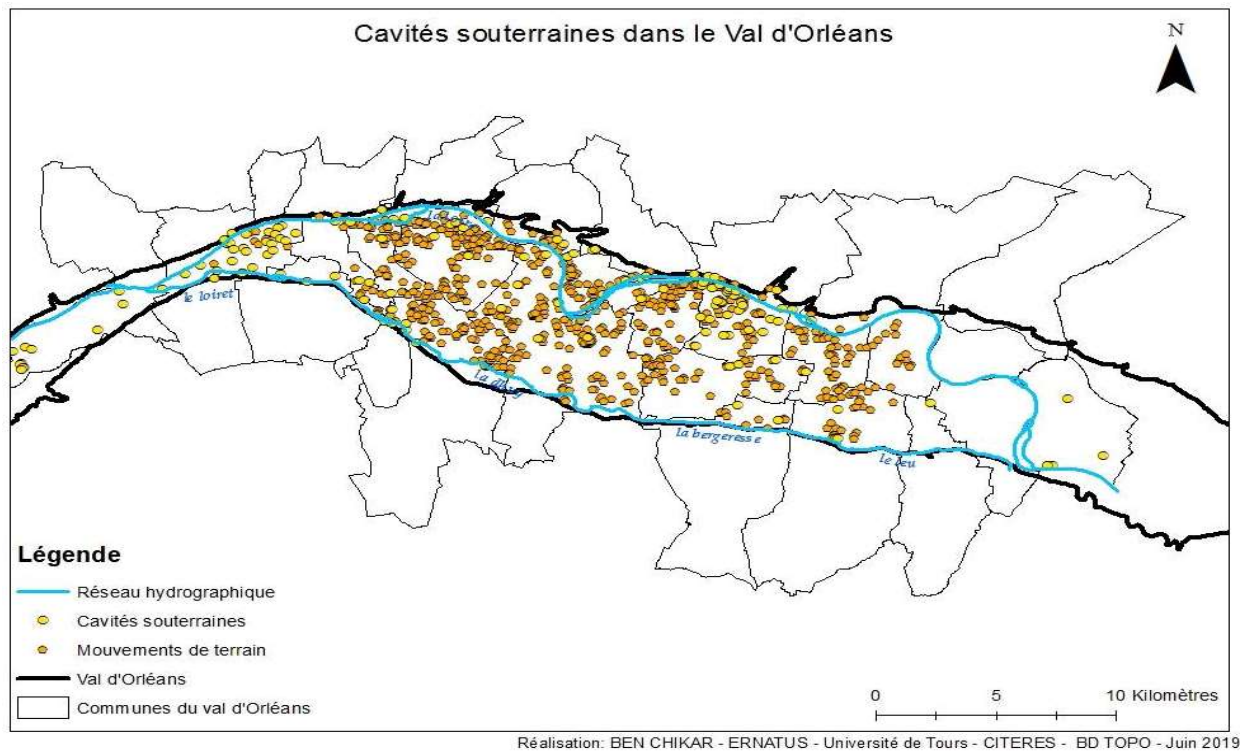


Figure t: Répartition des cavités dans le Val d'Orléans

Selon les études récemment établies à ce sujet, environ 600 instabilités sur 170km² de la zone ont été recensées (Noury, 2017). En moyenne, le val connaît 3 à 4 désordres par an.



Figure u: Carte localisant les fontis apparus dans le Val d'Orléans sur la période 2010-2015

Le Val d'Orléans concentrait 436 événements (Mathon, 2014) dont la répartition confirme l'influence de certains paramètres sur leur survenue. En effet, la proximité de la Loire représente un critère amplifiant l'apparition des désordres karstiques, ce qui signifie que l'aléa karstique est grandement élevé dans la zone tampon de la Loire. La carte ci-dessous représente la forte concentration des cavités notamment à proximité des digues du Val en raison de l'importante présence de l'eau.

