

# Les modèles de prévision opérationnels d'aujourd'hui auraient-ils été fiables sur la crue de 1910 ? Analyse rétrospective critique sur une base de données de 1910

Yan LACAZE<sup>1</sup>, Sylvain CHESNEAU<sup>1</sup>, Emmanuel RAIMBAULT<sup>1</sup>, Olivier PIOTTE<sup>1</sup>, Jean-Pédro SILVA<sup>1</sup>, Charles PERRIN<sup>2</sup>, Vazken ANDREASSIAN<sup>2</sup>, Lionel BERTHET<sup>2</sup>, Laurent CORON<sup>2</sup>, Thomas-Charles FORTIER-FILION\*

<sup>1</sup> DIREN Ile-de-France, 79 rue Benoît Malon, F-94257 Gentilly Cedex, e-mail : prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr

<sup>2</sup> Cemagref, UR HBAN, BP 44, 92163 Antony Cedex, email : charles.perrin@cemagref.fr

\* Maintenant au CEHQ, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7, Canada

**RÉSUMÉ.** – La crue de janvier 1910 survenue sur le bassin de la Seine constitue un mythe pour le Service de Prévision des Crues Seine Moyenne-Yonne-Loing (SPC SMYL) de la DIREN Ile-de-France, une référence quant à sa capacité à être opérationnel et performant sur un tel événement et un défi pour les modèles. Sur la base de données d'époque, issues de l'exploitation récente d'archives, un exercice en temps réel de simulation de la crue a été proposé aux prévisionnistes, munis seulement d'outils de prévision rudimentaires. Les prévisions produites dans ce mode dégradé répondent de façon satisfaisante aux attentes, tant en anticipation qu'en précision, pour l'Ile-de-France. Les modèles de prévision opérationnels du SPC ont eux aussi été testés, mettant en évidence de bons résultats pour la partie hydraulique de la modélisation, mais de faibles performances pour la partie hydrologique. Ces déficiences trouvent une explication dans la faible quantité et le format des données disponibles, mais surtout dans les processus physiques exceptionnels qui ont généré cette crue.

Mots-clés : Bassin de la Seine, crue de 1910, débit, Paris, prévision de crue opérationnelle, modélisation hydrologique, propagation de crue

## Would the currently operational models have been reliable to forecast the 1910 flood event ? Critical analysis using a historical database

**ABSTRACT.** – The flood event of January 1910 on the Seine basin is legendary for the Seine-Moyenne-Yonne-Loing Flood Forecasting Service (SPC SMYL) of the DIREN Ile-de-France (Regional Environmental Authority). It has become a reference for assessing the operability and performance of the SPC during such an event, as well as a challenge for models. By means of a database recently constructed using archives from that period, a simulated real-time exercise of flood forecasting was carried out by forecasters, using only very simple forecasting tools. The forecasts made during this exercise adequately met expectations in terms of lead time and accuracy for the Ile-de-France region. The operational flood forecasting models used by the SPC were also tested. The hydraulic models produced good results, but the hydrological models obtained low performances. While this failure can be partially explained by the limited data availability, it is mainly due to the exceptional physical conditions that generated this flood.

Key-words : Seine River basin, 1910 flood event, discharge, Paris, operational flood forecasting, hydrological modelling, flood routing

### I. INTRODUCTION

La crue de janvier à mars 1910 survenue sur le bassin de la Seine constitue aujourd'hui une crue de référence en matière de risque d'inondation en Ile-de-France. L'anticipation d'un tel événement est primordiale pour permettre d'en limiter les conséquences socio-économiques. Les services en charge de la sécurité civile et de la gestion de crise attendent aujourd'hui des prévisions à 3 jours à Paris pour pouvoir organiser les évacuations, les secours et la protection des infrastructures et des biens. Ces prévisions sont de la responsabilité du service de prévision des crues Seine-Moyenne-Yonne-Loing (SPC SMYL) de la DIREN Ile-de-France sur un territoire couvrant la partie moyenne du bassin de la Seine, depuis l'amont de la confluence avec l'Yonne jusqu'à l'aval de la confluence avec l'Oise, englobant les bassins de l'Yonne et du Loing et la partie aval de la Marne.

Les modèles mis au point pour le SPC au cours des dernières années pour réaliser des prévisions opérationnelles ont tous été développés et testés sur des événements de crue récents (observés majoritairement au cours des 15 dernières années). La capacité de ces outils à anticiper des événements tels que la crue de 1910, qui vont bien au-delà de la gamme de débits sur lesquels ils ont été mis au point, n'a pas ou peu été évaluée, faute de données suffisantes. Les analyses d'archives réalisées par la DIREN ouvrent à ce titre des perspectives nouvelles. L'objectif de ce travail est de confronter les outils et méthodes actuels de prévision aux conditions hydrologiques et hydrométriques de 1910, dans le cadre opérationnel et réglementaire national existant, décliné sur le territoire du SPC-SMYL.

Pour illustrer l'apport des modèles dans le travail de prévision, nous présentons dans un premier temps les prévisions faites à l'époque que l'on peut retrouver dans le rapport Picard [1] ou les notes soigneusement consignées de l'in-

génieur Willemin [2]. Elles permettent de mieux saisir le caractère hors norme de la crue à laquelle ont dû faire face nos prédécesseurs. En se plaçant dans les conditions d'information disponible lors de l'événement, une première expérience retracera les prévisions possibles dans des conditions minimalistes de fonctionnement du SPC, à savoir des données hydrométriques en temps réel dégradées et des outils élémentaires de propagation. Dans un second temps, les modèles de prévision, mis au point en conditions actuelles, seront alimentés par les données observées en 1910.

La discussion consacrée à la réaction des modèles sous le forçage pluviométrique de la saison 1909-1910 met en avant les apports et limites des outils utilisés. Dans le cadre de cette discussion, les deux principaux modèles du SPC ont été testés, il s'agit du modèle de prévision hydrologique de prévision GR3P [3] et du modèle couplant prévision hydrologique et propagation hydraulique dans Mike, intitulé Cassandre [4]. L'analyse des résultats souligne les conditions hydrométéorologiques particulières de la crue de 1910.

