

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-19-179206-03140A

24/04/2019

**Rôle des paramètres hydroclimatiques dans l'occurrence de fontis dans le Val d'Orléans (Loiret) et essai de projection dans le cadre du changement climatique attendu.**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



# **Rôle des paramètres hydroclimatiques dans l'occurrence de fontis dans le Val d'Orléans (Loiret) et essai de projection dans le cadre du changement climatique attendu.**

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Augustin COLETTE, Unité « Modélisation Atmosphérique et Cartographie Environnementale », Direction des Risques Chroniques, Ineris.

Laure MALHERBE, Unité Instrumentation et Exploitation de la donnée, Direction des Risques Chroniques, Ineris.

## PREAMBULE

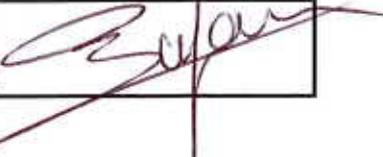
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'Ineris, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'Ineris ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'Ineris dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'Ineris de par son décret de création, l'Ineris n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'Ineris ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'Ineris dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Philippe GOMBERT	<i>P/c</i> Stella COCCIA Christian FRANCK	Pascal BIGARRE
Qualité	Ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Ingénieur à l'unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol et Délégué Appui Technique à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

## RESUME

Situé près d'Orléans, à 100 km au sud de Paris, le Val d'Orléans possède un substratum calcaire fortement karstifié surmonté d'un recouvrement alluvial meuble. Lorsque des cavités souterraines de nature karstique se forment à faible profondeur, il peut se produire un effondrement en surface appelé « fontis » : 651 fontis ont ainsi été signalés dans le Val d'Orléans depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle.

Une analyse bibliographique montre que, dans ce contexte dit de karst couvert, des fontis peuvent se former à l'occasion de variations importantes de la charge hydraulique, induites par des événements hydroclimatiques ou anthropiques extrêmes tels que des épisodes pluvieux intenses, un fort rabattement piézométrique (induit par une sécheresse prolongée ou par des pompages importants) ou encore des inondations liées à des crues exceptionnelles.

Dans la première partie du rapport, afin de savoir si ces mêmes mécanismes sont à l'œuvre dans le Val d'Orléans, une analyse statistique des conditions d'apparition des fontis datés a été réalisée. Après avoir identifié les principaux paramètres hydroclimatiques (précipitations, températures, débit de la Loire et niveau de la nappe), une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle a été utilisée : l'analyse factorielle discriminante. Elle a permis d'estimer la probabilité qu'un fontis apparaisse un jour donné, en fonction des valeurs prises par les différents paramètres hydroclimatiques. A condition de raisonner par périodes de 4 semaines, les fonctions de classement obtenues expliquent correctement plus des trois-quarts des événements survenus depuis 2000.

Dans la seconde partie du rapport, cette méthode a été appliquée aux prévisions climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle dans le but de vérifier si l'aléa « apparition de fontis » risquait d'évoluer significativement ou pas avec le changement climatique en cours. Pour cela, un modèle de projection climatique a été utilisé afin de connaître l'évolution de la fréquence et de l'intensité de ces paramètres au cours des décennies à venir

Cependant, l'application directe des équations discriminantes précédemment obtenues sur les données du passé à celles du futur n'a pas donné les résultats escomptés. Le raisonnement a donc dû être modifié en intégrant une période de référence et une durée d'agrégation des données plus longues, ainsi qu'une nouvelle variable dépendante (le nombre de fontis apparus par période). En agrégeant les données par semestres et en scindant les nouvelles variables dépendantes en « semestres négatifs » (apparitions de fontis de faible à nulle) et « semestres positifs » (apparitions de fontis de fortes à très fortes), on a ainsi pu expliquer plus des trois quarts des apparitions de fontis du début du 21<sup>e</sup> siècle.

Il ressort de cette analyse que les périodes d'apparition d'un nombre élevé de fontis surviennent actuellement tous les 43 ans en moyenne et devraient se produire, au cours du 21<sup>e</sup> siècle, en 2030-2040, 2050-2060 et 2090-2100. A la fin du siècle, 1 semestre sur 4 à 5 devrait ainsi être frappé d'un nombre exceptionnel de fontis.

Cette étude concerne le secteur du Val d'Orléans qui possède un contexte hydrogéologique particulier. Elle souffre par ailleurs de biais et d'incertitudes liés à la précision de la base de données, au choix des paramètres hydroclimatiques, à la disponibilité d'un seul modèle climatique et au choix d'un seul scénario de forçage radiatif. Il s'agit donc d'une première approche de la compréhension de ce phénomène, qui propose un cadre méthodologique pour de nouveaux travaux sur cette problématique.

## ABSTRACT

Located near Orléans, 100 km south of Paris, the Val d'Orléans has a strongly karstified limestone substratum overlain by a crumbly alluvial deposit. When karstic underground cavities form at shallow depth, there may appear a surface collapse called "fontis": 651 collapses have been reported in the Val d'Orléans area since the end of the 19<sup>th</sup> century.

A bibliographic analysis shows that, in this so-called covered karst context, collapses may appear during significant hydraulic load variations induced by extreme hydroclimatic or anthropogenic events such as intense rainfall events, or strong piezometric drawdown (induced by a prolonged drought or by large pumping) or exceptional floods.

In the first part of the report, in order to know if these same mechanisms are efficient the Val d'Orléans, a statistical analysis of the conditions of appearance of the dated collapses was carried out. After identifying the main hydroclimatic parameters (precipitation, temperature, Loire' flow, water table), a multidimensional statistical analysis method was used: the discriminant factor analysis. It made it possible to estimate the probability that a collapse will appear on a given day, according to the values taken by the various hydroclimatic parameters. If we reason in periods of 4 weeks, the obtained ranking functions correctly explain more than three-quarters of the events that occurred since 2000.

In the second part of the report, this method was applied to climate forecasts for the 21<sup>st</sup> century in order to verify whether the "collapse appearance " geohazard could change significantly, or not, with the current climate change. For this purpose, a climate projection forecasting model was used to determine the evolution of the frequency and intensity of these parameters over the coming decades.

However, the direct application of the previously obtained discriminant equations to past and future data has not yielded the expected results. The reasoning had to be modified by integrating longer reference period and data aggregation time, as well as a new dependent variable (the number of collapses by period). By aggregating the data in semesters and splitting the new dependent variables into "negative semesters" (weak or null collapse appearance) and "positive semesters" (high to very high collapse appearance), it was thus possible to explain more three quarters of the collapse appearances at the beginning of the 21<sup>st</sup> century.

This analysis shows that the periods of occurrence of a high number of collapses, that currently occur every 43 years on average, should be more frequent during the 21<sup>st</sup> century, and particularly during the crises anticipated in 2030-2040, 2050-2060 and 2090-2100. By the end of the century, about 1 in 4 to 5 semesters should be hit by an exceptional number of collapses.

This study concerns only the Val d'Orléans area, which has a particular hydrogeological context. It also suffers from biases and uncertainties related to the accuracy of the database, the choice of hydroclimatic parameters, the availability of a single climate model and the choice of a single radiative forcing scenario. It is therefore a first approach to understanding this phenomenon.

## **MOTS-CLÉS**

Digues, mouvements de terrain, interaction sols-structures, modélisation, changement climatique, calcaire.

## **MOTS-CLÉS**

Levee, ground movements, soil-structures interaction, modeling, climate change, limestone.

## **TERRITOIRE / TERRITORY**

Val d'Orléans, Loiret (45), France, Long. : 2,022857 E, Lat. : 47,873525 N.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
<b>2. PRÉSENTATION DU VAL D'ORLÉANS.....</b>	<b>15</b>
2.1 Localisation .....	15
2.2 Contexte géologique et hydrogéologique .....	15
2.3 Contexte karstique et présence de fontis .....	16
<b>3. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'APPARITION DE FONTIS     KARSTIQUES EN ZONE DE RECOUVREMENT .....</b>	<b>21</b>
3.1 Rôle du recouvrement .....	21
3.2 Période d'apparition des fontis .....	23
3.3 Scénarios d'effondrement.....	24
<b>4. ANALYSE DE LA BASE DE DONNÉES DE FONTIS DU VAL D'ORLÉANS</b>	<b>27</b>
4.1 Présentation de la base de données .....	27
4.2 Analyse des saisons d'ouverture de fontis .....	27
<b>5. SÉLECTION DES PARAMÈTRES HYDROCLIMATIQUES REPRÉSENTATIFS     .....</b>	<b>31</b>
5.1 Choix des paramètres hydroclimatiques.....	31
5.2 Choix des indicateurs hydroclimatiques .....	31
5.3 Acquisition des données et calcul des seuils.....	32
5.4 Choix de la période de calcul .....	40
<b>6. ANALYSE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE DES DONNÉES.....</b>	<b>43</b>
6.1 Méthode d'analyse statistique multidimensionnelle des données, Présentation de la méthode analytique employée .....	43
6.2 Analyse des années 2010-2013 et extrapolation au lot de référence .....	44
<b>7. PRÉSENTATION DE LA MODÉLISATION CLIMATIQUE.....</b>	<b>51</b>
7.1 Contexte général des modélisations climatiques.....	51
7.2 Modèles utilisés .....	51
7.3 Scénario sélectionné .....	52
7.4 Données climatiques extraites.....	52
7.5 Tendances climatiques pour le 21 <sup>e</sup> siècle .....	53
<b>8. DÉTERMINATION DES NOUVELLES FONCTIONS DE CLASSEMENT.....</b>	<b>55</b>
8.1 Application des fonctions de classement préalablement définies.....	55

8.2	Eléments de calcul des nouvelles fonctions de classement .....	56
8.3	Nouvelles fonctions de classement .....	60
<b>9.</b>	<b>APPLICATION AU CLIMAT ATTENDU POUR LE 21E SIÈCLE .....</b>	<b>61</b>
<b>10.</b>	<b>DISCUSSIONS ET CONCLUSION .....</b>	<b>65</b>
10.1	Rappel des résultats obtenus .....	65
10.2	Remarques concernant l'approche réalisée .....	66
10.3	Validité de l'approche réalisée.....	67
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>69</b>
<b>12.</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>73</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte du Val d'Orléans montrant la zone inondable (en bleu) et les digues (en rouge) (d'après CETE Normandie-Centre, 2011) .....	15
Figure 2. Principales connexions hydrauliques karst-surface dans le Val d'Orléans (Lepiller et Jozja, 2010) .....	16
Figure 3. Exemples de phénomènes hydrogéologiques d'origine karstique dans le Val d'Orléans (Crédit : P. Boismoreau).....	17
Figure 4. Carte de répartition des fontis du Val d'Orléans .....	17
Figure 5. Quelques exemples de fontis d'origine karstique ayant affecté des bâtiments et des infrastructures dans le Val d'Orléans.....	18
Figure 6. Périodes d'apparition des fontis datés dans le Val d'Orléans .....	19
Figure 7. Mécanismes d'instabilité induits par un système karstique actif en présence et absence de formations superficielles (Waltham et al., 2015) .....	21
Figure 8. Exemples d'effondrements en terrain cohésif (a) ou peu cohésif (b) et d'affaissement (c) dans le Val d'Orléans .....	22
Figure 9. Schéma de l'instabilité d'une cavité karstique recouverte d'une formation meuble (Alboresha, 2016) .....	26
Figure 10. Autocorrélogramme des dates d'apparition de fontis.....	28
Figure 11. Répartition des occurrences de fontis par mois.....	28
Figure 12. Comparaison des occurrences de fontis dans le Val d'Orléans avec les paramètres hydroclimatiques .....	29
Figure 12. Choix des seuils minimal (bleu) et maximal (rouge) .....	32
Figure 13. Localisation des stations de mesure des paramètres hydroclimatiques à proximité du Val d'Orléans (en grisé) .....	33
Figure 14. Histogramme des précipitations de l'année 2010 à Orléans-Bricy .....	34
Figure 15. Autocorrélogramme des précipitations journalières à Orléans en 2010 ..	34
Figure 16. Histogramme des températures journalières à Orléans en 2010.....	35
Figure 17. Autocorrélogramme des températures moyennes à Orléans en 2010 ....	36
Figure 18. Histogramme des débits journaliers de la Loire à Orléans en 2010 .....	37
Figure 19. Autocorrélogramme des débits journaliers de la Loire en 2010.....	37
Figure 20. Localisation et période de suivi des piézomètres du Val d'Orléans (d'après Infoterre) - Le piézomètre de St-Cyr-en-Val est en rouge.....	38
Figure 21. Histogramme des niveaux piézométriques de la nappe de Beauce à Saint-Cyr-en-Val en 2010 .....	39
Figure 22. Autocorrélogramme des niveaux journaliers de la nappe en 2010.....	40
Figure 23. Représentation du classement de l'échantillon d'apprentissage (années 2010 et 2013 par périodes de 4 semaines) selon 20 indicateurs hydroclimatiques .....	46
Figure 24. Représentation du classement de l'échantillon d'apprentissage (années 2010 et 2013 par périodes de 4 semaines) selon 10 indicateurs climatiques....	47
Figure 25. Evolution des températures moyennes et des précipitations annuelles à Sandillon depuis 1950 (selon le scénario RCP8.5 pour le 21 <sup>e</sup> siècle) .....	54
Figure 26. Classement des jours avec fontis (1) et sans fontis (0) agrégés par tranches de 4 semaines sur la période de référence 2006-2017.....	57
Figure 27. Evolution de la fréquence cumulée de semestres positifs au cours du 21 <sup>e</sup> siècle .....	62
Figure 28. Evolution de la fréquence de semestres positifs par décennie au cours du 21 <sup>e</sup> siècle .....	63

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Fréquence d'apparition en surface de fontis par siècle dans le val d'Orléans .....	19
Tableau 2. Précision des dates de signalement de fontis.....	27
Tableau 3. Synthèse des corrélations entre paramètres hydroclimatiques et occurrences de fontis à l'échelle saisonnière .....	29
Tableau 4. Caractéristiques des précipitations (mm) en 2010, 2013 et 2016 .....	33
Tableau 5. Caractéristiques des températures (°C) en 2010, 2013 et 2016 .....	35
Tableau 6. Caractéristiques des débits de la Loire (m <sup>3</sup> /s) en 2010, 2013 et 2016....	36
Tableau 7. Caractéristiques des niveaux piézométriques de la nappe des calcaires de Beauce (m NGF) en 2010, 2013 et 2016.....	39
Tableau 8. Effet mémoire (en jours) des paramètres hydroclimatiques des années 2010, 2013 et 2016.....	41
Tableau 9. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 12 indicateurs hydroclimatiques	45
Tableau 10. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 20 indicateurs hydroclimatiques	45
Tableau 11. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 10 indicateurs climatiques .....	46
Tableau 12. Application des fonctions de classement obtenues sur la période 2010-2013 au lot de référence 1994-2016 (10 indicateurs climatiques x 4 semaines)	48
Tableau 13. Application des fonctions de classement précédemment obtenues pour 2010 et 2013 aux données simulées d'après le scénario RCP8.5 .....	55
Tableau 14. Application des nouvelles équations discriminantes obtenues sur les données simulées de 2010 aux données simulées de 2013, et vice-versa .....	55
Tableau 15. Comptage annuel du nombre de jours avec fontis (N <sub>JOUR</sub> ) et du nombre de fontis (N <sub>FONT</sub> ) sur la période 2006-2017 .....	56
Tableau 16. Application de l'AFD aux données climatiques RCP8.5 selon diverses modalités appliquées aux jours avec fontis pour la période de référence 2006-2017 .....	57
Tableau 17. Eléments de calcul des valeurs seuil des variables dépendantes .....	58
Tableau 18. Paramètres de calcul des variables dépendantes de l'AFD.....	59
Tableau 19. Résultats de l'AFD pour la période de référence 2006-2017 .....	60

# 1. INTRODUCTION

Dans le Val d'Orléans (département du Loiret), 651 effondrements localisés de type fontis ont été signalés depuis le 19<sup>e</sup> siècle. Ils ont endommagé des enjeux vulnérables tels que les digues de la Loire, des voies de circulation ou encore des habitations. Il semble qu'on assiste à une recrudescence de ce type d'évènement depuis quelques décennies avec 88 signalements de fontis depuis 2000 contre 32 pour la totalité du 20<sup>e</sup> siècle.

La question qui se pose est l'évolution de ce phénomène au cours du 21<sup>e</sup> siècle dans le contexte du changement climatique en cours, ainsi que l'augmentation ou non des impacts sur les enjeux.

Le présent rapport est établi dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS06 « Connaissance et observation des risques gravitaires, impact du changement climatique ». Il vise à apporter des éléments sur le rôle des paramètres hydroclimatiques<sup>1</sup> dans l'apparition de ces fontis, et à définir et tester une méthode permettant d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'occurrence de ces évènements.

L'approche proposée s'organise de la manière suivante :

- 1) Etablissement d'une base de données de fontis et de paramètres hydroclimatiques pertinents, et synthèse bibliographique sur l'apparition de fontis d'origine karstique<sup>2</sup> en zone de recouvrement ;
- 2) Analyse statistique de ces données afin d'identifier les principaux paramètres hydroclimatiques, potentiellement en lien avec les apparitions historiques de fontis ;
- 3) Evaluation du risque d'apparition - en termes d'occurrence - de nouveaux fontis au cours du 21<sup>e</sup> siècle sur la base d'une modélisation climatique des paramètres précédemment identifiés comme pertinents.

Le présent rapport rassemble la totalité de l'étude et intègre notamment le rapport de phase 1, réalisé en 2017, et intitulé « Rôle des événements hydroclimatiques dans l'occurrence d'apparition de fontis dans le Val d'Orléans (Loiret) » (Référence Ineris DRS-17-164722-04971A).

---

<sup>1</sup> On entend par « paramètres hydroclimatiques » des paramètres hydrologiques (débits de cours d'eau, niveaux de nappe) et climatiques (précipitations, températures) potentiellement associés.

<sup>2</sup> Se dit d'une région calcaire caractérisée par la prépondérance du drainage souterrain et par le développement d'une topographie originale due à la corrosion de la roche (grottes, gouffres, résurgences, etc.), <http://www.cnrtl.fr/definition/karst>



## **PREMIERE PARTIE**

### **ANALYSE DES CONDITIONS ACTUELLES D'APPARITIONS DE FONTIS EN LIAISON AVEC LES PARAMETRES HYDROCLIMATIQUES**



## 2. PRÉSENTATION DU VAL D'ORLÉANS

### 2.1 LOCALISATION

Dans la plaine alluviale de la Loire, environ 230 000 personnes sont soumises au risque d'inondation (Maurin et al., 2013). La protection des habitants et des biens contre les crues repose sur la construction de levées<sup>3</sup> ou digues qui atteignent une longueur cumulée de 650 km. Les dégâts que pourraient causer une inondation centennale en cas de ruptures majeures de ces digues, comme cela s'est produit à plusieurs reprises au 19<sup>e</sup> siècle, sont de l'ordre du milliard d'euros.

Le Val d'Orléans correspond à la portion qui s'étend sur environ 30 km en amont d'Orléans et 5 km en aval, jusqu'à la confluence de la Loire et du Loiret (Figure 1). Sur une largeur de 1 à 7 km, habitent environ 63 000 personnes, pratiquement toutes situées en zone inondable. Cette zone est protégée par 42 km de digues qui ont déjà subi 35 ruptures (dont la relation avec des fontis est en discussion), ce qui a engendré des inondations catastrophiques notamment lors du passage des trois crues exceptionnelles de 1846, 1856 et 1866. Toute défaillance du système d'endiguement aurait de nos jours des conséquences catastrophiques, dans la mesure où la partie la plus urbanisée du val serait systématiquement inondée avec un risque qualifié d'intolérable (Maurin et al., 2012) : près de 11 000 personnes seraient ainsi potentiellement mises en danger.

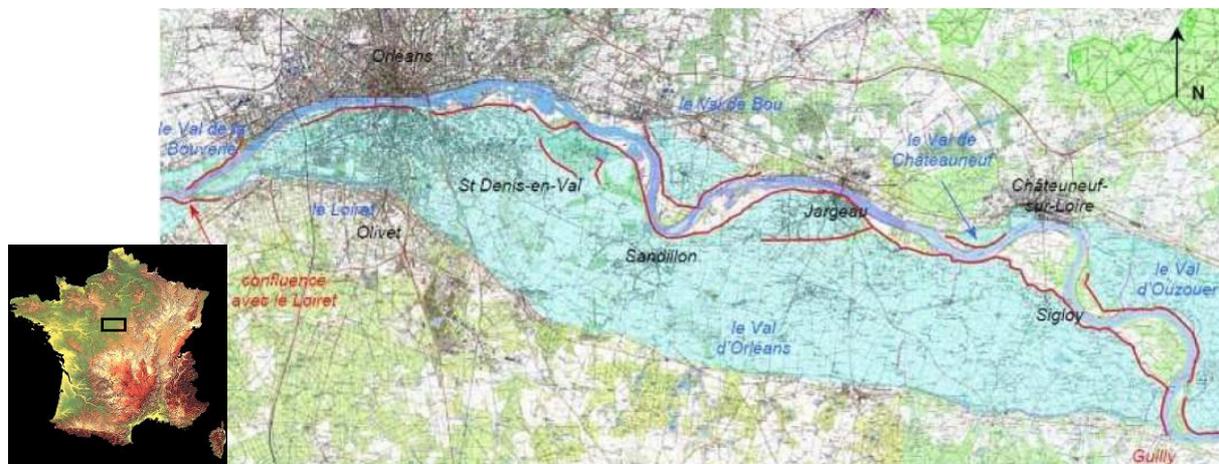


Figure 1. Carte du Val d'Orléans montrant la zone inondable (en bleu) et les digues (en rouge) (d'après CETE Normandie-Centre, 2011)

### 2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le Val d'Orléans est constitué par deux formations géologiques superposées :

- au sommet, les alluvions de la Loire, à dominante sableuse, épaisses de 6 à 9 m en moyenne, avec un maximum de 25 m ;
- à la base, les calcaires de Beauce, de l'Oligocène, épais de 100 à 200 m ; ils sont constitués de deux niveaux calcaires (calcaires de Pithiviers en haut, calcaires d'Étampes en bas) séparés par l'horizon marneux de la Molasse du Gâtinais.

<sup>3</sup> digues en terre ; on utilisera ici le terme générique « digue » pour parler des digues et des levées.

Sur le plan hydrogéologique, on relève la superposition de deux aquifères : celui des alluvions de la Loire et celui, karstique<sup>4</sup>, des calcaires de Beauce. Ils sont tous deux rechargés par les précipitations tombant sur leur impluvium (celui des calcaires de Beauce débordant largement au nord de la vallée de la Loire). L'aquifère des calcaires de Beauce est en outre temporairement et localement alimenté par des pertes ou des infiltrations en provenance de la Loire ou d'autres cours d'eau du plateau de Beauce.

Du fait de l'absence de couche imperméable entre les alluvions et les calcaires dans le Val d'Orléans, les deux nappes s'y trouvent en continuité hydraulique : cela signifie que leurs niveaux piézométriques sont confondus et qu'il peut exister des relations directes entre elles (entrées d'eau du karst vers les alluvions et vice-versa).

### 2.3 CONTEXTE KARSTIQUE ET PRÉSENCE DE FONTIS

Des interactions existent entre le réseau hydrographique de surface et le karst des calcaires de Beauce (Figure 2). L'eau de certains cours d'eau disparaît sous terre au niveau de plusieurs pertes, principalement situées dans la Loire, en partie amont du Val d'Orléans, dont le débit cumulé moyen est de l'ordre de 12 m<sup>3</sup>/s (Figure 3a). Cette eau transite par des conduits karstiques (Figure 3b) dont les exutoires parsèment le cours du Loiret, formant l'un des systèmes karstiques les plus importants de France en termes de débit moyen (Lepiller et Jozja, 2010).

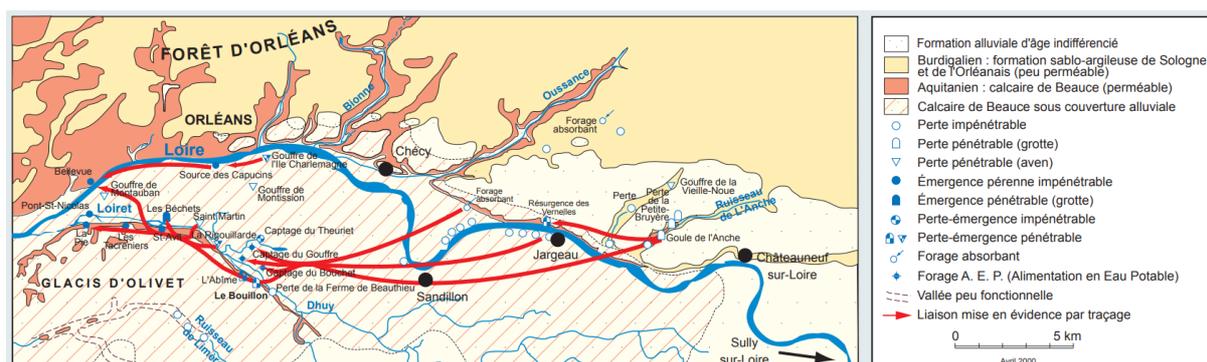


Figure 2. Principales connexions hydrauliques karst-surface dans le Val d'Orléans (Lepiller et Jozja, 2010)

Les cartographies spéléologiques réalisées en amont des sources du Loiret par Boismoreau (2008) ont permis d'identifier de vastes galeries de 2 à 9 m de hauteur, situées entre 8 et 28 m de profondeur, c'est-à-dire parfois à quelques mètres seulement sous la base des alluvions.

