

CARTE : ALÉA D'INONDATION

THEME : EAU

1 PRÉAMBULE : DÉFINITION DE L'ALÉA ET MÉTHODE DE TRAVAIL

Le **risque d'inondation** est évalué par l'intermédiaire de deux composantes:

- l'**aléa**, lié au phénomène physique de submersion, résultant d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données,
- et la **vulnérabilité** (ou **enjeux**), liée à la présence de population ou au degré potentiel d'endommagement des biens et de perturbation des activités susceptibles d'être affectés par la submersion.

Le risque est considéré comme une mesure de la dangerosité résultant de la confrontation entre l'aléa et les enjeux.

L'objet de ce travail est la mise en carte de l'aléa. L'aléa est le plus souvent caractérisé par une intensité (traduisant l'importance de la submersion en terme de hauteur, vitesse ou durée), et par une occurrence temporelle et spatiale. La probabilité d'occurrence temporelle dépend de facteurs déclenchant comme la pluie. Elle peut être estimée qualitativement (négligeable, faible, forte) ou quantitativement (temps de retour¹ de 100 ans, 30 ans, 10 ans). Pour un point quelconque de l'espace, si l'on cherche à caractériser l'intensité de l'aléa ainsi que sa probabilité d'occurrence temporelle, on est obligé de réaliser des modélisations hydrologiques et hydrauliques assez complexes pour lier les statistiques de pluie aux caractéristiques de submersion qui en résultent. Ces modélisations n'existent pas encore à l'échelle de la Région (pour rappel, tout le territoire est concerné, et pas seulement les zones en bordure de rivière).

La probabilité d'occurrence spatiale, elle, est conditionnée par des facteurs de prédisposition ou de susceptibilité. L'approche retenue dans ce travail se base sur cette probabilité d'occurrence spatiale, en tenant compte des facteurs de prédisposition dérivable à l'échelle de la Région. Ceux-ci sont la proximité aux axes d'écoulement (le fait d'être situé dans un axe ou à hauteur d'un axe), la nature des sols (humide, sédimentaire) et l'imperméabilisation à l'amont.

L'intensité de l'aléa dans ce cas ne sera pas exprimée en terme de temps de retour ou de hauteur de submersion (qui, pour rappel, nécessiteraient des modélisations hydrologiques et hydrauliques sur tout le territoire), mais par référence au pourcentage d'observations historiques ayant eu lieu pour des niveaux de susceptibilité équivalents ou moindres.

La présente note explicite la méthodologie et les résultats de la mise en carte de l'aléa.

¹ Le temps de retour caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Le temps de retour d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement: un temps de retour de 10 ans correspond donc à une fréquence d'occurrence d'1/10 par an (sur une série statistique longue et homogène). Une pluie de temps de retour court s'observe donc plus fréquemment qu'une pluie de temps de retour long.

2 RÉSUMÉ DE LA NOTE MÉTHODOLOGIQUE

Pour la Région de Bruxelles Capitale, à la fois les débordements de cours d'eau et d'égouts doivent être pris en compte dans l'analyse des risques d'inondations. Le risque est considéré comme une mesure de la dangerosité résultant de la confrontation entre l'aléa et les enjeux. L'objet de ce travail est la mise en carte de l'aléa. Chaque parcelle du territoire a sa propre sensibilité par rapport à des pluies d'intensité et de durée différentes, selon sa position au sein du bassin versant. En tête de bassin versant, ce sont les orages violents qui génèrent des crues dites « éclaires », tandis que dans le lit majeur des rivières, ce sont plutôt les longues périodes pluvieuses qui génèrent des inondations extensives par débordement de cours d'eau.

Nous avons procédé à une première analyse de l'aléa « in extenso », c'est-à-dire que l'on étend le périmètre de la zone en aléa (déterminée sur base de propriétés géographiques déterminant la prédisposition des parcelles à être submergées) de sorte à englober au mieux les lieux pour lesquels on dispose d'observations historiques d'inondations entre 1997 et 2012 (plus de 7450 points d'adresse issus du Fond des Calamités, des données du SIAMU et de la base de donnée de VIVAQUA). L'enjeu est de couvrir un maximum d'observations historiques d'inondation tout en cernant au maximum la zone en aléa et éviter une extension excessive de celle-ci qui diminuerait sa pertinence. Cette étude, basée actuellement sur une approche géographique, devra être affinée par une étude hydrologique et hydraulique plus complexe au fur et à mesure des possibilités de modélisation.

La localisation des observations historiques d'inondations ne constitue qu'une information ponctuelle, localisée le plus généralement en zone habitée (là où l'aléa agit sur un enjeu). La carte d'aléa doit par contre être une donnée continue dans l'espace qui délimite le périmètre de l'inondation, en zone habitée comme en zone non habitée. Dès lors, la méthode consiste à se baser sur une série de facteurs de prédisposition dérivés d'information géographique connue en tous points du territoire (topographie, imperméabilisation et condition de sol). Ces facteurs de prédisposition sont :

- **Le facteur de surplomb** : ce facteur indique initialement à quel point un lieu est perché au-dessus de son thalweg et ainsi lui permet d'échapper à l'inondation de celui-ci. C'est son contraire qui est utilisé comme facteur de prédisposition. Ce facteur fait alors ressortir les zones en fond de vallée peu perchées au-dessus de leurs thalwegs et donc facilement submersibles.
- **le facteur d'humidité topographique (TWI)** : le TWI est un indice classique qui sert à quantifier l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autres l'engorgement des sols). Il fait ressortir les zones relativement plates et naturellement humides de par leur position dans le bassin versant.
- **le facteur d'aire urbanisée** : ce facteur reflète le fait que plus la surface urbanisée à l'amont d'une parcelle est grande, plus la quantité de ruissellement qui transitera par celle-ci au cours de l'évènement est importante. Il fait donc ressortir les zones de concentrations des écoulements à l'aval des zones urbanisées.
- **le facteur de sol** : les sols dont la fraction granulométrique est petite sont des zones de faible potentiel d'infiltration et donc naturellement sujettes à l'engorgement, mais également des témoins de dépôts alluvionnaires probablement liés aux inondations lointaines.