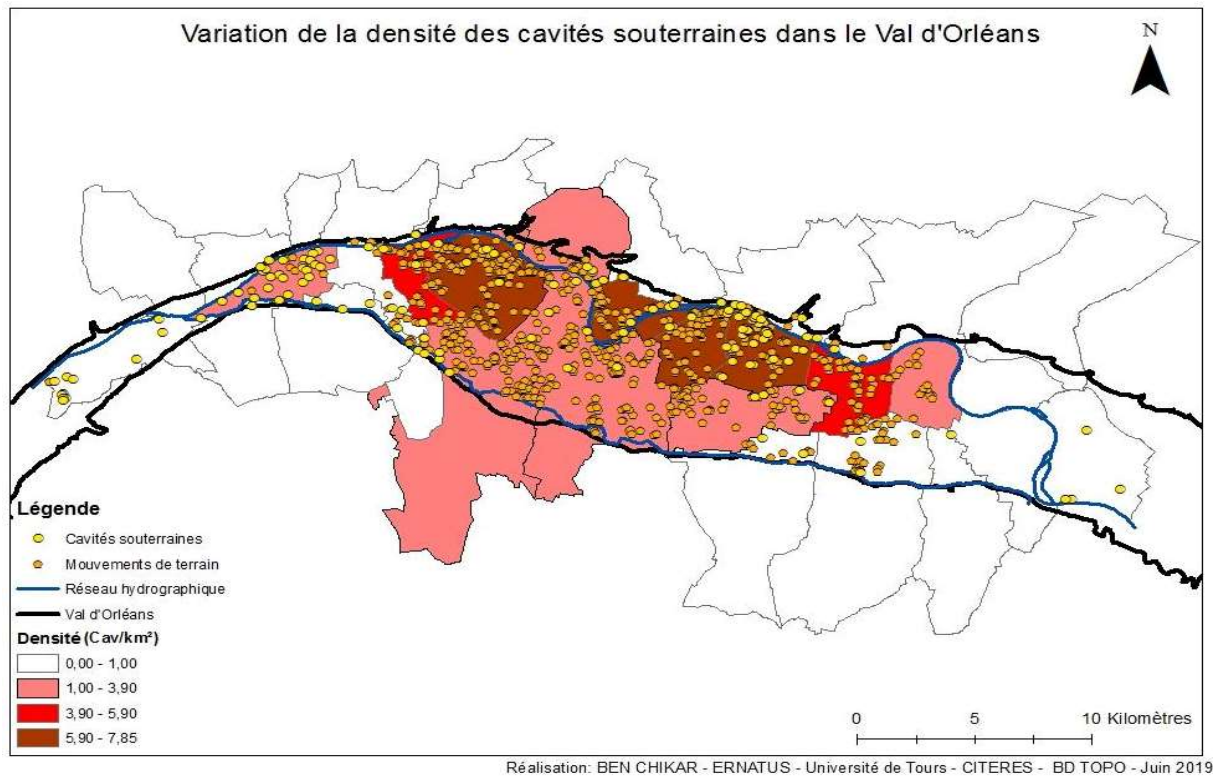
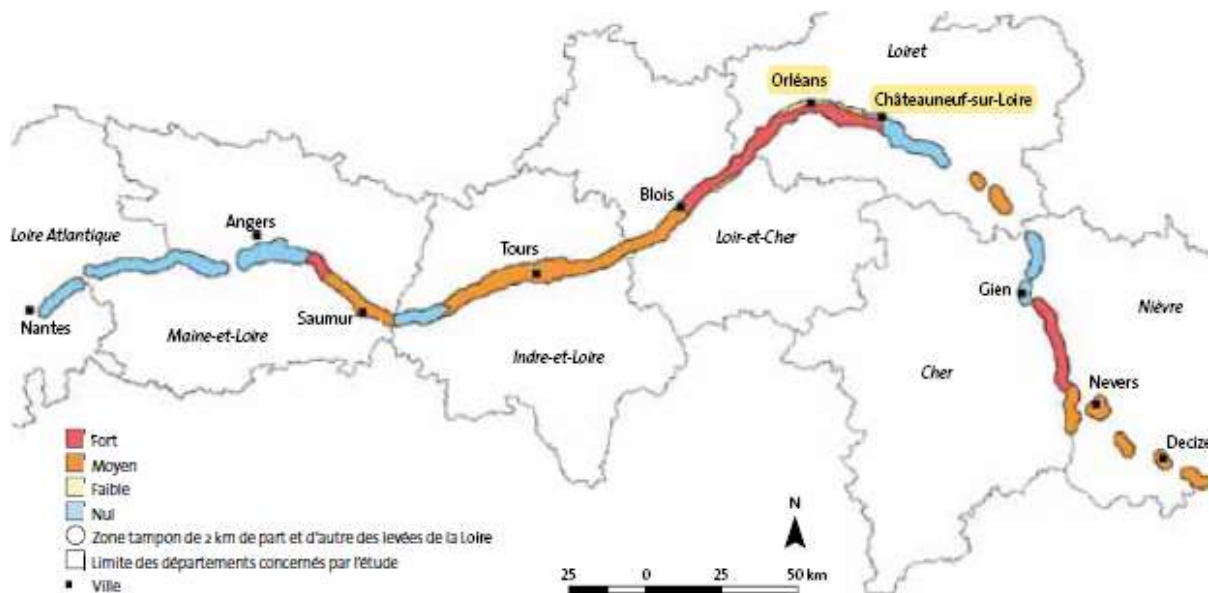


Figure v: Répartition des 915 cavités à proximité de la Loire

De plus, la concentration d'événements favorise la survenue de nouveaux désordres. En effet, les anciennes cavités augmentent la probabilité d'apparition de nouvelles cavités naturelles renforçant donc l'aléa karstique et la survenue des désordres karstiques (3/4 des événements karstiques répertoriés se situent à moins de 300m d'un autre événement) (Mathon 2010). Sur le site du val, on recense au total 915 mouvements terrains dont 153 sont des cavités souterraines (Serrhini, 2019). On retrouve donc au niveau de la levée d'Orléans, de nombreuses anomalies qui fragilisent l'ouvrage et pouvant à la longue entraîner la défaillance des digues. Les cavités donnant naissance à ces désordres sont fortement présentes à proximité du système d'endiguement en raison de l'importante

dissolution du calcaire dans ces zones. La carte suivante présente une hiérarchisation des tronçons de digues selon leurs niveaux de susceptibilité à la dissolution du substratum du Val d'Orléans (calcaire).



On observe que le niveau de susceptibilité aux événements karstiques du tronçon correspondant au Val d'Orléans est très élevé. Cela confirme la forte corrélation entre l'apparition des effondrements et la survenue des inondations, conséquence imminente de la rupture du système d'endiguement. Le Val d'Orléans est donc soumis à ce qu'on pourrait caractériser par un multi-aléa.

○ Multi-aléa :

Le terme multi-aléa renvoie aux différents aléas menaçant le même ensemble d'enjeux et fait référence également aux différents événements se produisant en même temps ou se déroulant l'un après l'autre, sous l'effet domino dans un territoire défini (Galina, 2016). Les aléas s'articulent entre eux via différentes relations et interactions (Touili, 2016). La typologie conventionnelle laisse entrevoir trois catégories d'interactions : des interactions de causalité (un aléa déclenche un ou plusieurs aléas), des interactions sous formes de rétroactions complexes (où un aléa amplifie ou réduit la probabilité d'occurrence d'autres aléas) et des interactions à travers les gestions des risques sur un même territoire.