<sup>4</sup> Se dit d'un milieu soumis à des phénomènes d'érosion chimique où l'eau souterraine circule dans des chenaux de dissolution qui peuvent atteindre un diamètre métrique et une longueur kilométrique.



a) Perte de la Loire près de Jargeau



b) Karst noyé de la source du Loiret

Figure 3. Exemples de phénomènes hydrogéologiques d'origine karstique dans le Val d'Orléans (Crédit : P. Boismoreau)

Dans le Val d'Orléans, plus de 600 fontis ont été répertoriés depuis 1856 sur une surface de seulement 167 km<sup>2</sup>, ce qui représente une moyenne de trois fontis par kilomètre carré (Figure 4). Ils mesurent de 1 à 20 m de diamètre et de 1 à 18 m de profondeur et sont principalement situés dans une bande de 2 km de largeur de part et d'autre de la Loire (Gombert et al., 2014). C'est dans cette même bande que sont majoritairement situées les digues de protection contre les crues fluviales.

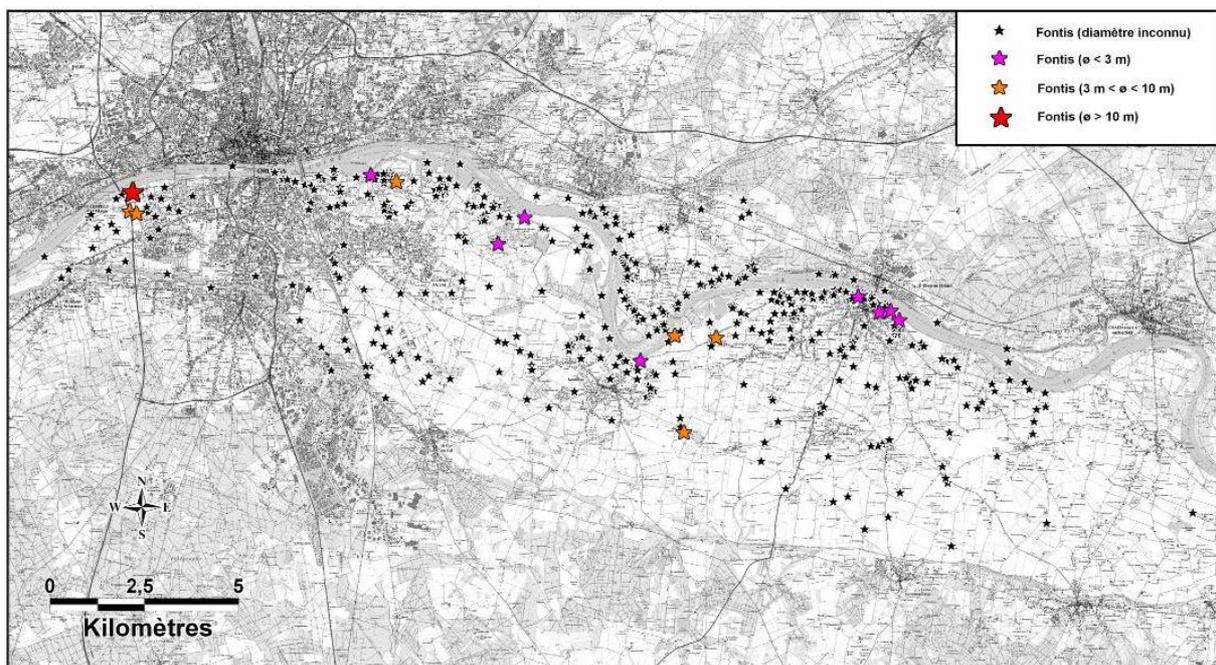


Figure 4. Carte de répartition des fontis du Val d'Orléans

Certains de ces fontis d'origine karstique ont impacté des infrastructures linéaires (digues de Loire, autoroute A71, canal de Briare...) ou des habitations (cf. Figure 5).

L'inventaire des fontis du Val d'Orléans a tout d'abord été réalisé par le Cerema puis complété depuis 2013 par l'Ineris (Orsat, 2013 ; Bouzeman, 2014 ; Treffot, 2015). A fin 2016, il comptait 651 fontis, dont seulement 26% ont une date d'apparition connue. Parmi eux, 54% possèdent une date de signalement au jour près, assimilée ici à la date d'apparition des fontis. Sur cette base, la Figure 6 montre l'irrégularité apparente des périodes d'ouvertures de fontis, laquelle est en fait biaisée par les recensements réalisés en 1902 et depuis 2013, qui cumulent de nombreux fontis.

Pendant cette période de 161 ans, des fontis n'ont été signalés qu'au cours de 39 années pendant lesquelles la fréquence moyenne d'occurrence a été de 4,4 fontis par an, avec des valeurs extrêmes allant de 1 à 30 fontis par an.



a) Digue (2008)



b) Habitation (2010)



c) Route (2011)



d) Autoroute (2012)

Figure 5. Quelques exemples de fontis d'origine karstique ayant affecté des bâtiments et des infrastructures dans le Val d'Orléans

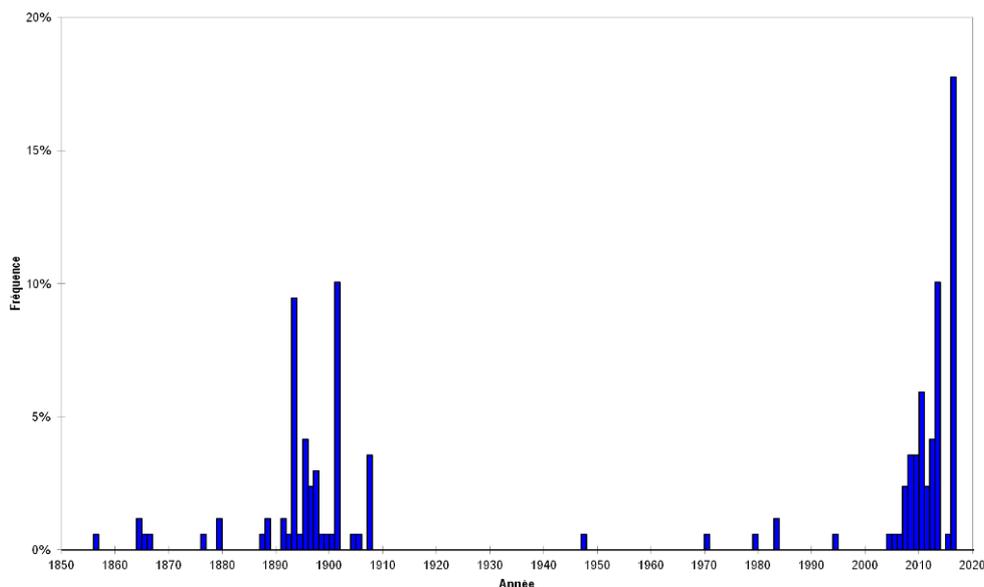


Figure 6. Périodes d'apparition des fontis datés dans le Val d'Orléans

On constate toutefois que la fréquence de signalement de fontis a très fortement augmenté entre le 20<sup>e</sup> et le 21<sup>e</sup> siècle, passant de 0,3 fontis par an à 5,2 fontis par an (Tableau 1) : si l'on ne prend en compte que la décennie actuelle, on obtient même une fréquence de 8,5 fontis par an. En raisonnant par année, alors que seulement 40% de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle a fait l'objet d'un signalement de fontis, ce pourcentage monte à 71% pour le début du 21<sup>e</sup> siècle et même à 100% pour la décennie actuelle. Cette augmentation apparente des fréquences d'apparition de fontis peut avoir deux explications :

- soit la fréquence de signalements augmente car les riverains sont plus sensibilisés au problème ; de ce fait, les inventaires précédents étaient incomplets ;
- soit la fréquence d'occurrence de fontis augmente sous l'effet de phénomènes naturels ; il convient alors d'étudier le rôle joué par le changement climatique.

Tableau 1. Fréquence d'apparition en surface de fontis par siècle dans le val d'Orléans

Siècle	Période	Effectif	Durée (an)	Fréquence (fontis/an)	Années avec fontis
19 <sup>e</sup>	1856-1899	48	44	1,12	40%
20 <sup>e</sup>	1900-1999	28	100	0,33	10%
21 <sup>e</sup>	2000-2016	88	17	5,18	71%



### 3. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'APPARITION DE FONTIS KARSTIQUES EN ZONE DE RECOUVREMENT

Pour mieux comprendre les mécanismes à l'origine des fontis du Val d'Orléans, une recherche bibliographique sur les effondrements survenus en zones de karst couvert<sup>5</sup> a été réalisée. Les résultats présentés ci-après proviennent principalement de l'analyse des phénomènes suivants :

- plus de 30 000 effondrements karstiques observés en Chine (Wanfang, 1997) ;
- des centaines d'effondrements apparus en 2010 dans le sud de la Chine, suite à une longue sécheresse suivie de violents épisodes pluvieux (Zhao et al., 2011) ;
- plus de 300 effondrements survenus en juillet 1994 près d'Albany (Géorgie, USA), à la suite de la crue exceptionnelle de la rivière Flint (Hyatt & Jacobs, 1996) ;
- 171 effondrements karstiques survenus depuis 1982 près de Dachengqiao dans le Hunnan (Chine), à 2 km d'une mine fréquemment inondée par des intrusions d'eau karstique et soumise de ce fait à des pompages permanents (Jiang et al., 2018).

#### 3.1 RÔLE DU RECOUVREMENT

Du fait de sa durée de creusement, de l'ordre de plusieurs milliers d'années (Bakalowicz, 2018), un réseau karstique est généralement un système stable à l'échelle humaine. Des cas de cavités karstiques spontanément ouvertes en surface (Figure 7a) ou dont le toit s'est naturellement effondré (Figure 7b) sont connus, mais il s'agit de phénomènes relativement rares dans l'espace et dans le temps.

Lorsque plusieurs mètres de formations recouvrent les vides karstiques, l'effondrement d'une cavité souterraine ne débouche pas toujours immédiatement en surface : il peut être différé dans le temps en fonction de la cohésion des terrains sus-jacents (Figure 7e). Il en va de même lorsqu'une cavité souterraine est reliée à un conduit karstique actif : le recouvrement et les matériaux de comblement de la cavité peuvent être peu à peu entraînés dans le karst et former, à terme, un effondrement (Figure 7c/f) ou un affaissement (Figure 7d). La question se pose alors de connaître les facteurs qui induisent une telle instabilité.

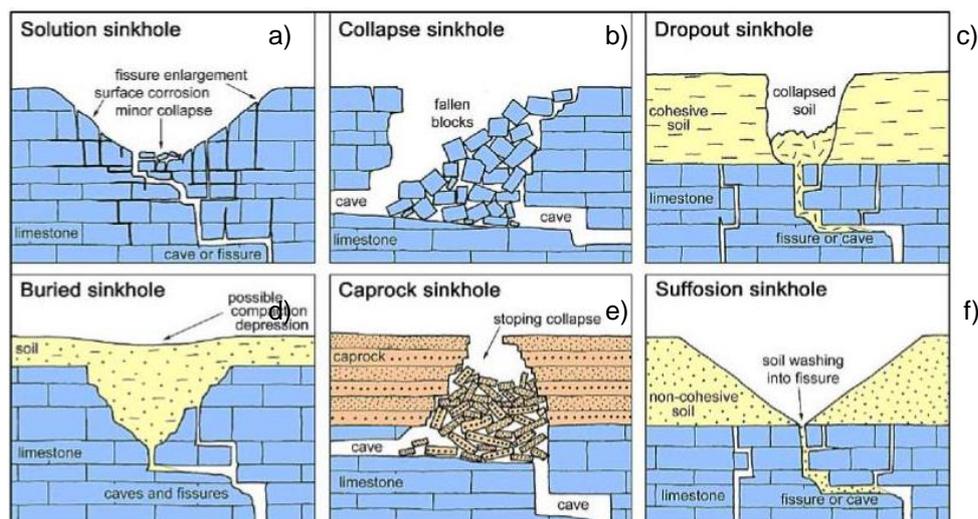


Figure 7. Mécanismes d'instabilité induits par un système karstique actif en présence et absence de formations superficielles (Waltham et al., 2015)

<sup>5</sup> On parle de « karst couvert » lorsque la formation karstique n'affleure pas.

Les formations de recouvrement peuvent avoir diverses origines et natures géologiques : alluvions, colluvions, loess<sup>6</sup>, résidus d'altération (argiles à silex), zone d'altération de la formation karstique, niveau sédimentaire meuble déposé ultérieurement (sables de Sologne), dépôt anthropique (remblais), etc.

Ces formations se différencient notamment entre elles (et des formations calcaires sous-jacentes) par leur cohésion dépendant de leur nature et de leur teneur en eau :

- les argiles et les sables ou limons humides sont des matériaux plus ou moins cohésifs et vont pouvoir s'opposer un certain temps aux forces générées par la présence de vide, jusqu'à s'effondrer brutalement et créer un cratère aux bords généralement verticaux (voir Figure 7c et Figure 8a) ;
- les sables et limons secs, ou les graviers et galets (secs ou humides) ne sont pas des matériaux cohésifs ; ils sont dits purement frottants ; un vide sous-jacent va finir par y induire un affaissement par départ progressif de matière (voir Figure 7d et Figure 8c) ou un effondrement dont les flancs seront moins pentus (voir Figure 7f et Figure 8b).



Figure 8. Exemples d'effondrements en terrain cohésif (a) ou peu cohésif (b) et d'affaissement (c) dans le Val d'Orléans

Outre leur nature, l'épaisseur des formations superficielles joue également un rôle dans la répercussion en surface de l'effondrement d'une cavité karstique sous recouvrement.

Dans une province de Chine du Sud, des centaines d'effondrements karstiques se sont formés en 2010 lorsque des pluies torrentielles ont succédé à une longue période de sécheresse : 93% d'entre eux sont apparus dans des zones où l'épaisseur de recouvrement était inférieure à 10 m (Zhao et al., 2011). Les auteurs ont identifié que les types de recouvrement les plus propices aux effondrements sont des terrains sableux homogènes (sable pur de granulométrie uniforme) et, dans une moindre mesure, des terrains graveleux hétérogènes stratifiés ou argileux. Le fait que le recouvrement soit stratifié, et qu'il montre une ou plusieurs couche(s) d'argile alternant avec une ou plusieurs couche(s) de sable graveleux<sup>7</sup>, apparaît ici être un facteur aggravant.

En analysant plus de 30 000 effondrements karstiques survenus à diverses périodes en Chine, Wanfang (1997) a montré qu'ils se produisaient préférentiellement dans les zones où l'épaisseur de recouvrement était inférieure à 15 m. Un autre facteur

<sup>6</sup> Dépôt éolien autrefois appelés « limons des plateaux »

<sup>7</sup> Comme c'est également le cas dans les alluvions du Val d'Orléans.

aggravant identifié est la présence d'un réseau karstique peu profond et fortement développé.

Dans le cas des 312 effondrements apparus en 1994 dans la plaine alluviale de la rivière Flint, aux Etats-Unis, Hyatt & Jacobs (1996) ont observé que les effondrements avaient été sept fois plus fréquents dans les zones où l'épaisseur de recouvrement était inférieure à 20 m. En outre, la majorité des effondrements se sont produits dans des zones de recouvrement sableux situées au sein de la plaine alluviale inondée : à l'extérieur de cette plaine, les effondrements se sont répartis de manière assez homogène entre les zones de recouvrement sableux, sablo-argileux et argileux. Dans ce cas précis, il semble que ce soit la « liquéfaction » des matériaux sableux sous l'effet de l'inondation qui ait été à l'origine de la plupart des effondrements.

Cette première analyse bibliographique met en évidence la prédominance des faibles épaisseurs (< 20 m) de terrains de recouvrement et de leur nature plutôt sableuse dans l'apparition d'effondrements karstiques. La localisation de tels terrains en plaine alluviale inondable semble, en outre, être un facteur aggravant. On notera que le val d'Orléans cumule tous ces facteurs de prédisposition : faible épaisseur de recouvrement à dominante sableuse et localisation en plaine alluviale inondable.

### 3.2 PÉRIODE D'APPARITION DES FONTIS

Zhao et al. (2011) ont analysé 114 effondrements karstiques survenus en Chine du Sud en 2010. Ils se sont produits lorsqu'une mousson exceptionnelle a succédé à longue période de sécheresse hivernale : pendant 3 mois, de fortes précipitations ont en effet atteint le double du cumul mensuel normal. Ces auteurs ont mis en évidence deux périodes préférentielles d'effondrements :

- 29% des effondrements se sont produits pendant la période de sécheresse, en lien avec l'abaissement du niveau piézométrique (aggravé ici par une surexploitation des eaux souterraines par pompage pour des besoins d'irrigation) ;
- 60% des effondrements sont survenus lors des épisodes de pluies torrentielles qui ont, en quelques mois, mis fin à cette sécheresse.

Ceci est corroboré par l'analyse de 80 autres effondrements karstiques survenus à Zaozhuang, province de Shandong (Chine) entre 1996 et 2000 : 80% d'entre eux sont apparus au tout début de la saison pluvieuse<sup>8</sup>. Dans le Datang (Province de Yicheng et de Guangxi, Chine), on retrouve cette dualité lors de l'analyse de 100 effondrements karstiques recensés au printemps 1986 : 40 sont survenus au cours d'une période de sécheresse (notamment du fait d'un niveau piézométrique bas) et 60 après les pluies torrentielles qui ont suivi. Les principales occurrences de fontis d'origine karstique surviennent donc pendant la période de transition entre une sécheresse prolongée et des pluies intenses et persistantes (Zhao et al., 2011).

Dans le Hunnan (Chine), l'exploitation minière du charbon nécessite le dénoyage permanent d'un aquifère karstique sur plus de 200 km<sup>2</sup>. Depuis 1982, 171 effondrements karstiques sont survenus, préférentiellement au début des cycles d'ennoyage ou de dénoyage des galeries minières (Jiang et al., 2018). Grâce à la surveillance conjointe du niveau d'eau et de la pression d'air dans le karst, les auteurs invoquent un « air blast », dû à la remontée piézométrique intense (>25 m) et brutale liée à de forts épisodes pluvieux (>60 mm par jour). Ce phénomène résulterait de la

---

<sup>8</sup> on rappelle que ces zones sont soumises à un climat de mousson caractérisé par plusieurs mois sans précipitations marquantes, suivis par des épisodes pluvieux intenses et plus ou moins brutaux.

compression de l'air souterrain entre la surface de la nappe en train de remonter et le recouvrement saturé, devenu étanche aux gaz.

Enfin, aux Etats-Unis, l'analyse du cas spécifique de la crue de la rivière Flint par Hyatt & Jacobs (1996), montre que les effondrements karstiques sont essentiellement apparus dans la plaine alluviale. Ils se sont produits pendant et après la décrue d'une très forte inondation induite par une tempête tropicale exceptionnelle. Cependant, quelques effondrements ont pu se produire pendant la crue elle-même, ce que l'on sait parce qu'ils ont affecté des bâtiments.

Cette analyse bibliographique montre le rôle des paramètres hydroclimatiques dans le déclenchement de certains effondrements : sécheresse intense et prolongée induisant un fort rabattement de nappe (parfois aggravée par des pompages) ou épisodes pluvieux importants déclenchant tantôt une remontée rapide de l'eau souterraine, tantôt une inondation brutale en surface. Il semblerait que la plupart des crises d'effondrements surviennent lors de la période de transition entre une longue période de sécheresse et de fortes précipitations. Cependant, elles peuvent également se produire pendant la période de sécheresse, notamment en lien avec des variations piézométriques importantes et/ou brutales, naturelles ou anthropiques.

### **3.3 SCÉNARIOS D'EFFONDREMENT**

Pour les auteurs consultés, la cause majeure de la plupart des apparitions en surface d'effondrements karstiques est donc le changement rapide des conditions hydroclimatiques, lequel peut engendrer :

- un abaissement drastique du niveau piézométrique, ce qui renforce les mécanismes de suffosion<sup>9</sup> et/ou réduit la charge hydraulique dans le karst jusqu'à éventuellement créer une aspiration par succion ; il s'agirait de la principale cause d'effondrement karstique en saison sèche ;
- une augmentation brutale de la teneur en eau des formations de recouvrement dès les premières fortes pluies, ce qui est de nature à accélérer la suffosion par augmentation de la charge hydraulique du recouvrement et/ou par déstabilisation des formations de recouvrement par diminution de leur cohésion ; cela peut aussi faciliter le phénomène d'air blast<sup>10</sup> ;
- la liquéfaction des sables (thixotropie) ou la désagrégation des argiles, au contact de l'eau, notamment en cas de fluctuations du niveau d'eau susceptibles de créer des cycles répétés de saturation-désaturation des terrains.

En France, le changement climatique attendu devrait se traduire par des sécheresses persistantes suivies de pluies fortes et régulières (Al Heib et al., 2008) : cela pourrait donc influencer sur l'occurrence des effondrements karstiques. En outre, en période de sécheresse, ce phénomène pourrait être aggravé par l'abaissement supplémentaire du niveau piézométrique induit par la surexploitation des eaux souterraines, par exemple pour l'irrigation.

Pour Hyatt & Jacobs (1996), le mécanisme déclencheur des effondrements observés près d'Albany (USA) a été la crue exceptionnelle de la rivière Flint, phénomène dont

---

<sup>9</sup> aspiration de particules fines (argiles, limons, sablons) à travers un squelette plus grossier (sables, graviers, galets), susceptible d'engendrer un manque de matière dans le proche sous-sol.

<sup>10</sup> Il s'agirait dans ce cas de la compression de l'air souterrain entre la surface de la nappe en train de remonter et le recouvrement saturé devenu étanche aux gaz.

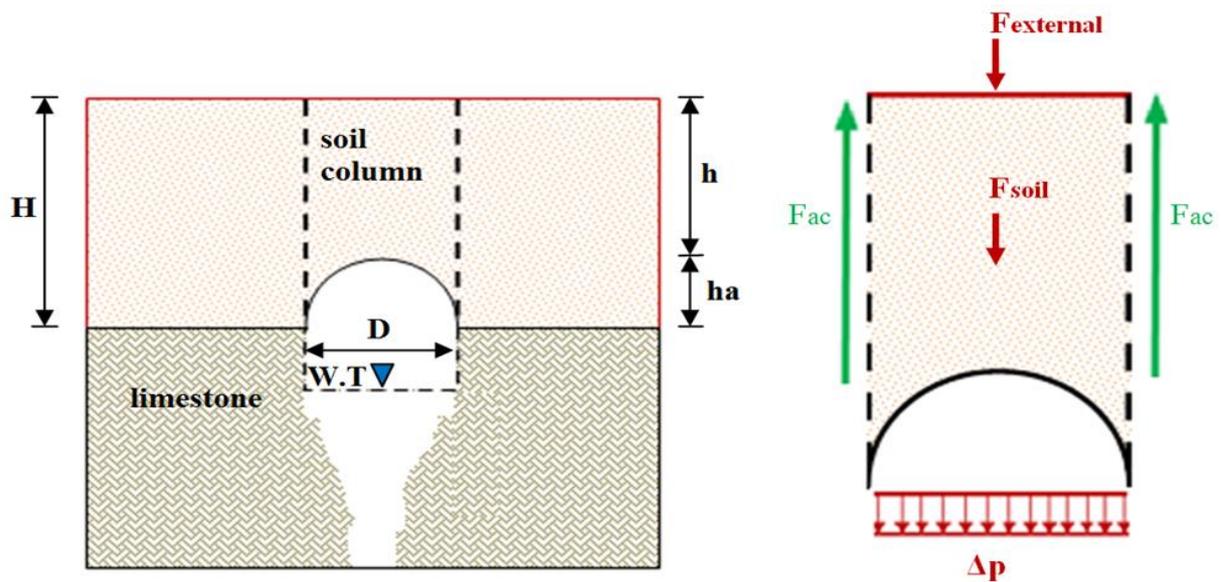
la durée de retour est supérieure à 200 ans. La crue a probablement engendré une remontée rapide du niveau de la nappe, générant une pression interstitielle à l'origine d'une perte de cohésion, ainsi qu'une augmentation de la charge par saturation des terrains de recouvrement : ces deux mécanismes auraient conduit à la « liquéfaction » des sédiments présents dans les cavités.