Afin de quantifier l'aléa de façon nuancée, il faut ensuite combiner ces différents facteurs de prédisposition entre eux. Ces différents facteurs de prédispositions ne sont pas indépendants les uns des autres et, très logiquement, la plupart des fonds de vallée vont ressortir dans les différents facteurs, puisque les prédispositions défavorables s'y renforcent. Chaque facteur de prédisposition, possédant au départ une unité bien distincte de celle des autres, est associé à une valeur adimensionnelle comprise entre 0.1 (favorable) et 1 (défavorable), par l'intermédiaire d'une fonction d'appartenance construite sur base des statistiques d'observation d'inondation. Ces facteurs de



prédisposition adimensionnels sont ensuite multipliés entre eux et retransformés de sorte à présenter une valeur finale (l'intensité de l'aléa ou *susceptibilité à l'inondation*) interprétable au vu des observations historiques d'inondation. Ainsi, si pour un site particulier on obtient une valeur de susceptibilité à l'inondation égale à 0.8, cela signifie que 80% des sites que l'on sait avoir été inondés entre 1999 et 2009 (Fond des Calamités) se trouvaient à un niveau de susceptibilité (représentée par le produit des facteurs de prédisposition adimensionnels) tout au plus aussi défavorable que la situation du site en question.

L'analyse conjointe de la susceptibilité à l'inondation et de la récurrence des inondations déclarées au Fond des Calamités nous a conduits à définir comme étant en zone d'aléa, les pixels où la susceptibilité à l'inondation est supérieure à 0,4. Avec une tolérance d'un pixel (20m) sur la localisation des inondations, nous recoupons ainsi 80 % des observations dont la récurrence est supérieure ou égale à 1x en 10 ans et plus de 96% des observations dont la récurrence est supérieure ou égale à 2x en 10 ans.

La méthode ci-dessus est une approche globale, mais simplifiée de la réalité. Les périmètres des zones d'aléa délimités par la méthode décrite ci-dessus ont été discutés pour affinage avec les experts de terrains (communes, gestionnaires d'égouts et du Canal). Cette étape a exploité les résultats de la présente méthode comme point de départ pour une définition réelle de la zone d'aléa. Des détails de terrains non repris dans la topographie de surface, comme la présence de bassin d'orage ou de digue de protection, sont alors pris en compte.



3 INTRODUCTION

3.1 Le phénomène d'inondation

Une inondation est un *débordement d'un cours d'eau, le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins. Le terme est souvent étendu aux débordements d'ouvrages artificiels tels que retenues ou réseaux d'assainissement. Des inondations peuvent aussi se produire en amont des cours d'eau, suite à la génération de quantités importantes de ruissellement* au niveau de terres imperméabilisées par exemple. Pour la Région de Bruxelles Capitale, il a été arrêté qu'à la fois les débordements de cours d'eau et d'égouts devaient être pris en considération dans l'analyse des risques d'inondations. Tout le territoire est donc concerné et il convient au sein de celui-ci de délimiter plus finement les zones à aléa significatif.

3.2 La cause pluviométrique

Pour le territoire bruxellois, on peut distinguer deux grands types d'évènements pluvieux à problèmes : les orages du printemps-été et les longues pluies d'automne-hiver.

Pour un territoire urbanisé et situé en tête de bassin versant, ce sont les orages violents qui génère des crues dites « éclaires », suite à un ruissellement rapide. La génération massive de ruissellement est dû à l'effet limitant de la vitesse d'infiltration par rapport à l'intensité de la pluie, et la convergence rapide des écoulements au sein du système d'égouttage. Ces crues sont localisées, apparaissent et disparaissent rapidement, et peuvent violemment endommager les infrastructures. C'est ce qui s'est passé notamment au mois d'août 2011, où l'on a observé des orages brefs, peu étendus, mais très intenses.

Pour un territoire situé dans le lit majeur des rivières, ce sont plutôt les longues périodes pluvieuses qui génèrent des inondations extensives par débordement de cours d'eau. La crue est alors provoquée par l'engorgement des sols en amont qui ne permet plus l'infiltration. La montée des eaux est progressive et provoque un passage de l'eau au-dessus des berges et une inondation de la plaine alluviale. Il s'agit d'un processus naturel propre aux rivières, qui peut être augmenté par l'action de l'homme s'il contient trop l'épanchement de la crue en amont. Une telle crue a eu lieu en novembre 2010, suite à un automne fort pluvieux et des précipitations neigeuses qui avaient limité encore plus la capacité d'infiltration des sols en les gelant. Ceci avait généré un débordement de la Senne et du Canal qui jouxte en Wallonie, en Flandre et à Bruxelles.

En règle générale, plus on va vers l'aval d'un bassin versant, plus la durée de la pluie critique augmente et son intensité diminue (statistiquement, l'intensité d'une pluie critique décroît avec sa durée). Chaque parcelle du territoire a donc sa propre sensibilité par rapport à des pluies d'intensité et de durée variable, en fonction de sa position au sein du bassin versant. Il convient donc d'englober dans l'étude des pluies de durée variables. On ne peut se limiter à l'analyse de l'un ou l'autre évènement majeur.

3.3 Les observations d'inondation, une information directe, mais ponctuelle

Les observation d'inondation sont issus de quatre sources distinctes :

- un rapport de la Province du Brabant reprenant les noms des rues inondées entre 1900 et 1970,
- une localisation par point d'adresse des interventions de pompiers entre 1997 et 2009 lors d'inondations et pour des interventions de pompage de cave et de nettoyage d'avaloirs bouchés,
- une localisation par point d'adresse des dossiers envoyés au fond des calamités liés aux inondations entre 1999 en 2009,



- une localisation par point d'adresse des observations rapportées au gestionnaire d'égouttage (BD SIGASS Flood) entre 1992 et 2012.

Ces observations d'inondation ne sont pas exhaustives pour plusieurs raisons :

- soit une zone est inondée, mais personne n'en fait témoignage, parce que personne n'est directement touché (inondation en zone non bâtie par exemple)
- soit une zone est inondée, mais les personnes touchées ne font pas intervenir le fond des calamités, les pompiers ou le gestionnaire d'égout.
- soit une zone est théoriquement inondable, mais en pratique pas inondée localement, car des dispositifs de protection (privés ou collectifs) existent déjà.

Par ailleurs la localisation des inondations rapportée est parfois trop vague (c'est le cas lorsque l'on ne dispose que d'un nom de rue), et l'extension de l'inondation n'est jamais mentionnée.

En résumé, ce n'est pas parce qu'il n'existe aucune observation d'inondation pour une zone particulière que cette zone est forcément épargnée. On dispose en réalité de beaucoup d'information utile, mais ponctuelle, liées à la présence d'un enjeu et incomplète. La carte devra dès lors être réévaluée au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances.

