

Détermination de l'aléa risque inondation dans le secteur des Wateringues

Thierry LEPELLETIER¹, E LEMOIGNE¹, J HENIQUE², F CLERC², Ph PARENT³, Ph CUSENIER⁴

¹ Hydratec - Central Seine, 42 quai de la Râpée, Paris 75012, Tél: +33 (0)1 52 81 67 40

² DREAL Nord Pas de Calais :/SR/DRNHM Tél : 03 20 13 48 70

³ Institution Interdépartementale des Wateringues, 7 rue du Colonel Doyen – BP 40373 - 62505 SAINT-OMER Cedex

⁴ Sépia Conseils – Tél : 01 53 01 92 99

RÉSUMÉ. – La DREAL Nord Pas de Calais a lancé une étude en 2009 pour tenter d'approfondir la compréhension des niveaux de risque d'inondation encourus dans le secteur des Wateringues, sous l'action conjuguée de facteurs hydro météorologiques, climatiques et technologiques concomitants : crues des bassins versants des collines, des cours d'eau de l'AA et de la Hem, épisodes pluvieux prolongés qui tendent à saturer les terrains de la plaine des Wateringues, les niveaux de marée, les surcotes marines et le vent, l'augmentation attendue du niveau marin, les dysfonctionnements d'ouvrages.

Une méthode de quantification de l'aléa a été développée sur ce secteur s'inspirant des principes développés pour l'étude des niveaux extrêmes le long de la Loire estuarienne [Lepelletier 2010]. Elle repose sur une analyse hydro climatique de tous les facteurs influant sur les risques d'inondation, sur la simulation d'événements de référence et sur une combinaison statistique appropriée des résultats pour définir un aléa représentatif de périodes de retour rares. Cette méthode s'inscrit dans une approche générale, applicable à tout système hydrologique complexe, dont les épisodes exceptionnels sont influencés par des combinaisons variées de facteurs physiques hétérogènes. Sa bonne application nécessite une caractérisation précise de ces facteurs et leur interaction, ainsi qu'une modélisation adéquate du fonctionnement hydrologique et hydraulique du système.

Mots-clés : risque naturel, niveau marin, surcote, crue, modélisation, polder

Assessment of extreme flood hazard in the Wateringues plain

ABSTRACT. – DREAL Nord Pas de Calais started a study in 2009 in order to get a better understanding of flood hazard in the Wateringues area induced by combined hydro meteorological, climatic and technological factors such as: floods from hill watershed, AA and Hem rivers, soil saturation from long rainy events in the plain area, tide and surge, wind effects during storms, mean water level elevation under climatic change, disruption of pumping stations.

A method has been developed to assess inundation risk in this area: it is based on principles developed in the study of extreme water levels along the Loire estuary [Lepelletier 2010] which combine: hydro climatic analysis of the various factors involved in the inundation process, numerical simulation of reference events, and statistical combination of simulation outputs to get correct risk evaluation for large return periods events.

This method is adapted to the particular Wateringues area using a more general approach involving complex hydrological systems which are influenced by a number of heterogeneous physical factors. Correct application of the method requires adequate statistical analysis of each factor and their joint probability and detailed hydrological and hydraulic modeling of the system.

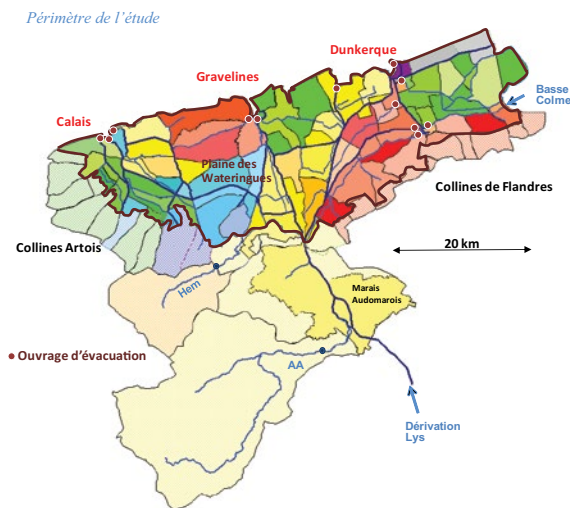
Key-words: natural hazards, sea level, storm surge, flood modeling, polder

I. INTRODUCTION

Le secteur des Wateringues occupe une zone géographique dans le nord de la France s'étirant sur 50 km de long entre Calais et la frontière belge, et sur 20 km de large entre la façade maritime et les collines d'Artois et de Flandre. C'est une zone plate, sillonnée par un réseau dense de canaux privés (les watergangs) et par les canaux VNF. Le bassin versant total représente 900 km², dont la moitié environ est occupée par le polder des Wateringues. Celui-ci se trouve à une altitude voisine du zéro marin, voire une altitude plus basse par endroits, comme le secteur des Moeres. La plupart des exutoires sont contrôlés par des stations de pompage qui

relèvent les apports à marée haute, les écoulements étant gravitaires à marée basse.