En laboratoire, Wanfang (1997) a montré que le phénomène de suffosion prend place préférentiellement lorsque le niveau de l'eau souterraine fluctue, notamment lorsqu'un aquifère karstique initialement captif devient libre suite à l'abaissement de la piézométrie. Le maximum de succion se produit alors au début du dénoyage, lorsque la teneur en eau des alluvions est encore forte.

Pour Alboresha (2016), qui a spécifiquement étudié le cas du Val d'Orléans, l'existence de cavités karstiques à la base d'une formation alluviale est de nature à déstabiliser celle-ci. Il peut alors se former une cloche de fontis qui peut remonter jusqu'en surface et provoquer un effondrement ou un affaissement. Il est toutefois important de noter la différence d'échelles de temps entre les divers processus en jeu :

- la durée de creusement d'une cavité karstique au sein des calcaires, qui est de l'ordre de quelques milliers à dizaines de milliers d'années (Bakalowicz, 2018) ou de quelques dizaines à centaines de milliers d'années (Kaufmann & Romanov, 2016)
- la durée de remontée de la cloche de fontis au travers du recouvrement meuble, qui varie énormément selon les auteurs mais qui est inférieure de 5 à 10 ordres de grandeur à la précédente ; suivant les contextes, on parle ainsi de durées de quelques mois (Ardau et al., 2007), quelques semaines (Intrieri et al., 2015 ; Ardau et al., 2007), quelques jours (Kaufmann & Romanov, 2016 ; Ardau et al., 2007), voire de seulement quelques heures (DelleRose et al., 2004) ;
- l'apparition finale du fontis en surface qui est le phénomène étudié ici et dont la durée serait inférieure à une journée, bien que les observations fiables soient rares ; on sait par exemple que les effondrements représentés sur la Figure 5 sont survenus en seulement quelques heures et ce, sans indices précurseurs significatifs.

Alboresha utilise un modèle analytique simple pour estimer le degré d'instabilité des formations de recouvrement meubles. Il suppose qu'à la verticale d'une cavité karstique développée à l'interface karst-recouvrement, se découpe un cylindre de même diamètre (Figure 9a). Sa stabilité peut ainsi être mesurée par le facteur de sécurité (« Safety Factor » ou « SF ») qui est le ratio des forces de frottements de ce cylindre contre l'encaissant (« Forces anti-collapse » ou «  $F_{ac}$  ») aux forces d'effondrement (« Forces collapse » ou «  $F_c$  »). Ces dernières (Figure 9b) sont la somme du poids du cylindre de sol au-dessus de la cavité ( $F_{soil}$ ), de la dépression causée par la baisse du niveau d'eau dans la cavité ( $\Delta p$ ) et de forces dites externes ( $F_{external}$ ) comme le poids induit par une digue et/ou par une lame d'eau en cas d'inondation.



a) Schéma général de l'instabilité induite par une cavité

b) Analyse mécanique de la stabilité

Figure 9. Schéma de l'instabilité d'une cavité karstique recouverte d'une formation meuble (Alboresha, 2016)

Légende : limestone) calcaire, soil column = colonne de sol, W.T. = niveau d'eau, D = diamètre, H = épaisseur de recouvrement (voir les autres traductions dans le texte)

Selon ce scénario, la modification de l'une et/ou l'autre de ces forces peut accroître l'instabilité du système, comme par exemple : l'abaissement rapide du niveau piézométrique (augmentation de la dépression), l'augmentation du poids de la colonne de sol due à l'infiltration des précipitations, l'augmentation des forces externes par construction d'une digue ou en cas de forte crue, ou encore la lubrification du contact entre la colonne de sol et l'encaissant par percolation profonde des précipitations.

On retrouve ici tout ou partie des causes précédemment évoquées dans la littérature. Au final, les paramètres hydroclimatiques les plus influents semblent être les précipitations intenses, les étiages soutenus, les inondations et les fortes variations piézométriques. Les températures ne semblent pas jouer de rôle prédominant mais elles influencent en fait les précipitations efficaces<sup>11</sup>, c'est-à-dire celles qui contribuent à la recharge des nappes, et donc indirectement les niveaux piézométriques.

<sup>11</sup> Elles correspondent à la partie non évapotranspirée des précipitations, calculée par des formules empiriques (dont celle de Penman-Monteith) faisant intervenir la température, la vitesse du vent et/ou le rayonnement solaire du lieu considéré. En France, à l'échelle annuelle, elles représentent environ 40% des précipitations totales (<https://www.eaufrance.fr/les-precipitations-efficaces>).

## **4. ANALYSE DE LA BASE DE DONNÉES DE FONTIS DU VAL D'ORLÉANS**

### **4.1 PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES**

La base de données actuellement disponible renferme 651 fontis répertoriés dans le Val d'Orléans de 1856 à 2016. Ce recensement repose sur la compilation de données de diverses origines : banque de données nationale des cavités souterraines abandonnées non minières (<http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/cavites-souterraines/#/>), inventaires communaux ou départementaux de cavités souterraines (dont le « Fonds Guillon », établi au XIX<sup>e</sup> siècle et disponible aux archives départementales du Loiret), déclarations spontanées de particuliers, analyse des fiches d'intervention sur site du Cerema, etc.

Parmi les fontis recensés, 637 possèdent des coordonnées géographiques ou des informations permettant de les localiser (par exemple, par rapport grâce aux « points kilométriques » mesurés le long des digues) et 14 n'ont pas pu être précisément localisés : ces derniers sont pour la plupart des fontis anciens, survenus entre 1893 et 1907, probablement situés dans le Val d'Orléans.

La grande majorité (597) des fontis géoréférencés se trouve dans l'emprise de la plaine alluviale inondable mais 40 appartiennent à une zone périphérique de 2 km de largeur, supposée être en relation directe avec les écoulements karstiques du Val d'Orléans. Ces derniers n'ont pas été pris en compte lorsqu'ils ne se trouvaient pas en zone de recouvrement par un matériau meuble (alluvions, colluvions, loess, etc.).

Enfin, en ce qui concerne leurs dates de signalement, données sur lesquelles repose la présente étude, seuls 91 fontis sont datés à la journée, soit 14% du nombre total de fontis recensés (Tableau 2). Cependant, on ne dispose pas d'éléments permettant de confirmer formellement qu'ils sont bien apparus le jour même où ils ont été signalés : cela reste une hypothèse de travail dont on pourra s'affranchir en raisonnant sur de longues périodes de temps (plusieurs semaines à plusieurs mois).

Tableau 2. Précision des dates de signalement de fontis

Précision de la date	Nombre de fontis	Pourcentage
Date inconnue	481	74%
Décennie	1	0%
Année	40	6%
Saison	4	1%
Mois	33	5%
Semaine	1	0%
Jour	91	14%

### **4.2 ANALYSE DES SAISONS D'OUVERTURE DE FONTIS**

Une première analyse statistique portant sur les 82 fontis datés survenus au cours des 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> siècles montre qu'ils ont tendance à apparaître en salves d'une durée moyenne de 4 jours, pouvant exceptionnellement aller jusqu'à 19 jours (Figure 10).

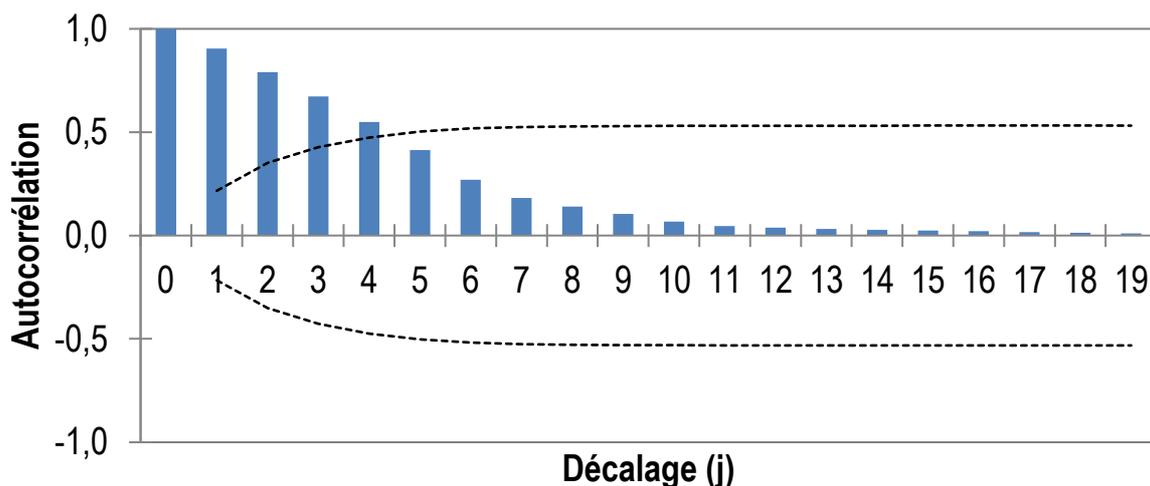


Figure 10. Autocorrélogramme des dates d'apparition de fontis

En raisonnant au pas de temps mensuel, on dispose de 125 fontis datés au mois près et répartis sur un total de 101 jours. Une première analyse de la répartition des mois d'apparition de fontis montre que les plus représentés sont, par ordre d'importance, octobre, juin, avril, novembre et mars (Figure 11) : un peu plus des deux tiers des fontis surviennent ainsi au cours de l'automne (34%) et du printemps (34%), le tiers restant se répartissant entre l'hiver (18%) et l'été (14%). Toutefois, ces chiffres ne représentent qu'un cinquième des fontis recensés et ne portent que sur 24% des années recensées : ainsi, on notera qu'aucun fontis n'a été déclaré pendant 122 des 161 années couvertes par la base de données.

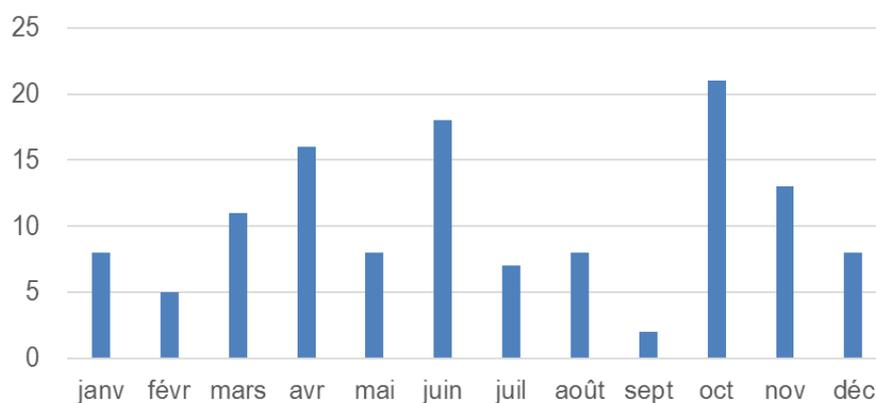


Figure 11. Répartition des occurrences de fontis par mois

La Figure 12, réalisée à l'échelle saisonnière, montre l'existence de probables corrélations entre les occurrences de fontis et certains paramètres hydroclimatiques, notamment les précipitations qui sont plus abondantes en automne et au printemps. Ces corrélations sont résumées dans le Tableau 3.

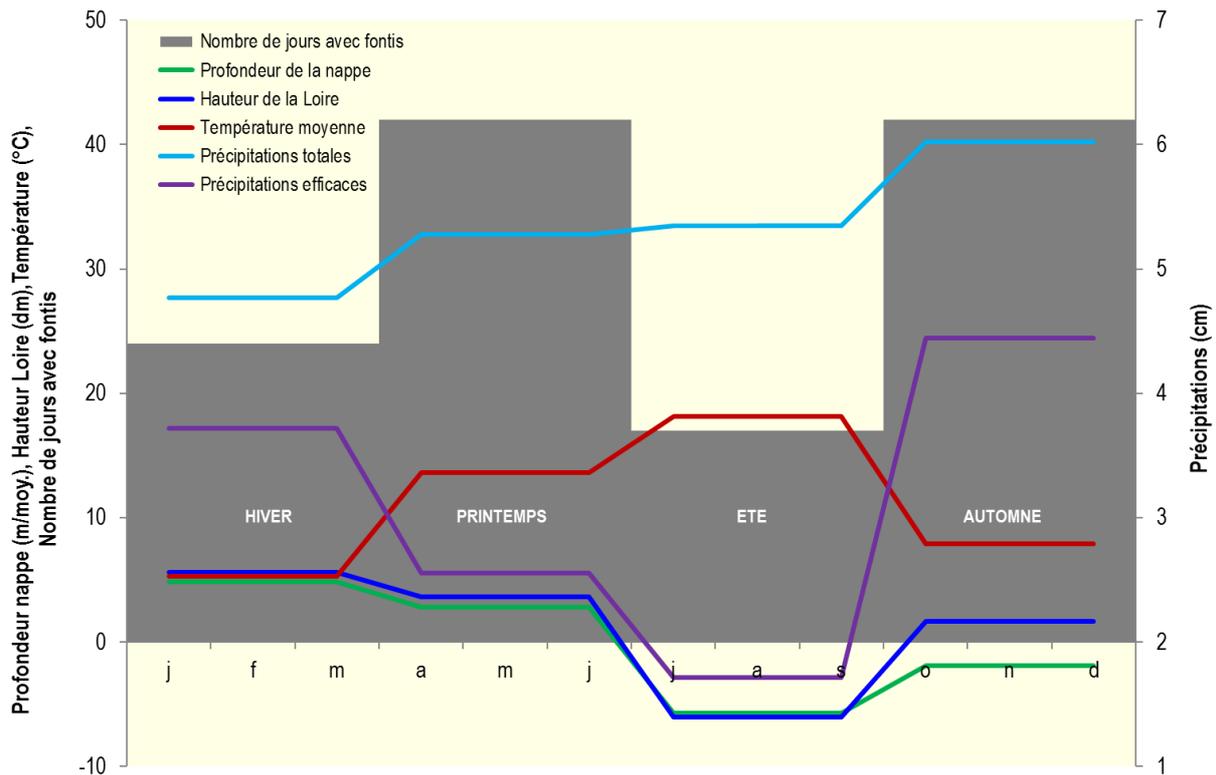


Figure 12. Comparaison des occurrences de fontis dans le Val d'Orléans avec les paramètres hydroclimatiques

Note explicative :

- le niveau de la nappe est exprimé en écart à sa moyenne pluriannuelle mesurée au piézomètre disponible le plus proche (Saint-Cyr-en-Val) ;
- la hauteur de la Loire est exprimée par rapport au repère du Pont Royal à Orléans ;
- les données météorologiques sont issues de la station d'Orléans-Bricy ; les précipitations efficaces ( $P_{eff}$ ) tracées ici sont des approximations basées sur le principe de tracé du diagramme ombrothermique de Gaussen, à savoir :  $P_{eff} = P_{tot} - 2 T$  où  $P_{tot}$  représente les précipitations totales en mm et  $T$  la température en °C.

Tableau 3. Synthèse des corrélations entre paramètres hydroclimatiques et occurrences de fontis à l'échelle saisonnière

Légende : corrélation faible (+) à forte (++) , anticorrélation faible (-) à forte (--), pas de corrélation (°)

Paramètres→ Saisons ↓	Niveau de la nappe	Débit de la Loire	Précipitations		Température moyenne
			Totales	Efficaces	
Hiver	++	++	-	+	--
Printemps	+	+	°	-	+
Eté	--	--	°	--	++
Automne	-	-	+	++	-

La lecture de ce tableau permet de visualiser les principaux paramètres hydroclimatiques qui caractérisent chaque saison :

- pour l'automne (34% des fontis), l'importance des précipitations totales et notamment des précipitations efficaces, les autres paramètres étant bas ;
- pour l'hiver (18% des fontis), des températures basses mais également des niveaux de nappe et de Loire très élevés ;
- pour le printemps (34% des fontis), des niveaux de nappe élevés mais des précipitations faibles ;
- pour l'été (14% des fontis), des températures hautes, des niveaux de nappe et de Loire très bas, ainsi que de très faibles précipitations efficaces.

On constate que ces mécanismes sont les mêmes que ceux issus de la synthèse bibliographique portant sur des pays où ils ont été étudiés plus en détail. La température ne semble pas jouer de rôle majeur direct, puisqu'elle est maximale (été) ou minimale (hiver) lors des périodes les moins favorables à l'apparition de fontis. On ne peut toutefois pas nier son rôle indirect dans le calcul des précipitations efficaces, lesquelles contribuent à contrôler le niveau de la nappe et, dans une moindre mesure, la hauteur d'eau dans la Loire.

Perrin et al. (2016) ajoutent également à cette liste l'amplitude des battements de nappe et la position de la nappe par rapport à l'interface alluvions-calcaire, mécanismes agissant sur le soutirage par suffosion. En outre, ils précisent que les fontis de grand diamètre sont nécessairement liés à la rupture du toit de vastes vides karstiques. Cela correspond à des événements assez rares<sup>12</sup> impliquant un mode de rupture brutale dans lequel le recouvrement ne semble pas jouer de rôle majeur.

---

<sup>12</sup> L'analyse de la base de données de fontis montre que, sur les 137 fontis pour lesquels on dispose d'une dimension, seuls 8% dépassent 10 m de diamètre.

## **5. SÉLECTION DES PARAMÈTRES HYDROCLIMATIQUES REPRÉSENTATIFS**

La sélection des paramètres hydroclimatiques représentatifs nécessite de répondre à trois questions :

- 1) quels paramètres choisir parmi ceux disponibles ?
- 2) quel(s) indicateur(s) choisir pour chaque paramètre ?
- 3) sur quelle période de temps calculer ces indicateurs ?

### **5.1 CHOIX DES PARAMÈTRES HYDROCLIMATIQUES**

Les paramètres hydroclimatiques disponibles sont nombreux :

- parmi les paramètres hydro(géo)logiques, les débits de la Loire et du Loiret, les hauteurs d'eau de la Loire et du Loiret, les niveaux piézométriques de la nappe alluviale et de la nappe karstique, etc.
- parmi les paramètres climatiques, les précipitations, les températures, l'hygrométrie, l'anémométrie, l'ensoleillement, etc.

Au regard de l'analyse de la bibliographie et des données précédentes, les paramètres finalement sélectionnés comme pertinents sont au nombre de quatre :

- deux paramètres hydrologiques, le débit de la Loire (Q) et le niveau de l'aquifère karstique (N) ;
- deux paramètres climatiques, les précipitations (P) et les températures (T).

### **5.2 CHOIX DES INDICATEURS HYDROCLIMATIQUES**

Cette question est plus complexe car il s'agit de savoir quels indicateurs vont représenter au mieux ces paramètres. Chaque paramètre peut en effet être décliné en indicateurs dits « de tendance centrale » (moyenne, médiane, mode, etc.) ou en d'autres dits « de dispersion » (maximum, minimum, écart-type<sup>13</sup>, fréquence de dépassement d'un seuil donné, etc.). Afin de mixer ces différents types d'informations, on a proposé de calculer, pour chaque paramètre hydroclimatique X, les 5 valeurs suivantes sur la période de temps retenue :

- une valeur moyenne ( $X_{MOY}$ ), moyenne des valeurs moyennes journalières ;
- une valeur minimale ( $X_{MIN}$ ), minimum des valeurs minimales journalières ;
- une valeur maximale ( $X_{MAX}$ ), maximum des valeurs maximales journalières ;
- le nombre de jours où un seuil maximal donné a été atteint ( $JX_{MAX}$ ) ;
- le nombre de jours où un seuil minimal donné a été atteint ( $JX_{MIN}$ ).

Au final, on dispose ainsi des 20 indicateurs hydroclimatiques suivants :

- pour les précipitations P :  $P_{MOY}$ ,  $P_{MIN}$ ,  $P_{MAX}$ ,  $JP_{MIN}$  et  $JP_{MAX}$  ;
- pour les températures T :  $T_{MOY}$ ,  $T_{MIN}$ ,  $T_{MAX}$ ,  $JT_{MIN}$  et  $JT_{MAX}$  ;
- pour les niveaux de nappe N :  $N_{MOY}$ ,  $N_{MIN}$ ,  $N_{MAX}$ ,  $JN_{MIN}$  et  $JN_{MAX}$  ;
- pour les débits de Loire Q :  $Q_{MOY}$ ,  $Q_{MIN}$ ,  $Q_{MAX}$ ,  $JQ_{MIN}$  et  $JQ_{MAX}$  .

---

<sup>13</sup> Le choix s'est porté sur des valeurs extrêmes (minimum, maximum, dépassement d'un seuil) plutôt que sur l'écart-type car elles ne nécessitent pas de vérifier que la répartition fréquentielle des données obéit bien à une loi de distribution statistique, par exemple de type gaussien.

La valeur des seuils minimaux et maximaux a été établie pour chaque paramètre hydroclimatique par rapport à sa loi de distribution. On a choisi de considérer comme seuil minimal le percentile 10 (pour lequel 10% des valeurs sont en dessous et 90% au-dessus) et comme seuil maximal le percentile 90 (pour lequel 90% des valeurs sont en dessous et 10% au-dessus).

Cela permet ainsi de travailler avec 10% des valeurs les plus basses et les plus hautes de chaque paramètre (Figure 13). On fait donc, implicitement l'hypothèse que seules les valeurs anormalement basses ou hautes d'un paramètre donné sont susceptibles d'avoir un lien avec l'apparition de fontis comme mis en évidence dans la bibliographie.

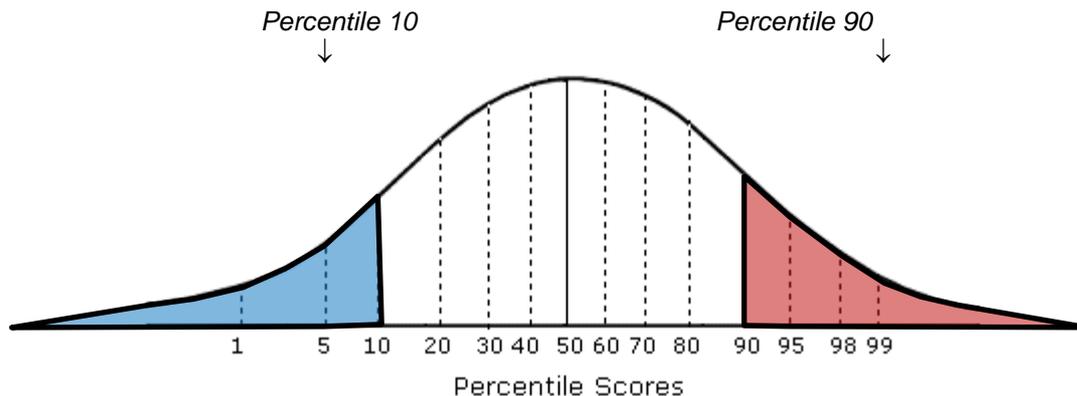


Figure 13. Choix des seuils minimal (bleu) et maximal (rouge)

### 5.3 ACQUISITION DES DONNÉES ET CALCUL DES SEUILS

Les données ont été acquises (voir localisation sur la Figure 14) :

- auprès de Météo-France, à la station météorologique d'Orléans-Bricy, pour les paramètres climatiques (température et précipitations) ;
- auprès de EauFrance, à la station limnimétrique d'Orléans-Pont Royal, pour les débits de la Loire ;
- auprès du BRGM, au piézomètre de St-Cyr-en-Val, pour les niveaux de la nappe.

On a tracé ci-après l'histogramme et l'autocorrélogramme de chaque paramètre. L'autocorrélogramme est le graphe de la fonction d'autocorrélation qui mesure la corrélation d'un paramètre à un temps donné avec ses valeurs antérieures ou postérieures. Si un système est relativement inertiel, c'est-à-dire si son influence perdure sur le long terme, son coefficient d'autocorrélation diminuera lentement au cours du temps. Dans le cas contraire, si les valeurs successives prises par un paramètre donné n'ont que peu de liens entre elles, son coefficient d'autocorrélation diminuera rapidement. Dénommé  $r(t)$ , ce coefficient d'autocorrélation a ici été calculé entre la valeur moyenne d'un paramètre prise au jour  $t$  et celle prise au jour  $t+n$ ,  $n$  variant par pas d'une unité entre 1 et 100. Cela revient à chercher la valeur  $n$  du décalage temporel en dessous duquel le coefficient d'autocorrélation  $r(t_n)$  ne se distingue plus du bruit de fond. Pour cela, on a utilisé le seuil de significativité donné par le logiciel utilisé (XLSTAT) pour chaque valeur calculée. En dessous de ce seuil, qui varie en fonction du décalage temporel et de l'effectif de données, le coefficient d'autocorrélation n'est plus considéré comme significatif et ne peut plus se différencier du bruit de fond. On propose donc de retenir cette valeur comme estimation de l'effet mémoire de chaque paramètre hydroclimatique.