En occurrence, on se focalisera sur les deux premiers types d'interactions. En effet, le Val d'Orléans est touché par l'aléa inondation et exposé également au phénomène d'effondrements karstiques. Étant donné le lien établi entre ces deux événements, nous pouvons déduire deux scénarios d'interaction :

- L'aléa inondation déclenche voir amplifie l'aléa karstique sous l'effet cascade :

Deux cas possibles sont à l'origine d'une inondation. La première est qu'à l'issue d'importants épisodes pluvieux ou de remontée de la nappe, le débit hydraulique de la Loire s'élève amenant ainsi à la formation d'une crue. La charge hydraulique exercée sur les ouvrages de protection s'amplifie jusqu'à la défaillance de ces digues, l'eau qui sort par cette ouverture exerce une pression et une augmentation du débit de celle-ci, causant une inondation de tout le val et une destruction importante. Par effet cascade, les eaux issues de ces inondations, s'infiltrent dans le sol, accélèrent les circulations

souterraines qui favorisent la survenue fréquente des désordres karstiques. L'autre cas résulte d'importantes précipitation sur une courte durée sans débordement de la Loire. Le sol déjà saturé en eau devient imperméable et favorise l'accumulation de l'eau en surface, favorisant une recrudescence des effondrements, l'exemple de l'inondation de 2016 sur le site de Chécy confirme ce scénario.

- L'aléa karstique amplifie l'aléa inondation :



Figure w: Effondrement karstique sur une digue (Gombert)

Dans le Val d'Orléans, les cavités souterraines sont fortement présentes à proximité de la Loire (Pus d'un tiers ; 375 sur 915 événements) (Serrhini, 2019). L'aléa karstique menace donc fortement les digues de la Loire et notamment la levée d'Orléans.

Aussitôt qu'un effondrement a lieu au niveau de l'ouvrage, une brèche est susceptible de s'ouvrir, fragilisant ainsi ce dispositif et provoquant sa défaillance. Cette rupture rend la digue obsolète qui, à certain temps ne pouvant plus remplir sa fonction, expose le val au danger de l'inondation. L'aléa karstique augmente donc la probabilité

d'occurrence de l'aléa inondation. La photo ci-contre illustre un effondrement survenu en crête de la digue de Jargeau en 2006.

Des effets (in)directs que chaque aléa entraîne sur l'autre (Touili, 2016), on peut synthétiser ce réseau d'interactions via le schéma suivant :

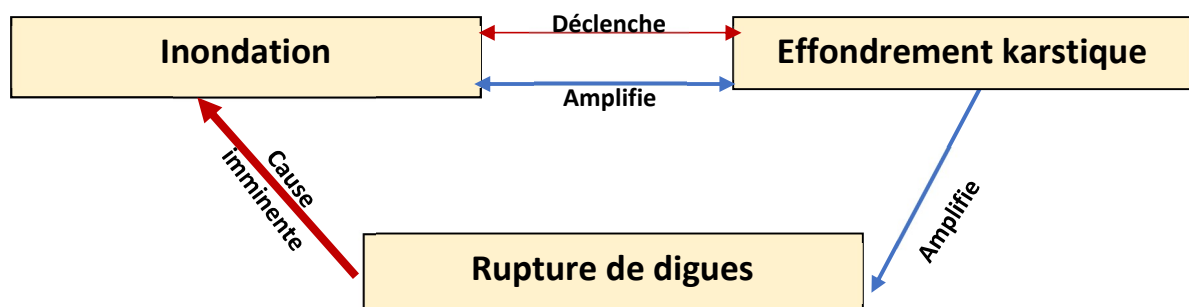


Figure x: Schéma synthétique des possibles interactions entre les aléas étudiés – Réalisation : BEN CHIKAR Mohamed

L'inondation est une conséquence imminente de la rupture de digues, car toute rupture de digue entraîne obligatoirement une inondation. La défaillance des ouvrages de protection est accélérée par les effondrements karstiques qui les endommagent structurellement. L'inondation amplifie la probabilité d'occurrence d'un effondrement karstique et peut parfois le déclencher et réciproquement.

En raison de la courte durée de ce stage, nous étudierons un seul scénario d'interaction pour aborder la notion du multi aléa. **Soit celui où l'inondation joue le rôle moteur dans la survenue des effondrements karstiques.**

○ Risque

Le risque désigne tout événement naturel susceptible d'infliger des dégâts aux différents enjeux que compte un territoire. Autrement dit, le risque correspond à l'éventualité d'occurrence d'un phénomène naturel ayant tendance à causer des dommages aux enjeux.

Le risque constitue donc le résultat de la superposition de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux sur un même lieu. En absence d'enjeux, le risque n'est plus présent. L'existence du danger est nécessaire pour pouvoir parler du risque. Il résulte de l'interaction de la société avec son environnement sur un espace (Touili, 2016).

La première définition du risque correspond au produit de la probabilité d'occurrence d'un processus physique et le degré de dommages subis par les enjeux. La définition officielle du risque est mise en exergue par l'illustration suivante qui montre la relation « additionnelle » généralement établie entre l'aléa, la vulnérabilité des enjeux, quel que soit la nature de l'aléa. Cette relation considère la vulnérabilité comme la susceptibilité des enjeux à subir des dommages due à leur exposition face à l'aléa, la vulnérabilité représente le degré d'exposition des enjeux face à l'aléa. (Reghezza, 2005)