Ce système hydrographique présente un fonctionnement complexe, avec une forte sensibilité au risque d'inondation sous les effets croisés des crues des bassins versants des collines, des cours d'eau de l'AA et de la Hem, des épisodes pluvieux prolongés qui tendent à saturer les terres agricoles de la plaine des wateringues, des marées, des surcotes marines et des tempêtes. A ces facteurs s'ajoutent les effets d'une hausse du niveau marin lié au changement climatique et les risques de dysfonctionnements des ouvrages. La carte ci-dessous situe le secteur d'étude, ainsi que les principaux ouvrages d'évacuation, tous équipés de postes de pompage.



La plaine des Wateringues est découpée en secteurs d'apports homogènes, chaque secteur est connecté à un canal, soit gravitairement, soit par pompage.

Les secteurs et les canaux dans lesquels ils se rejettent sont regroupés en sous systèmes hydrauliques homogènes, relativement indépendants les uns des autres. On distingue ainsi 8 grands sous-systèmes couvrant le territoire des wateringues : Canal de Calais, canal des Pierrettes, canal de Marck, rivière d'Oye, AA plus canal à grand Gabarit, canal des Moeres, canal de Bergues et canal de Furnes.

Les inondations sont engendrées par différentes causes : ruissellements et coulées de boues au pied des collines lors d'orages estivaux, défaillance d'ouvrages de pompage, épisodes pluvieux hivernaux générant des apports de crue en provenance de l'AA, de la Hem et des collines, à la suite d'épisodes préparatoires provoquant la saturation des terrains. Les inondations les plus marquées résultent de cette dernière situation hydrologique et c'est celle-ci que nous considérons dans le présent article. Le volume d'apports de ruissellement peut excéder la capacité d'évacuation des ouvrages, avec comme conséquence un stockage progressif dans les canaux et les watergangs et des débordements en cas de dépassement de seuils de niveaux critiques.

On s'est attaché à quantifier les risques d'inondation encourus par une approche globale à la fois phénoménologique et statistique, dont le principe est présenté ci-après.

II. PRINCIPE DE LA DEMARCHE

La caractérisation de l'aléa associé aux niveaux d'eau dans les canaux revient à définir une période de retour « T » de dépassement d'une cote en un point représentatif de chaque sous-système hydrographique composant le périmètre de l'étude. La démarche retenue s'articule en trois grandes étapes :

1. analyse hydro météorologique et statistique des facteurs influant sur les risques d'inondation, de façon à faire émerger un nombre restreint de variables primaires, dont certaines peuvent être partiellement corrélées, mais dont la connaissance suffit pour caractériser une période de retour globale d'événement, et aussi pour définir complètement un scénario événementiel (c'est-à-dire pouvant être simulé via un modèle hydraulique). Un nombre limité de scénarios événementiels couvrant des périodes de retour d'occurrence contrastée sont ainsi sélectionnés selon une procédure détaillée plus loin,

2. calcul à l'aide d'un modèle hydraulique de la hauteur H_i maximale au point caractéristique du sous-système, pour chacun des différents scénarios retenus dans l'étape 1,
3. calcul de combinaison statistique des hauteurs calculées pour les différents scénarios afin de déterminer la hauteur H_{100} correspondant à un aléa centennal.