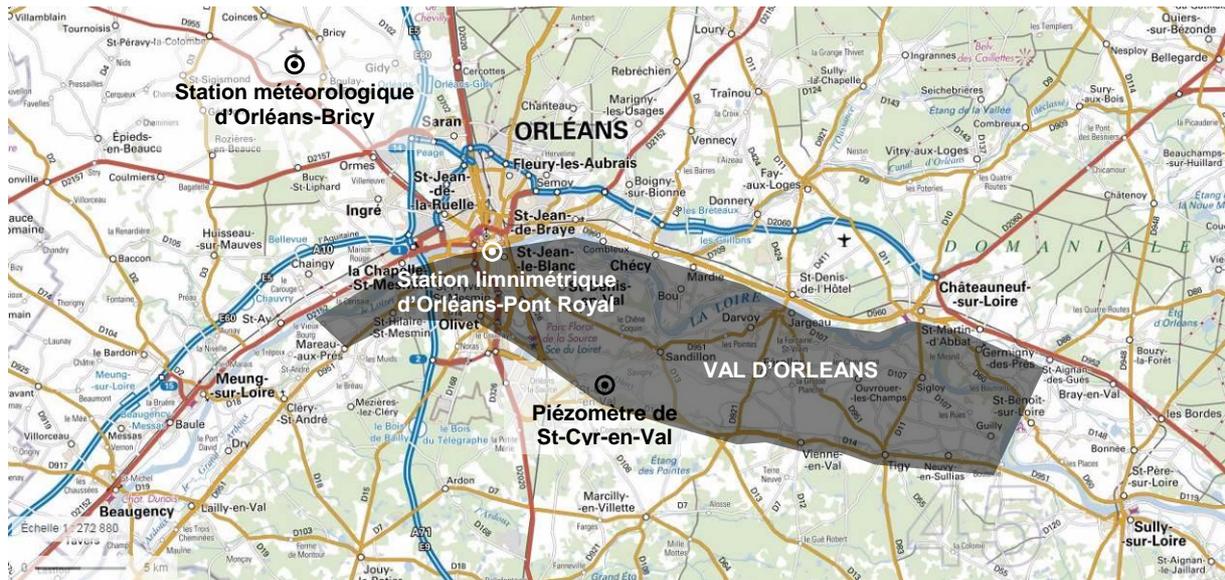


Figure 14. Localisation des stations de mesure des paramètres hydroclimatiques à proximité du Val d'Orléans (en grisé)

### 5.3.1 Précipitations journalières

Le calcul des seuils haut et bas résulte de l'interpolation des données issues de la fiche climatologique établie par MétéoFrance à la station d'Orléans-Bricy pour la période 1981-2010, à savoir :

- seuil bas : 0,0 mm/jour ;
- seuil haut : 6,4 mm/jour.

Le Tableau 4 présente les caractéristiques des trois années choisies en termes de précipitations mesurées au pas de temps journalier : les années 2010 et 2016 sont proches de la normale (calculées par Météo-France sur la période 1981-2010). On notera que l'année 2013 se singularise par un cumul de précipitations supérieur à la normale de 19% et par une valeur de précipitations journalières maximales qui atteint pratiquement le record trentennal.

Tableau 4. Caractéristiques des précipitations (mm) en 2010, 2013 et 2016

Critère ↓	Période →	2010	2013	2016	1981-2010
Cumul (annuel)		628,5	766,5	652,0	642,5
Minimum		0,0	0,0	0,0	0,0
Moyenne		1,7	2,1	1,8	1,8
Maximum		29,0	30,3	63,4	64,4
Ecart-type		4,0	4,8	4,8	-

En ce qui concerne l'année 2010, l'histogramme des précipitations journalières montre une distribution très irrégulière, de type log-normal (Figure 15), du fait qu'il y a eu 198 jours sans précipitations : la classe [0;1[ possède à elle seule une fréquence de 72%. Le seuil bas a donc été atteint 54% du temps alors que le seuil haut a été dépassé dans 8% des cas. Les précipitations maximales ont été de 29 mm le 02/07/2010.

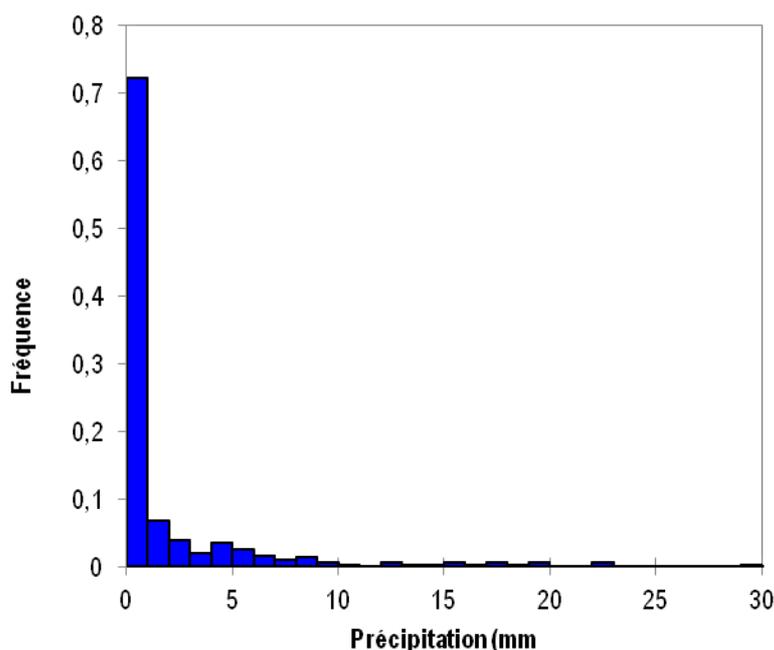


Figure 15. Histogramme des précipitations de l'année 2010 à Orléans-Bricy

L'autocorrélogramme des précipitations journalières de l'année 2010 montre une décroissance très rapide (Figure 16) : l'effet mémoire correspond à seulement 1 jour alors qu'on aurait pu penser que, soumise à un climat océanique, la région voit défiler des épisodes pluvieux plurijournaliers

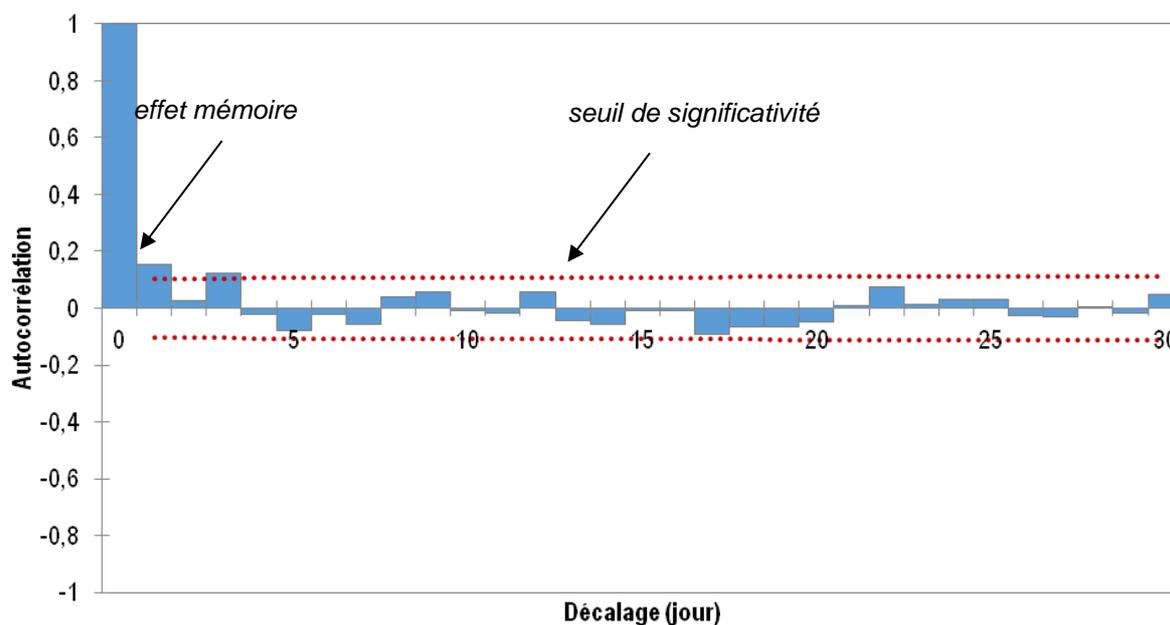


Figure 16. Autocorrélogramme des précipitations journalières à Orléans en 2010

### 5.3.2 Températures journalières

Le Tableau 5 présente les caractéristiques des trois années choisies en termes de températures mesurées au pas de temps journalier. Les années 2013 et 2016 sont proches de la normale (calculée par MétéoFrance sur la période 1981-2010), alors que l'année 2010 est une année « froide : les températures moyenne, minimale et maximale sont nettement plus basses que la normale.

Tableau 5. Caractéristiques des températures (°C) en 2010, 2013 et 2016

Critère ↓	Période →	2010	2013	2016	1981-2010
Moyenne (annuelle)		10,4	11,1	11,6	11,3
Minimum		-15,3	-7,5	-5,8	-19,8
Maximum		33,8	34,4	37,0	40,3
Ecart-type		7,5	6,8	6,5	-

On a distingué le comportement des températures minimales et maximales car elles peuvent influencer différemment sur la stabilité du recouvrement des cavités :

- une longue période (plusieurs jours et nuits d'affilée) de températures minimales négatives peut conduire au gel du sol sur une certaine profondeur, d'ordre décimétrique ; lors du dégel, il peut alors se produire temporairement un phénomène de liquéfaction susceptible de fragiliser la couche superficielle de sol ;
- des températures maximales élevées peuvent engendrer un phénomène de retrait des argiles constitutives des formations superficielles, ce qui peut les fragiliser ou favoriser l'infiltration d'eau de précipitations ou de ruissellement.

Les températures minimales de l'année 2010 varient de -15°C à 19 °C avec une moyenne de 5,7 °C. L'histogramme de ces températures minimales met en évidence deux pics entre 2°C et 6 °C et entre 12°C et 14 °C (Figure 17a) : le premier correspond aux températures hivernales, le second aux températures printanières et automnales. Les températures minimales sont négatives plus de 20% du temps, soit 74 jours. On notera également l'existence d'un petit pic entre -12 et -16 °C qui n'a duré que 3 jours, mais dont le rôle géomécanique pourrait avoir été significatif (gel-dégel du sol).

Les températures maximales de l'année 2010 varient entre -4°C et 34 °C avec une moyenne de 15,0 °C. L'histogramme de ces températures montre également une courbe à tendance bimodale (Figure 17b) : un premier pic, qui caractérise la période hivernale, apparaît entre 0°C et 6°C et un second entre 16°C et 22 °C. On n'observe pas de pics de températures élevées en période estivale avec seulement 9 jours de températures supérieures ou égales à 30 °C.

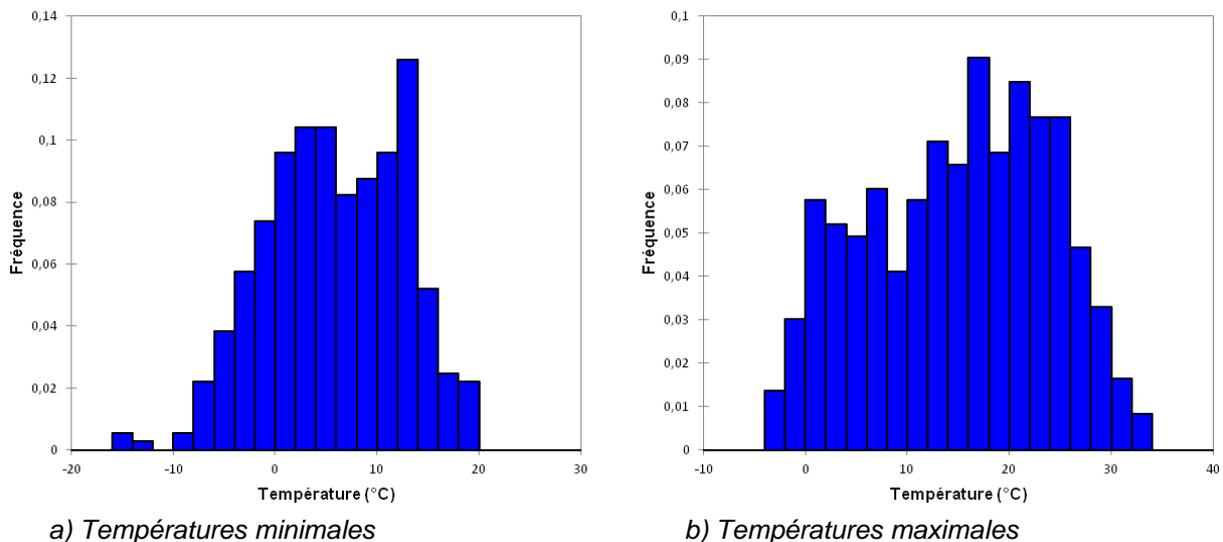


Figure 17. Histogramme des températures journalières à Orléans en 2010

L'analyse de l'autocorrélogramme des températures journalières moyennes de l'année 2010 montre une décroissance assez rapide, durant environ 12 jours, suivie d'une légère reprise culminant vers 20 jours (Figure 18). L'effet-mémoire a été estimé à 29 jours.

En ce qui concerne les seuils haut et bas, on a également interpolé les données issues de la fiche climatologique établie par MétéoFrance à la station d'Orléans-Bricy pour la période 1981-2010, à savoir :

- seuil bas : -2,0 °C ;
- seuil haut : 26,7 °C.

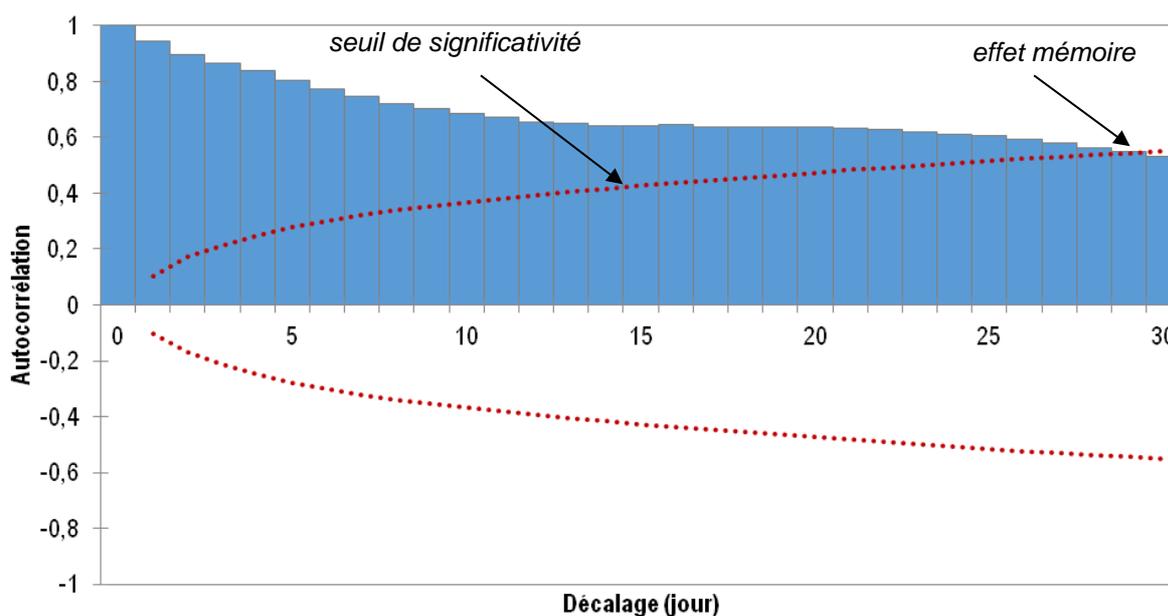


Figure 18. Autocorrélogramme des températures moyennes à Orléans en 2010

### 5.3.3 Débit journalier de la Loire

Le Tableau 6 présente les caractéristiques des trois années choisies en termes de débit de la Loire mesurés au pas de temps journalier : les années 2010 et 2016 sont proches de la normale (calculée par la Banque Hydro sur la période 1964-2017), mais leurs débits minimaux d'étiage sont plus élevés et leurs débits maximaux de crue plus faibles. L'année 2013 se singularise par un débit moyen supérieur de 27% à la normale, mais toujours par un débit maximal de crue plus faible.

Tableau 6. Caractéristiques des débits de la Loire (m<sup>3</sup>/s) en 2010, 2013 et 2016

Critère ↓	Période →	2010	2013	2016	1964-2017
Minimum		63	79	53	38
Moyenne		343	433	350	341
Maximum		1 510	1 970	1 650	3 230
Ecart-type		257	322	303	-

En ce qui concerne l'année 2010, l'histogramme des débits journaliers montre une distribution de type log-normale mais bimodale : on observe en effet un pic principal entre 100 et 150 m<sup>3</sup>/s et un pic secondaire entre 450 et 500 m<sup>3</sup>/s (Figure 19). Les débits faibles (<50 m<sup>3</sup>/s) sont par ailleurs inexistant cette année-là.

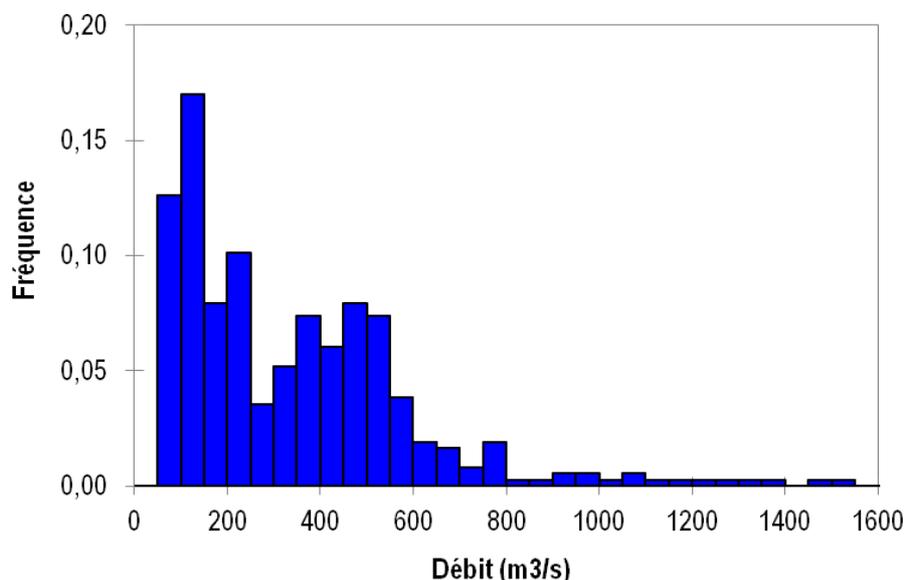


Figure 19. Histogramme des débits journaliers de la Loire à Orléans en 2010

L'analyse de la chronique des débits journaliers de la Loire pendant l'année 2010 montre également une double structure : une diminution assez rapide de l'autocorrélation jusqu'à environ 10 jours puis une reprise avec un pic à 15 jours (Figure 20). L'effet-mémoire a ici été estimé à 19 jours.

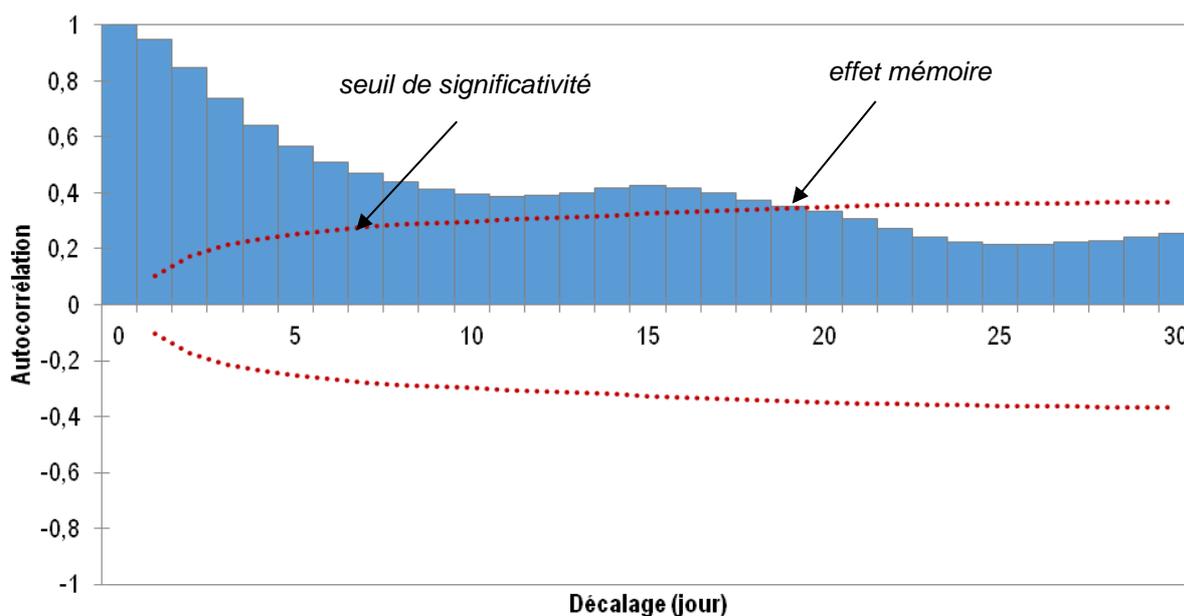


Figure 20. Autocorrélogramme des débits journaliers de la Loire en 2010

En ce qui concerne les seuils haut et bas, on a utilisé les données de la fiche de synthèse établie par EauFrance à la station limnimétrique d'Orléans-Pont Royal pour la période 1964-2017, à savoir :

- seuil bas : 65,5 m<sup>3</sup>/s ;
- seuil haut : 755 m<sup>3</sup>/s.

### 5.3.4 Niveau piézométrique journalier de la nappe

On ne dispose de données piézométriques sur une longue période qu'au piézomètre de La commanderie, situé à Saint-Cyr-en-Val, en bordure sud du Val d'Orléans (Figure 21). Ce piézomètre est suivi par le BRGM depuis 1994 alors que ceux situés directement dans le Val n'ont été suivis que sporadiquement.

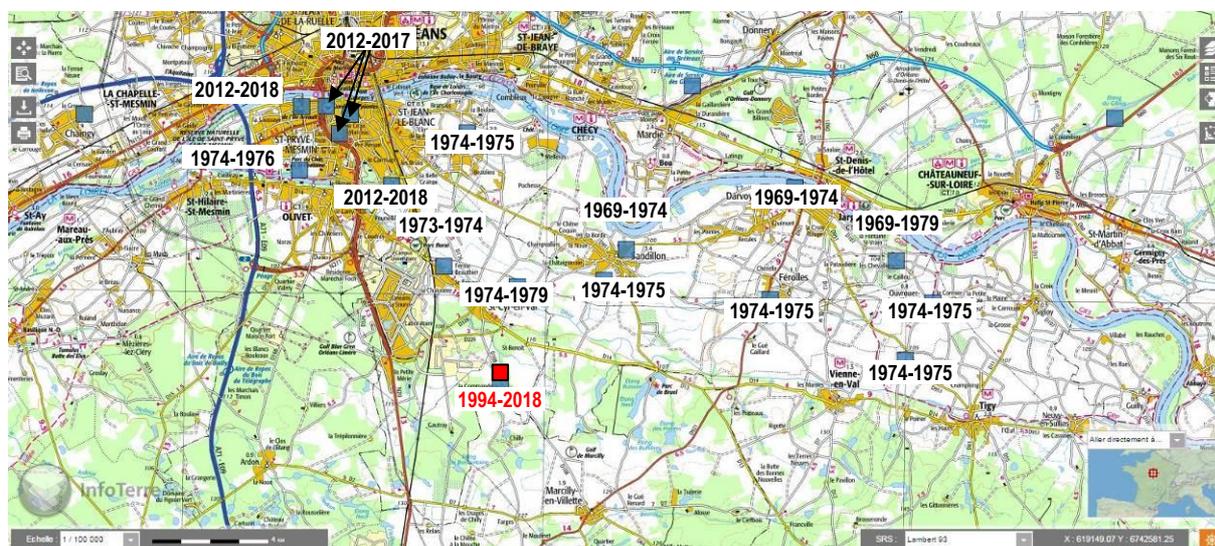


Figure 21. Localisation et période de suivi des piézomètres du Val d'Orléans (d'après Infoterre) - Le piézomètre de St-Cyr-en-Val est en rouge

Cet ouvrage, profond de 72 m, capte la partie inférieure de la nappe des calcaires de Beauce et non directement l'aquifère karstique qui est à l'origine probable des fontis : il est en effet crépiné dans le calcaire d'Etampes, situé sous la molasse du Gâtinais. Son niveau piézométrique moyen (92 m NGF) est toutefois comparable à la cote de la Loire et de sa nappe alluviale, qui se trouvent entre 90 et 100 m NGF. Néanmoins, il est possible que la nappe captée ici, plus profonde que celle qui nous intéresse directement, soit moins réactive aux événements pluviométriques ainsi qu'aux variations de niveau de la Loire.