Par ailleurs, il faut aussi distinguer le caractère récurrent de l'inondation: répétitif ou accidentel. Un problème fortuit peut survenir (tel la présence d'embâcles dans le réseau d'écoulement), provoquant une inondation dans une zone a-priori non-inondable.

3.4 L'aléa, une information continue mais indirecte

Par définition, on sait qu'on est en zone inondable si la zone a déjà été inondée. Cela dit, la localisation des observations d'inondation ne constitue la plupart du temps qu'une information ponctuelle (dans le sens en un point unique de l'espace), or la carte d'aléa doit être une donnée continue dans l'espace. On souhaite en effet pouvoir délimiter le périmètre de l'inondation et non pas seulement situer l'inondation par rapport à un lieu-dit ou un point d'adresse. Il faut dès lors étendre l'analyse en tous points de la Région. Pour cela on utilise une série de facteurs de prédisposition à l'inondation que l'on dérive d'information connue en tous points. En combinant ensuite les facteurs de prédisposition entre eux, on attribue à tout point du territoire une valeur quantifiant l'intensité de l'aléa, reprise sous le terme de susceptibilité à l'inondation. Cette combinaison est construite de sorte que les zones d'aléa délimitées sur base de l'analyse de la susceptibilité à l'inondation soient en adéquation avec les observations d'inondation. En résumé, on quantifie l'aléa d'inondation en tout point, sur base d'information continue dans l'espace et après un processus de calibration basé sur la comparaison entre les zones d'aléa prédites en tous points et les observations ponctuels d'inondation.

3.5 Les facteurs de prédisposition, basés sur des informations continues dans l'espace

Intuitivement, on se doute qu'une zone est susceptible d'être inondée si:

- On est en fond de vallée (cf. facteur de surplomb),
- dans une zone relativement plate (cf. facteur de pente),
- et plus particulièrement dans une zone naturellement humide de par sa position dans le bassin versant (cf. facteur d'humidité topographique)

Ces facteurs peuvent être directement dérivés de la topographie (le **Modèle Numérique de Terrain** issu du vol LIDAR 2012 du CIRB, agrégé au pas de 20m et mixé au **MNT IGN** au pas de 20 m est notre donnée source). La topographie exerce un contrôle de premier ordre sur les variations spatiales des conditions hydrologiques (humidité du sol, orientation et accumulation du ruissellement et de l'écoulement souterrain).



Par ailleurs, on se doute qu'on est en zone susceptible d'être inondée si :

- On se situe à l'aval d'une grande superficie, d'autant plus si cette superficie est fortement urbanisée (cf. facteur d'aire urbanisée contributive)

Cette donnée dérive de la topographie et du taux d'imperméabilisation de la région (l'étude de l'IGEAT sur le taux d'urbanisation en 2006, au pas de 0.6m agrégé au pas de 20 m, est notre donnée source)

Enfin, on se doute qu'on est en zone susceptible d'être inondée si :

- Le sol est constitué d'alluvions témoignant d'inondations passées (facteur de sol)

La carte pédologique de Belgique ne couvre qu'une infime partie de la Région, vu le caractère remanié du sol et son imperméabilisation. Dès lors nous exploitons la carte des « sols naturels » du projet BONat qui représente les sols tels qu'ils ont probablement été avant l'existence de la ville, et ce sur base des observations de profondeur de nappe, des données géologiques et hydrogéologiques.

Afin de quantifier l'aléa de façon nuancée, il faut ensuite combiner ces différents facteurs de prédisposition entre eux.



4 FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

4.1 Au départ, un modèle numérique de terrain hydrologiquement valide

Le modèle numérique de terrain (MNT) issu du vol LIDAR 2012, fourni par le CIRB a été modifié pour permettre le bon calcul des indices de risques. En effet, la présence de talus et de ponts modifie la topographie vue depuis le ciel et constitue des sortes de barrages virtuels à l'écoulement. En pratique, les dépressions réellement existantes sont comblées par des étangs et des ouvrages de franchissement sont prévus sous les talus et les ponts. Cette possibilité de circulation de l'eau doit être considérée dans le modèle numérique de terrain pour éviter des biais importants dans le calcul des indices. Par ailleurs, le système d'égouttage à sa propre logique d'écoulement qui n'est pas toujours en adéquation avec le relief en surface. Le modèle numérique de terrain est dès lors manipulé (creusement de chenaux au travers des talus, comblements des dépressions et orientation des axes d'écoulement dans le sens des collecteurs) avant son usage dans le calcul des facteurs de prédisposition qui suivent. Par ailleurs, étant donné l'échelle de travail (1/10.000) et la lourdeur des calculs, le pas de 1m du MNT a été ramené à 20m, mais de façon à ne pas perdre l'information sur les chenaux d'écoulement. Ce pas de 20m détermine la résolution spatiale des facteurs de prédisposition, et donc la résolution spatiale de la susceptibilité à l'inondation également. Le pixel de la carte d'aléa sera de 20m de côté.

Les facteurs de prédisposition sont calculés en interaction les uns avec les autres, étant donné que certaines étapes de calcul partant du MNT sont communes (ex. : identification des orientations d'écoulement et des aires contributives pour le positionnement des thalwegs dans le calcul du surplomb, dans le calcul de la surface contributive d'aire urbanisée ou encore pour l'indice d'humidité topographique). Les directions de flux et le calcul de l'aire contributive se base sur un algorithme de « multiple-flow direction » (Toolbox TauDEM²), qui diminue fortement le phénomène de hachure tel qu'engendré par un algorithme plus classique de « single-flow direction ».

4.2 Le facteur de surplomb, le risque d'être dans le fond...

Le facteur de surplomb calcule pour chaque pixel la différence de niveau entre l'altitude de ce pixel et l'altitude du pixel formant le thalweg le plus proche. Cet indice nous indique (en cm) à quel point un lieu est perché au-dessus de son thalweg et ainsi lui permet d'échapper à l'inondation de celui-ci. Le calcul consiste à identifier les pixels constituant les thalwegs (sur base d'un seuil d'aire contributive), à allouer les pixels restants aux pixels des thalwegs les plus proches et enfin à comparer l'altitude de chaque pixel par rapport à l'altitude du pixel de thalweg auquel il est rattaché. La valeur est ensuite prise dans l'autre sens (les faibles valeurs indiquent une grande prédisposition) pour servir de facteur de prédisposition et indique à quel point une zone est à hauteur du thalweg et donc risque d'être inondée.