## II. EXERCICE DE SIMULATION EN TEMPS RÉEL DE LA CRUE DE 1910

### II.1. Prévisions publiées en 1910

Le rapport Picard mentionne que le service hydrométrique central de la Seine était en mesure d'indiquer le maximum probable pour la Seine à Montereau en moyenne 2 jours à l'avance ; pour l'Aisne à Pontavert en amont de Soissons, en moyenne 3 jours à l'avance ; pour l'Oise à Venette, en moyenne 4 jours à l'avance ; pour la Marne à Damery 3 jours à l'avance.

Ce service était chargé de l'annonce des crues sur la Seine depuis le confluent de l'Yonne jusqu'à la Marne, sur la Marne depuis le confluent du Grand-Morin jusqu'à celui de la Seine, sur la Seine à Paris, la Seine à Mantes et en aval, l'Aisne en aval des Ardennes et l'Oise en aval de la confluence avec l'Aisne. Il ne bénéficiait que de prévisions

météorologiques à 24 h limitées. Les prévisions publiées pour Paris montrent néanmoins les difficultés qu'ont eu les services d'annonce à anticiper toute l'étendue du phénomène. Les prévisions à 72 h sont largement sous-estimées ; celles publiées pour le lendemain sont étonnamment précises.

### II.2. Objectifs de l'exercice

Les prévisionnistes du Service de prévision des crues Seine moyenne – Yonne – Loing (SPC SMYL) ont été soumis à un exercice de simulation de la crue de janvier 1910 sur le bassin de la Seine (jusqu'à Paris), préparé sur la base des données de l'époque, et organisé dans des conditions aussi proches que possible du formalisme et des contraintes opérationnelles actuelles.

Cet exercice particulier revêtait plusieurs objectifs :

- améliorer la formation et l'entraînement des prévisionnistes, par la réalisation d'un exercice de prévision d'une crue majeure, situation non vécue depuis la création du SPC ;
- tester le SPC dans des conditions minimalistes de fonctionnement en mode dégradé, avec peu de données et peu d'outils ;
- estimer la qualité minimale des prévisions du SPC en simulation de la crue de 1910.

### II.3. Données utilisées

Parmi l'ensemble des données limnimétriques disponibles en janvier 1910, 29 points de mesure ont été retenus en raison de leur utilité pour l'exercice. Globalement, cela représente environ le tiers des stations importantes exploitées actuellement pour la prévision des crues. Sur les 29 échelles de crue, 20 sont toujours utilisées aujourd'hui (dont 9 sont des stations de référence pour le SPC SMYL) et 6 ont pu être corrélées avec des stations actuelles. Sur 16 des 29 stations, au moins une méthode d'estimation du débit, même très approximative, était disponible. Pour la plupart des stations, trois cotes par jour (matin, midi, soir) sont disponibles pendant la durée de l'événement, avec parfois un relevé supplémentaire à minuit.

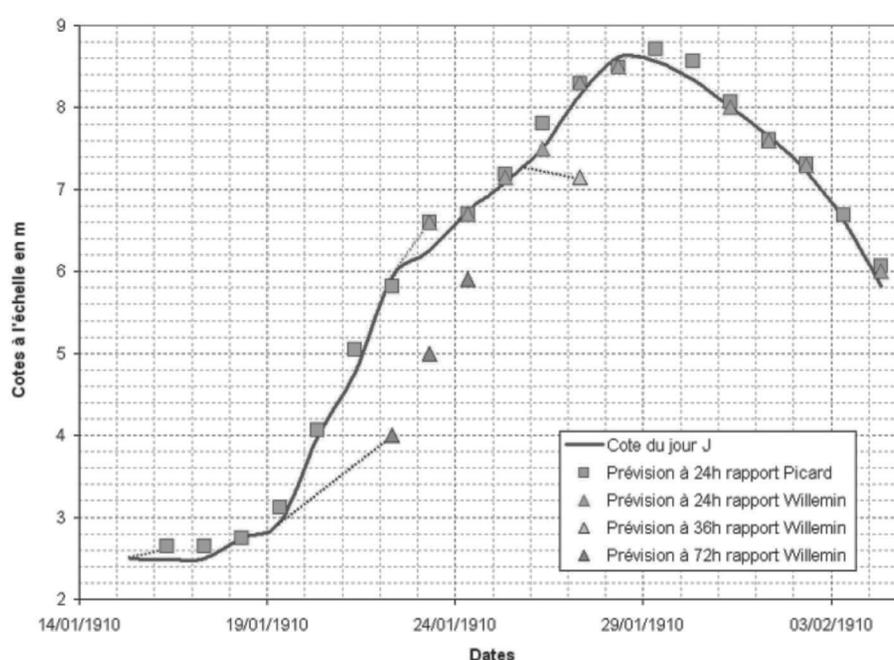


Figure 1 : Prévisions à 24, 36 ou 72 h publiées en 1910.

Concernant les données pluviométriques, les prévisionnistes avaient à leur disposition les cumuls journaliers mesurés sur 13 postes répartis sur le bassin, ce qui a été jugé suffisant pour donner un ordre de grandeur des épisodes de pluie, sachant qu'aucun outil de prévision pluie-débit n'était utilisé.

Dans le cadre de l'exercice, il était en effet prévu d'avoir uniquement recours à des outils de prévision rudimentaires. Outre la connaissance générale du fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine (notamment des temps de propagation des ondes de crue), les prévisionnistes disposaient, selon les stations, de courbes de tarage expertisées ou modélisées, de réglottes de Bachet (élaborées pour la plupart après la crue de 1955) et d'abaques simples de prévision.

#### II.4. Déroulement de l'exercice

L'exercice a été organisé sur 2 jours pleins non consécutifs. Pour les besoins de l'exercice, la crue de janvier 1910 a été maquillée en une crue fictive ayant eu lieu en février 1970, faux documents d'époque à l'appui, de façon à ce que le travail des prévisionnistes ne soit pas influencé par la connaissance préalable de l'ampleur de la crue. Objectif réussi puisque la crue de 1910 n'a été démasquée qu'à la fin de la première journée de l'exercice, alors que la crue était déjà largement amorcée.