III. ETAPE 1: ANALYSE HYDRO CLIMATIQUE

Une analyse approfondie des paramètres concourant au risque d'inondation a été entreprise à partir des données de mesures disponibles sur la zone d'étude : pluviométrie, hydrométrie, données marégraphiques, chroniques de vent, mesures issues de différents fournisseurs de données : DREAL, METEO-France, SHOM, VNF, IIW. Une douzaine d'épisodes de crues et d'épisodes de tempête ont également été examinés pour analyser les structures spatio temporelles des épisodes et les corrélations entre paramètres. Un certain nombre de résultats importants ressortent de cette analyse :

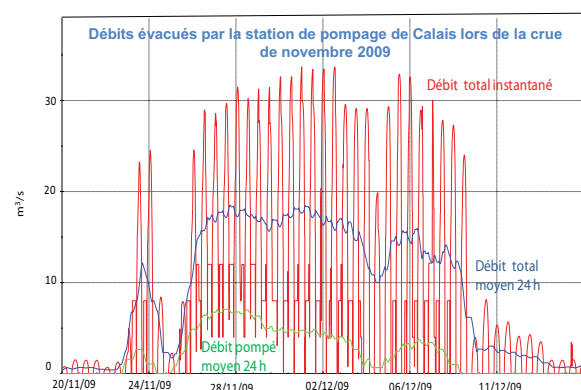
Pluviométrie : c'est la grandeur déterminante pour l'évaluation du risque d'inondation. Le scénario pluviométrique retenu est caractérisé par :

- Des conditions de sols saturés par une pluviométrie du mois précédent, totalisant 130 mm environ sur le secteur du Calaisis,
- Une structure spatiale relativement stable avec une décroissance de la pluviométrie de la zone ouest (Calaisis) vers la zone est (Dunkerquois),
- Un événement perturbé d'environ 8 jours, caractérisé par une succession de trois épisodes dont un épisode intense sur 2 jours. Les statistiques de pluie sur 2 jours sont relativement bien corrélées avec celles des précipitations sur 8 jours.

Marée, surcotes et vent : le coefficient de marée peut avoir un impact non négligeable sur les volumes évacuables par les ouvrages aval. Un coefficient de vives eaux va favoriser le tirage gravitaire à basse mer et ainsi augmenter le débit évacué sur 24h. À l'inverse un coefficient de mortes eaux va limiter la durée ainsi que le débit gravitaire évacué et diminuer en conséquence le volume évacué sur 24h. Le graphe suivant illustre pour la station de Calais les débits évacués lors de la crue de novembre 2009 :

Le débit gravitaire instantané à marée basse dépasse $30 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le débit instantané pompé à marée haute est limité à $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit total moyenné sur 24h évacué à la mer est $18 \text{ m}^3/\text{s}$, dont environ $7 \text{ m}^3/\text{s}$ par pompage, le 28/11/2009, date à laquelle la crue a atteint son maximum. Ce jour-là le coefficient de marée était égal à 37, donc défavorable. Le coefficient de marée influe en effet directement sur le volume d'apport évacuable sur 24h en période de crue :

- à marée haute les vannes gravitaires sont fermées et les débits d'apport sont évacués par pompage ; le coefficient de



marée n'influe pas ou très peu sur le débit évacué durant cette séquence,

— mais à marée basse le tirage gravitaire et donc le débit évacué gravitairement est d'autant plus fort que le niveau marin est bas, en raison de l'augmentation de la pente hydraulique ; ce niveau est d'autant plus bas que le coefficient de marée est élevé.

Au final donc le volume de crue évacué augmente avec le coefficient de marée : en période de mortes eaux le volume évacué sur un cycle de marée est minimal.

L'analyse statistique a mis en évidence :

— une absence de corrélation entre les hauteurs de marée et les surcotes de basse mer,
— une absence de corrélation entre les débits de crue de l'AA (et donc la pluviométrie) et les surcotes de basse mer générées par les situations de tempête, ces surcotes étant néanmoins toujours positives,
— une corrélation raisonnable entre la vitesse du vent tri horaire et la surcote à Calais, à partir d'un certain seuil. Le vent de tempête est en direction de l'ouest et peut impacter les basculements de lignes d'eau des canaux orientés dans la direction est-ouest, tels que le canal des Moeres ou la Basse Colme.

En définitive un scénario hydro météorologique est considéré comme parfaitement défini par la connaissance de trois grandeurs scalaires statistiquement indépendantes :

La lame d'eau précipitée sur 8 jours « h » dans chaque secteur. Les périodes de retour correspondantes sont précisées ci-dessous

— Le coefficient de marée « m » lors du pic de débit de crue,
— La surcote de basse mer « s », dont la courbe d'ajustement statistique a également été déterminée.