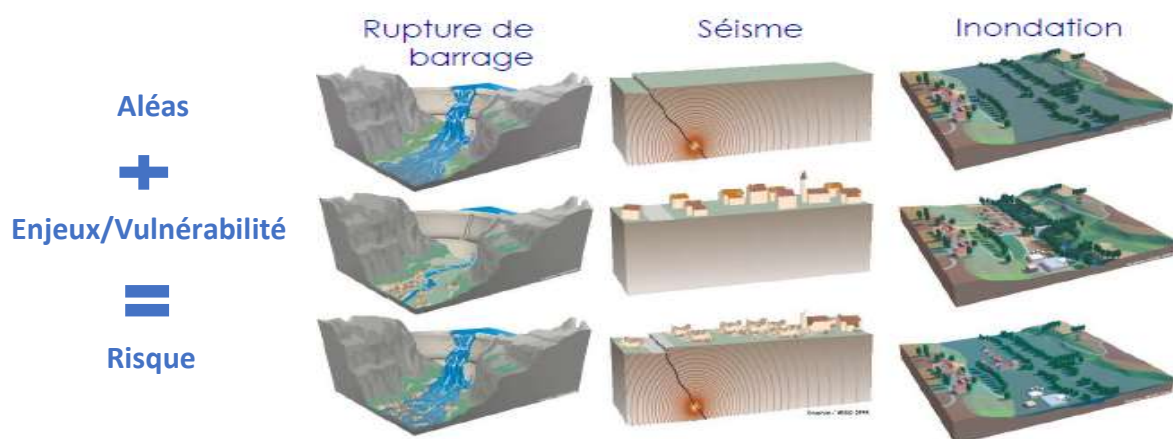


Figure y: Définition du risque (Source : l'aménagement du territoire et urbanisme/ Ministère de la sécurité publique du Québec)

○ Risque du multi- aléa ou multirisque ?

Notre territoire d'étude est soumis à deux aléas dévastateurs dont les conséquences sur les enjeux, comme les faits passés ont pu prouver, sont désastreuses. Le risque résultant de l'interaction entre les aléas et les enjeux menacés est donc présent sur notre site d'étude. On est confronté à une situation du risque du multi-aléa/ multirisque (Gallina, ...).

On appelle le risque du multi-aléa, tout risque global provenant d'une interaction/combinaison d'aléas. Autrement dit, la notion du risque du multi-aléa renvoie à la menace globale et aux dommages communs qu'un ensemble d'aléas peut engendrer à un territoire défini et particulièrement aux enjeux qu'il accueille. Cette approche analyse d'une façon combinatoire les aléas, les agrège, les regroupe en multi aléa et évalue la vulnérabilité du territoire face à ces menaces pour définir à la fin le risque provenant de cet ensemble aléa sur un territoire.

Tandis que le terme du multirisque fait référence à l'ensemble des risques produit par un nombre précis d'aléas sur un territoire. Le multirisque met l'accent sur les différents risques (économique, social, environnemental...) qu'une chaîne d'aléas peut provoquer. (Gallina,...). Cette approche est plus complexe que la précédente car elle prend en compte les différents aléas et les différents types de vulnérabilité pour chaque aléa.

Le schéma suivant explique la distinction entre ces deux notions :