L'exercice a débuté par la situation du 19 janvier 1910, qui correspond au lendemain du début de l'épisode de fortes pluies et à l'observation des premières réactions en amont des bassins versants. Il s'est poursuivi jusqu'à l'atteinte du maximum de la crue à Paris le 28 janvier. La situation était détaillée jour par jour (cotes observées, précipitations mesurées...) et il était demandé aux prévisionnistes, répartis en 3 trinômes, de produire l'équivalent d'un bulletin de vigilance crues, incluant le choix de la couleur de vigilance sur les tronçons actuels du SPC et des prévisions sur certains points de mesure caractéristiques répartis sur le bassin. Environ deux heures étaient accordées pour la production de chaque bulletin, ce qui correspond approximativement au temps dont dispose le SPC en fonctionnement normal pour élaborer ses bulletins dans le cadre de la vigilance crues.

Les prévisions sur l'extrême amont des bassins n'ont pas été réalisées, en raison d'une insuffisance de données hydro-métriques et pluviométriques dans ces secteurs et de l'absence d'outils exploitables pour l'exercice. Concrètement, il était demandé des prévisions à Sens (Yonne aval), Melun (Seine moyenne), Chalifert (Marne aval) et Paris-Austerlitz (Seine), aux meilleures échéances possibles.

#### II.5. Méthodes de prévision et incertitudes

Les prévisionnistes avaient à leur disposition plusieurs outils de prévision. Dans le meilleur des cas, leurs résultats bruts ont permis de faire des prévisions acceptables à 24 voire 48 h (par exemple les réglottes de Bachet de Montereau, Melun ou Paris, intégrant certes la crue de 1910 dans les événements de « calage »), avec généralement des imprécisions maximum de quelques dizaines de centimètres. Mais le plus souvent, les prévisionnistes ont eu recours à des méthodes de prévision rudimentaires, « à la main », pour pouvoir croiser les résultats et allonger les horizons de prévision :

- estimation des débits ou variations de débit sur une ou plusieurs stations amont ;
- routage des débits vers l'aval en fonction des temps de propagation estimés selon la gamme de la crue ;
- expertise des résultats, pour prendre par exemple en compte, de manière qualitative, des phénomènes de lami-

nage, des apports intermédiaires non quantifiés, l'influence des barrages de navigation, le comportement atypique de certaines confluences, etc. ;

— transformation des débits en hauteurs d'eau (ou des variations de débits en variation de hauteur d'eau) à la station de prévision.

Les correspondances hauteur-débit par extrapolation des courbes de tarage existantes sont sources d'importantes incertitudes. De plus, même dans les cas où des courbes de tarage modélisées étaient disponibles (issues d'études hydrauliques poussées et couvrant la gamme des crues majeures), certaines incertitudes subsistent. En certains points de l'exercice, les courbes de tarage modélisées issues de plusieurs études différentes présentent, en très hautes eaux, des écarts très significatifs.

Dans les gammes hydrologiques rencontrées à l'occasion de l'exercice, les temps de propagation sur les différents affluents sont très différents du comportement auquel sont habitués les prévisionnistes. Bien que disposant d'ordres de grandeur des temps de propagation sur tous les cours d'eau et pour plusieurs gammes de crue, il s'avère délicat d'estimer le bon phasage du passage des ondes de crue.

#### II.6. Analyse détaillée des prévisions faites à Paris

L'analyse des prévisions faites par le SPC est ici menée uniquement pour la station de Paris-Austerlitz, qui était la limite aval de l'exercice, et qui intègre les incertitudes des prévisions faites plus en amont. L'intérêt est, compte tenu de la concentration des enjeux, d'estimer les horizons de prévision atteignables.

Le tableau ci-dessous synthétise les prévisions réalisées. Les échéances de prévision étant laissées au libre choix des prévisionnistes, il n'y a pas de caractère systématique dans le nombre de prévisions disponibles chaque jour. L'écart entre les prévisions élaborées par les différents trinômes est ici assimilé à une fourchette d'incertitude.

Globalement, les conditions de déroulement de l'exercice étaient largement dégradées par rapport à ce qu'elles devraient être aujourd'hui au SPC. Toutefois, considérant la vulnérabilité potentielle de la chaîne de prévision du SPC en crue majeure (incertitudes sur la mesure des débits, risques de pannes de stations, performances des outils limitées hors du domaine de calage...), ces conditions correspondent à un mode de fonctionnement minimal du SPC et permettent d'avoir un aperçu intéressant de ses performances dans des conditions qui pourraient très bien être à nouveau constatées.

Au final, l'analyse des prévisions à Paris témoigne d'une relative robustesse des méthodes rustiques de prévision. Les trois franchissements de seuils sont bien prévus, et les anticipations sont acceptables (environ 12 h pour le jaune, 36 h pour le orange et 48 h pour le rouge).

Toutefois, la précision des prévisions reste limitée, notamment du fait de la complexité du fonctionnement de la Marne aval, où les prévisions sont beaucoup plus difficiles à faire que sur l'axe Yonne-Seine. Les erreurs sont dans l'ensemble inférieures à 50 cm, certaines prévisions étant nettement meilleures.

On retiendra surtout, alors que les ondes de crue étaient à peine formées sur l'amont du bassin de l'Yonne, que le SPC a été en capacité dès le 21 de réaliser des prévisions pertinentes à 4/5 jours, avec des erreurs de l'ordre de 30 cm et de prévoir la gravité de la crue qui s'amorçait (suspicion de passage en vigilance rouge à Paris, dont le seuil sera effectivement franchi le 25 au matin). La meilleure prévision

Bulletin de prévision	19/01/1910	20/01/1910	21/01/1910	22/01/1910	23/01/1910	24/01/1910	25/01/1910	26/01/1910	27/01/1910	28/01/1910	28/01/1910 (max)
Cote observée à 8h	2.94 m	3.98 m	4.76 m	5.93 m	6.25 m	6.74 m	7.09 m	7.51 m	8.61 m	8.59 m	8.62 m
Vigilance constatée	Vert	Jaune	Jaune	Orange	Orange	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
Vigilance prévue par le SPC	Jaune	Orange	Orange	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
Anticipation vigilance	Jaune : 12 h	Orange : 36 h			Rouge : 48 h						
Prévisions	○ - - - - -	3.70 m à 3.95 m	4.10 m à 4.80 m	○ - - - - -	5.50 m à 6.50 m	6.50 m	6.60 m	○ - - - - -	7.10 m (à 1 h)		
		○ - - - - -	4.50 m	○ - - - - -	5.05 m	6.40 m à 6.60 m	6.60 m	6.80 m	7.35 m à 7.50 m	7.45 m	8.30 m
				○ - - - - -		6.35 m à 6.40 m	7 m à 7.20 m	○ - - - - -	8 m	8.40 m à 8.50 m	

est faite du 25 pour le 28 (prévision à 8,30 m pour 8,60 m observés, quasiment au pic de la crue), avec toutefois une sous-estimation importante (environ 80 cm) sur la prévision intermédiaire du 27, *a priori* due à une quantification difficile des réactions des affluents franciliens suite au deuxième épisode de pluie.