Les signatures spatio temporelles de l'ensemble des paramètres hydro météorologiques : ce sont des courbes invariantes s'appliquant à tous les scénarios. Les valeurs du triplet (h,m,s) plus les fonctions de forme des courbes temporelles (pluies, marée, vent, surcote) sont ainsi combinées pour définir toutes les conditions aux limites nécessaires à la simulation d'un scénario à l'aide du modèle hydraulique.

IV. ETAPE 2: MODÉLISATION DU SYSTÈME DES WATERINGUES

IV.1. Définition du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique a été élaboré et calé à l'aide du logiciel HYDRARIV. Il couvre :

— La modélisation hydrologique des apports à partir de la pluie. Des modules de production pluie-débit ont été développés et calés sur les secteurs de l'AA de la Hem et des collines,

— les îlots de la plaine des wateringues et le réseau de watergangs ceinturant les îlots. Les îlots sont regroupés en secteurs homogènes selon la nature de l'évacuation : par gravité ou par pompage. Les apports dans les watergangs sont modélisés à partir de la pluie sous forme d'apports répartis.

— Le système de canaux qui reçoit les apports des watergangs,
— Les ouvrages à la mer dont le mode de gestion est reproduit conformément aux protocoles.

La régulation des niveaux d'eau dans les canaux est soumise à une double contrainte :

— Il convient en temps normal d'assurer un niveau compatible avec la navigation,
— En période de crue les tolérances de montée des plans d'eau sont faibles : de l'ordre de quelques dizaines de cm pour certains canaux.

Ces niveaux sont régulés par les ouvrages d'évacuation selon des protocoles de gestion officiels. En période de crise une certaine souplesse est néanmoins prévue par les protocoles pour ajuster les manœuvres au mieux en fonction de l'évolution de la crue en cours.

IV.2. Calage du modèle

Les paramètres présentant la plus grande incertitude sont les coefficients d'apports de ruissellement sur le territoire occupé par la plaine des Wateringues. La principale difficulté du calage tient au fait que l'on ne dispose pas de données hydrométriques explicites sur le territoire de l'étude, hormis les hydrogrammes d'apport de l'AA et de la Hem. Il est par ailleurs très difficile de s'assurer de la pertinence d'un calage sur la seule comparaison des niveaux d'eau car ceux-ci sont influencés par des conditions locales d'écoulement et des manœuvres d'ouvrages qui occultent en grande partie l'interprétation de ces mesures en termes d'apports.

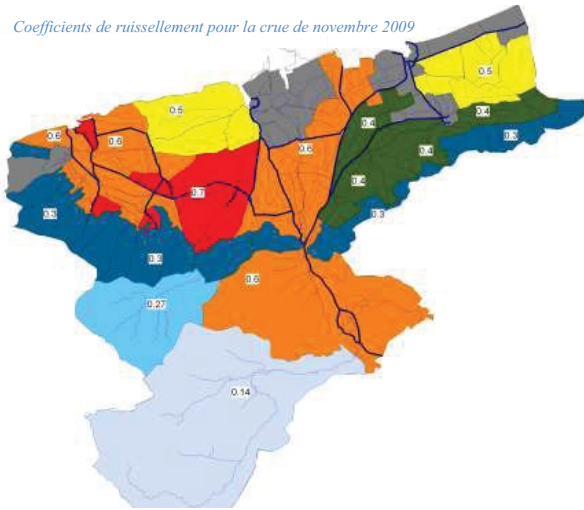
C'est la raison pour laquelle un travail important a été entrepris pour la crue récente de novembre 2009, pour tenter de reconstituer les hydrogrammes au droit des ouvrages d'évacuation. On a pour cela procédé à des analyses hydrauliques locales et à l'exploitation des mesures disponibles sur les manœuvres des ouvrages et les niveaux d'eau de part et d'autre de chaque ouvrage : ces mesures sont gérées au sein du système de contrôle centralisé de l'IIV, Maître d'ouvrage de la plupart des ouvrages d'évacuation.