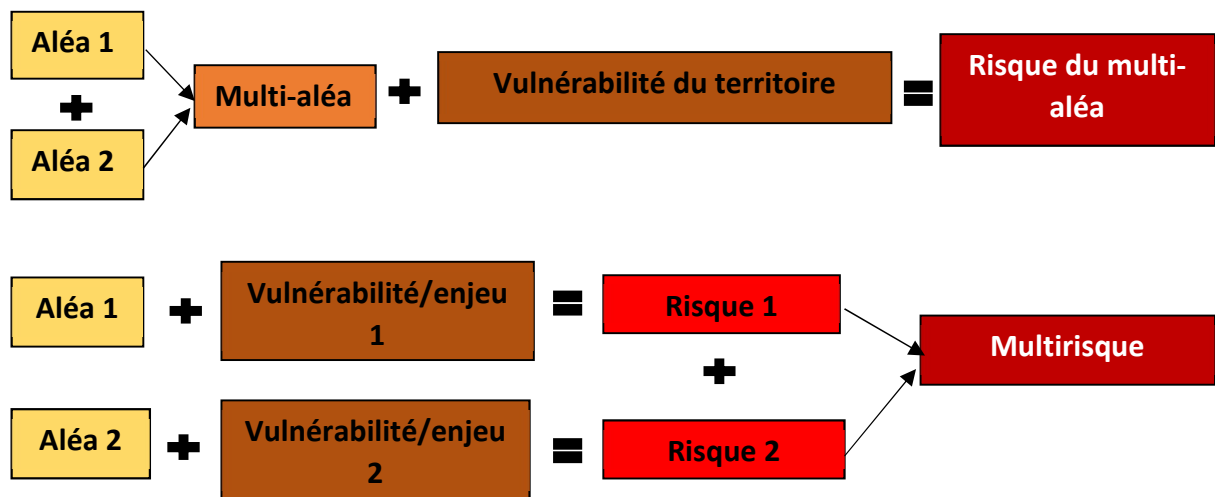
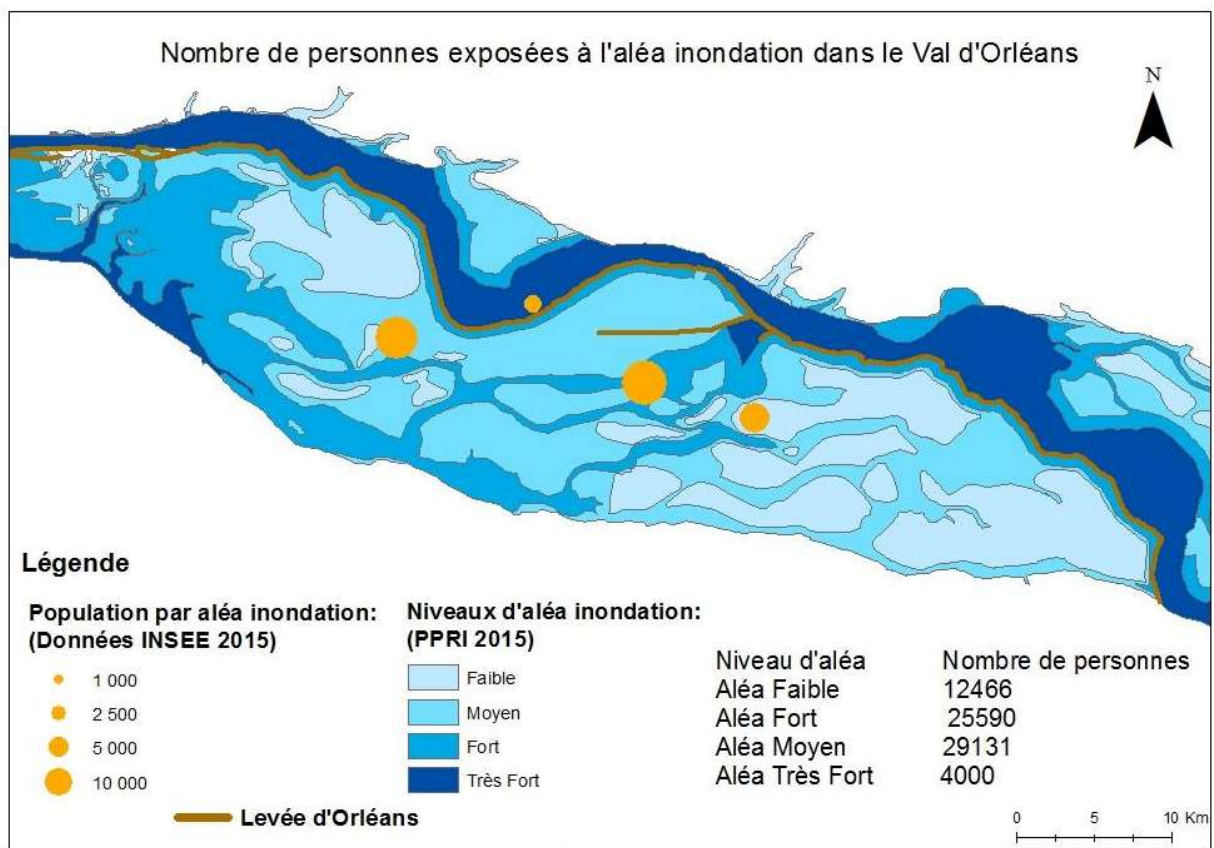
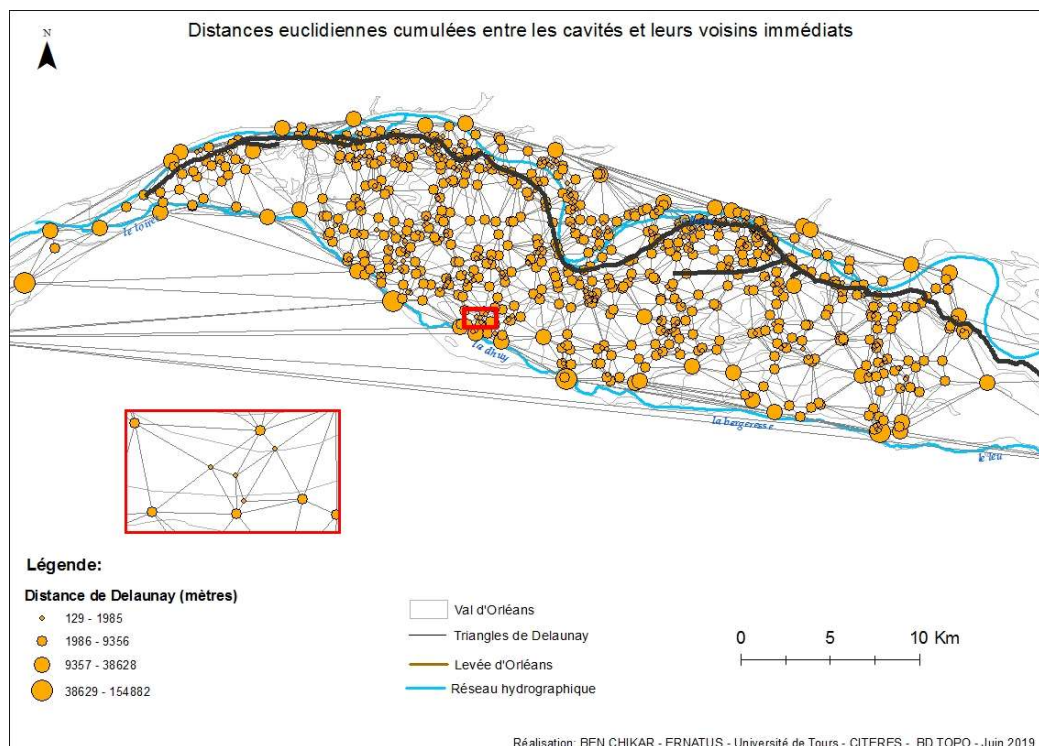


Figure z: Différence entre risque du multi-aléa et multirisque – Réalisation : BEN CHIKAR Mohamed

En vue d'obtenir de résultats fiables dans la démarche d'évacuation et d'étudier les effets du multi-aléa sur le territoire, il convient d'opter pour la première approche qui consiste à évaluer la vulnérabilité du territoire face au multi-aléa.

a) Td vulnérabilité de la population face aux multi aléa



IV. Evacuation

- a) Acteurs et réglementations
- b) Elaboration plan d'évacuation

- Les acteurs de la planification de la gestion des risques et de la gestion de crise :

- Cadre législatif de la gestion du risque

Selon l'article L.125-2 du code de l'environnement, « Le citoyen a un droit à l'information sur les risques majeurs auxquels il est soumis dans certaines zones du territoire et sur les mesures de sauvegarde qui le concerne ». Afin de respecter cette stipulation, la France définit, instaure et met en œuvre de nombreuses lois et règles inscrites dans une démarche de gestion du risque dans le but de faire prendre conscience la population du danger du risque auquel elle est exposée, ainsi que l'importance de l'évacuation et dans le but de minimiser les dommages lors d'une crise.