4.3 L'indice de pente, le risque de stagnation de l'eau....

La vitesse de circulation de l'eau dépend de la pente. Pour un même débit, la hauteur d'eau dans les conduites, les chenaux ou sur les surfaces ruisselantes sera d'autant plus faible que la pente est forte. Le risque de mise en charge des ouvrages ou de submersion significative est donc lié à la pente. Ce facteur n'est toutefois pas utilisé explicitement, mais est inclus dans le facteur d'humidité topographique qui suit.

² <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/index.html>



4.4 Le facteur d'humidité topographique (TWI), le risque d'engorgement des sols...

Le Topographic Wetness Index (TWI) (Beven and Kirkby, 1979³) est un indice hydrologique classique pour identifier les zones hydrologiquement homogènes et quantifier l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autres l'engorgement des sols) et les autres processus biologiques et chimiques qui en découlent. Il est défini comme $\ln(A/\tan(B))$, où $\tan(B)$ [m/m] est la pente locale et A [m²/m] est, pour chaque pixel et par unité de largeur, l'aire contributive (càd. la surface située à l'amont du pixel et drainée par ce pixel). Différents algorithmes existent pour ces calculs et diffèrent principalement dans la manière dont les aires contributives se propagent vers l'aval et dans le rayon d'influence utilisé dans le calcul de la pente. De l'étude de Sorensen et al. (2006)⁴ qui comparent l'impact du choix des algorithmes, on tire comme conclusion que la qualité des résultats est renforcée lorsqu'on utilise :

- des algorithmes d'accumulation de flux multidirectionnels₁
- la modification de Tarboton (1997)⁵ dans le calcul de la direction de flux

Nous avons donc suivi ces recommandations en exploitant un algorithme de multiple-flow accumulation area exploitant la modification de Tarboton (1997) dans le calcul des angles (toolbox TauDEM, développé à l'Utah State University).

4.5 Le facteur d'aire urbanisée contributive, l'importance du ruissellement en transit...

Chaque pixel se voit attribuer la valeur de la surface urbanisée située à l'amont de celui-ci et drainée par celui-ci. La surface urbanisée est calculée sur base du taux d'urbanisation qui pondère la surface réelle. Plus la surface urbanisée à l'amont d'un pixel est grande, plus la quantité de ruissellement qui transitera par celui-ci au cours de l'évènement sera importante, accentuant ainsi l'importance de l'inondation en terme de hauteur et d'extension en cas d'obstruction hydraulique. L'aire contributive exploite à nouveau un algorithme multidirectionnel de la toolbox TauDEM.

4.6 Le facteur de sol, le témoin d'un passé alluvionnaire...

Les processus d'érosion-déposition affectent la pédologie et la géomorphologie. L'érosion décape les sols en amont et entraîne préférentiellement certaines fractions particulières. Les particules sédimentent en fonction de leur taille et de l'agitation (lié à la vitesse d'écoulement) des eaux. On observe un dépôt de particules fines dans les zones inondées où l'eau stagne, c'est le processus qui conduit à la formation des plaines alluviales où l'on retrouve des sols de surface enrichis en particules fines (argiles ou limon fin). Ces dépôts constituent un sol lourd, peu drainant et facilement engorgé. En temps de pluie, l'infiltration y est très limitée, tant par la finesse des pores qui limite la conductivité du sol que par la saturation préexistante qui limite la sorptivité. Ces sols sont les témoins d'inondation passée et infiltrent peu.

Comme il n'existe pas de carte des sols exhaustive pour Bruxelles vu le caractère remanié des sols et leur imperméabilisation, nous exploitons la carte des sols naturels (projet BONat) qui extrapole leur nature sur base des propriétés hydrogéologiques sous-jacentes et de la géomorphologie. Il s'agit d'une information intégrant de nombreux aspects, mais qui est fortement indirecte, donc entachée d'incertitudes.

³ Beven, K. J. and Kirkby, M. J.: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrol. Sci. Bull., 24, 43-69, 1979.

⁴ Sørensen, R., Zinko, U., and Seibert, J.: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 2006.

⁵ Tarboton, D. G.: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, Water. Resour. Res., 33, 1997.

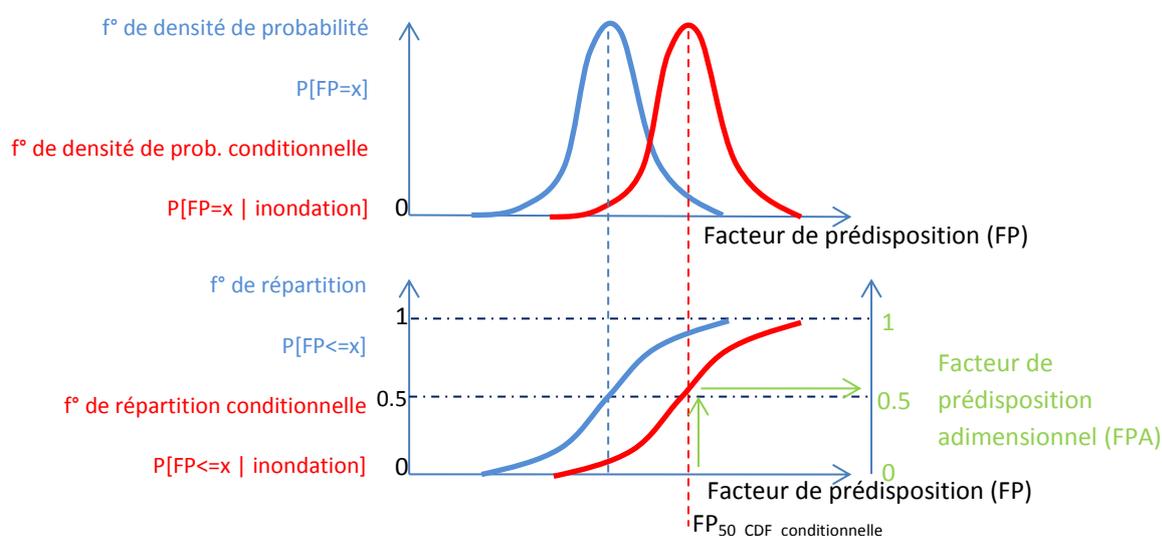


Les sols dont la fraction granulométrique est petite sont associés à une grande prédisposition à être inondé.