La reconstitution de ces hydrogrammes a permis de plus de réaliser des bilans hydrologiques globaux et de préciser les coefficients d'apports générés par les secteurs de plaine pour cette crue. La carte ci-dessous montre la distribution des coefficients de ruissellement moyens obtenus pour la crue de novembre 2009 sur les différents secteurs du périmètre d'étude :

Le résultat majeur tiré de cette analyse concerne les très forts coefficients obtenus pour les secteurs de plaine

Période d'hiver – durée 8 jours				
Période de retour en année	Hauteur statistique de pluviométrie en mm [et intervalle de confiance à 95 %]			
	Licques (1969-)	Fruges (1928 – 1991)	Audruicq (1944-1997)	Dunkerque (1948-2009)
2	90 [84 – 101]	87 [82 – 95]	60 [57 – 66]	53 [50 – 58]
10	136 [118 – 168]	122 [109 – 141]	85 [76 – 99]	78 [69 – 90]
100	193 [160 – 242]	165 [141 – 198]	116 [100 – 139]	109 [88 – 130]

Coefficients de ruissellement pour la crue de novembre 2009



puisqu'ils peuvent atteindre 0.7 dans certaines zones. Ce résultat s'explique par le fait que les possibilités d'infiltrations deviennent très limitées dans ces zones basses en cas de sol saturé par des pluies antérieures : les watergangs jouent alors un rôle de drains favorisant les écoulements vers les exutoires.

La crue de décembre 2006, moins forte que celle de 2009, a été testée avec les mêmes coefficients, elle a donné des résultats satisfaisants.

Il est à noter que cette crue a été également précédée d'épisodes pluvieux préparatoires de même importance que celle de novembre 2009.

Avec ces ajustements des paramètres hydrologiques les hydrogrammes et limnigrammes calculés sont en bon accord avec les courbes mesurées ou reconstituées. Les écarts sur les cotes maxima restent inférieurs à 5cm sur la majorité des points de comparaison, pour les deux crues de décembre 2006 et novembre 2009.

IV.3. Exploitation du modèle

A l'aide du modèle calé des bilans volumiques ont été réalisés sur chaque sous-système hydrographique pour tenter de préciser les marges de sécurité vis-à-vis d'un épisode de crue comptant une phase intense sur deux jours. Les résultats obtenus montrent que la sécurité offerte par la capacité de stockage des canaux et des watergangs est loin d'être négligeable : si ce système est déjà saturé par un épisode pluvieux immédiatement antérieur, la période de retour d'apparition des premiers débordements est pour l'ensemble des sous-systèmes de 10 ans, voire moins pour certains d'entre eux. Mais si le système de canaux et watergangs a pu être vidangé avant le passage de l'épisode pluvieux intense, cette période de retour peut atteindre 100 ans pour certains secteurs. Ce constat montre toute l'importance à accorder au choix d'une séquence perturbée pour les calculs d'aléa. L'étude a montré que la variable aléatoire la plus pertinente attachée à la pluviométrie était la hauteur de précipitation sur 8 jours, afin de tenir compte du phénomène de saturation progressive des sols et des canaux.

Des tests ont également été réalisés avec le modèle pour déterminer la sensibilité des cotes maximales atteintes en

fonction du coefficient de marée, des surcotes et du vent. On a trouvé des résultats contrastés selon les sous-systèmes :
— les cotes maximales peuvent varier entre 0 et 20cm selon le sous-système, entre une situation de vives eaux et une situation de mortes eaux,
— cette variation est du même ordre de grandeur si l'on fait varier la surcote de 0 à 60cm,
— elle peut atteindre 15 cm si l'on tient compte de l'effet d'un vent soufflant avec des rafales à 130 km/h, lorsque les canaux sont orientés dans la direction ouest-est et coulent vers l'ouest.
— les niveaux d'eau maxima varient de plus ou moins 50cm lorsque la hauteur de précipitation varie de plus ou moins 20%.

Tous ces ordres de grandeurs confirment le fait que le paramètre de forçage principal est la pluviométrie ; les autres paramètres de marée, surcote et vent constituent des facteurs d'accompagnement, venant moduler les risques et donc l'aléa inondation. Cette propriété justifie le principe de calcul de l'aléa présenté ci-après.

V. ETAPE 3 : CALCUL DE L'ALÉA CENTENNAL ASSOCIÉ À CHAQUE SOUS SYSTÈME

V.1. Principe de calcul

Le principe retenu dans le cas du système des Wateringues découle de l'application d'une loi de probabilité classique, qui s'énonce comme suit :

$$P_r(Z > z) = \sum_i \sum_j P_r(H > h | m_i, s_j) \times P_r(M = m_i) \times P_r(S = s_j)$$

Dans l'expression ci-dessus :

Z = variable aléatoire « cote maximum atteinte en un point caractéristique d'un canal donné, en amont des ouvrages d'évacuation contrôlés par les stations de pompage »,

H = variable aléatoire « précipitation pluvieuse sur 8 jours »,

M = variable aléatoire « coefficient de marée », qui conditionne les marégrammes théoriques à Calais, Gravelines et Dunkerque,

S = variable aléatoire « surcote » (avec laquelle la variable vent est assez bien corrélée pour les fortes dépressions marines).

m_i et s_j sont des valeurs discrètes prises par le coefficient de marée et la surcote respectivement.