L'information préventive est mise en place par le décret du 11 Octobre 1990. Le préfet recense les risques et les mesures de sauvegarde dans un dossier synthétique qui est le Dossier Départemental sur les Risques Majeurs qu'il fait suivre au Mairie. Ce dernier élabore un document d'information, appelé le Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (Dicrim) dans lequel les détails concernant les différents risques sont expliqués, ainsi que les préconisations à suivre en cas de survenue d'une crise.

La prévention est une discipline qui relève de l'aménagement du territoire et est instrumentée par la succession de plusieurs dispositions législatives. Parmi les lois préventives, il en ressort :

- Loi n°95-101 du 2 Février 1995, dite **loi Barnier**. Cette loi relève du renforcement de la protection de l'environnement et concerne particulièrement les risques relatifs aux cavités et aux inondations. La loi Barnier a généré la création d'un nouvel outil, dit Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR). Ce dispositif remplace les documents antérieurs (Plans d'exposition aux risques, Plans de surface submersibles...). Le PPR précise des mesures de prévention collective pour la protection et le secours des populations et est annexé au PLU.
- Loi n°2003-699 du 30 Juillet 2003, **Loi Bachelot**, relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. Cette loi instaure l'information de la population par le maire notamment dans les communes à plan de prévention des risques naturels prévisibles et renforce les dispositions antérieures.
- Loi n°2004-811 du 31 Août 2004, appelée **loi de modernisation de la sécurité civile**. Elle impose la création des Plans Communaux de Sauvegarde. Ce document prépare préventivement les acteurs de la gestion de risque et définit le fonctionnement général d'une intervention préventive à l'échelle d'une commune.
- Acteurs impliqués dans la gestion de crise à l'échelle de la France :
 - À l'échelle nationale

La direction politique et stratégique d'une crise à l'échelle de la France relève du Président de la République et du premier Ministre qui sont appuyés par plusieurs cellules et structures afin de mener à bien le pilotage stratégique des crises et d'assurer les conditions adaptées pour la prévention. En effet, l'Etat joue un rôle fondamental dans la prévention des risques naturels. Outre son rôle de mise en place de dispositions législatives rappelant les prérogatives nécessaires à la prévention des risques naturels (GEORISQUES et TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2017b), l'Etat finance les institutions publiques afin de réaliser des études sur le territoire et répondre aux problématiques générales et locales.

L'Etat gère également un outil de prévention de grande ampleur, le PPR (Plan de Prévention des Risques). Afin de réduire la vulnérabilité des biens et des personnes, ce dispositif a été instauré dans la loi le 2 février 1995 et représente un des principaux leviers d'action de l'Etat. Il est défini par les articles L562-1 du Code de l'environnement et contient des cartes de zonages réglementaires dans une optique de réglementation de la construction des zones en fonction d'un aléa.

Ce document prend en compte l'ensemble des risques et est susceptible de rendre obligatoire la prise en compte de certaines mesures générales de prévention de protection et de sauvegarde (GEORISQUES et TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2017b).

Le Val d'Orléans est actuellement soumis au PPR d'inondation, cependant, en dépit du risque karstique présente sur le site, aucun PPR karstique n'existe pour le moment faute d'un zonage inexistant.

- À l'échelle départementale

Le Préfet de la zone seconde l'Etat dans la mise en œuvre des mesures de protection et d'information à l'échelle départementale. Selon l'article R125-11 du code de l'environnement, Il est missionné d'appliquer le DDRM (Dossier Départemental sur les Risques Majeurs) qui est un document dans lequel le préfet consigne toutes les informations relatives aux risques majeurs naturels ou technologiques de son département.

En ce qui concerne le département du Loiret, le DDRM (avril 2018) traite succinctement des mouvements de terrains, mais demeure imprécis sur la zone de l'aléa et met en accent sur la forte vulnérabilité du Val d'Orléans.

« La principale zone située au-dessus de cavités souterraines naturelles se superpose en grande partie à la zone inondable du Val d'Orléans, entre Saint-Benoît-sur-Loire et La Chapelle-Saint-Mesmin » -DCRIM du Loiret1.