Le Tableau 7 présente les caractéristiques des trois années choisies, en termes de niveaux piézométriques de la nappe des calcaires de Beauce dans ce piézomètre, mesurés au pas de temps journalier : les niveaux moyens sont proches de la normale (calculée d'après les données ADES<sup>14</sup> sur la période 1994-2017), mais le battement annuel de la nappe est moins important.

<sup>14</sup> Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraine  
Ineris DRS-19-179206-03140A

Tableau 7. Caractéristiques des niveaux piézométriques de la nappe des calcaires de Beauce (m NGF) en 2010, 2013 et 2016

Critère ↓	Période →	2010	2013	2016	1994-2017
Minimum journalier (m NGF)		91,0	90,1	90,8	90,0
Moyenne journalière (m NGF)		91,4	91,5	91,5	91,4
Maximum journalier (m NGF)		91,8	92,3	92,6	93,2
Battement annuel (m)		0,8	2,2	1,8	3,2

En ce qui concerne l'année 2010, l'histogramme des niveaux piézométriques journaliers montre une distribution unimodale avec un pic entre 91,2 et 91,3 m NGF (Figure 22).

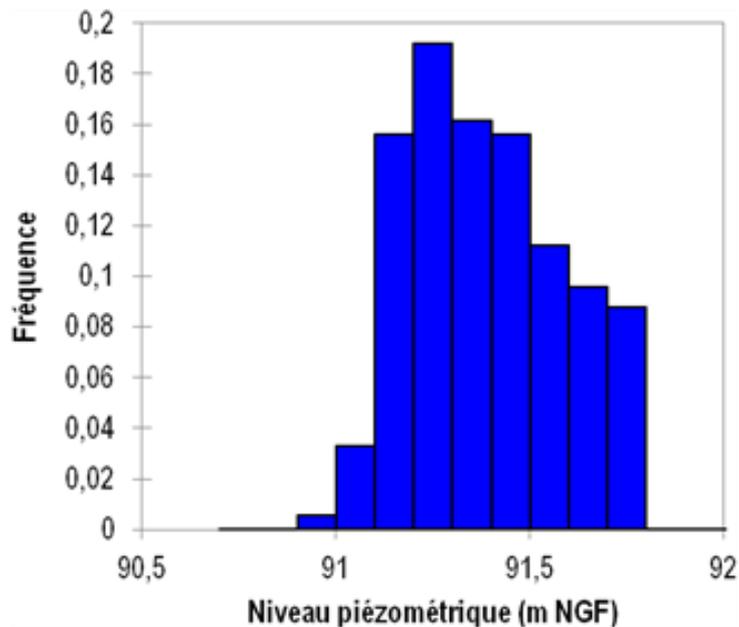


Figure 22. Histogramme des niveaux piézométriques de la nappe de Beauce à Saint-Cyr-en-Val en 2010

L'analyse de la chronique des niveaux de nappe journaliers de l'année 2010 montre que l'autocorrélation s'atténue lentement et de manière très régulière (Figure 23). L'effet-mémoire est estimé à 25 jours.

En ce qui concerne les seuils haut et bas, on a utilisé les données de la chronique piézométrique établie par le BRGM au piézomètre de St-Cyr-en-Val pour la période 1994-2017, à savoir :

- seuil bas : 90,7 m NGF ;
- seuil haut : 92,0 m NGF.

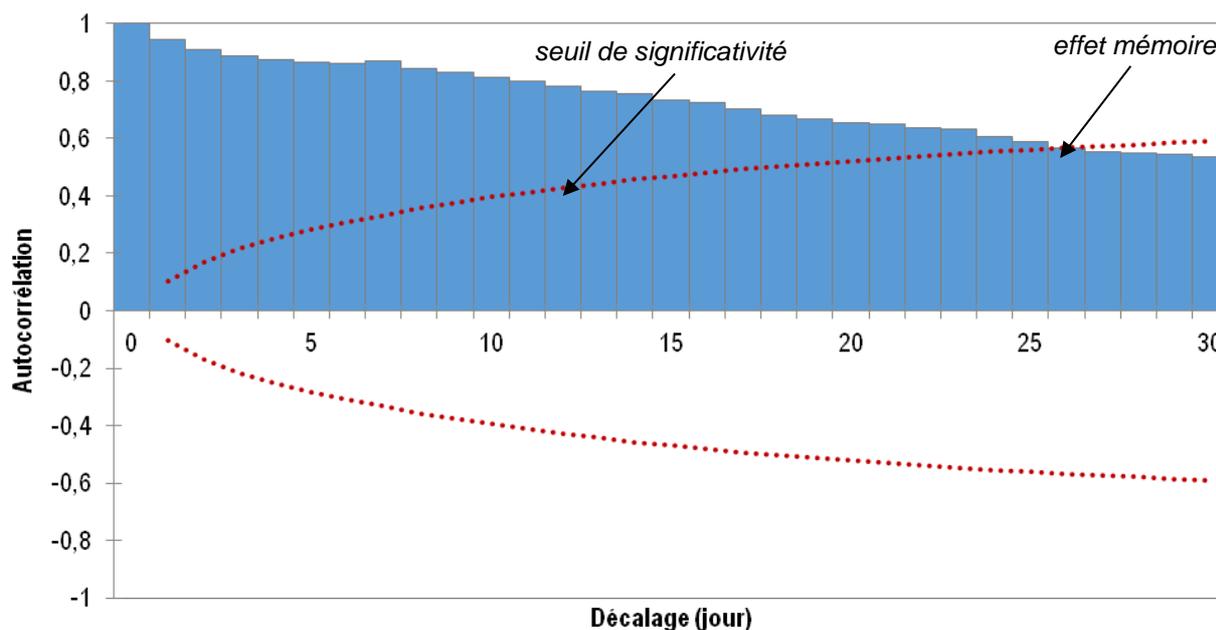


Figure 23. Autocorrélogramme des niveaux journaliers de la nappe en 2010

#### 5.4 CHOIX DE LA PÉRIODE DE CALCUL

La durée pendant laquelle on calculera les indicateurs précédemment définis a été assimilée à la durée de « l'effet mémoire » de chaque paramètre hydroclimatique, tel que défini ci-avant.

Pour l'obtenir, on a tracé l'autocorrélogramme de chaque paramètre qui correspond au graphe de la fonction d'autocorrélation. Celle-ci permet de mesurer la dépendance de la valeur d'un paramètre à un temps donné avec ses valeurs antérieures. Cette valeur représente ainsi la « mémoire du système ». Si un système est relativement inertielle, c'est-à-dire que son influence perdure sur le long terme, son coefficient d'autocorrélation diminuera lentement au cours du temps : dans le cas contraire, si les valeurs successives prises par un paramètre donné n'ont que peu de liens entre elles, son coefficient d'autocorrélation diminuera rapidement. Dénommé  $r(t)$ , ce coefficient d'autocorrélation a ici été calculé entre la valeur d'un paramètre prise au jour  $t$  et celle prise au jour  $t+n$ ,  $n$  variant par pas d'une unité entre 1 et 100.

Concrètement, cela revient à chercher la valeur  $n$  du décalage temporel en dessous duquel le coefficient d'autocorrélation  $r(t_n)$  ne se distingue plus du bruit de fond. Pour cela, on a utilisé le seuil de significativité donné par le logiciel pour chaque valeur calculée. En dessous de ce seuil, variant en fonction du décalage temporel et de l'effectif de données, le coefficient d'autocorrélation n'est plus considéré comme significatif et ne peut donc plus se différencier du bruit de fond. On propose, donc, de retenir cette valeur comme estimation de l'effet mémoire de chaque paramètre hydroclimatique et de la durée pendant laquelle seront calculés les indicateurs précédemment définis.

Trois années, particulièrement riches en fontis (datés à la journée) et pour lesquelles on a pu acquérir les valeurs journalières de chacun des paramètres hydroclimatiques sélectionnés, ont été prises en compte pour le calcul de cet effet mémoire. Il s'agit des années 2010 (10 fontis), 2013 (15 fontis) et 2016 (16 fontis). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 8 et les autocorrélogrammes<sup>15</sup> présentés dans le chapitre suivant.

A l'exception des précipitations qui sont très peu autocorrélées (effet mémoire de 1 à 2 jours), les autres paramètres montrent un effet mémoire significatif, allant de 20 à 30 jours en moyenne. Cela signifie que les épisodes pluvieux successifs sont quasiment indépendants dès lors qu'ils se produisent à plus de 2 jours d'intervalle, alors que les débits de la Loire, les niveaux de la nappe ou les températures atmosphériques s'équilibrent sur 3 à 4 semaines. Dit autrement, la succession assez aléatoire des précipitations entrant dans le système hydraulique Loire-nappe est transformée en variables de sortie nettement plus stables dans le temps.

Tableau 9. Effet mémoire (en jours) des paramètres hydroclimatiques des années 2010, 2013 et 2016

<b>Paramètres → Années ↓</b>	<b>Débit de la Loire</b>	<b>Niveau de la nappe</b>	<b>Précipitations totales</b>	<b>Température moyenne</b>
2010	19	25	1	29
2013	23	26	1	31
2016	17	24	1,5	31
<b>Moyenne</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>~1</b>	<b>30</b>

<sup>15</sup> uniquement pour l'année 2010, ceux des autres années étant comparables.



## **6. ANALYSE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE DES DONNÉES**

### **6.1 MÉTHODE D'ANALYSE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE DES DONNÉES, PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE ANALYTIQUE EMPLOYÉE**

La méthode d'analyse statistique multidimensionnelle choisie est l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD). Il s'agit d'une méthode utilisée pour prédire l'appartenance d'un ensemble d'individus à des groupes prédéfinis, à partir d'une série de variables dites « explicatives ». Dans la présente étude :

- un individu correspond à une période de temps qui peut aller de 1 jour à 6 mois ;
- les variables explicatives sont les indicateurs hydroclimatiques précédemment définis ;
- chaque individu est affecté à l'un des deux groupes suivants : « groupe 0 » si aucun fontis n'y est survenu et « groupe 1 » si au moins un fontis y est survenu.

L'affectation d'un individu à un groupe repose sur la construction de « fonctions de classement », régressions linéaires multiples faisant intervenir les variables explicatives. Il existe une fonction de classement par groupe<sup>16</sup>. Ces fonctions sont du type «  $y_n = a_n + b_n x_1 + c_n x_2 + d_n x_3 + \dots$  » où  $y$  représente un individu,  $n$  son groupe et  $x_1, x_2, x_3 \dots$  les différentes variables explicatives : les coefficients  $a_n, b_n, c_n, d_n \dots$  sont déterminés par le logiciel (XLSTAT).

Les fonctions de classement sont calculées à partir d'un « échantillon d'apprentissage » qui doit renfermer un nombre suffisant d'individus appartenant à chaque groupe. Cet échantillon d'apprentissage peut être soit un « lot de référence », créé artificiellement en mélangeant des jours avec ou sans fontis, soit une ou plusieurs années considérées comme caractéristiques (voir Annexe 1).

On a tout d'abord utilisé ici la méthode du « lot de référence » qui est la plus classique. Un lot de référence de 47 individus a été créé, renfermant 29 jours avec fontis et 16 jours sans fontis. Le résultat obtenu montre que, si le classement de l'échantillon d'apprentissage est excellent au sein du lot de référence, son application aux années 2010 et 2013 (pourtant prolifiques en fontis<sup>17</sup>) ne permet pas d'expliquer les 19 jours au cours desquels des fontis ont été signalés. On a supposé que cela résultait de la rareté des événements recherchés, à savoir une probabilité d'occurrence de fontis comprise entre 0 et 3% selon les années, qui ne correspond pas à celle du lot de référence où elle atteint 64%.

Il a donc été décidé d'appliquer également la méthode des « années caractéristiques » qui nécessite un nombre plus important de données, mais qui tient mieux compte de la rareté de ces événements puisqu'il s'agit de chroniques réelles. L'échantillon d'apprentissage a donc été représenté par les années 2010 et 2013 puis les fonctions de classement obtenues ont été appliquées au lot de référence précédent afin de vérifier la validité des résultats obtenus.

---

<sup>16</sup> Pour information, chaque individu est affecté au groupe pour lequel le résultat de la fonction de classement est le plus élevé.

<sup>17</sup> Il s'agit des années 2010 (15 fontis survenus en 10 jours) et 2013 (10 fontis survenus en 9 jours).

## 6.2 ANALYSE DES ANNÉES 2010-2013 ET EXTRAPOLATION AU LOT DE RÉFÉRENCE

Le lot de référence doit renfermer un effectif suffisant de jours avec et sans fontis, pris entre 1994 et 2016, à l'exception des années 2010 et 2013 qui servent à la construction des fonctions de classement. Sa constitution est détaillée en Annexe 1.

### 6.2.1 Application de l'AFD aux années 2010 et 2013

Une première AFD portant sur les six indicateurs hydroclimatiques de base a été effectuée au pas de temps journalier<sup>18</sup> : précipitations moyennes ( $P_{MOY}$ ), températures minimales ( $T_{MIN}$ ), moyennes ( $T_{MOY}$ ) et maximales ( $T_{MAX}$ ), niveau de nappe moyen ( $N_{MOY}$ ) et débit moyen de la Loire ( $Q_{MOY}$ ). Le résultat obtenu montre que tous les jours sont classés « sans fontis » par ces paramètres, même les 19 jours où des fontis ont été signalés. Cela peut signifier soit qu'il n'existe pas de relation entre les conditions hydroclimatiques et l'apparition de fontis, soit que :

- les indicateurs hydroclimatiques pris en compte ne permettent pas de caractériser correctement les conditions hydroclimatiques ;
- les conditions hydroclimatiques susceptibles de déclencher un fontis agissent à une autre échelle de temps que la journée, comme semblent le montrer les calculs d'autocorrélation (sauf pour les précipitations) ;
- la fréquence d'apparition des jours avec fontis est trop faible (2,6%), ce qui crée un lot de référence trop déséquilibré pour que le logiciel puisse en sortir une fonction de classement valide pour ces derniers.

Une première solution a consisté à allonger la durée prise en compte afin d'intégrer plus de fontis par période. Le Tableau 10 montre qu'on agit ainsi simultanément sur les trois causes susmentionnées, ce qui améliore significativement le résultat final :

- au pas de temps d'une semaine, on obtient 104 périodes, dont 17 présentent au moins un fontis, soit une fréquence d'apparition de 16%. Le taux de bon classement reste excellent pour les périodes sans fontis (99%), mais il s'améliore peu pour celles avec fontis (24%) ;
- au pas de temps de deux semaines, on a 52 périodes, dont 13 présentent au moins un fontis, soit une fréquence d'apparition de 25%. Les taux de bon classement sont de 95% et de 54% respectivement pour les périodes sans et avec fontis ;
- au pas de temps de quatre semaines, on dispose de 26 périodes, dont 11 présentent au moins un fontis, soit une fréquence d'apparition de 42%. Les taux de bon classement sont de 93% et de 73%, respectivement pour les périodes sans et avec fontis.

La durée de la période n'a pas été étendue au-delà de quatre semaines car cela aurait significativement réduit l'effectif pris en compte tout en donnant trop d'importance aux périodes avec fontis au détriment des périodes sans fontis. On constate également que cette durée correspond à la période d'influence maximale de la plupart des paramètres hydroclimatiques précédemment analysés.

---

<sup>18</sup> A ce pas de temps, les indicateurs MIN et MAX n'ont pas de sens pour les paramètres précipitations, débit et niveau puisqu'on ne dispose que d'une seule valeur journalière (MOY), contrairement aux températures pour lesquelles on dispose des 3 valeurs MIN, MOY et MAX.

Tableau 10. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 12 indicateurs hydroclimatiques

Période	Effectif	Absence de fontis		Présence de fontis		Taux global de bon classement <sup>19</sup>
		Effectif	Classement	Effectif	Classement	
1 jour	730	711	100%	19	0%	97%
1 sem.	104	87	99%	17	24%	87%
2 sem.	52	39	95%	13	54%	85%
4 sem.	26	15	93%	11	73%	85%

Une autre solution a consisté à augmenter le nombre d'indicateurs afin de mieux caractériser les conditions hydroclimatiques extrêmes. On a ainsi ajouté les six indicateurs suivants en référence aux seuils définis au chapitre 5.3 :

- nombre de jours de précipitations inférieures au seuil bas ( $JP_{MIN}$ ) ou supérieures au seuil haut ( $JP_{MAX}$ ) ;
- nombre de jours de température minimale inférieure au seuil bas ( $JT_{MIN}$ ) ou de température maximale supérieure au seuil haut ( $JT_{MAX}$ ) ;
- nombre de jours de niveau de nappe inférieur au seuil bas ( $JN_{MIN}$ ) ou supérieur au seuil haut ( $JN_{MAX}$ ) ;
- nombre de jours de débit de Loire inférieur au seuil bas ( $JQ_{MIN}$ ) ou supérieur au seuil haut ( $JQ_{MAX}$ ).

Une première AFD portant sur les 20 indicateurs hydroclimatiques ainsi disponibles a été effectuée. Le résultat obtenu sur la base de données journalières est comparable au précédent avec, toutefois, un taux de bon classement qui s'améliore significativement au fur et à mesure que la durée de la période augmente : pour une période de 4 semaines, il atteint 100% pour les deux groupes (Tableau 11).

Tableau 11. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 20 indicateurs hydroclimatiques

Période	Effectif	Absence de fontis		Présence de fontis		Taux global de bon classement
		Effectif	Classement	Effectif	Classement	
1 jour	730	711	100%	19	0%	97%
1 sem.	104	87	98%	17	29%	87%
2 sem.	52	39	97%	13	69%	90%
4 sem.	26	15	100%	11	100%	100%

En conclusion, le classement optimal est obtenu en utilisant les données des années 2010 et 2013 regroupées par périodes de temps de quatre semaines en prenant en compte les 20 indicateurs hydroclimatiques disponibles.

La Figure 24 permet de visualiser ce classement selon un axe allant de la probabilité maximale d'avoir un fontis (abscisses négatives) vers la probabilité minimale

<sup>19</sup> Il s'agit du ratio du nombre de périodes bien classées (avec et sans fontis) à l'effectif total de périodes.

(abscisses positives). Elle montre une nette individualisation des périodes avec et sans fontis grâce aux fonctions de classement obtenues.

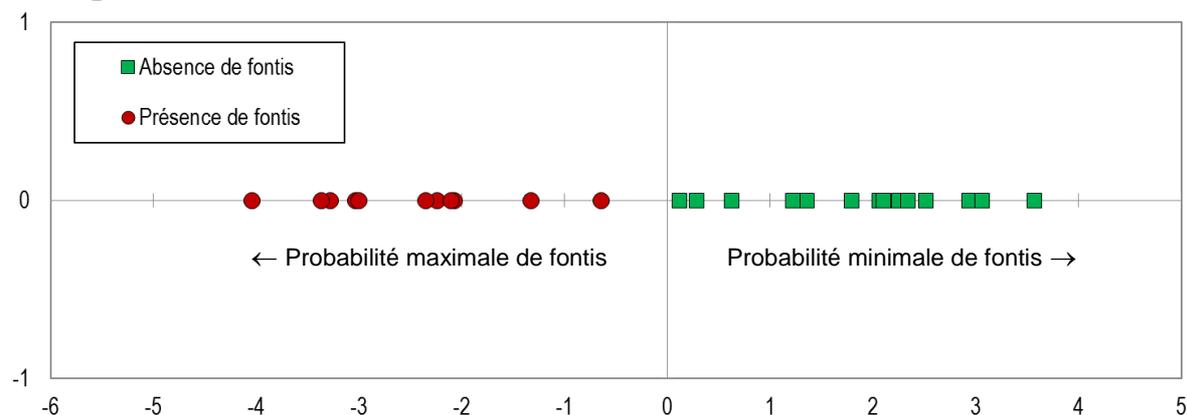


Figure 24. Représentation du classement de l'échantillon d'apprentissage (années 2010 et 2013 par périodes de 4 semaines) selon 20 indicateurs hydroclimatiques

La corrélation entre indicateurs hydroclimatiques et apparitions de fontis est donc excellente, mais compte tenu du fait que seuls les indicateurs climatiques pourront être calculés par le modèle climatique utilisé en seconde partie de l'étude, on doit se résoudre à ne prendre en compte que les 10 indicateurs suivants : précipitations et températures moyennes, minimales et maximales ( $P_{MOY}$ ,  $P_{MIN}$ ,  $P_{MAX}$ ,  $T_{MOY}$ ,  $T_{MIN}$ ,  $T_{MAX}$ ), jours de précipitations et de températures extrêmes ( $JP_{MIN}$ ,  $JP_{MAX}$ ,  $JT_{MIN}$ ,  $JT_{MAX}$ ).

Les paramètres hydrologiques ont donc été abandonnés bien qu'on ait vu précédemment qu'ils devaient probablement jouer un rôle significatif dans l'apparition des fontis. Cela se traduit immédiatement par un déficit d'information avec un taux global de bon classement qui passe de 100% à 85%. Ce changement affecte peu le classement des périodes sans fontis avec un taux de bon classement qui reste supérieur à 93%. En revanche, le taux de bon classement des périodes avec fontis diminue et n'atteint plus que 73% pour des périodes de 4 semaines (Tableau 12).

Tableau 12. Effet de la durée de la période de calcul dans le classement de l'échantillon d'apprentissage 2010-2013 selon 10 indicateurs climatiques

Période	Effectif	Absence de fontis		Présence de fontis		Taux global de bon classement
		Effectif	Classement	Effectif	Classement	
1 jour	730	711	100%	19	0%	97%
1 sem.	104	87	100%	17	12%	86%
2 sem.	52	39	97%	13	31%	81%
4 sem.	26	15	93%	11	73%	85%

Il apparaît dans ces tableaux qu'il semble plus facile de classer les périodes sans fontis que celles avec fontis. Cela pourrait s'expliquer par le fait que :

- certaines périodes climatiques exceptionnelles n'ont pas donné lieu à signalement de fontis ; c'est par exemple le cas de la période allant du 17/06/2013 au 14/07/2013 malgré de fortes précipitations journalières (maximum de 24 mm) et malgré qu'elle vienne à la suite de deux périodes successives qui ont vu s'ouvrir 10 fontis ; on peut ici se poser la question d'un manque de signalement ;

- à l'inverse, des fontis sont apparus lors de périodes de conditions climatiques normales (par exemple du 09/09/2010 au 06/10/2010, du 25/02/2013 au 24/03/2013 et du 09/09/2013 au 06/10/2013) ; ces périodes se sont caractérisées par quelques valeurs climatiques extrêmes, notamment sur le plan des températures ( $T_{\text{MIN}} < -5 \text{ °C}$  ou  $T_{\text{MAX}} > 30 \text{ °C}$ ), mais qui n'ont pas suffi pas à les faire classer comme propices à l'apparition de fontis.

Avec un taux moyen de bon classement de 85%, on a cependant considéré que ce classement était fonctionnel. Les deux fonctions discriminantes obtenues par l'AFD sont alors les suivantes<sup>20</sup> :

- Équation 1 (périodes sans fontis) :  $(26,59 P_{\text{MOY}} - 0,98 P_{\text{MAX}} + 6,68 J_{\text{P}_{\text{MIN}}} - 6,27 J_{\text{P}_{\text{MAX}}}) + (13,53 T_{\text{MOY}} - 6,03 T_{\text{MIN}} - 3,55 T_{\text{MAX}} + 3,03 J_{\text{T}_{\text{MIN}}} - 5,81 J_{\text{T}_{\text{MAX}}}) - 93,97$
- Équation 2 (périodes avec fontis) :  $(23,98 P_{\text{MOY}} - 0,94 P_{\text{MAX}} + 5,88 J_{\text{P}_{\text{MIN}}} - 4,49 J_{\text{P}_{\text{MAX}}}) + (11,30 T_{\text{MOY}} - 5,01 T_{\text{MIN}} - 2,61 T_{\text{MAX}} + 2,99 J_{\text{T}_{\text{MIN}}} - 4,53 J_{\text{T}_{\text{MAX}}}) - 81,71$

L'analyse de ces fonctions montre que les principaux indicateurs climatiques qui tendent à classer une période comme propice à l'apparition de fontis sont le nombre de jours de précipitations maximales et les valeurs extrêmes de température. Néanmoins, ces indicateurs jouent dans le même sens pour les deux fonctions de classement : ils ne sont donc pas fortement discriminants pour classer les fontis dans l'un ou l'autre groupe (seuls leurs coefficients multiplicateurs diffèrent de 10% à 30% d'un groupe à l'autre).