Cette expression est vraie si les variables aléatoires H, M et S sont indépendantes entre elles, ce qui a été vérifié.

Afin de simplifier l'expression ci-dessus on sélectionne trois valeurs (m_i) et trois valeurs (s_j) de façon à ce qu'elles découpent des intervalles de probabilités égales (intervalle de fréquence de 0.33), dans les courbes d'ajustement statistiques trouvées pour les deux variables M et S.

Les coefficients moyens de marée retenus par classe sont : **48** [22 ; 60], **72** [60 ; 81] et **92** [81 ; 119].

De même les surcotes retenues par classe sont :

0.30 [0.23 ; 0.40], **0.50** [0.40 ; 0.58] et **0.69** [0.58 ; 1.18]. On ne retient que des surcotes positives car les statistiques de surcote ne mettent pas en évidence de surcotes négatives durant les épisodes pluvieux significatifs sur 8 jours.

Avec ce découpage l'expression ci-dessus se simplifie comme suit :

$$P_r(Z > z) = \frac{1}{9} \sum_i \sum_j P_r(H > h | m_i, s_j)$$

V.2. Mise en œuvre

On procède en deux étapes. Dans l'étape 1 on fixe la valeur $s_j = s_2$; on a alors :

$$P_r(Z > z | s_2) = \frac{1}{3} \sum_i P_r(H > h | m_i, s_2)$$

Cette fonction de probabilité se construit géométriquement à partir de la connaissance des différentes valeurs Z_i obtenues par simulations des scénarios $(H(T), m_i, s_2)$. On obtient ainsi la courbe colorée en rouge.

Dans l'étape 2 on répète la procédure après construction des courbes rouges calculées pour les deux autres valeurs s_1 et s_3 . Ces courbes se déduisent directement de la première par application des résultats des tests de sensibilité portant sur s :

On obtient finalement la courbe noire ci-contre. L'aléa centennal Z_{100} recherché correspond à l'ordonnée du point ayant pour abscisse la probabilité annuelle de dépassement égale à 0.01.

La précision de cette méthode peut être améliorée en définissant davantage de classes de marée et de surcote, mais on augmente alors le nombre de simulations nécessaires pour construire la courbe d'aléa.

V.3. Application pratique de la méthode

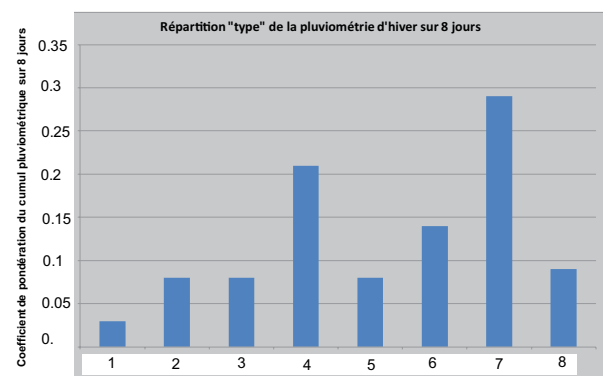
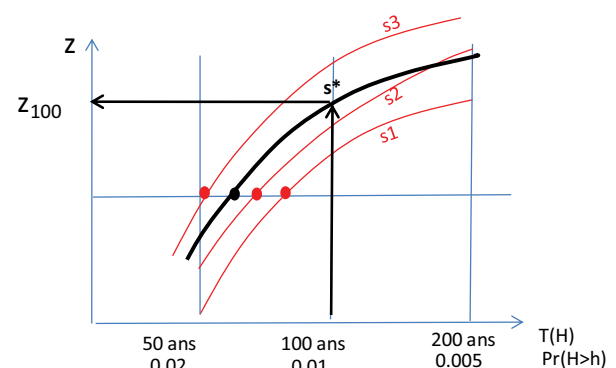
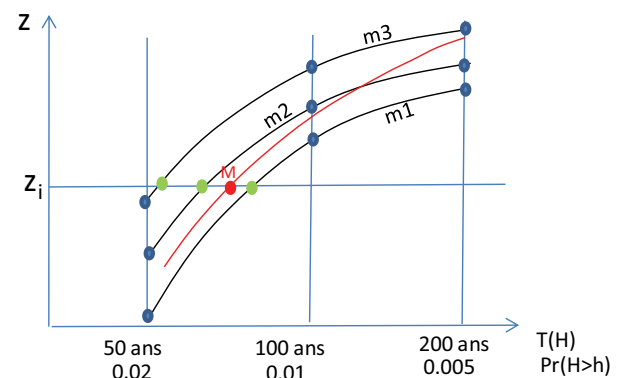
La construction des courbes s_1 , s_2 et s_3 nécessite 9 simulations pour chacune de ces courbes. Il faut donc simuler au total 27 scénarios à l'aide du modèle hydraulique pour construire la courbe d'aléa ci-dessus. Les simulations fournissent des résultats en tout point de calcul, on peut donc construire autant de courbes d'aléa qu'on le souhaite, chaque courbe se rapportant à une localisation donnée du système de canaux des waterings.