- À l'échelle communale

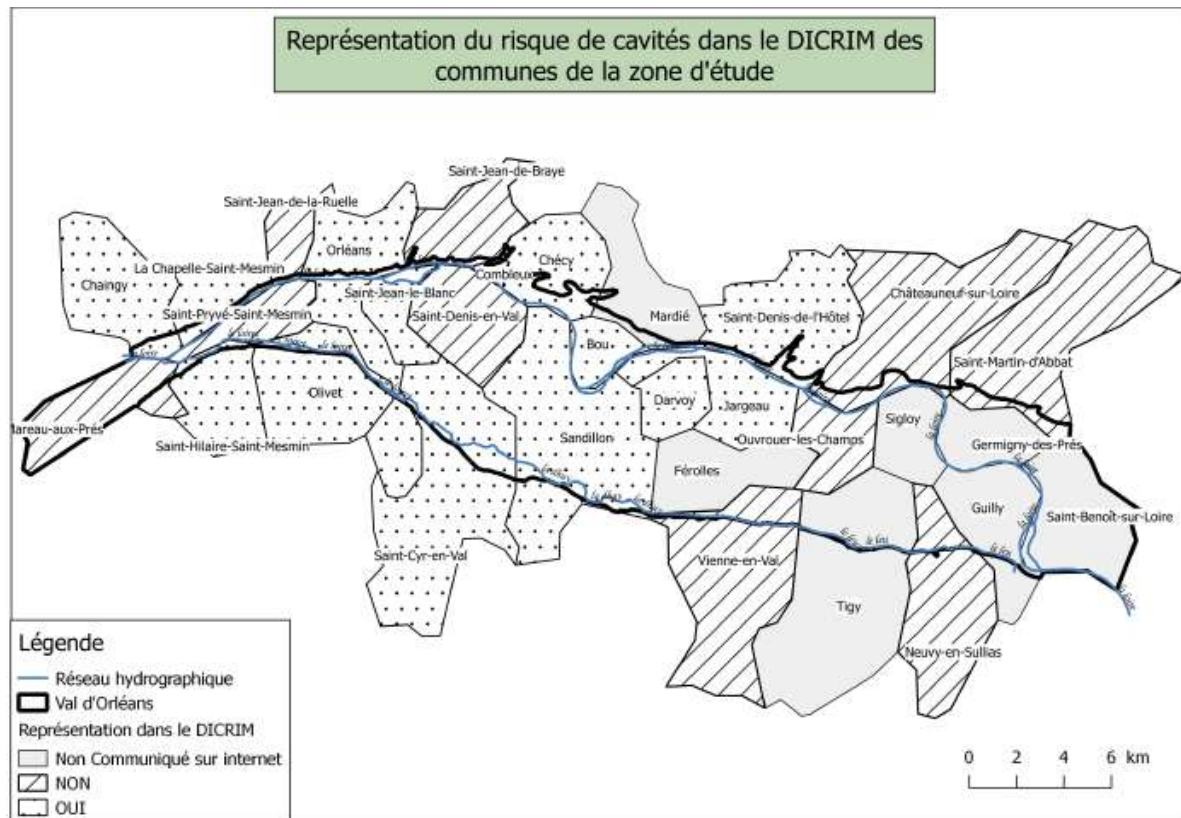
Dernier maillon de la chaîne de gestion de crise, les communes, sous l'autorité du maire, sont chargées d'apporter une réponse de proximité à la crise en complément et cohérence avec les opérations menées par le Préfet. À l'aide de ses services, le maire exerce son pouvoir de police dans le cas d'événements de sécurité civile.

Le maire d'une commune - principale entité publique engagée à agir en cas d'évènement majeur - reçoit l'alerte provenant du Préfet, la traite, et fixe les modalités de sa diffusion ainsi que celles des consignes de sécurité. Il doit aussi organiser et diriger les mesures de secours et d'évacuation sous sa responsabilité.

La communication permanente et la fine collaboration entre le Préfet et le maire représente la clé du bon fonctionnement des mesures de protection et permet le transfert fluide des consignes départementales et leur application efficace à l'échelle de la commune.

Le maire est donc responsable de la prévention et de l'information du public sur les risques majeurs auxquels sa population peut être exposée et doit se référer au DDRM pour identifier la vulnérabilité du territoire. Le maire doit établir, en cas d'exposition de sa commune à des aléas, un DICRIM (Dossier d'information communal sur les risques majeurs) afin de communiquer sur les risques majeurs. Ce document doit intégrer des informations sur les mesures impliquant la population, doit être accessible et doit comprendre tous les détails des aléas (description des phénomènes, les conséquences et mesures de prévention).

Les communes de notre site d'étude se positionnent différemment en matière de prise en compte de l'aléa karstique dans leur DICRIM respectif.



Réalisation : Antoine You - BRGM - Université de Tours - Données : DICRIM - 2018

Figure aa: Prise en compte du risque karstique dans le DICRIM des communes du Val d'Orléans

De cette carte, on peut déduire les résultats suivants :

- La commune de Saint-Martin-d'Abbat est la seule commune ne prenant pas en compte l'aléa karstique étant donné qu'elle ne possède pas de cavités naturelles.
- 42% des communes (11) possèdent un Dicrim et représentent le risque lié aux cavités.
- 29% des communes (9) possèdent un Dicrim et ne représentent pas le risque lié aux cavités.
- 23% des communes (7) possèdent un Dicrim mais ne le communiquent pas sur internet.
- 3% des communes (1) possèdent un Dicrim mais ne sont pas concernés par le risque lié aux cavités.
- 3% des communes (1) ne possèdent pas de Dicrim.

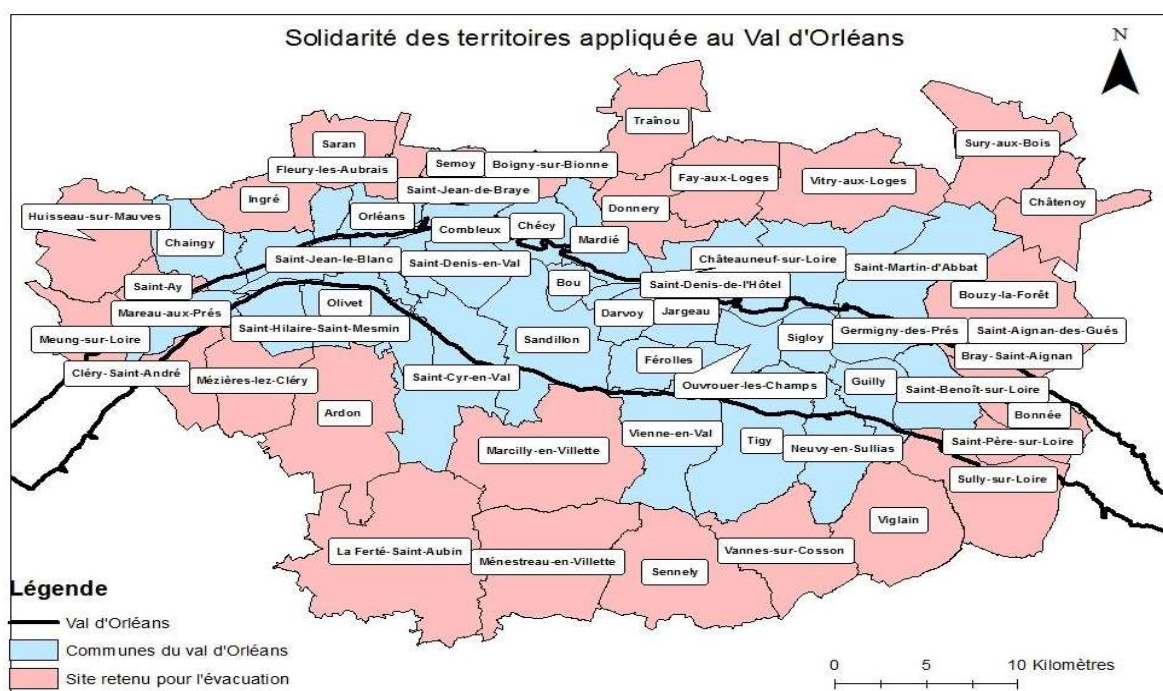
Afin d'optimiser la planification de gestion d'une crise, le maire se doit également de mettre en œuvre le PCS (Plan de Communal de Sauvegarde) conformément à la loi de modernisation de la sécurité civile. Ce document analyse les risques à l'échelle de la commune, organise les actions à mener en cas de crise et joue un rôle d'appui aux services de secours et de police dans leurs actions de soutien à la