L'expertise des prévisionnistes au cours de l'exercice en temps réel a essentiellement porté sur le volet hydraulique de la crue, dispensés de l'hydrologie, si ce n'est pour la prise en compte des apports intermédiaires et la mise en vigilance globale des tronçons. La transformation pluie-débit

de la crue de 1910 a été testée au travers des modèles dont dispose le SPC. Les résultats sont présentés ci-après.

### III QUELLES RÉPONSES LES MODÈLES DONNENT-ILS FACE À LA CRUE DE 1910 ?

#### III.1 Base de données

Afin d'alimenter les modèles hydrologiques continus, une base des données disponibles a été reconstituée au pas de

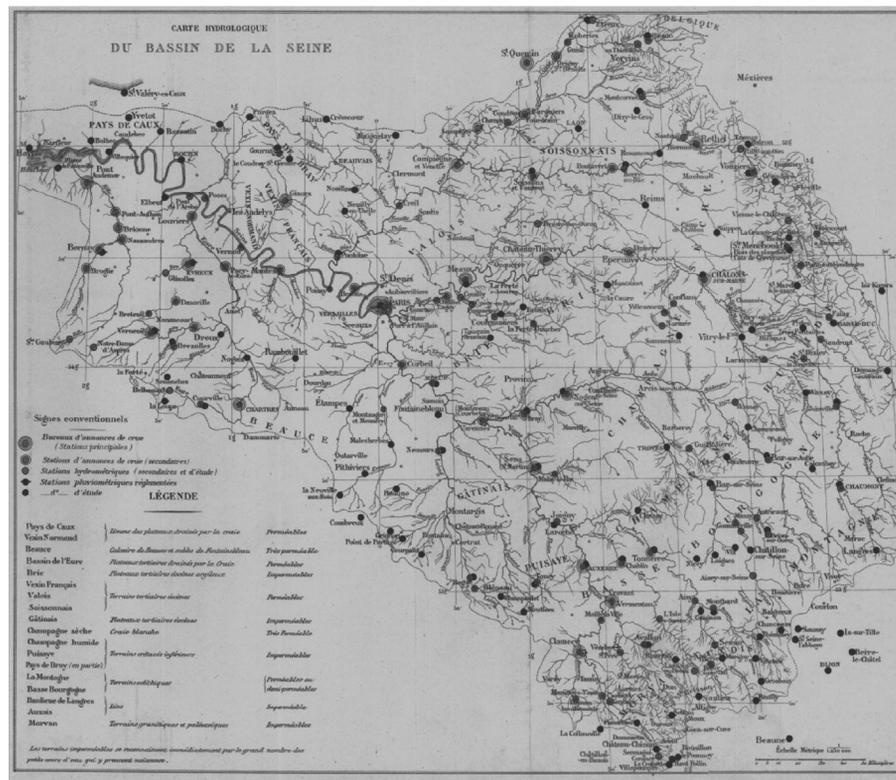


Figure 2 : Carte hydrologique du bassin de la Seine.

temps horaire. Elle regroupe des relevés pluviométriques du 1<sup>er</sup> janvier 1909 au 1<sup>er</sup> mai 1910. Les données pluviométriques utilisées sont issues du rapport Picard [1] et de chroniques traitées par Météo-France. Pour alimenter les 68 postes actuellement disponibles au SPC, une sélection a été faite parmi les 117 pluviomètres consignés dans le rapport Picard sur une durée de 3 mois (janvier, février et mars 1910) et répartis sur tout le bassin versant, et les données journalières de 37 pluviomètres mis à disposition par Météo-France sur une durée de 24 mois (janvier 1909 à décembre 1910). Les données journalières ont été désagrégées de manière uniforme au pas de temps horaire. L'analyse du réseau pluviométrique d'époque (figure 2) fait ressortir la bonne couverture des sources du réseau hydrographique. Certaines zones actuellement peu couvertes par le réseau pluviométrique n'ont pas pu bénéficier de toute l'information ancienne disponible (cas du Loing notamment). La configuration actuelle est une première limite à la pertinence de l'estimation de la lame d'eau précipitée en entrée des modèles.

Les informations de débit disponibles sont plus parcellaires. Aussi un travail de reconstitution des débits cohérents sur le bassin a-t-il été nécessaire. En effet, les débits de cette crue historique ont fait l'objet de plusieurs estimations divergentes [5]. Si les cours d'eau à l'amont de Paris n'ont que peu été jaugés du fait de la soudaineté de la crue, l'aval de Paris est lui richement renseigné grâce à

toutes les mesures consignées par M. Willemin. Tous les jaugeages disponibles [2, 6, 7] ont fait l'objet d'une analyse visant à en étudier les incertitudes, afin de proposer un débit maximum probable cohérent de l'aval vers l'amont, depuis Vernon jusqu'à Paris [8, 9]. Les hydrogrammes ont été reconstitués pour prendre en compte tous ces jaugeages par interpolation liée aux variations de hauteurs. A l'amont de Paris les hydrogrammes sont estimés à partir des limnigrammes sur la base des courbes de tarage les plus probables (propositions de M. Willemin ou travaux d'Hydratec [10]).

Il résulte de l'analyse des jaugeages et de la très bonne cohérence amont-aval qui en ressort sur la Seine aval, que le débit de pointe à l'entrée de Paris se situe à environ 2650 m<sup>3</sup>/s [9]. Telle est la valeur qui est utilisée dans la suite de l'étude. Au final, on dispose de 16 points où des chroniques observées ont été reconstituées pour l'assimilation de données des modèles, sur les 40 en mode non dégradé.