Un scénario est totalement défini par le triplet (H, m, s) qui sert à générer les fonctions de forçage : hyétogrammes, marégrammes, courbes de vent, par l'intermédiaire de fonctions de forme pré établies. La surcote est appliquée au moment du passage de l'épisode pluvieux intense, ainsi que le coefficient de marée « m » (ce coefficient varie d'un jour à l'autre selon le cycle astronomique classique, cette variation est reproduite par le marégramme reconstitué sur la durée de la simulation).

V.4. Remarque sur le choix de l'événement pluvieux pour le calcul de l'aléa

Cet événement est formé par une succession de trois épisodes pluvieux, dont l'épisode intense sur deux jours. On a donc une certaine liberté pour sélectionner la séquence de passage des épisodes.

On sélectionne en pratique la combinaison qui, tout en restant réaliste vis-à-vis des intervalles de temps séparant le passage de deux épisodes, fournit les résultats les plus pessimistes. Cela revient à placer l'épisode intense en dernière position en limitant l'intervalle de temps avec



le second épisode à 2 jours. De cette façon on limite les possibilités de ressuyage de vidange des canaux après le second épisode et on réduit ainsi les capacités de stockage offertes par les canaux. Le graphe suivant illustre le mode de répartition retenu pour les séquences pluvieuses de l'événement centennal.

VI. CONCLUSIONS

La méthode présentée ci-dessus est une adaptation de la méthode générale des courbes enveloppes appliquée dans la problématique de l'aléa submersion marine [Kergadallan *et al.* 2012] et dans l'étude [Lepelletier 2010]. Elle se justifie dans le contexte particulier des Waterings, pour lesquels le paramètre de forçage principal est la pluviométrie ;

les autres paramètres de marée, surcote et vent constituent des facteurs d'accompagnement, venant moduler les risques et donc l'aléa inondation.

L'application de cette méthode permet de requalifier l'aléa en prenant en compte des évolutions climatiques, tels que l'augmentation du niveau moyen de la mer. De même l'aléa technologique peut être reconsidéré en introduisant un taux de fiabilité dans les équipements, et notamment les stations de pompage.

Les services rendus par une telle méthode sont donc multiples. Rappelons toutefois que sa bonne application nécessite une caractérisation correcte des différents facteurs concourant au risque d'inondation et une modélisation précise du fonctionnement hydro météorologique du système étudié.

VII. REFERENCES

- BACHOC A ET AL. (2011) — Besoins opérationnels et progrès actuels en matière de connaissance des phénomènes physiques dans l'hydrologie des crues. *La Houille Blanche*. 1 : 14-21
- KERGADALLAN X. ET AL. (2012) — Révision du guide méthodologique Plans de prévention des risques littoraux : une meilleure prise en compte de l'ensemble des phénomènes pour la connaissance de l'aléa submersion marine. *Centenaire de la SHF : Evénements extrêmes fluviaux et maritimes, Paris, 1-2 février 2012 34es journées de l'hydraulique SHF*
- LEPELLETIER TH (2010) — Détermination des lignes d'eau extrêmes dans l'estuaire de la Loire par une approche statistique de courbes enveloppes. *colloque SHF Risques d'inondation en Ile de France, 100 ans après les crues de 1910, Paris, 24 – 25 mars 2010*