La Figure 25 permet de visualiser le résultat de ce classement. Comme précédemment, les abscisses positives correspondent aux périodes sans fontis et les abscisses négatives aux périodes avec fontis. Le classement est ici moins bon mais on note que les 3 périodes « avec fontis » mal classées ont une faible abscisse positive, c'est-à-dire qu'elles sont proches d'un bon classement : une petite variation d'un ou de quelques indicateur(s) climatiques pourrait suffire à les faire changer de classe<sup>21</sup>.

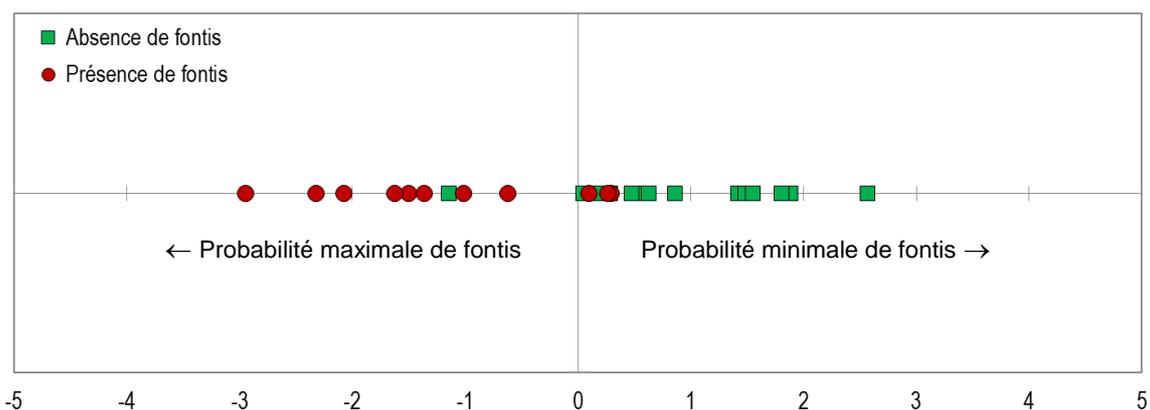


Figure 25. Représentation du classement de l'échantillon d'apprentissage (années 2010 et 2013 par périodes de 4 semaines) selon 10 indicateurs climatiques

<sup>20</sup> Le 10<sup>e</sup> paramètre est «  $P_{\text{MIN}}$  » qui n'est pas représenté dans l'équation car il est affecté d'un coefficient multiplicateur nul. Sa valeur n'influence donc pas le résultat et seuls 9 paramètres sont de ce fait représentatifs.

<sup>21</sup> Autrement dit, la prise en compte de seuils légèrement différents pourrait être de nature à influencer ce résultat.

Note : les seuls indicateurs modifiables sont ceux qui dépendent d'une valeur seuil, à savoir le nombre de jours de valeurs extrêmes de précipitations et de températures. Il est possible qu'une modification de certains des seuils définis au chapitre 5.3 puisse affecter ce résultat mais la vérification de cette hypothèse demanderait un important travail d'ajustement des seuils et de re-calcul des résultats, qui n'a pas été réalisé.

## 6.2.2 Application des fonctions de classement au lot de référence

Les deux fonctions de classement ainsi obtenues ont été appliquées au lot de référence qui comprend 29 jours avec fontis et 16 jours sans fontis. Il a fallu préalablement calculer les indicateurs climatiques pour les périodes de 1 jour à 4 semaines précédant chacun de ces 45 jours. Les résultats sont comparables aux précédents et seules les valeurs obtenues pour des périodes de 4 semaines sont présentées dans le Tableau 13.

On obtient un taux moyen de bon classement de 73% avec, en revanche, un meilleur classement des périodes avec fontis (76%) que sans fontis (68%). Cela peut être dû à l'imperfection des fonctions de classement mais aussi au fait qu'il est difficile d'avoir la certitude qu'aucun fontis ne s'est réellement produit pendant les jours dits « sans fontis », qui ne sont finalement que des jours où aucun fontis n'a été signalé.

Tableau 13. Application des fonctions de classement obtenues sur la période 2010-2013 au lot de référence 1994-2016 (10 indicateurs climatiques x 4 semaines)

Classe	Effectif			Taux de bon classement
	Total	Bien classé	Mal classé	
Présence de fontis	29	22	7	76%
Absence de fontis	16	11	5	68%

Dans le cadre de la deuxième partie de l'étude, ces équations ont ensuite été appliquées aux données climatiques simulées pour le 21<sup>e</sup> siècle.

## **DEUXIEME PARTIE**

### **ESSAI DE PREVISION DES PERIODES D'APPARITIONS DE FONTIS AU COURS DU 21<sup>E</sup> SIECLE EN RELATION AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE**



## **7. PRÉSENTATION DE LA MODÉLISATION CLIMATIQUE**

### **7.1 CONTEXTE GÉNÉRAL DES MODÉLISATIONS CLIMATIQUES**

Dans le Cinquième Rapport d'Évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC), publié en 2013 (IPCC, 2013), la communauté scientifique a entrepris un exercice coordonné de simulations numériques du climat intitulé « Coupled Model Intercomparison Project » ou CMIP5 (Taylor et al., 2012).

Les simulations effectuées dans le cadre du CMIP5 ont permis de discuter les grandes tendances climatiques et d'identifier la responsabilité des activités anthropiques dans les changements passés et à venir. Les outils impliqués dans cet exercice sont des modèles numériques couplés du système Terre qui représentent l'évolution dynamique, physique et chimique de l'atmosphère, mais aussi de l'océan, de la biosphère et de la cryosphère. Cette complexité en termes de processus représentés se fait au détriment de la granularité spatiale<sup>22</sup> des modèles qui recouvrent l'ensemble du globe avec une résolution de quelques degrés (i.e. quelques centaines de kilomètres aux moyennes latitudes). Cette résolution n'est en général pas satisfaisante pour effectuer des études d'impact du changement climatique à l'échelle locale.

C'est pour combler ce manque qu'a été conçu l'exercice de modélisation CORDEX<sup>23</sup> : (Giorgi et al., 2009). En utilisant les modèles globaux du CMIP5 comme conditions aux limites, les modèles régionaux engagés dans CORDEX ont pu proposer des zooms sur plusieurs régions du monde jusqu'à une résolution spatiale de 10 km, et fournir ainsi des projections climatiques à haute résolution pour le 21<sup>e</sup> siècle.

### **7.2 MODÈLES UTILISÉS**

Afin d'obtenir des séries chronologiques de précipitations et de températures dans le secteur d'Orléans, des extractions de données ont été réalisées à partir d'un des modèles impliqués dans CORDEX pour deux scénarios prospectifs. Il s'agit des simulations dénommées WRF-IPSL-INNERIS effectuées conjointement par l'Institut Pierre-Simon Laplace et l'Ineris dans le cadre du volet Européen de l'exercice CORDEX « EuroCordex » (Jacob et al., 2013).

Ces simulations régionales ont été réalisées avec une résolution tantôt moyenne (0,44° soit de l'ordre de 40 km), tantôt haute (0,11°, soit presque 10 km). Elles ont été forcées avec le modèle de système Terre IPSL-CM5-MR<sup>24</sup> de l'IPSL (Dufresne et al., 2013). Elles ont ensuite été validées en regard d'observations et aussi par rapport aux autres modèles participants à EuroCordex par Kotlarski et al. (2014).

Le modèle de climat régional sélectionné par le partenariat IPSL-Ineris est le modèle américain WRF « Weather Research and Forecasting Model » (Skamarock et al., 2008). Il s'agit d'un modèle assez modulaire, dont la configuration peut varier fortement suivant les utilisateurs. Dans le contexte de la présente étude, il est donc important d'en expliciter la configuration, notamment en termes de bilan hydrique.

---

<sup>22</sup> Modélisation d'un phénomène selon différents niveaux de détail, de résolution ou d'échelle.

<sup>23</sup> Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

<sup>24</sup> Avec celui de Météo-France, c'est l'un des deux modèles français sur lequel repose le 4<sup>e</sup> volume du rapport Jouzel sur les scénarios régionalisés pour la métropole et l'outre-mer (Ouzeau et al., 2014).

La partie la plus importante concerne la représentation des processus relatifs à la vapeur d'eau, aux nuages et aux précipitations qu'on retrouve sous l'appellation de paramétrisation microphysique de l'atmosphère. Celle qui a été choisie ici est le schéma « WRF Single Moment 3-class » de Hong et al. (2004) qui considère trois catégories d'hydrométéores : (i) la vapeur, (ii) l'eau et la glace nuageuse, (iii) la pluie et la neige précipitantes. C'est un schéma relativement simple qui ne prend pas en compte la surfusion ni la fonte graduelle des parcelles d'air.

Le schéma de surface terrestre est le NOAH<sup>25</sup> tel que décrit par Ek et al. (2003), qui est d'une complexité intermédiaire. En chaque point du domaine couvert par le modèle de climat régional, il comporte quatre sous-couches de sol de 10, 30, 60 et 100 cm d'épaisseur. Sont représentées : la zone des racines, l'évapotranspiration, le drainage et le ruissellement, en différenciant les différentes catégories de végétation et leur évolution annuelle ainsi que le type de sol. Ce schéma de sol a pour objectif principal de fournir les flux de chaleur sensible et latente au modèle d'atmosphère, mais il prend aussi en compte le contenu du sol en glace et la couverture neigeuse, en plus du ruissellement, fournissant ainsi de précieuses informations dans le contexte de l'étude de l'évolution des sols (voir le point d'amélioration possible décrit dans la conclusion).

### 7.3 SCÉNARIO SÉLECTIONNÉ

Les scénarios climatiques utilisés pour l'Assessment Report AR5 sont exprimés en termes de forçage radiatif au sommet de l'atmosphère à la fin du 21<sup>e</sup> siècle plutôt qu'en termes de politiques de gestion ou de flux d'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, comme c'était le cas pour les exercices précédents. Il existe quatre scénarios dits RCP « Representative Concentration Pathway », suivis d'un chiffre définissant la valeur du forçage radiatif en W/m<sup>2</sup> : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5. Ces scénarios sont décrits en détail dans l'article de van Vuuren et al. (2011). On peut trouver différentes propositions de politiques climatiques correspondant à chaque scénario dans le travail de prospective des « Shared Socioeconomic Pathways » (ONERC, 2013).

Dans le cadre d'une approche majorante, c'est le scénario RCP8.5 qui a été sélectionné pour la présente étude. Il correspond à des conditions climatiques très dégradées dues à l'absence de toute politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

### 7.4 DONNÉES CLIMATIQUES EXTRAITES

Pour cette étude, on a disposé de trois types de données climatiques, toutes issues des simulations climatiques WRF-IPSL-INERIS forcées par IPSL-CM5-MR de CMIP5 pour le scénario RCP8.5. Elles concernent la période 1951-2005 dite « historique », la période 2006-2100 dite « future » (sur laquelle le modèle de prévision climatique a été appliqué), ainsi que des simulations réalisées avec le même modèle mais forcé par des réanalyses météorologiques. La réanalyse utilisée ici est celle du Centre

---

<sup>25</sup> L'acronyme vient des 4 organismes qui ont créé ce modèle : **N** pour National Centers for Environmental Prediction, **O** pour Oregon State University, **A** pour Air Force Weather Agency et Air Force Research Lab, et **H** pour NWS Hydrology Lab.

Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme ERA-interim, disponible seulement sur la période 1989-2008.

Les données climatiques fournies correspondent à l'état de l'art. Il s'agit de données extraites des simulations numériques à la plus haute résolution spatiale disponible dans le cadre d'exercices internationaux. Ces simulations sont aussi celles qui ont alimenté les scénarios officiels réalisés par l'ONERC<sup>26</sup> dans le cadre des Rapports Jouzel ou le Rapport d'Evaluation du 2<sup>e</sup> Groupe de travail du GIEC en 2013.

On gardera cependant à l'esprit que toutes ces données, même celles réanalysées, ne sont comparables au climat réel que de manière statistique et qu'il n'y a pas de synchronisation au jour le jour. Autrement dit, comme c'est le cas pour les périodes du futur, le climat d'un jour simulé dans le passé peut ne pas correspondre au climat réellement observé : c'est la moyenne climatique de la période au sein de laquelle ce jour est inclus qui est correctement reproduite. Toutefois, les réanalyses météorologiques permettent de s'assurer que les années modélisées dans le passé sont bien comparables aux années réelles : par exemple, l'année 2003 simulée puis réanalysée correspond effectivement à une année caniculaire. Les données réanalysées, bien que possédant le même biais que les données historiques, sont mieux corrélées avec les données réelles, mais elles ne sont malheureusement disponibles que pour un passé récent. C'est pourquoi c'est la longue chronique historique 1951-200 qui a été choisie pour représenter la période passée.

Au final, près de 600 Go de données climatiques spatialisées ont été extraites du portail Cordex<sup>27</sup> pour la réalisation de cette étude. Le point géographique choisi est le point de grille le plus proche du centre géographique du Val d'Orléans, situé dans la commune de Sandillon aux coordonnées suivantes :

- longitude 2,0333 Est
- latitude 47,8461 Nord

## 7.5 TENDANCES CLIMATIQUES POUR LE 21<sup>E</sup> SIÈCLE

Les données fournies par le modèle climatique pour le secteur de Sandillon sont disponibles quotidiennement de 1951 à 2005 puis de 2006 à 2100, selon le scénario RCP8.5.

Elles montrent (Figure 26) :

- des précipitations annuelles moyennes en baisse d'environ 2 mm/an ; elles devraient ainsi passer de 1360 mm à 1140 mm d'ici la fin du siècle ;
- des températures annuelles moyennes en hausse d'environ 0,03°C/an ; elles devraient ainsi passer de 7,8°C à 10,7°C d'ici la fin du siècle. Les températures annuelles minimales et maximales sont affectées de la même hausse.

---

<sup>26</sup> Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

<sup>27</sup> <http://cordex.org/data-access/esgf/>

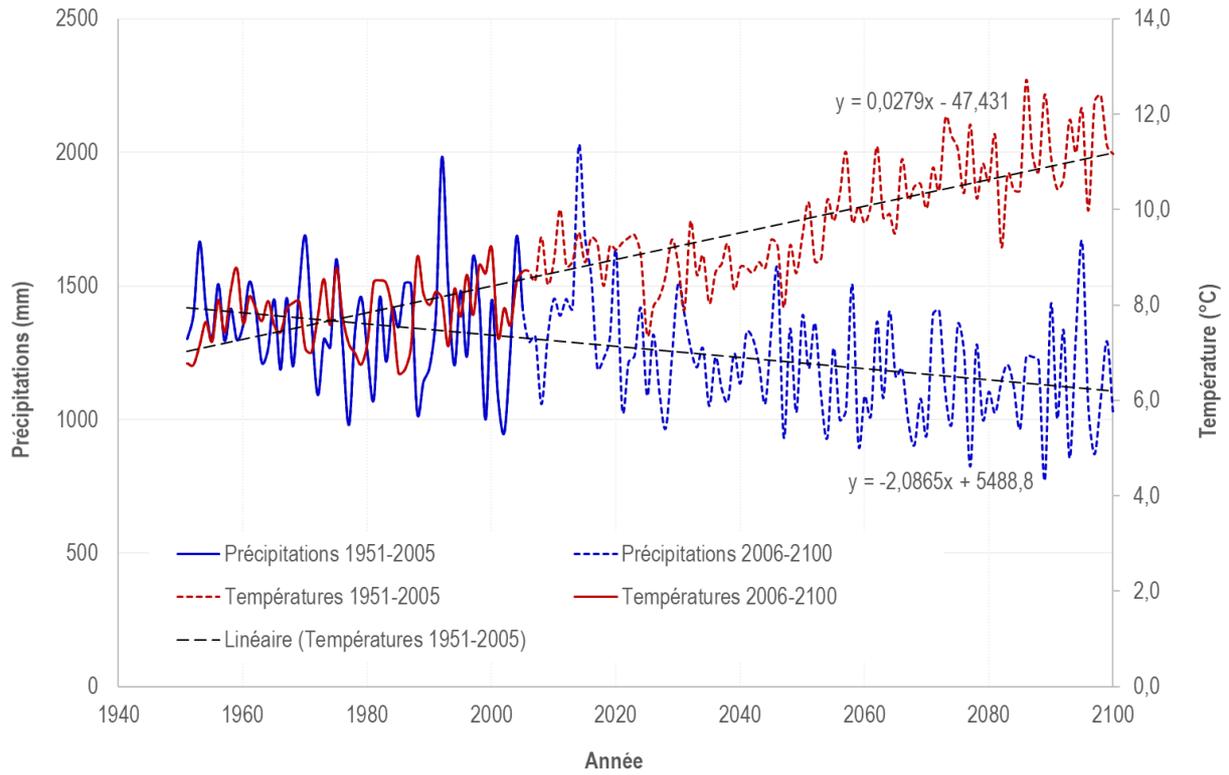


Figure 26. Evolution des températures moyennes et des précipitations annuelles à Sandillon depuis 1950 (selon le scénario RCP8.5 pour le 21<sup>e</sup> siècle)

## **8. DÉTERMINATION DES NOUVELLES FONCTIONS DE CLASSEMENT**

### **8.1 APPLICATION DES FONCTIONS DE CLASSEMENT PRÉALABLEMENT DÉFINIES**

Afin de vérifier si les fonctions de classement précédemment obtenues restent valides avec des données issues de la modélisation climatique, on a tout d'abord appliqué les fonctions de classement basées sur les données réelles de 2010 et 2013 aux données simulées pour ces mêmes années d'après le scénario RCP8.5 (Tableau 14). Les résultats sont corrects pour les périodes sans fontis, avec 79% de bon classement, mais pas pour les périodes avec fontis qui ne sont bien classées qu'à 14%. La différence entre les données climatiques réelles et celles simulées d'après le scénario RCP8.5 semble donc trop forte pour que ces équations soient utilisables.

Tableau 14. Application des fonctions de classement précédemment obtenues pour 2010 et 2013 aux données simulées d'après le scénario RCP8.5

Classe	Effectif			Taux de bon classement
	Total	Bien classé	Mal classé	
Période sans fontis	19	15	4	79%
Période avec fontis	7	1	6	14%
Total 2010 et 2013	26	16	10	62%

Devant cette absence de résultats significatifs, une autre démarche a été adoptée (Tableau 15) : recalculer les fonctions de classement de l'année 2010 simulée d'après le scénario RCP8.5 et les appliquer à l'année 2013 simulée d'après le même scénario. Puis l'opération inverse a été réalisée, en appliquant à l'année 2010 simulée les résultats recalculés sur l'année 2013 simulée. Comme précédemment, les résultats des deux opérations sont corrects pour les périodes sans fontis (75% bien classées), mais pas pour les périodes avec fontis (20% bien classées).

Tableau 15. Application des nouvelles équations discriminantes obtenues sur les données simulées de 2010 aux données simulées de 2013, et vice-versa

Classe	Effectif			Taux de bon classement
	Total	Bien classé	Mal classé	
Période sans fontis	16	12	4	75%
Période avec fontis	10	2	8	20%
Total 2010 et 2013	26	14	12	53%

Les résultats obtenus n'étant pas satisfaisants, il a été décidé de recourir au calcul de nouvelles fonctions de classement applicables aux données climatiques simulées d'après le scénario RCP8.5.

## 8.2 ELÉMENTS DE CALCUL DES NOUVELLES FONCTIONS DE CLASSEMENT

### 8.2.1 Principe

Bien que l'incertitude induite par la modélisation climatique fortement majorante du scénario RCP8.5 ne permette pas d'appliquer le même raisonnement aux données réelles et simulées, on a conservé le principe du calcul de fonctions de classement sur des périodes avec et sans fontis, mais en le modifiant de la manière suivante :

- prise en compte d'une période d'apprentissage la plus longue possible afin d'augmenter la précision statistique du résultat en englobant un plus grand nombre d'évènements (apparitions de fontis). Il s'agira de la période 2006-2017 où l'on dispose de 69 fontis (datés au jour près) répartis en 46 jours distincts ;
- utilisation d'une période d'agrégation des données plus longue que celle de 4 semaines précédemment utilisée ; on a choisi 6 mois afin de se rapprocher du concept de « prévisibilité saisonnière » qui renonce à toute approche chronologique pour décrire une saison sur le plan uniquement statistique (par exemple, la probabilité d'avoir un épisode de forte pluie au cours de l'hiver suivant) . Dans ce concept, Déqué (2018) propose ainsi de travailler avec des prévisions produites jusqu'au mois M+7 ;
- ajout d'une autre variable dépendante, en plus du nombre de jours avec fontis ; on a choisi le nombre de fontis apparus pendant une période donnée<sup>28</sup> . Le Tableau 16 montre que ces deux variables sont souvent liées mais que certaines années se singularisent par la valeur élevée de l'une ou l'autre d'entre elles.

Tableau 16. Comptage annuel du nombre de jours avec fontis (NJ<sub>OUR</sub>) et du nombre de fontis (NF<sub>ONT</sub>) sur la période 2006-2017

*Légende : les valeurs supérieures à la moyenne sont en gras.*

An	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
NJ <sub>OUR</sub>	1	3	<b>6</b>	4	<b>10</b>	3	<b>6</b>	<b>9</b>	0	1	3	0
NF <sub>ONT</sub>	1	3	6	6	<b>10</b>	4	<b>7</b>	<b>15</b>	0	1	<b>16</b>	<b>0</b>

La période 2006-2017 va donc servir de période d'apprentissage pour un traitement par AFD des données climatiques simulées selon le scénario RCP8.5 et les nouvelles fonctions de classement obtenues seront ensuite appliquées au reste des chroniques climatiques simulées pour le 21<sup>e</sup> siècle.

*Note importante : on doit garder en mémoire que toute prévision climatique n'est pas de nature déterministe mais statistique. Il faudrait donc disposer d'une cinquantaine de prévisions pour pouvoir obtenir des estimations probabilistes robustes, comme cela est réalisé dans la prévision dite « d'ensemble » (Déqué, 2018) : elle consiste à simuler, par tirage aléatoire, les erreurs commises lors du calcul d'une prévision numérique du temps pour aboutir à l'évolution la plus probable (Bouttier, 2018). Pour*

<sup>28</sup> Cette nouvelle variable est basée notamment sur l'expérience de l'année 2016 où 14 fontis sont apparus en un seul jour. Tout semble s'être passé comme si plusieurs fontis « en attente » étaient simultanément apparus au cours d'un seul épisode pluvieux exceptionnel. Ces deux variables (nombre de jours avec fontis et nombre de fontis par jour) semblent donc renfermer des informations différentes pour la caractérisation des périodes avec fontis.

le présent rapport, on n'a disposé que d'une seule prévision climatique portant sur le scénario RCP8.5, ce qui relativise donc sa portée probabiliste (voir en conclusion).

## 8.2.2 Nouvelles périodes d'apprentissage et d'agrégation

Afin de disposer de la plus longue période d'apprentissage possible, celle-ci débute au 01/01/2006 et se termine au 31/12/2017, date à laquelle aucun fontis n'a plus été signalé depuis un an. On a donc recalculé les indicateurs climatiques à partir des données journalières de précipitations et de température issues du scénario RCP8.5 sur cette période de 12 ans. Comme dans la première partie de l'étude, ces indicateurs ont été agrégés par tranches de 4 semaines mais avec un résultat non satisfaisant (Figure 27) : le taux de bon classement des périodes avec fontis n'atteint que 11%.

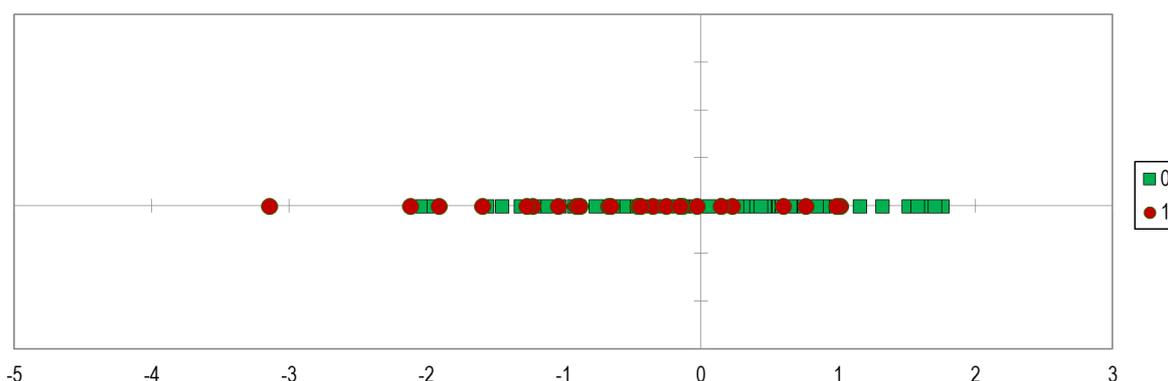


Figure 27. Classement des jours avec fontis (1) et sans fontis (0) agrégés par tranches de 4 semaines sur la période de référence 2006-2017

On a donc recommencé l'opération en utilisant des durées d'agrégation de plus en plus longues, comprises entre 4 semaines et 1 an, afin de se rapprocher de celle de 7-8 mois prônée par Déqué (2018) pour sa « prévisibilité saisonnière ». Le Tableau 17 montre que les résultats sont corrects dès que la durée d'agrégation atteint 182 jours (6 mois) et deviennent excellents à partir de 224 jours (7,4 mois). Toutefois, il a également fallu respecter le critère de représentativité statistique d'un échantillon qui impose que l'effectif sur lequel porte les calculs statistiques soit d'au moins 30 individus (Schwartz, 1963) : cela interdit théoriquement de valider les résultats obtenus sur des durées d'agrégation supérieures à 136 jours (4,9 mois). Au final, une durée d'agrégation de 6 mois a paru être un bon compromis entre ces deux critères.