population. Ce document va référencer les personnes soumis au risque localement, et intégrer le DICRIM.

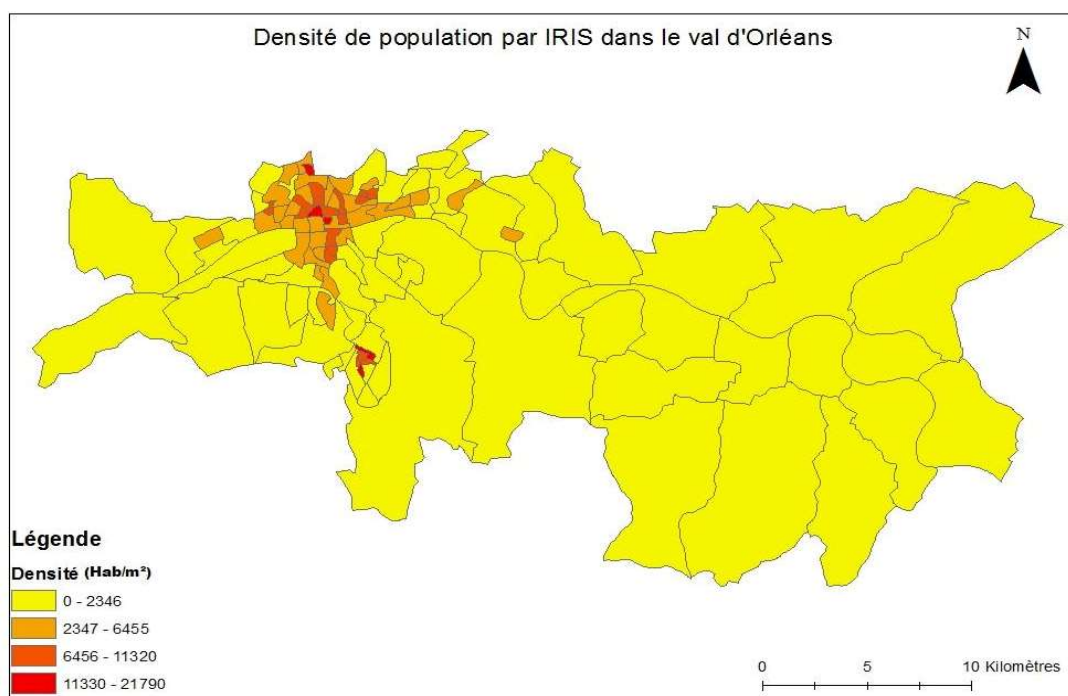
Définition du site d'étude :

La DREAL propose une délimitation géographique du Val d'Orléans qui consiste à intégrer uniquement les communes qui sont couvertes par le lit majeur de la Loire. Ainsi, 17 communes sont prises en compte dans cette circonscription. Une autre délimitation a été également suggérée (You, 2018), elle s'appuie sur le scénario de la crue ayant lieu le 1866 et prend en compte toutes les communes du val touchées par le risque d'inondation, pour englober au total 31 communes.

Dans le cadre d'une évacuation préventive et afin d'optimiser cette démarche et de limiter la gravité des conséquences en cas d'événement majeur, il semble nécessaire d'élargir la délimitation retenue. En effet, le département du Loiret, garant de la solidarité territoriale, engage comme tout département français l'ensemble de ses communes à soutenir les territoires voisins en cas de catastrophes. Les subdivisions communales exposées à aucun risque majeur ou touchées faiblement par des aléas se doivent d'accueillir la population des communes en danger et les appuyer jusqu'au retour à la normale. Par conséquent, l'étude de la vulnérabilité demeurera axée sur le périmètre du Val d'Orléans exposé au risque du multi-aléa. Tandis que pour l'évacuation, dans une perspective de solidarité des territoires, la zone sera étendue pour prendre en compte le val et les communes avoisinantes, situées en zone non (faiblement) inondable et qui sont en mesure d'accueillir les évacués issus des communes sinistrées. La carte en bleu représente le Val d'Orléans et la carte en rouge correspond au site retenu pour l'évacuation, intégrant au total 60 communes.



Réalisation: BEN CHIKAR - ERNATUS - Université de Tours - CITERES - BD TOPO - Juin 2019



Réalisation: BEN CHIKAR - ERNATUS - Université de Tours - CITERES - BD TOPO - Juin 2019



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Ben chikar,
Ernatus
2018-2019

Titre (en minuscule) : sous titre (minuscule)

Résumé : [Résumé de votre travail de stage en 5 à 15 lignes]

Mots Clés :

[Entreprise] :

Adresse

Tuteur entreprise :

Gildas Noury

— “

Tuteur académique :

Serrhini Kamal