4.7 L'adimensionnement des facteurs de prédisposition

Bien que les facteurs de prédisposition soient corrélés avec les observations d'inondation, il n'existe pas de relation théorique équivoque entre ces facteurs et la localisation des inondations. On ne peut dès lors pas combiner les facteurs de prédisposition au moyen de formules théoriques représentant les phénomènes physiques, issus de la mécanique des fluides par exemple. Par contre, on peut utiliser une approche de logique floue où l'on va adimensionner les facteurs de prédisposition et les combiner entre eux pour aboutir à une estimation qualitative de la susceptibilité à l'inondation des parcelles.

Les différents facteurs de prédisposition possèdent chacun des unités bien distinctes (exemple : le facteur de surplomb est exprimé en centimètre, le facteur de sol n'a pas d'unité, ...). Chaque facteur de prédisposition est alors associé à une valeur adimensionnelle comprise entre 0 et 1, par l'intermédiaire d'une fonction d'appartenance (« membership function »). La fonction d'appartenance représente la transition croissante entre 0 et 1 en fonction de la valeur prise par le facteur de prédisposition : on va d'une situation à faible probabilité de submersion (0) à une situation à probabilité de submersion élevée (1). Nous choisissons, pour faciliter l'interprétation de la fonction d'appartenance, de la faire correspondre à la fonction de répartition conditionnelle du facteur de prédisposition, dont la condition est l'observation d'un évènement d'inondation (sur base des déclarations au fond des calamités). Le facteur de prédisposition est dès lors adimensionné en prenant la valeur du décile supérieur auquel il correspond, divisée par 100. Le facteur de prédisposition adimensionnel vaudra donc 0.1, 0.2, ..., 1.

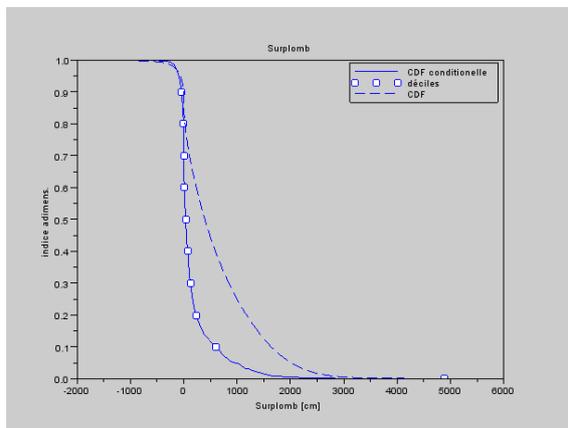


Ex : Pour une valeur de facteur de prédisposition particulière, si 50 % des observations d'inondations sont dans des zones à facteur de prédisposition inférieur ou égale à cette valeur particulière, on lui associe une valeur adimensionnelle de 0.5.

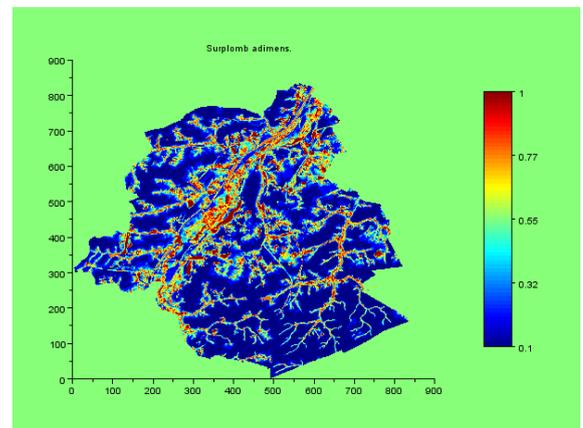
En d'autres termes, imaginons que l'on analyse uniquement les sites où des déclarations d'inondation ont eu lieu (d'où le terme conditionnel ici plus haut), et que l'on observe qu'au niveau de 25 % des sites ayant été inondés, le facteur de prédisposition « TWI » était inférieur ou égal à 7, qu'au niveau de 50 % des sites ayant été inondés le TWI était inférieur ou égal à 9 et que dans 75 % des cas le TWI était inférieur ou égal à 12, et sachant que plus le TWI est important plus la probabilité de

submersion est élevée, on attribue alors la valeur (adimensionnelle) 0.25 à $TWI = 7$, la valeur de 0.5 à $TWI = 9$ et la valeur de 0.75 à $TWI = 12$. La valeur adimensionnelle du facteur de prédisposition a donc un sens compréhensible par tous (parfois même plus que la valeur du facteur de prédisposition proprement dit). On peut ainsi expliquer pour un endroit donné (pas forcément un endroit où l'on possède une observation d'inondation) ayant une valeur de $TWI = 12$ (valeur adimensionnelle de 0.75), que dans des contextes tout au plus aussi défavorable que celui-ci, on a recensé 75% des cas d'inondation déclarés au fond des calamités.

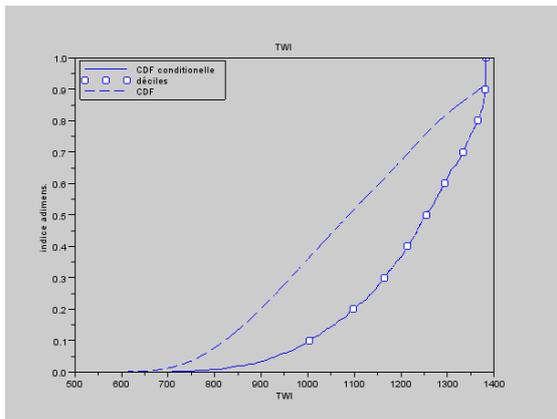
Graphiques présentant les fonctions de répartition (conditionnelles ou pas), les déciles retenus comme fonction d'appartenance et le résultat en plan de l'adimensionnement des facteurs de prédisposition