Tableau 17. Application de l'AFD aux données climatiques RCP8.5 selon diverses modalités appliquées aux jours avec fontis pour la période de référence 2006-2017

Durée d'agrégation	Effectif	Période sans fontis bien classés	Période avec fontis bien classés	Moyenne
28 jours	143	99%	3%	76%
91 jours	44	58%	76%	68%
182 jours	22	80%	88%	86%
196 jours	20	75%	100%	95%
224 jours	17	100%	100%	100%
280 jours	14	100%	100%	100%
365 jours	11	100%*	100%*	100%*

\* en considérant comme « sans fontis » les deux années qui n'ont enregistré qu'un seul.

### 8.2.3 Modalités des variables dépendantes

Le choix des variables dépendantes devrait obéir aux impératifs suivants : respecter l'ordre de grandeur de la fréquence d'apparitions de fontis<sup>29</sup>, conserver une certaine représentativité statistique et donner une importance plus forte aux événements exceptionnels (nombres élevés d'apparitions de fontis).

Outre le nombre de jours avec fontis au cours de la période d'agrégation choisie (variable appelée  $N_{\text{JOUR}}$ ), on a donc ajouté le nombre de fontis signalés au cours de cette période (variable appelée  $N_{\text{FONT}}$ ).

On a ensuite calculé les indicateurs climatiques (10 variables explicatives) et les indicateurs relatifs aux fontis (2 variables dépendantes) pour chaque période d'agrégation d'un semestre au sein de la période de référence 2006-2017. On a ainsi obtenu la matrice de 24 lignes x 13 colonnes présentée en Annexe 2.

La gamme de valeurs des indicateurs relatifs aux fontis apparaît très large : de 0 à 15 pour  $N_{\text{FONT}}$  et de 0 à 6 pour  $N_{\text{JOUR}}$ . Or, les variables dépendantes doivent permettre de scinder l'effectif en familles représentatives ce qui, pour un total de 22 variables (une par semestre), n'est pas possible au-delà de deux familles : cela ne représente déjà plus qu'une dizaine d'individus par famille. Il a donc été décidé que chaque variable dépendante ne pourrait avoir que deux modalités de part et d'autre d'une valeur seuil. Ainsi,  $N_{\text{JOUR}}$  et  $N_{\text{FONT}}$  ont été respectivement remplacées par  $N_{\text{JX}}$  et  $N_{\text{FX}}$ , obtenues selon la règle suivante :

- si  $N_{\text{FONT}} \leq$  « valeur seuil » alors  $N_{\text{FX}} = 0$  et si  $N_{\text{JOUR}} \leq$  « valeur seuil » alors  $N_{\text{JX}} = 0$  ; cela correspond à une période à faible (voire nulle) présence de fontis ;
- si  $N_{\text{FONT}} >$  « valeur seuil » alors  $N_{\text{FX}} = 1$  et si  $N_{\text{JOUR}} >$  « valeur seuil » alors  $N_{\text{JX}} = 1$  ; cela correspond à une période à forte (voire très forte) présence de fontis.

Les valeurs seuils choisies ont été calculées d'après les données du Tableau 18.

Tableau 18. Eléments de calcul des valeurs seuil des variables dépendantes

Paramètre	$N_{\text{FONT}}$	$N_{\text{JOUR}}$
Unité	Fontis/semestre	Jour de fontis/semestre
Moyenne	2,88	1,92
Ecart type	3,83	1,95
Intervalle de 68% autour de la moyenne	0,78	0,40
Borne supérieure de l'intervalle de 68%*	3,66	2,32
Intervalle de 95% autour de la moyenne	1,53	0,78
Borne supérieure de l'intervalle de 95%**	4,41	2,70

\* soit un écart-type au-dessus de la moyenne

\* soit deux écarts-types au-dessus de la moyenne

Les choix de l'indice X sont explicités ci-après et synthétisés dans le Tableau 19 :

<sup>29</sup> L'agrégation en semestres donne en moyenne 1,9 j de fontis/semestre, soit une fréquence de 1,1%.

- pour  $X = 1$ , le seuil est fixé à 0, c'est-à-dire qu'on comptera comme « positif » ( $NF_1 = 1$  ou  $NJ_1 = 1$ ) chaque jour présentant au moins un fontis ; on obtient ainsi une moyenne de 0,71 jour avec fontis/semestre, soit une fréquence de 3,0%, et l'effectif est réparti en 7 semestres « 0 » (appelés par la suite « semestres nuls ») et 17 semestres « 1 » (appelés par la suite « semestres positifs ») ;
- pour  $X = 2$ , le seuil est fixé à la moyenne, c'est-à-dire qu'on comptera comme positif ( $NF_2 = 1$  ou  $NJ_2 = 1$ ) chaque jour présentant un nombre de fontis supérieur à la moyenne ; on obtient ainsi une moyenne de 0,42 jour avec fontis/semestre, soit une fréquence de 1,7%, et une répartition de l'effectif en 14 semestres nuls et 10 semestres positifs ;
- pour  $X = 3$ , le seuil est fixé à la borne supérieure de l'intervalle de confiance de 68% qui correspond à plus ou moins un écart type autour de la moyenne<sup>30</sup> ; on obtient ainsi une moyenne de 0,29 à 0,38 jour avec fontis/semestre (suivant la variable dépendante prise en compte), soit une fréquence de 1,2% à 1,6% . L'effectif est ainsi réparti en 15 à 17 semestres nuls et 7 à 9 semestres positifs ;
- pour  $X = 4$ , le seuil est fixé à la borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95% qui correspond à plus ou moins deux écarts types autour de la moyenne<sup>31</sup> ; on obtient ainsi une moyenne de 0,21 à 0,38 jour avec fontis/semestre (suivant la variable dépendante prise en compte), soit une fréquence de 0,9% à 1,6% ; l'effectif est alors réparti en 15 à 19 semestres nuls et 5 à 9 semestres positifs.

Tableau 19. Paramètres de calcul des variables dépendantes de l'AFD

Variable	NFONT	NJOUR	NFONT	NJOUR	NFONT	NJOUR	NFONT	NJOUR
Seuil*	$NF_1 > 0$	$NJ_1 > 0$	$NF_2 > 2$	$NJ_2 > 1$	$NF_3 > 3$	$NJ_3 > 2$	$NF_4 > 4$	$NJ_4 > 2$
Fréquence <sub>(1)</sub>	2,95%		1,74%		1,22%	1,56%	0,87%	1,56%
Répartition** <sub>(0)/(1)</sub>	7 / 17		14 / 10		17 / 7	15 / 9	19 / 5	15 / 9

\* les seuils ont été arrondis à l'unité inférieure (cf. Tableau 18)

\*\* (0) correspond aux semestres nuls et (1) aux semestres positifs (cf. texte)

La différence entre ces deux variables dépendantes peut être explicitée comme suit :

- pour  $X = 1$ , la fréquence de jours avec fontis est trop élevée (2,8 fois plus que la fréquence observée qui est de 1,1%) et la répartition en semestres nuls et positifs est déséquilibrée au profit de ces derniers. Dans l'AFD, on risque ainsi de donner trop de poids aux jours renfermant peu de fontis. Par ailleurs, les résultats obtenus pour les deux variables  $NF_1$  et  $NJ_1$  sont identiques ;

<sup>30</sup> Cet intervalle renferme 68% des valeurs qu'est susceptible de prendre la moyenne si sa distribution suit une loi normale ; dans 16% des cas, il est donc possible que la moyenne dépasse ces valeurs ; la formule de calcul de cet intervalle est :  $I_{68} \approx \sigma / \sqrt{n}$  (où  $\sigma$  est l'écart type et  $n$  l'effectif) et celle de calcul de la borne supérieure :  $BS_{68} = m + I_{68}$  (où  $m$  est la moyenne) ;

<sup>31</sup> Cet intervalle renferme 95% des valeurs qu'est susceptible de prendre la moyenne (si sa distribution suit une loi normale) ; cela signifie que la moyenne peut exceptionnellement dépasser ces valeurs dans 2,5% des cas ; la formule de calcul de cet intervalle est :  $I_{95} \approx 2 \sigma / \sqrt{n}$  (où  $\sigma$  est l'écart type et  $n$  l'effectif) et celle de calcul de la borne supérieure :  $BS_{95} = m + I_{95}$  (où  $m$  est la moyenne)

- pour  $X = 2$ , la fréquence de jours avec fontis reste encore élevée (1,7 fois plus que la fréquence observée), mais la répartition en semestres nuls et positifs est plus équilibrée sur le plan de la représentativité statistique. Comme précédemment, les résultats des deux variables  $NF_2$  et  $NJ_2$  sont toutefois identiques ;
- pour  $X = 3$ , la fréquence de jours avec fontis se rapproche de sa valeur moyenne (1,2 à 1,5 fois plus que la fréquence observée), mais la répartition redevient déséquilibrée au détriment des semestres positifs. On note ici une différenciation de comportement entre les deux variables  $NF_3$  et  $NJ_3$  ;
- pour  $X = 4$ , la fréquence de jours avec fontis vaut 0,8 à 1,5 fois la fréquence observée. La répartition entre semestres nuls et positifs est plus ou moins équilibrée selon la variable prise en compte. La différenciation de comportement entre  $NF_4$  et  $NJ_4$  est encore plus nette.

Il résulte de cette interprétation que les variables dépendantes les plus intéressantes pour discriminer les périodes renfermant un nombre élevé de fontis semblent *a priori* être  $NF_3$ ,  $NJ_3$ ,  $NF_4$  et  $NJ_4$ .

### 8.3 NOUVELLES FONCTIONS DE CLASSEMENT

Les résultats de l'application de l'AFD à la période de référence 2006-2017 sont présentés dans le Tableau 20. Le meilleur classement correspond aux variables dépendantes  $NF_3$  et  $NF_4$  pour lesquelles seul un semestre de chaque famille est mal classé, avec une préférence pour  $NF_4$  du fait d'un effectif un peu plus important de semestres positifs (donc, une meilleure représentativité).

Les équations discriminantes obtenues pour chaque cas sont par ailleurs présentées en Annexe 3.

Tableau 20. Résultats de l'AFD pour la période de référence 2006-2017

Variable dépendante	Semestres nuls		Semestres positifs		Classement global
	Effectif	Bon classement	Effectif	Bon classement	
$NF_1$ ou $NJ_1$	7	43%	17	88%	75%
$NF_2$ ou $NJ_2$	14	93%	10	70%	83%
$NJ_3$ ou $NJ_4$	15	93%	9	78%	88%
$NF_4$	19	95%	5	80%	92%
$NF_3$	17	94%	7	86%	92%

## **9. APPLICATION AU CLIMAT ATTENDU POUR LE 21<sup>E</sup> SIÈCLE**

Les indicateurs climatiques (variables explicatives) ont été calculés pour chaque semestre de la période 2006-2100, simulée selon le scénario RCP8.5. Les fonctions de classement obtenues avec chaque variable dépendante ont ensuite été appliquées à ces indicateurs climatiques, en supposant qu'elles restent valables dans la gamme des valeurs de température et de précipitations attendues au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

- sur la Figure 28, on a calculé au pas de temps semestriel la fréquence cumulée de semestres positifs tout au long du 21<sup>e</sup> siècle. Pour cela, on a choisi de sommer les semestres positifs successifs et de les rapporter au cumul des semestres écoulés ;
- sur la Figure 29, on a calculé au pas de temps décennal la fréquence moyenne de semestres positifs tout au long du 21<sup>e</sup> siècle. Pour cela, on a choisi de regrouper les semestres par décennies et de calculer la fréquence moyenne de semestres positifs au sein de chaque décennie.

Quelle que soit la variable dépendante prise en compte, la Figure 28 montre un comportement en 4 phases :

- une première phase de 2006 à 2017 qui correspond aux épisodes actuels d'apparition de fontis, avec un maximum de semestres positifs atteignant de 24% à 47% ;
- une légère croissance entre 2026 et 2040, correspondant à de futurs épisodes potentiels d'apparition de fontis, avec un maximum comparable de semestres positifs (de 29% à 45%) ;
- une décroissance jusqu'en 2090 où l'on devrait atteindre de 20% à 31% de semestres positifs. Cette longue période devrait être entrecoupée de petites crises d'apparition de fontis, comme celle centrée sur 2053 où le nombre de semestres positifs remonterait à son maximum antérieur (de 24% à 48%) ;
- en tenant compte des variables NF<sub>3</sub> et NF<sub>4</sub>, cette décroissance se poursuivrait jusqu'à atteindre 19% à 25% de semestres positifs en 2100. Par contre, les variables NJ<sub>2</sub> (ou NF<sub>2</sub>) et NJ<sub>3</sub> (ou NJ<sub>4</sub>) montreraient une crise modérée d'apparition de fontis vers 2096-2097, avec un pic autour de 31% de semestres positifs.

Bien que, dans le détail, le comportement des variables NF<sub>3</sub> et NF<sub>4</sub> se différencie de celui des autres variables, ces courbes ont globalement la même allure. Cela peut s'interpréter de la manière suivante : les périodes d'apparition d'un nombre élevé de fontis - et plus particulièrement d'un nombre exceptionnel (NF<sub>4</sub>) - ne devraient pas être fréquentes dans la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle, alors que les conditions climatiques seront plus fortement dégradées. Outre le fait que cette méthode de calcul induit un biais (voir page suivante), on peut également y voir le rôle prépondérant de l'augmentation de température alors que l'ouverture des fontis serait plutôt sensible à une augmentation des précipitations. A la fin du siècle, environ 1 semestre sur 3 devrait renfermer au moins un fontis (NJ<sub>2</sub>, NF<sub>2</sub>) et environ 1 semestre sur 4 à 5 serait frappé d'un nombre exceptionnel de fontis (NF<sub>3</sub>, NF<sub>4</sub>).

On note toutefois que l'écart de comportement entre les variables NJ<sub>3</sub> et NF<sub>3</sub> ou NJ<sub>4</sub> et NF<sub>4</sub> peut être intéressant. Les variables basées sur le nombre de jours de fontis (NJ<sub>2</sub>, NJ<sub>3</sub>, NJ<sub>4</sub>) font apparaître des crises peu avant le milieu et la fin du siècle avec environ 40% de semestres positifs. Ceux-ci seraient dus à un nombre de jours de fontis et à un nombre total de fontis supérieurs à la moyenne. Cependant, l'apparition d'un nombre exceptionnel de fontis (NF<sub>3</sub> et NF<sub>4</sub>) serait de moins en moins fréquente.

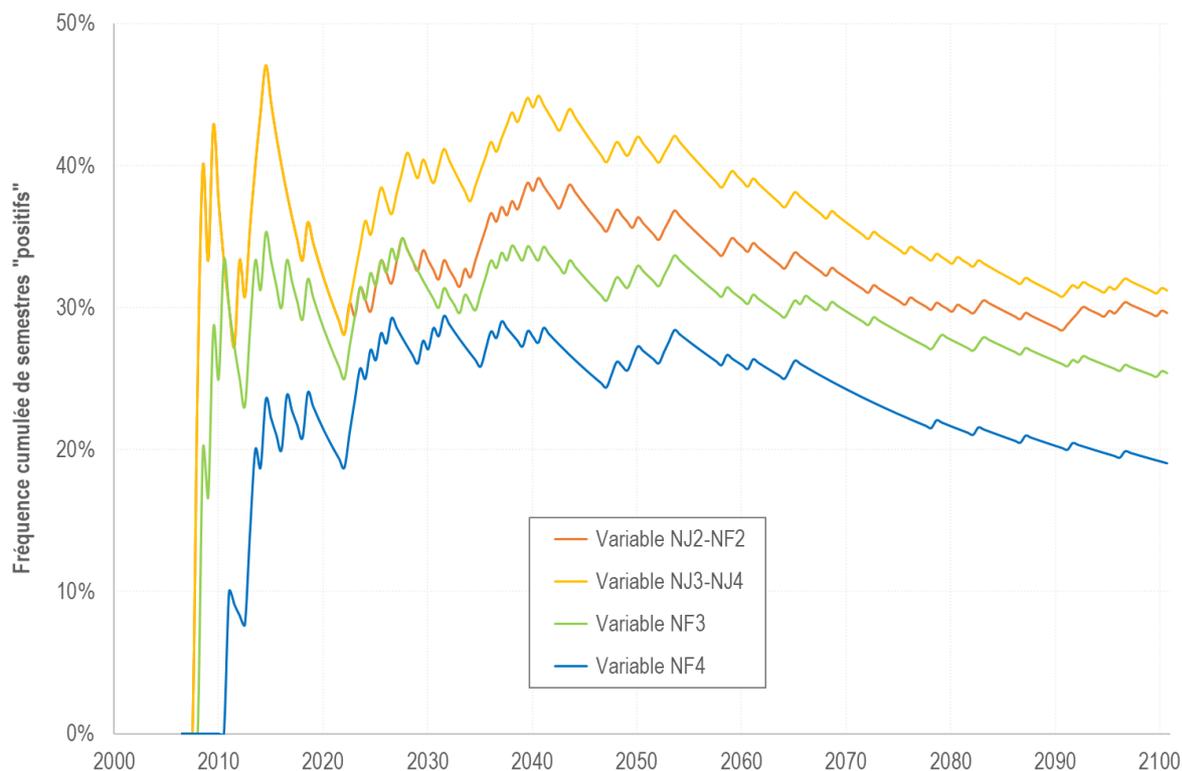


Figure 28. Evolution de la fréquence cumulée de semestres positifs au cours du 21<sup>e</sup> siècle

Cette méthode de calcul induit cependant un biais : plus on s'éloigne de l'année de départ (2006) et plus augmente la durée par laquelle on doit diviser le nombre de semestres positifs pour obtenir une fréquence d'apparition. Ainsi, une année représente une durée de 7% en 2020, mais de 2% en 2050 et de seulement 1% en 2100.

Ce biais, qui a pour effet de lisser les résultats, peut être levé en raisonnant par périodes égales : en choisissant des périodes d'une décennie, soit 20 semestres, on ne dispose alors que d'un seul point par décennie au lieu d'un point par semestre. La Figure 29 montre le même comportement que précédemment avec toutefois une amplitude plus forte, notamment en fin de siècle où la fréquence calculée n'est alors plus lissée par la durée prise en compte. On retrouve les trois pics de fréquence déjà mentionnés mais celui de 2030-2040 (40 à 55%) serait deux fois plus fort que celui de 2050-2060 (20 à 25%), alors que celui de 2090-2100 serait d'une intensité intermédiaire (30 à 35%).

Ce mode de raisonnement permet également de représenter sur un même graphe les événements passés et futurs. Si l'on se fie aux données d'apparition historiques de fontis pour le 19<sup>e</sup> et le 20<sup>e</sup> siècle, on constate que la décennie 1890-1900 a dû présenter un pic d'apparitions de fontis de 20% et que, après une période anormalement longue sans aucun fontis signalé, le pic de la décennie 2010-2020 a été très fort (55%). Il est probable que l'absence de signalement de fontis de 1920 à 1980 corresponde à un artefact et qu'il ait pu exister un pic centré sur la décennie 1950-1960 : ce pic a été représenté en pointillés sur la Figure 29.

Depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle, un nombre anormalement élevé de fontis est donc apparu pendant plus de la moitié des semestres écoulés, et ceci risque de perdurer jusqu'en 2040.

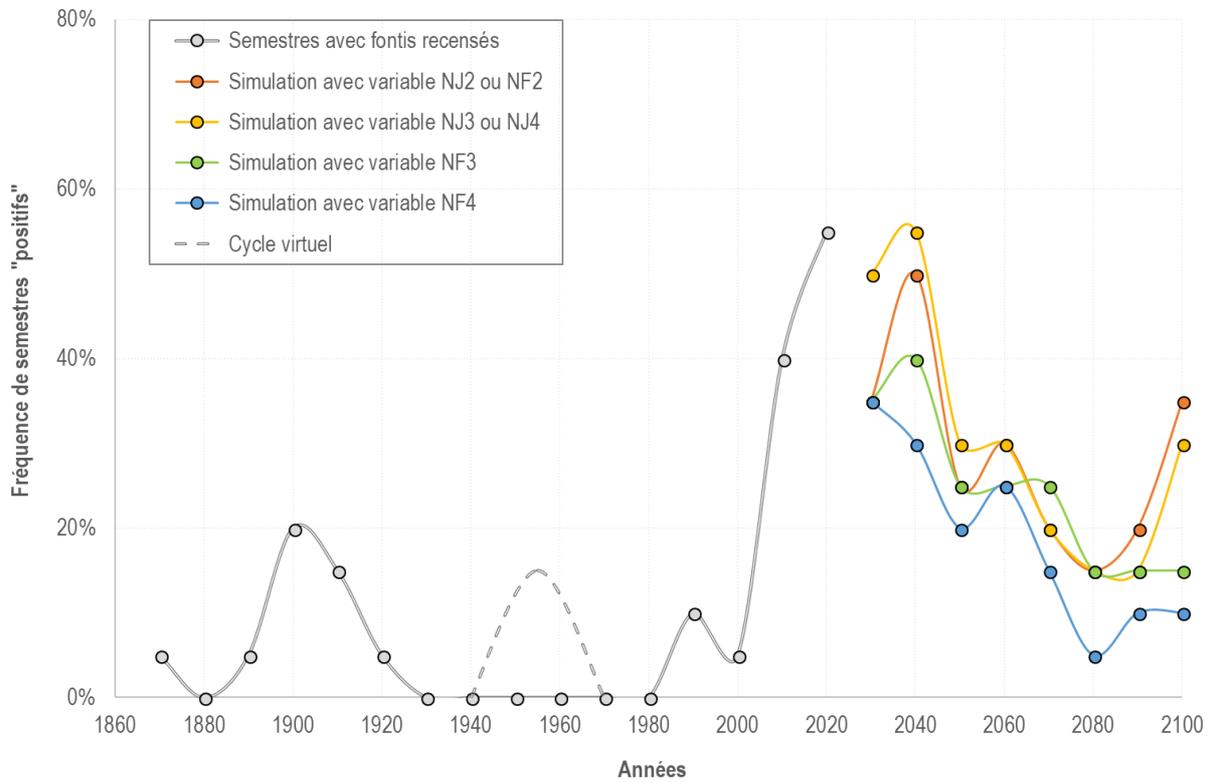


Figure 29. Evolution de la fréquence de semestres positifs par décennie au cours du 21<sup>e</sup> siècle



## **10. DISCUSSION ET CONCLUSION**

### **10.1 RAPPEL DES RÉSULTATS OBTENUS**

Le Val d'Orléans se caractérise par la superposition d'un substratum calcaire fortement karstifié, présentant des vides plus ou moins importants à des profondeurs parfois faibles, et d'un recouvrement alluvial meuble de nature sablo-argileuse. Cette configuration géologique de karst couvert est propice à l'apparition de fontis dont les causes peuvent être le soutirage lent de matériaux fins à travers des conduits karstiques (suffosion) ou l'effondrement brutal du toit de cavités peu profondes. La durée du creusement d'une cavité karstique et de la remontée de la cloche de fontis à travers le recouvrement se chiffre en milliers d'années : toutefois, on s'intéresse ici à l'apparition du fontis à la surface qui est un phénomène beaucoup plus rapide, de l'ordre de grandeur de la journée, dû à l'effondrement des formations superficielles meubles. Plusieurs causes d'apparition de fontis ont déjà été identifiées dans d'autres régions de karst couvert dans le monde où leur étude a permis de mettre en évidence les mécanismes initiateurs suivants : des épisodes pluvieux intenses, un fort rabattement piézométrique induit par une sécheresse prolongée ou par des pompages importants, des inondations liées à des crues exceptionnelles... On a donc cherché à savoir si ces mêmes mécanismes pouvaient être à l'œuvre dans le Val d'Orléans, en réalisant une analyse statistique des conditions d'apparition des fontis datés.