### III.2. Modèles et protocole de test

L'objectif du protocole de test retenu a été de se placer au plus près des conditions opérationnelles de prévision et d'utilisation des modèles en période de crue. Cela consiste à réaliser une prévision tous les jours à 6 h du matin en s'ap-

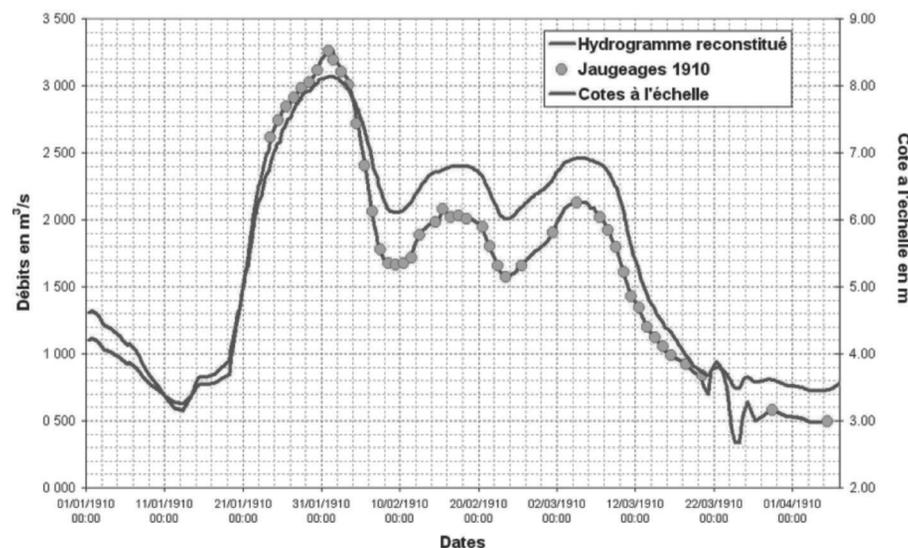


Figure 3 : Exemple de reconstitution d'hydrogramme d'après les jaugeages disponibles. Ici Mantès.

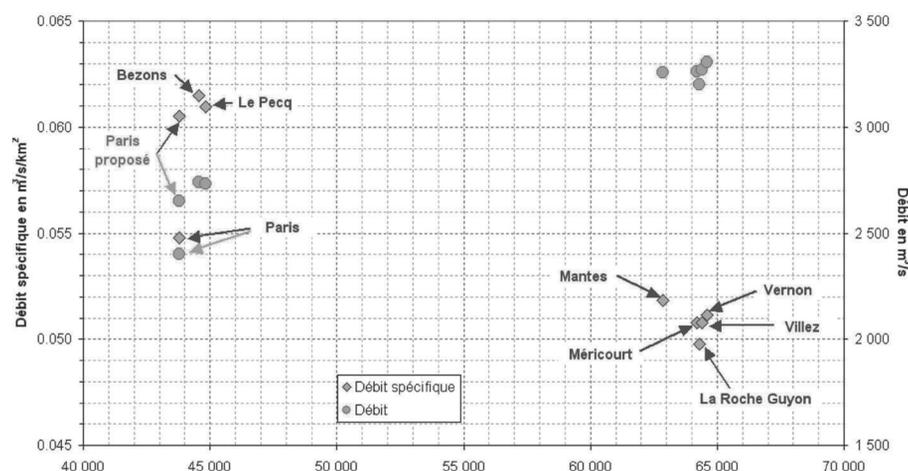


Figure 4 : Cohérence spatiale des débits spécifiques des jaugeages de 1910 avec la valeur de 2650 m<sup>3</sup>/s proposée pour Paris.

puyant sur des données observées jusqu'à cet instant (pluies, hauteurs et débits) et des pluies prévues sur 72 h.

Plusieurs configurations de pluies prévues ont été testées en limitant l'horizon de prévision de la pluie future à 72 h. Un premier scénario consiste à considérer les pluies journalières des 72 heures à venir comme parfaitement connues, en prenant les pluies observées. Ce scénario est évidemment plus favorable que les conditions de fonctionnement en temps réel. Nous nous sommes donc aussi placés dans le cadre des prévisions telles qu'elles sont fournies au SPC actuellement, à savoir des fourchettes de cumuls journaliers exprimés en mm ([Traces ;3], [1 ;5], [3 ;10], [7 ;15], [10 ;20], etc.) et désagrégés de façon uniforme au pas de temps horaire. Deux scénarios supplémentaires de pluies futures maximales et minimales ont été testés, correspondant à la limite haute et basse de la fourchette encadrant le cumul parfait.

Deux modèles de prévision ont été testés sur l'événement : le modèle hydrologique GR3P (modèle à réservoirs) [11, 12] et Cassandre [4], modèle hydraulique (MIKE11) couplé à des modèles hydrologiques NAM (modèle conceptuel à réservoirs). Pour assurer un fonctionnement correct de ces deux outils, notamment respecter le fonctionnement continu des modèles hydrologiques à réservoirs, une période d'initialisation d'un an a été respectée, grâce aux données pluviométriques disponibles depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1909. Pour des aspects pratiques de fonctionnement en temps réel des modèles actuels, nous avons fait débiter l'année 1909 au 1<sup>er</sup> janvier 2010. La crue de 1910 est donc rejouée dans le futur, en janvier 2011.

Le modèle GR3P est un modèle pluie-débit continu global dont les prévisions, faites à l'exutoire du bassin pour lequel le modèle est calé, bénéficient de l'assimilation du dernier débit observé [12, 13].

Le modèle Cassandre fonctionne avec des modèles hydrologiques (NAM) injectés sous forme d'apports ponctuels aux entrées du réseau de surveillance réglementaire, modélisé par un modèle hydraulique filaire Mike. Les modèles hydrologiques complètent le modèle hydraulique par des apports intermédiaires diffus.