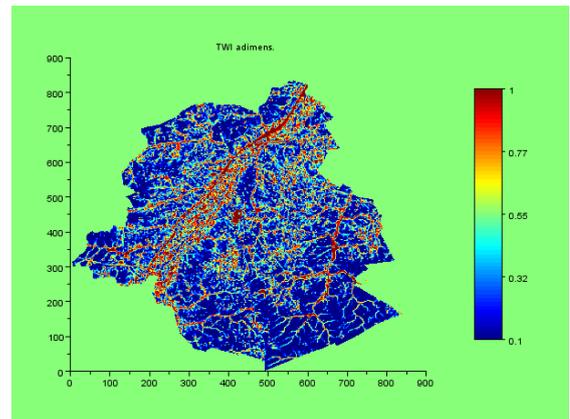
CDF du Facteur de Surplomb



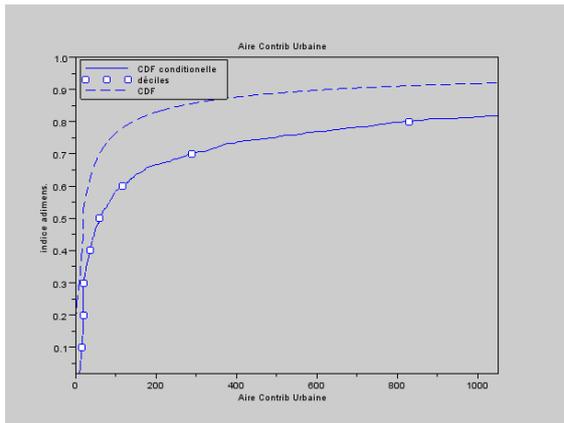
Plan du Facteur de Surplomb adimensionnel



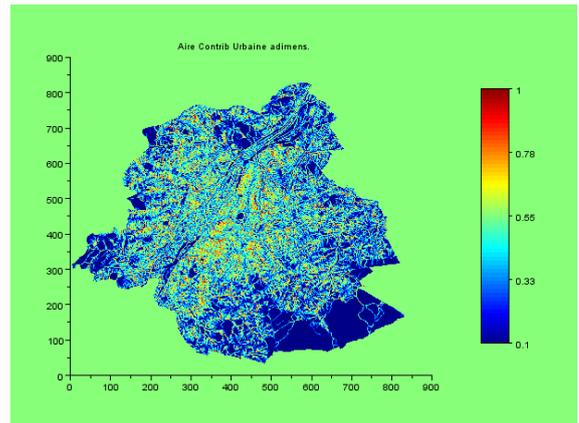
CDF du Facteur TWI



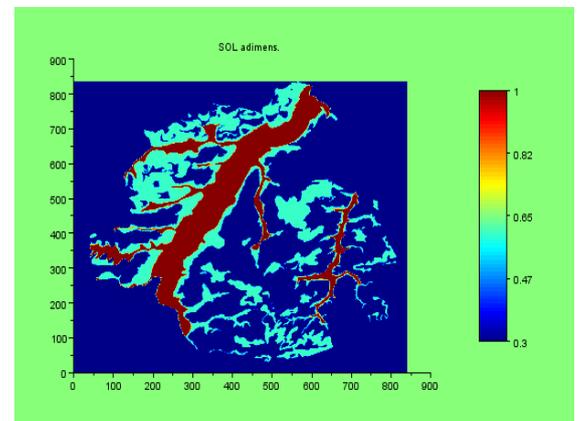
Plan du Facteur TWI adimensionnel



CDF du Facteur d'Aire Urbaine Contributive



Plan du Facteur d'AUC adimensionnel



Plan du Facteur de Sol adimensionnel

5 L'ALÉA D'INONDATION : UNE COMBINAISON AGGRAVANTE DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

5.1 Quantification de l'aléa d'inondation : la susceptibilité à l'inondation

Le fait d'avoir une valeur importante pour un facteur de prédisposition particulier ne suffit pas à rendre la zone réellement susceptible à l'inondation si, par exemple, les autres facteurs de prédisposition ont une valeur faible. Ainsi, être situé en zone plate uniquement (comme sur un plateau, par exemple) ne suffit pas à faire courir le risque d'une inondation significative, de même qu'être à hauteur d'un talweg uniquement (en tête de bassin forestier, par exemple). Il faut en réalité combiner les valeurs des facteurs de prédisposition entre elles pour dégager les zones sensibles où les conditions défavorables se renforcent.

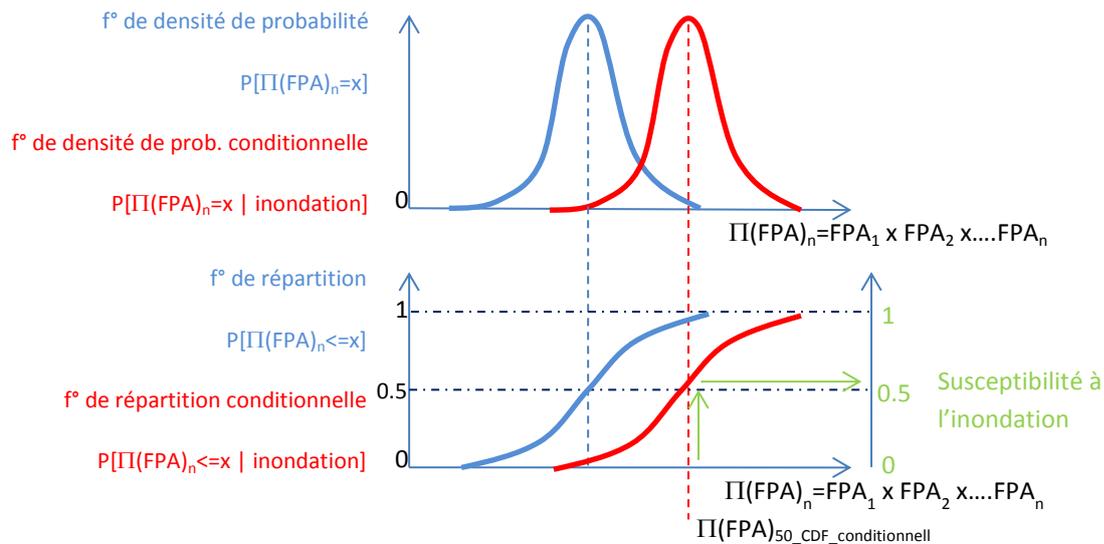
Nous avons procédé à de nombreux tests pour identifier la combinaison optimale des facteurs de prédisposition, en vue d'obtenir une carte représentant au mieux les zones d'aléa. L'enjeu est de couvrir un maximum d'observations historique d'inondation tout en cernant au maximum la zone d'aléa et éviter ainsi une extension excessive de celle-ci.

Par analyse, nous sommes arrivés à la conclusion que la simple multiplication des valeurs des différents facteurs de prédisposition adimensionnels (sans pondération de ces facteurs entre eux) permettait au mieux de discriminer les zones d'aléa du reste de la région. Ceci se traduit dans le graphique ci-dessous par une séparation maximale entre la fonction de répartition conditionnelle (courbe rouge) et la fonction de répartition (courbe bleue).