On a tout d'abord identifié quatre paramètres hydroclimatiques (précipitations, températures, débit de la Loire, niveau de la nappe) qui ont ensuite été déclinés en vingt indicateurs hydroclimatiques sur lesquels ont porté une analyse statistique classique, puis une méthode d'analyse multidimensionnelle (AFD). Les événements ont été agrégés par période de 4 semaines et l'AFD a fourni des équations permettant de classer chacune de ces périodes selon sa probabilité d'être ou pas affectée par au moins un fontis. L'objectif était de tenter d'expliquer les apparitions historiques de fontis par des combinaisons statistiques de ces paramètres hydroclimatiques, dans un but d'extrapolation au reste du 21<sup>e</sup> siècle sur la base de prévisions tenant compte du changement climatique attendu. Cependant, cette extrapolation ne peut tenir compte que des seuls paramètres simulés par la modélisation climatique : les équations ont donc dû être recalculées sur la base des deux seuls paramètres climatiques (précipitations et températures) qui ont été déclinés en dix indicateurs climatiques (précipitations et températures moyennes, minimales et maximales, nombre de jours de précipitations et de températures extrêmes). L'abandon des paramètres hydrologiques et hydrogéologiques induisant une perte d'information, les nouvelles équations obtenues ne permettent d'expliquer que les trois-quarts des apparitions de fontis observées.

Plusieurs simulations climatiques européennes à haute résolution ont été prises en compte, parmi celles qui ont alimenté les scénarios officiels mis en avant par le GIEC. Le scénario choisi, appelé RCP8.5, est le plus majorant sur le plan climatique, car il suppose l'absence de toute politique de réduction des gaz à effet de serre. Selon ce scénario, les tendances climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle montrent, dans la région d'Orléans, une baisse des précipitations annuelles moyennes d'environ 2 mm/an et une hausse des températures annuelles moyennes d'environ 0,03°C/an, soit +2,8°C à la fin du siècle.

L'application des équations discriminantes basées sur les données réelles du passé aux données simulées du futur n'a toutefois pas donné les résultats escomptés, principalement du fait de l'incertitude induite par la modélisation climatique. Le

raisonnement précédent a donc dû être modifié en intégrant une période de référence plus longue (12 ans) ainsi qu'une durée d'agrégation plus longue (6 mois). A côté du nombre de jours avec fontis, on a également inclus, comme autre variable dépendante, le nombre de fontis apparus par semestre. Comme précédemment, on a ainsi pu expliquer plus des trois-quarts des semestres où des fontis sont apparus depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle.

Sur la base des hypothèses prises (voir chapitre suivant), les périodes d'apparition d'un nombre élevé de fontis - et plus particulièrement d'un nombre exceptionnel - ne devraient pas être plus fréquentes d'ici la fin du siècle alors que les conditions climatiques seront plus fortement dégradées. Cela est probablement dû à la diminution attendue des précipitations auxquelles le phénomène d'apparition des fontis est particulièrement sensible. Cependant, depuis le début du siècle, on constate l'apparition d'un nombre anormalement élevé de fontis pendant plus de la moitié des semestres écoulés (55%). Trois périodes d'apparitions importantes de fontis pourraient également survenir au cours des décennies 2030-2040 (fréquence de 40 à 55%), 2050-2060 (fréquence de 20 à 25%) et au-delà de 2090 (fréquence de 30 à 35%). A la fin du siècle, environ 1 semestre sur 3 devrait compter au moins un fontis et environ 1 semestre sur 4 à 5 pourrait être frappé d'un nombre exceptionnel de fontis.

On a également pu comparer les événements passés et futurs, et reconstituer ainsi deux probables pics d'apparitions de fontis lors des décennies 1890-1900 et 1950-1960, à ajouter à celui en cours (2010-2020). Cela correspond à une périodicité des pics d'apparitions de fontis de l'ordre de 43 ans pour le 20<sup>e</sup> siècle qui devrait passer à 25 ans pour le 21<sup>e</sup> siècle.

## **10.2 REMARQUES CONCERNANT L'APPROCHE RÉALISÉE**

Le travail présenté dans ce rapport repose sur un certain nombre d'hypothèses susceptibles d'induire des incertitudes sur le résultat final. Celles-ci sont rappelées et discutées ci-après.

### **10.2.1 Précision de la base de données**

La base de données utilisée repose sur un principe déclaratif : elle ne recense que les fontis qui ont été déclarés ou observés par des individus. Elle possède donc d'emblée une incertitude sur la date exacte d'apparition d'un fontis et un biais de représentativité, certains fontis ayant pu ne pas être déclarés pour diverses raisons (autocomblement, refus de signalement...). Toutefois, le fait que seuls 14% des 651 fontis déclarés possèdent une date précise au jour près milite en faveur de l'exactitude de cette date : en effet, celle-ci n'a pas été mentionnée dans 86% des fontis, ce qui semble indiquer que les observateurs n'ont pas souhaité communiquer de date erronée lorsqu'ils n'en étaient pas certains. Quoi qu'il en soit, on peut estimer l'ordre de grandeur de cette incertitude à quelques jours : elle est donc compensée par la prise en compte de périodes d'agrégation suffisamment longues pour l'englober (4 semaines puis 6 mois).

La seconde difficulté concerne la nécessité de disposer d'un lot de référence de jours sans fontis. On a vu que l'absence de signalement de fontis lors d'un jour donné ne signifie pas forcément qu'il n'y en a pas eu. Pour pallier ce risque, on a choisi de ne considérer comme « sans fontis » que les jours sans fontis déclaré et séparés de plus d'un mois du fontis précédent ou suivant. Cela repose sur l'hypothèse que les fontis surviennent fréquemment en salves d'une durée pouvant atteindre 19 jours, entrecoupées de périodes de rémission.

### **10.2.2 Choix des paramètres hydroclimatiques**

La synthèse bibliographique a mis en évidence le rôle des paramètres hydrologiques (crues) ou hydrogéologiques (variations piézométriques) dans l'apparition d'un certain nombre de fontis. Or ces paramètres ne sont pas pris en compte dans le modèle climatique prévisionnel qui n'intègre que des données climatiques. Ils ont, de ce fait, été retirés des fonctions de classement bien qu'il existe des corrélations entre les précipitations et le niveau des cours d'eau ou des nappes. Pour améliorer la représentativité de l'analyse statistique, il faudrait donc pouvoir modéliser des données hydro(géo)logiques.

Dans un premier temps, il est possible d'extraire directement du modèle climatique des données de ruissellement et de teneur en eau des sols mais on ne connaît pas la relation entre ces paramètres et les apparitions de fontis. Cela n'a donc pas été réalisé dans le cadre de ce travail mais mériterait cependant d'être étudié ultérieurement.

Dans un second temps, on peut créer un modèle hydrogéologique du secteur étudié, y intégrer les données climatiques issues du modèle prévisionnel et en extraire des estimations de niveaux piézométriques qui pourraient alors être réintégrées dans l'analyse statistique. Cette approche, qui demande un temps de travail conséquent, pourrait être réalisée si une suite était donnée à cette étude.

### **10.2.3 Choix du scénario de forçage radiatif**

Le scénario RCP8.5 choisi ici est le plus majorant sur le plan du changement climatique attendu car il suppose l'absence de toute politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il se caractérise par un forçage radiatif maximum selon une trajectoire croissante qui amènerait la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère autour de 1370 ppm en 2100 (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>) contre 405 ppm aujourd'hui. A la fin du siècle, dans la région d'Orléans, il devrait ainsi induire en moyenne une hausse des températures d'environ 0,03°C/an mais, concomitamment, une baisse des précipitations annuelles d'environ 2 mm/an.

On a fait l'hypothèse que ce scénario serait également majorant en termes d'impact sur l'apparition de fontis. Cependant, on constate qu'il limite l'influence des précipitations qui sont l'un des paramètres importants dans l'analyse de ce phénomène. Il conviendrait donc de tester d'autres scénarios climatiques qui auraient un effet moins réducteur sur les précipitations.

### **10.2.4 Choix du modèle climatique**

Du fait des contraintes imposées par les temps de calcul, on a utilisé ici un modèle climatique prévisionnel unique, ce qui n'est pas une option satisfaisante en termes de représentation des incertitudes, alors qu'il s'agit là d'un point sensible dans l'étude des impacts du changement climatique. Il serait intéressant d'associer à ces extractions l'information provenant d'un ensemble de plusieurs simulations climatiques, comme cela est proposé dans le 4<sup>e</sup> volume du rapport Jouzel (Ouzeau et al., 2014), et de mettre en œuvre des techniques statistiques de descente d'échelle et de correction de biais. L'utilisation conjointe d'un ensemble de modèles et de plusieurs scénarios RCP permettrait de couvrir les incertitudes de modélisation et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

## **10.3 VALIDITÉ DE L'APPROCHE RÉALISÉE**

Ce travail doit être considéré comme une première approche de l'impact du changement climatique attendu sur le risque d'apparition de fontis dans le Val

d'Orléans. Il fait l'hypothèse que les relations entre l'apparition de fontis et les paramètres climatiques, établies sur une période de référence, restent valables dans la gamme des températures et précipitations attendues au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Il n'a pas vocation à être extrapolé à d'autres contextes climatiques ou hydrogéologiques. En outre, basé sur un seul modèle climatique prévisionnel et un seul scénario de forçage radiatif, il doit être considéré comme une étude de faisabilité.

Si une suite devait être donnée à ce travail, il conviendrait, outre l'AFD, de mettre en œuvre d'autres méthodes statistiques, et de faire appel à d'autres types de simulations climatiques que celles issues du modèle WRF-IPLS-INERIS, à d'autres scénarios de forçage radiatif que le scénario RCP8.5, et à d'autres paramètres hydroclimatiques tels que le niveau des nappes et des cours d'eau.

## 11. BIBLIOGRAPHIE

Ardau F, Balia R, Bianco M, De Waele J, 2007. Assessment of cover-collapse sinkholes in SW Sardinia (Italy). In: Parise, M. & Gunn, J. (eds) Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation. Geological Society, London, Special Publications, 279, 47– 57. DOI: 10.1144/SP279.5

Bakalowicz M, 2018. Le karst, ressource en eau renouvelable dans les roches calcaires, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/karst-ressource-eau-renouvelable-roches-calcaires/>.

Bouttier F, 2018. La prévision d'ensemble. Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/air/prevision-densemble/>

Bouzemane M, 2014. La caractérisation de l'aléa « effondrement karstique » dans le Val d'Orléans (Loiret). Rapport de stage de Master 2, Université Paris I.

Delle Rose M, Federico A, Parise M, 2004. Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2004, 4 (5/6), pp.747-755.

Déqué M, 2018. La prévision saisonnière. Encyclopédie de l'environnement, [En ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=1707>

Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benshila R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, de Noblet N, Duvel JP, Ethé C, Fairhead L, Fichet T, Flavoni S, Friedlingstein P, Grandpeix JY, Guez L, Guilyardi E, Hauglustaine D, Hourdin F, Idelkadi A, Ghattas J, Joussaume S, Kageyama M, Krinner G, Labetoulle S, Lahellec A, Lefebvre MP, Lefevre F, Levy C, Li ZX, Lloyd J, Lott F, Madec G, Mancip M, Marchand M, Masson S, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Parouty S, Polcher J, Rio C, Schulz M, Swingedouw D, Szopa S, Talandier C, Terray P, Viovy N, 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 Climate Dynamics, in press., 10.1007/s00382-012-1636-1.

Ek M, Mitchell K, Lin Y, Rogers E, Grunmann P, Koren V, Gayno G, Tarpley J, 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108.

Giorgi F, Jones C, Asrar GR, 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, WMO Bulletin, 58, 175-183.

Gombert P, Orsat J, Mathon D, Alboresha R, Al Heib M, Deck O, 2014. Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val d'Orléans (France). Bull Eng Geol Environ, Volume 74, Issue 1, 125-140.

Hong SY, Dudhia J, Chen SH, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, Monthly Weather Review, 132: 103-120.

Hyatt JA, Jacobs PM, 1996. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. Geomorphology 17 (1 996) 305-316

Intrieri E, Gigli G, Nocentini M, Lombardi L, Mugnai F, Fidolini F, Casagli N (2015). Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application. *Geomorphology*, Volume 241, 2015, pp. 304-314.

IPCC, 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen O, Bouwer L, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kraner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B, Yiou P, 2013. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change*: 1-16.

Jiang X, Lei M, Gao Y, 2018. New Karst Sinkhole Formation Mechanism Discovered in a Mine Dewatering Area in Hunan, China. *Mine Water Environ* (2018) 37: 625. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0486-9>

Kaufmann G, Romanov D (2016). Structure and evolution of collapse sinkholes: Combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical field work. *Journal of Hydrology*, Volume 540, pp. 688-698. Al Heib M, Gombert P, Charmoille A, 2008. Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : Etat des connaissances. Rapport INERIS DRS-08-95052-11840A.

Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, Colette A, Déqué M, Gobiet A, Goergen K, Jacob D, Lüthi D, van Meijgaard E, Nikulin G, Schär C, Teichmann C, Vautard R, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V, 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 7, 1297-1333, 2014.

Lafont G, 2014. Analyse probabiliste de l'occurrence des fontis sur le territoire français et détermination de la probabilité de rencontre d'un bâtiment. Rapport de synthèse. Université de Lorraine – Mines Nancy, 18/05/2014.

LCPC, 2008. Les marnières de Haute-Normandie. Méthodologies d'étude et de prévention. Guide technique. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2008, doi/Crossref 10.3829/gt-gtmarn.fr

Lepiller M, Jozja N, 2010. Le Val d'Orléans, un aquifère karstique alimenté par la Loire. In : Grottes et karsts de France. *Karstologia Mémoires*, n° 19 : 170-171.

Mangin A, 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale - The use of autocorrelation and spectral analyses to obtain a better understanding of hydrological systems. *Journal of Hydrology* 67, 25-43.

Maurin J, Boulay A, Tourment R, Beullac B, 2012. Étude de dangers de la levée d'Orléans, digues de classe A. Résumé non technique. Décembre 2012, 16 p.

Maurin J, Boulay A, Ferreira P, Tourment R, Beullac B, 2012. Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents – retour d'expérience. Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, 2<sup>ème</sup> Colloque national, Aix-en-Provence, 12-14 juin 2013, 7 p.

ONERC, 2013. Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Sept. 2013, 12 p.

Orsat J, 2013. Caractérisation de l'impact des réseaux karstiques dans la survenue des désordres sur les digues de classe A du Val d'Orléans. Rapport de Master 1 Environnement-Géosciences, Université de Lille 1.

Ouzeau G, Déqué M, Jouini M, Planton S, Vautard R, Jouzel J, 2014. Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. DGEC, août 2014.

Perrin J, Gutierrez A, Vanoudheusden E, Salquèbre D, Joigneaux E, Château C, Jozja N, Défarge C, Binet S (2016). Projet i-fontis : vers une méthodologie de surveillance de l'apparition de fontis dans le Val d'Orléans. Rapport final. BRGM/RP-65474-FR, mars 2016.

Schwarz D, 1963. Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. Flammarion, 303 p.

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, Powers JG, 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR.

Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA, 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, Bulletin of the American Meteorological Society, 93: 485-498.

Treffot M, 2015. Analyse et modélisation des facteurs de prédisposition à l'effondrement karstique des terrains du Val d'Orléans. Rapport de stage de Master 2, Université de Strasbourg.

Van Vuuren D, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S, Rose S, 2011. The representative concentration pathways: an overview Climatic Change, 109: 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

Waltham T, Bell F, Culshaw M, 2005. Sinkholes and subsidence, karst and cavernous rocks in engineering and construction, book, Springer, ch.1, 379 p.

Wanfang Z, 1997. The formation of sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. Environmental Geology 31 (1/2), may 1997.

Zhao H, Ma F, Guo J, 2011. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010. Nat Hazards, DOI/10.1007/s11069-011-9888-3.



## 12. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Constitution du lot de référence de l'AFD	3 A4
Annexe 2	Indicateurs climatiques (variables explicatives) et liés aux fontis (variables dépendantes) pour les semestres de la période de référence 2006-2017	1 A4
Annexe 3	Equations discriminantes obtenues avec les diverses variables dépendantes	1 A4



## Annexe 1

### Constitution du lot de référence de l'AFD

Ce lot de référence doit renfermer un effectif suffisant de jours avec et sans fontis, pris entre 1994 et 2016, à l'exception des années 2010 et 2013 qui doivent servir à la validation des fonctions de classement.

#### A - Sélection d'un lot représentatif de jours avec fontis

La base de données renferme 91 fontis datés au jour, pour lesquels on va chercher à corréliser la période d'apparition avec les indicateurs hydroclimatiques. Comme évoqué précédemment, il est possible de récupérer facilement ces données pour la période allant de 1994 à 2016 mais cela est plus compliqué pour la période antérieure à 1994. Le travail a donc été réalisé sur la période 1994-2016 qui regroupe 72 fontis survenus en 50 jours distincts. Au sein de cette période, on n'a conservé que les 29 jours de fontis survenus en dehors des années 2010 et 2013 : ils sont présentés dans le tableau A de la page suivante.

#### B - Sélection d'un lot représentatif de jours sans fontis

Parallèlement aux jours avec fontis, il est nécessaire de disposer d'un lot de jours où aucun fontis ne s'est produit. La fabrication de ce lot est plus problématique car l'absence de signalement de fontis un jour donné ne signifie pas forcément qu'il n'y en a pas eu. Comme le fait remarquer Lafont (2014), le suivi du nombre réel de fontis (en contexte minier) est rendu délicat par les facteurs suivants :

- s'ils ne sont pas découverts rapidement, ce qui peut être le cas en plein champ, les fontis peuvent s'auto-combler peu après leur formation ;
- les propriétaires de terrains dans lesquels des fontis apparaissent ne sont pas toujours enclins à les signaler.

Dans le cas présent, on a choisi de considérer comme « sans fontis » tout jour où aucun fontis n'a été déclaré et qui est séparé de plus d'un mois du fontis précédent ou suivant. En excluant les années 2010 et 2013, on a ainsi pu créer une liste de 16 jours sans fontis, telle que référencée dans le tableau B (voir en pages suivantes).

Tableau A - Jours avec fontis du lot de référence

Référence du fontis	Date d'apparition	Nombre de fontis/jour
647	22/11/1994	1
618	16/04/2004	1
634	04/05/2005	1
423	24/10/2006	1
633	07/06/2007	1
424	01/08/2007	1
425	01/12/2007	1
551	02/01/2008	1
619	27/03/2008	1
630	18/04/2008	1
635	21/04/2008	1
627	04/06/2008	1
600	01/11/2008	1
553	30/01/2009	1
620	27/02/2009	1
621 et 622	12/05/2009	2
554	01/11/2009	1
625	26/07/2011	1
628	11/08/2011	1
626	01/01/2012	1
640	08/07/2012	1
636	09/10/2012	1
637	10/10/2012	1
506 et 644	13/11/2012	2
555	15/12/2012	1
580	04/08/2015	1
604 à 617	05/06/2016	14
603	12/06/2016	1
651	22/12/2016	1

Tableau B - Jours sans fontis du lot de référence

Référence	Date
J1	28/05/2002
J2	07/05/2003
J3	31/05/2006
J4	01/10/2007
J5	13/02/2008
J6	18/08/2008
J7	16/12/2008
J8	20/08/2009
J9	28/12/2009
J10	23/02/2011
J11	12/06/2011
J12	21/10/2011
J13	15/02/2012
J14	04/04/2012
J15	04/06/2012
J16	23/08/2012



## Annexe 2

### Indicateurs climatiques (variables explicatives) et liés aux fontis (variables dépendantes) pour les semestres de la période de référence 2006-2017

*Légende : la première colonne correspond à la date de la fin du semestre, les dix suivantes aux variables explicatives (indicateurs climatiques) et les deux dernières aux variables dépendantes proposées (indicateurs relatifs aux fontis).*

Date	P <sub>MOY</sub>	P <sub>MIN</sub>	P <sub>MAX</sub>	JP <sub>MIN</sub>	JP <sub>MAX</sub>	T <sub>MOY</sub>	T <sub>MIN</sub>	T <sub>MAX</sub>	JT <sub>MIN</sub>	JT <sub>MAX</sub>	N <sub>FONT</sub>	N <sub>JOUR</sub>
02/07/06	3,5	0,0	28,6	44	37	6,4	-10,3	22,9	18	0	0	0
01/01/07	3,7	0,0	63,1	43	28	11,0	-10,1	25,4	8	0	1	1
03/07/07	3,8	0,0	39,9	50	33	6,5	-10,7	28,3	27	2	1	1
02/01/08	3,3	0,0	81,5	60	30	10,5	-5,3	26,7	10	1	3	3
03/07/08	2,6	0,0	57,9	60	24	6,8	-7,9	23,8	31	0	4	4
02/01/09	3,4	0,0	33,7	47	36	12,0	-3,6	28,9	3	5	1	1
04/07/09	3,6	0,0	52,1	29	34	5,3	-13,7	24,8	25	0	5	3
03/01/10	3,4	0,0	45,1	43	30	11,5	-4,1	27,5	2	5	1	1
05/07/10	3,4	0,0	51,1	37	28	7,7	-1,8	23,3	0	0	4	4
04/01/11	4,5	0,0	31,4	48	42	10,1	-6,9	27,8	13	2	6	6
06/07/11	3,7	0,0	42,7	53	31	8,2	-6,6	24,3	8	0	2	1
05/01/12	3,8	0,0	38,2	40	42	11,8	-6,0	27,8	8	3	3	3
06/07/12	3,7	0,0	31,1	47	35	6,4	-6,3	25,2	17	0	0	0
05/01/13	4,4	0,0	46,5	45	40	11,3	-5,9	26,2	10	0	6	5
07/07/13	3,8	0,0	37,3	45	33	6,7	-7,0	24,2	25	0	12	6
06/01/14	4,0	0,0	98,7	66	29	10,9	-8,2	27,8	18	3	3	3
08/07/14	5,7	0,0	83,3	35	47	7,5	-8,2	26,7	16	0	0	0
07/01/15	5,3	0,0	49,1	34	51	11,4	-7,0	28,9	12	7	0	0
09/07/15	5,1	0,0	50,8	41	49	8,1	-9,7	23,1	9	0	0	0
08/01/16	4,6	0,0	39,7	42	49	9,8	-11,6	29,9	14	7	1	1
09/07/16	4,9	0,0	33,8	33	47	7,3	-3,7	23,2	6	0	15	2
08/01/17	3,2	0,0	35,0	67	30	11,7	-6,2	25,8	7	0	1	1
10/07/17	3,0	0,0	33,7	51	29	7,2	-6,3	22,4	16	0	0	0
09/01/18	3,5	0,0	31,1	43	38	11,3	-2,4	27,8	2	5	0	0



### Annexe 3

#### Equations discriminantes obtenues avec les diverses variables dépendantes

Légende :

- Classe 0 = semestres « nuls »
- Classe 1 = semestres « positifs »
- Constante = constante de chaque équation discriminante
- Autres paramètres = coefficients à appliquer à chaque indicateur climatique

#### Equations discriminantes avec les variables dépendantes NJ<sub>2</sub> ou NF<sub>2</sub>

Classe	Constante	PMOY	PMAX	JPMIN	JPMAX	TMOY	TMIN	TMAX	JTMIN	JTMAX
0	-222,377	-18,963	0,116	0,738	2,667	-5,775	0,402	18,179	-0,977	-12,989
1	-226,060	-21,936	0,199	0,581	2,918	-4,967	1,112	18,324	-0,642	-13,859

#### Equations discriminantes avec les variables dépendantes NJ<sub>3</sub> ou NJ<sub>4</sub>

Classe	Constante	PMOY	PMAX	JPMIN	JPMAX	TMOY	TMIN	TMAX	JTMIN	JTMAX
0	-223,808	-21,073	0,170	0,635	2,792	-5,171	0,743	18,388	-0,758	-13,551
1	-232,200	-24,686	0,264	0,459	3,012	-4,141	1,346	18,733	-0,380	-14,521

#### Equations discriminantes avec la variable dépendante NF<sub>3</sub>

Classe	Constante	PMOY	PMAX	JPMIN	JPMAX	TMOY	TMIN	TMAX	JTMIN	JTMAX
0	-234,873	-20,343	0,164	1,156	2,876	-7,298	-0,872	18,527	-1,697	-11,789
1	-224,611	-19,472	0,134	0,922	2,750	-6,455	-0,168	18,325	-1,297	-12,446

#### Equations discriminantes avec la variable dépendante NF<sub>4</sub>

Classe	Constante	PMOY	PMAX	JPMIN	JPMAX	TMOY	TMIN	TMAX	JTMIN	JTMAX
0	-222,670	-18,116	0,085	0,679	2,612	-5,451	0,488	18,216	-0,878	-13,260
1	-230,325	-15,634	-0,007	0,440	2,459	-4,147	0,925	18,371	-0,463	-14,386



**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

**Institut national de l'environnement industriel et des risques**

Parc Technologique Alata  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) - Internet : <http://www.ineris.fr>