Les données disponibles étant très incomplètes en comparaison des données nécessaires au fonctionnement temps réel du modèle Cassandre récemment développé, plusieurs configurations ont été testées et évaluées :

- fonctionnement intégral de la chaîne pluie-débit-propagation avec assimilation de données sur 7 limnigrammes (tronçons Marne et Seine) et 2 hydrogrammes reconstitués (aval des tronçons Yonne et Loing). Les entrées sur la Marne et la Petite Seine sont les hydrogrammes reconstitués. Dans cette configuration, l'hydrologie de l'Yonne et du Loing n'est pas recalée sur des débits observés, excepté à l'amont immédiat des confluences avec la Seine ;

- configuration précédente à laquelle s'ajoute l'assimilation de débit sur 5 stations amont du bassin de l'Yonne (affluents principaux : Armançon, Serein, Cure et Yonne) afin de mieux représenter et prévoir la contribution de l'Yonne à la crue de janvier 1910. Les débits reconstitués sont néanmoins fortement entachés d'incertitude ;

- utilisation du modèle sans la modélisation des bassins de l'Yonne et du Loing, avec injection directe des débits observés reconstitués à l'exutoire de ces deux bassins (comme sur la Marne et la Petite Seine). Comme dans le cas précédent, les résultats sont fortement conditionnés par la qualité des hydrogrammes reconstitués. Cette configuration a vocation à tester la dynamique hydraulique de la crue en Ile-de-France.

### III.3. Résultats

Nous donnons la priorité à l'Yonne à Courlon et la Seine à Paris, eu égard à l'importance du rôle de cet affluent dans les crues de la Seine d'une part et à la portée des enjeux à considérer dans le cas de Paris d'autre part.

La mise en alerte hydrométéorologique du SPC est une phase critique puisqu'elle marque le début de la crise. Avant que la crue ne s'amorce, le déclenchement de la procédure de vigilance s'opère essentiellement sur la base des prévisions de pluie. Les courts temps de réaction des sous-bassins amont n'autorisent pas les prévisionnistes à attendre les cumuls observés pour essayer de garantir un délai d'anticipation de 24 h en entrée du réseau de surveillance réglementaire. La figure 5 illustre l'effet du format des prévisions de pluie sur la capacité de mise en alerte du SPC. On constate que, dans le cas de prévisions déterministes, l'étendue de la fourchette de cumuls prévus donne des scénarios de débit équiprobables aux conséquences opposées (alerte ou pas). La probabilisation des prévisions de pluie fournirait des éléments d'expertise supplémentaires en se traduisant en scénarios de débit probabilisés. Les moyens de calcul actuels permettent de tester nombre de scénarios de pluie dans les modèles hydrologiques pour mieux appréhender la situation future. Ces possibilités ouvrent des perspectives intéressantes pour probabiliser les prévisions issues des modèles propres à chaque SPC.

Les figures 6 et 7 présentent une sélection de prévisions faites par les modèles respectivement à Courlon et Paris pour le scénario dit de pluies parfaites. On constate que les modèles hydrologiques peinent à prévoir l'évolution des débits dans la durée. Les modèles hydrologiques GR3P et NAM parviennent à anticiper relativement correctement le début de la montée de crue à Courlon par exemple jusqu'au niveau orange de la vigilance, avec un délai d'anticipation de 3 jours pour la meilleure des prévisions. Les résultats

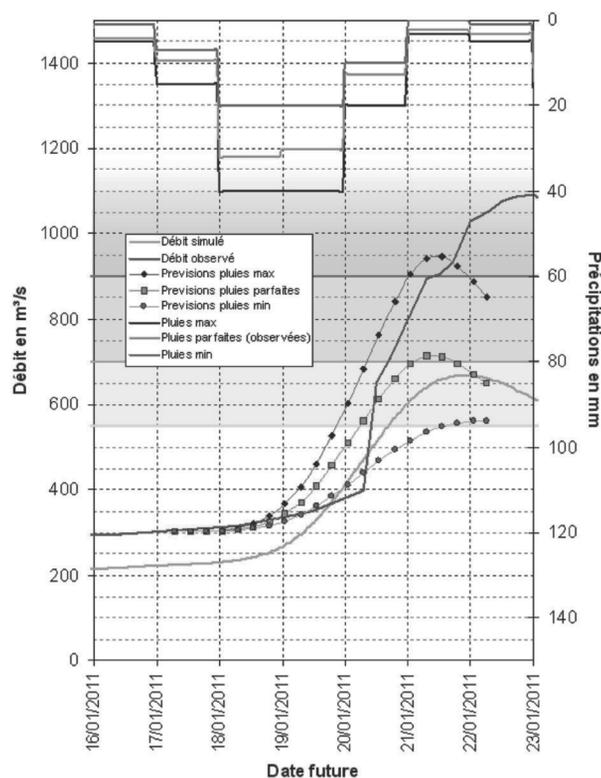
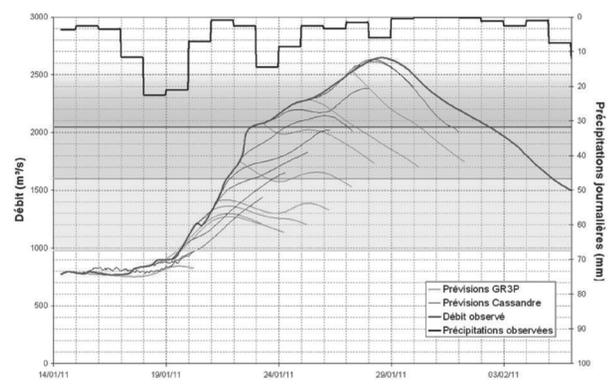
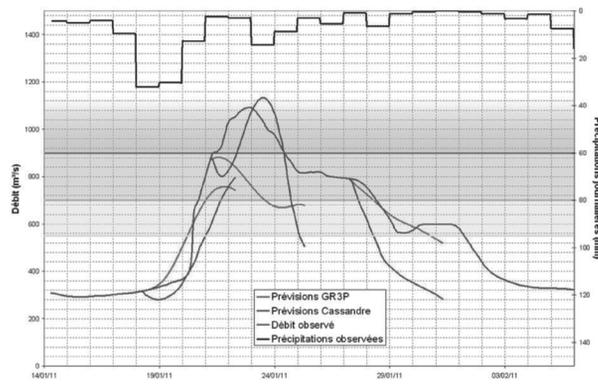


Figure 5 : Prévisions de débit en pluies parfaites et selon la fourchette haute ou basse de l'intervalle des pluies prévues



Figures 6 et 7 : Prévisions faites avec le scénario de pluies parfaites sur 72 h, respectivement à Courlon et Paris, avec les modèles GR3P et Cassandre

sont cependant médiocres sur la suite de cet événement exceptionnel. En effet, la transformation des pluies observées en débit est systématiquement déficitaire en volume ; les débits prévus sont trop faibles. Ces outils ont été calés sur une période récente (les quinze dernières années), sans crue majeure sur le bassin de la Seine, mais leur structure n'est pas limitante pour prévoir des phénomènes extrêmes. Outre leur ampleur, il semble que les processus générateurs diffèrent du comportement habituel des bassins. Aussi certaines pistes peuvent être explorées pour tenter d'expliquer ces performances (voir le cas de GR3P par la suite).