Toutefois, vu que les facteurs de prédisposition ne sont pas indépendants les uns des autres (ex : une vallée est à hauteur du talweg par définition, de même qu'elle est souvent humide, à l'aval de surface bâtie, constituée d'un sol alluvionnaire), le produit (compris entre 0 et 1) des facteurs de prédisposition adimensionnels n'a plus de valeur statistique. On ne peut par exemple plus lier la valeur du produit au taux de recouvrement des observations d'inondation reprises au fond des calamités.

Dès lors, on procède à nouveau à la transformation déjà exploitée dans l'adimensionnement des facteurs de prédisposition. Le produit des facteurs de prédisposition adimensionnels va être transformé par une fonction d'appartenance définie comme étant la fonction de répartition conditionnelle du produit, dont la condition est, comme précédemment, l'observation d'un événement d'inondation déclaré au fond des calamités.

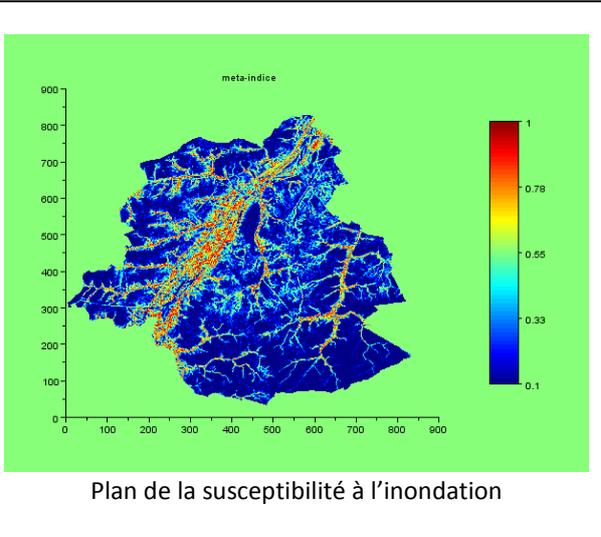
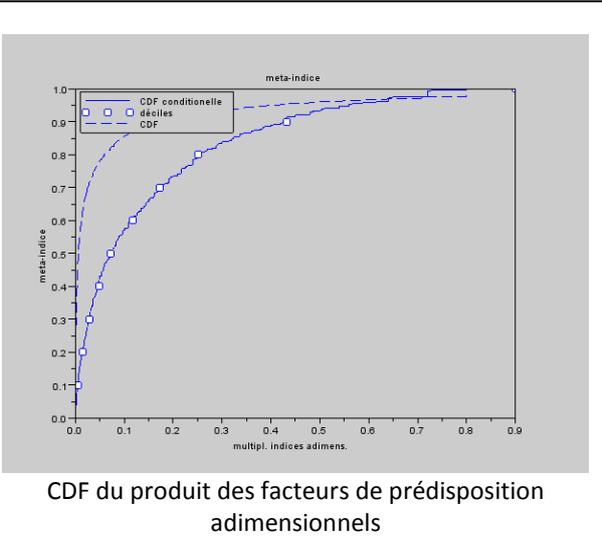




Ex : Pour une valeur particulière du produit des facteurs de prédisposition adimensionnels (FPA), si 50 % des inondations historiques sont dans des zones à valeur du produit inférieur ou égale à cette valeur particulière, on lui associe une valeur de susceptibilité à l'inondation de 0.5.

Le produit des facteurs de prédisposition adimensionnels, transformé ensuite par la fonction d'appartenance, quantifie la susceptibilité à l'inondation (compris entre 0 et 1). Cette susceptibilité à l'inondation est calculée en tous points de la région et quantifie l'aléa. Imaginons qu'en un site particulier la susceptibilité à l'inondation soit égal à 0.8, cela signifiera que 80% des sites que l'on sait avoir été inondés se trouvaient dans une situation de susceptibilité à l'inondation (représentée par le produit des facteurs de prédisposition adimensionnels) tout au plus aussi défavorable que la situation du site en question.

Graphique présentant les fonctions de répartitions (conditionnelle ou pas), les déciles retenus comme fonction d'appartenance et le résultat en plan de l'adimensionnement du produit des facteurs de prédisposition adimensionnels (= susceptibilité à l'inondation)



5.2 Définition des classes d'aléa d'inondation

Plus une zone est susceptible d'être inondée, plus la récurrence des inondations tend à être importante. De façon réciproque, la récurrence des inondations révèle la susceptibilité à l'inondation de la zone. Toutefois, l'assertion ci-dessus n'est pas toujours vérifiée dans notre jeu de données vu que :

- la période limitée d'observation ne permet pas de couvrir tous les cas de pluies critiques qui varient selon la position des zones en aléa au sein du bassin versant,
- certaines zones où des inondations se répètent ne sont pas, par nature, susceptibles d'être inondées, mais s'inonde quand même en raison d'un dysfonctionnement local (embâcle, mauvais dimensionnement du réseau d'égouttage, ...) solutionnable et indépendant des conditions environnementales globales,
- on ne peut exclure qu'une zone inondée ne soit localisée ailleurs qu'au niveau du point d'adresse repris au fond des calamités, dans le cas de propriétaires possédant plusieurs biens ou lorsque la propriété est vaste et que le point d'adresse ne situe pas précisément la zone inondée au sein de la parcelle.

Dès lors, à moins d'étendre la zone d'aléa de façon excessive⁶, celle-ci ne couvrira pas 100% des observations d'inondation.

Un choix doit donc être opéré sur le pourcentage d'observation d'inondation que couvrira la zone d'aléa. Il convient de mettre en balance les besoins contradictoires que sont :

- la maximisation du taux de couverture des observations,
- la minimisation de l'extension de la zone d'aléa.

L'analyse conjointe de la susceptibilité à l'inondation et de la récurrence des inondations déclarées au fond des calamités nous a conduits à définir comme étant en zone d'aléa, les pixels où la susceptibilité est supérieur à 0,4. Avec une tolérance d'un pixel (20m) sur la localisation des inondations, nous recoupons ainsi 81 % des observations dont la récurrence est supérieure ou égale à 1x en 10 ans et plus de 96% des observations dont la récurrence est supérieure ou égale à 2x en 10 ans.