Les résultats des modèles hydrologiques NAM en entrée du modèle Cassandre sont eux aussi insatisfaisants. Une partie de l'erreur commise s'explique par le pas de temps journalier des pluies injectées. Ce format agrégé de la donnée dégrade les performances des modèles pluie-débit calés à l'aide d'une pluie définie au pas de temps horaire [14, 15]. L'estimation de la lame d'eau précipitée peut également être mise en cause, mais le nombre de points de mesure donnent une bonne approximation générale de celle-ci. Compte tenu de la faible disponibilité d'hydrogrammes observés, les bassins amont à réactions rapides tels que le Serein, dont la morphologie étendue rend les prévisions dépendantes de la capacité à saisir la répartition spatiale de la pluie et les apports intermédiaires qui en résultent, n'ont pu tirer le bénéfice du couplage entre hydrologie et hydraulique et du recalage temps réel [16, 17].

Néanmoins la possibilité qu'offre le modèle Cassandre de recalculer le débit transité sur des hydrogrammes ou des limniogrammes observés a été exploitée plus à l'aval sur le bassin de l'Yonne. Les gains sensibles confirment la défaillance de la modélisation hydrologique sur l'événement, mais aussi la bonne tenue du modèle hydraulique fonctionnant dans des conditions très dégradées (disponibilité et fiabilité des données). Le pic de crue à Paris est ainsi prévu 3 jours à l'avance de manière très satisfaisante (figure 7).

La nature lacunaire des données disponibles rend les conditions de test pénalisantes. Seuls 16 points d'observations sont disponibles sur les 40 utilisés dans le modèle.

Afin d'améliorer la réponse des modèles hydrologiques, nous avons tenté de reproduire un état de saturation fictif des modèles, pour simuler l'état des sols tel qu'il en est fait mention dans le rapport Picard. La simulation de la crue, sans effet du recalage, est sensiblement améliorée (figure 8). Les prévisions tirent légèrement profit de cette amélioration. Cependant le déficit de volume reste très prononcé en deuxième partie de montée et à la décrue. Les modèles GR3P ont été testés avec succès sur de nombreux bassins et sont testés sur le territoire du SPC depuis plusieurs années. Les performances ici obtenues

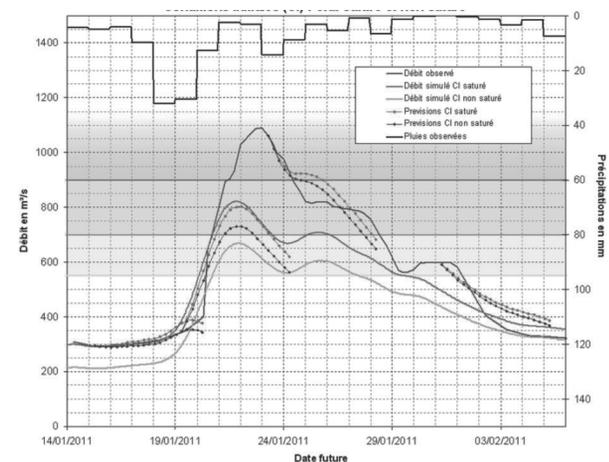
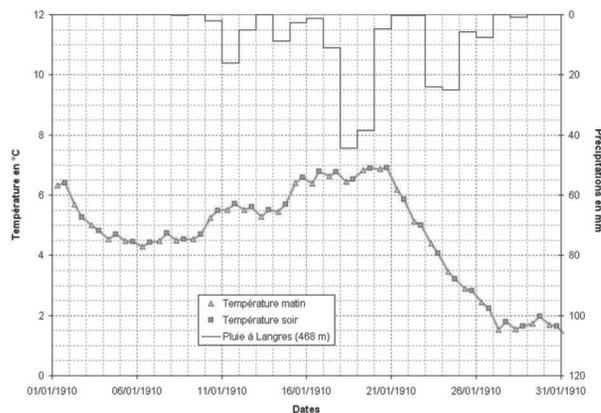


Figure 8 : Effet de la saturation sur la prévision à Courlon.

nues sont bien en deçà des résultats obtenus en validation sur les échantillons ayant servi à leur construction.

Une optimisation des paramètres du modèle sur cet événement particulier conduit à retenir des valeurs de paramètres du modèle très différentes : le temps de transfert est beaucoup plus long et le réservoir de routage plus grand, ce qui permet d'avoir une réponse plus lissée et un débit de base plus important ; le réservoir de production est plus petit, ce qui permet au modèle d'augmenter fortement le coefficient de rendement et de simuler une pluie efficace plus forte. Le modèle a donc besoin d'avoir des paramètres très spécifiques pour restituer la dynamique de l'événement, paramètres non représentatifs du comportement hydrologique moyen. La difficulté de modélisation de l'efficacité des pluies semble indiquer que la genèse de l'événement est l'effet de processus non actifs habituellement. Les conditions particulières de sol gelé sont peut-être à l'origine de ce phénomène. Les données de température de la Marne recueillies auprès de Météo-France indiquent en effet de faibles valeurs, avec une chute à partir du 21 janvier (figure 9). Or les processus de production sur sol gelé ne sont pas pris en compte dans les modèles, et sont complexes à mettre en œuvre. La confirmation de cette hypothèse reste cependant délicate compte tenu du faible nombre d'événements de crues observées coïncidant avec des périodes de gel intense sur le bassin [18].

La génération d'une crue de l'ampleur de celle de 1910 semble nécessiter la concordance de conditions météorologiques particulières. Si les outils du SPC répondent actuellement à une gamme de crues de l'ordre de la vicennale, ils



**Figure 9 :** Température de l'eau de la Marne à Saint-Maur. La chute des températures provient vraisemblablement de la fonte de la neige et du ruissellement sur sol gelé à l'amont.

montrent leurs limites pour prévoir des crues moins fréquentes générées par des processus rarement actifs. Les efforts de modélisation doivent être poursuivis en parallèle pour répondre spécifiquement aux phénomènes hors norme.