Zone de « susceptibilité > 0.4 », jeu de donnée « fond des calamités »		
Récurrence	Supérieure ou égale à 1	Supérieure ou égale à 2
nombre d'observation	1735	53
% recouvrement des obs. (calamités), à 20 m près	81%	96%

Afin de valider un modèle de prédiction, il est bon de comparer les résultats de ce dernier par rapport à un jeu de donnée indépendant à celui utilisé pour construire et paramétrer le modèle. Nous avons pour cela utilisé les données d'intervention du SIAMU. Avec une tolérance d'un pixel (20m) sur la localisation des inondations, nous recoupons ainsi 91 % des points d'interventions dont la récurrence est supérieure ou égale à 2x en 12 ans.

⁶ A l'extrême, si l'on considérait l'ensemble de la Région comme étant en aléa, on recouperait à coup sûr 100% des observations d'inondation passées, mais on exagérerait la taille de la zone à risque, au point que l'information devient totalement inutile.



Zone de « susceptibilité > 0.4 », jeu de donnée « SIAMU »

Récurrence	Supérieure ou égale à 1	Supérieure ou égale à 2
nombre d'observation	1183	106
% recouvrement des obs. (SIAMU), à 20 m près	68%	91%

Si l'on s'intéresse au jeu de donnée SIGASS – Flood (VIVAQUA), toujours avec une tolérance d'un pixel (20m) sur la localisation des inondations, nous recoupons 88 % des points d'interventions dont la récurrence est supérieure ou égale à 2x en 20 ans.

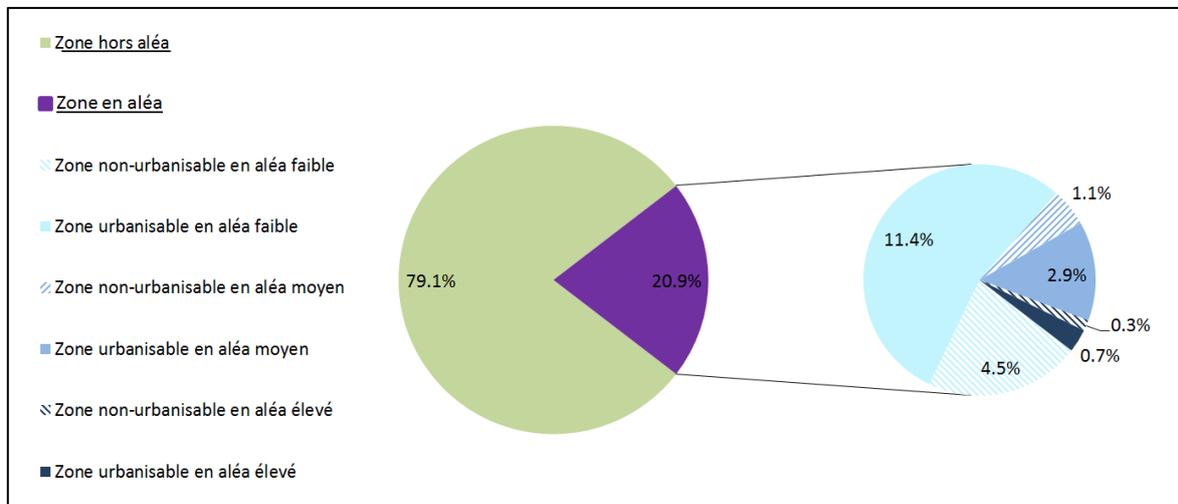
Zone de « susceptibilité > 0.4 », jeu de donnée « SIGASS - Flood »

Récurrence	Supérieure ou égale à 1	Supérieure ou égale à 2
nombre d'observation	3688	726
% recouvrement des obs. (SIGASS), à 20 m près	76%	88%

Trois classes de susceptibilité sont utilisées pour quantifier l'aléa d'inondation et graduent la carte d'aléa d'inondation :

- aléa faible : zone dont la susceptibilité se situe dans l'intervalle]0.4-07],
- aléa moyen : zone dont la susceptibilité se situe dans l'intervalle]0.7-0.9],
- aléa élevé : zone dont la susceptibilité se situe dans l'intervalle]0.9-1].

Les parts que chaque zone occupe dans la superficie totale de la région (NB : après les opérations de validation sur le terrain explicitées à la section suivante) se ventilent de la façon suivante :



La classe d'aléa élevée se définit donc comme le 1% du territoire le plus inondable. Les classes aléa élevé et aléa moyen ensemble représentent les 5% du territoire les plus inondables.

6 POST-TRAITEMENT : LA VALIDATION SUR LE TERRAIN

La méthode ci-dessus est une approche globale, mais simplifiée de la réalité. Le périmètre des zones prédites en aléa ont été discutés pour affinage avec les experts de terrains (19 communes, gestionnaires d'égouts et du Canal). Cette étape a exploité les résultats de la méthode ci-dessus comme point de départ pour une définition réelle de la zone d'aléa. Des détails de terrains sont alors pris en compte.

En particulier, la présence de bassin d'orage diminue dans certaines zones la fréquence et l'ampleur des inondations, réduisant de facto localement l'importance de l'aléa. Puisque l'approche actuelle ne considère par l'hydrodynamique fine du bassin versant, nous avons procédé à l'analyse comparative des résultats de la méthode actuelle par rapport aux simulations hydrauliques là où elles étaient disponibles et qui incluaient l'effet des bassins d'orage. Nous en avons dégagé la règle de cliquet suivante et l'avons appliquée sur l'ensemble du territoire :

Intensité initiale	Si Facteur BO < 75	Si Facteur BO \geq 75 mais < 95	Si Facteur BO \geq 95
Faible	Faible	Faible	Faible
Moyen	Moyen	Faible	Faible
Elevé	Elevé	Moyen	Faible

Facteur BO = AUC collectée par les BO en amont / AUC totale
BO = bassin d'orage, AUC = Aire Urbaine Contributive

Enfin, un certain nombre de filtres ont été appliqués pour éviter d'avoir des zones esseulées (soit le cas d'une petite zone soi-disant non inondable alors qu'enclavée dans une zone inondable plus large, soit le cas d'une petite zone inondable sans lien direct avec une zone inondable plus large). L'intensité d'aléa a par ailleurs été localement abaissée vers les valeurs faibles lorsqu'aucune observation d'inondation ou de résultat de simulation hydraulique ne révélait de problème significatif dans un secteur pourtant habité.