#### IV. CONCLUSION

La simulation de la crue de 1910 sous forme d'exercice en temps réel ou à l'aide de modèles de prévision hydrologiques et hydrauliques permet de tirer des enseignements profitables pour le Service de Prévision des Crues Seine Moyenne, Yonne et Loing. La mise en alerte du SPC sur la formation d'une crue aux entrées du réseau hydrographique surveillé est largement dépendante de la qualité des cumuls pluviométriques prévus. Dès lors que les maxima sont atteints sur les bassins amont, la propagation hydraulique d'une forte crue semble maîtrisée avec une incertitude acceptable. L'expertise des prévisionnistes confortée par les outils de modélisation permet une anticipation de l'ordre de 72 h à Paris. Le gain apporté par l'assimilation des données, même sous une forme dégradée pousse à poursuivre les recherches sur le sujet. Des pistes d'amélioration peuvent également être dégagées sur la transformation pluie-débit. Les tests effectués sur la crue de 1910 ont mis en évidence des processus différents du comportement moyen des bassins, potentiellement liés à l'effet supposé du sol gelé. Ce phénomène complexe n'étant pas représenté dans les modèles hydrologiques, ceux-ci ne sont pas en mesure de restituer correctement cet événement particulier. Le potentiel générateur de crue de phénomènes plus rares tels que le sol gelé encourage à étudier la possibilité de se doter d'outils de prévision spécifiques adaptés. Enfin, il est à noter la bonne robustesse générale de fonctionnement du SPC, valable tant pour les prévisionnistes que pour les outils, eu égard aux conditions très dégradées de simulation par rapport aux moyens modernes d'observation hydrométéorologique.

#### V. REMERCIEMENTS

Les auteurs saluent la mémoire des contrôleurs hydromètres, ingénieurs ordinaires et autres acteurs de l'annonce des crues de 1910 dont la qualité des écrits permettent un siècle plus tard de s'y replonger avec plaisir, et remercient M<sup>me</sup> Jourdain pour son aide.

#### VI. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] PICARD A. ET AL. (1910) — Rapports et documents divers ; Commission des inondations, service hydrométrique du bassin de la Seine. 771 p
- [2] WILLEMIN T. (1910) — Rapport général de l'ingénieur ordinaire du 1<sup>er</sup> arrondissement de la 3<sup>ème</sup> section de la Navigation de la Seine. Crue de 1910, service navigation de la Seine.
- [3] TANGARA M. (2005) — Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, EPHE, Paris. 374 p
- [4] MEJDI S., SORENSEN C., AMMENTORP H.C., PAYAN J-L., SCHOORENS J., HELLEGOUARCHE M., LENORMAND S., RIGAUDIERE P. (2008) — Réalisation d'un outil de prévision des crues pour le SPC Seine Moyenne Yonne Loing. Rapport de fin d'étude. DHI, Safège, DIREN Ile-de-France
- [5] MARTI R., LEPELLETIER T. (1997) — L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine. Hydratec ; DOI : 10.1051/lhb/1997081, *La Houille Blanche*. 8 64-70
- [6] ARANA (1910) — Crue de janvier février 1910. Rapport du subdivisionnaire. Service hydrométrique central du bassin de la Seine.
- [7] LORTON, MAHIEU (1910) — Crue de janvier février 1910. Rapport de l'ingénieur ordinaire. 2<sup>ème</sup> arrondissement de la 3<sup>ème</sup> section de la Navigation de la Seine. 17p
- [8] GOUTX D., LACAZE Y. (2008) — Relire les jaugeages de la crue de la Seine en 1910 à la lumière des mesures récentes à l'ADCP, DIREN Ile-de-France, *Colloque SHF Mesures hydrologiques et incertitudes*, avril 2008. 8p
- [9] CHESNEAU S., LACAZE Y., RAIMBAULT E. (2010) — Evaluation du débit de 1910 à Paris : analyse de cohérence spatiale des jaugeages d'époque. DIREN Ile-de-France. En cours.
- [10] LEPELLETIER T., ET AL. (1997) — Evaluation des impacts socio-économiques des crues en région Ile-de-France. Rapport de fin d'étude.
- [11] CEMAGREF (2005) — Inventaire et diagnostic des modèles simples de prévision des crues déjà existants sur le bassin de la Seine. Rapport d'étude, Cemagref, DIREN Ile-de-France, Antony. 133 p
- [12] PERRIN C., CORON L., FORTIER-FILION T.C., MUNIER S., LITRICO X., BERTHET L., LERAT J., PESCHARD J., JAVELLE P., & ANDREASSIAN V. (2009) — *Analyse et modélisation des sous-bassins amont du bassin de la Seine. Rapport de fin d'étude, Cemagref, UR HBAN (Antony) et UMR G-Eau (Montpellier), DIREN Ile-de-France*. 76 p
- [13] BERTHET L. (2010) — Prévision des crues à pas de temps fin : comment mieux assimiler l'information de débit dans un modèle Pluie - Débit ? Thèse de Doctorat, AgroParisTech/ENGREF, Paris. 603 p
- [14] LACAZE Y., JAVELLE P., GOUTX D., BERTHET L. (2008) — Influence des pluies futures sur la prévision des crues : évaluation opérationnelle pour le cas du SPC « Seine moyenne-Yonne-Loing », *Colloque SHF « Prévisions hydrométéorologiques »*. 8 p
- [15] PERRIN C., CORON L., FORTIER-FILION, T.C., BERTHET, L., ANDREASSIAN, V., LITRICO, X., MUNIER, S., LERAT, J., JAVELLE, P., LACAZE, Y., CHESNEAU, S., LAMBLIN, R., SILVA, J.P., CHALÉON, C. and PIOTTE, O. (2010) — Evaluation de modèles de prévision des crues sur le bassin de la Seine, *Colloque SHF : « risques inondation en Ile de France »*, mars 2010. 6p
- [16] LERAT J. (2009) — Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris. 300 p
- [17] MUNIER S. (2009) — Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, Cemagref (Montpellier).
- [18] TONDU Y. (2010) — Simulation of the Paris 1910 flood with a lumped hydrological model : the influence of frozen soil. Master Thesis, Cemagref (Antony), Department of Land and Water Resources Engineering, University of Stockholm.