
Etude de la résilience de réseaux de voies navigables en période d'étiage

Application au réseau du Nord-Pas de Calais

Klaudia Horváth¹, Houda Nouasse², Lala Rajaoarisoa²,
Eric Duviella², Karine Chuquet³

1. Deltares - TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences,
Department of Water management Delft, The Netherlands
hklau85@gmail.com

2. Mines Douai, URIA, France
{houda.nouasse,lala.rajaoarisoa,eric.duviella}@mines-douai.fr

3. VNF, DT Nord-Pas de Calais, SEME, PARME Hydro, France
karine.chuquet@vnf.fr

RÉSUMÉ. L'étude du changement climatique et de son impact sur les fleuves et rivières, ainsi que sur les voies navigables, est au centre des préoccupations de plusieurs laboratoires de recherche en Europe. Il s'agit à partir de modèles climatiques couplés à des modèles hydrologiques de prédire l'état de la ressource sur des horizons futurs allant jusqu'à la fin du siècle, en considérant plusieurs scénarios de changement climatique. Cette démarche n'est pertinente qu'à la condition de disposer de modèles climatiques et hydrologiques fiables et de méthodes permettant de réduire l'incertitude liée à l'utilisation de chaque modèle. Dans le cas contraire, l'étude de la résilience des voies navigables peut être effectuée à partir d'un modèle volumique représentant leur dynamique. Ce type de modèle est considéré dans cet article. Il s'agit d'un modèle intégré de réseaux de voies navigables qui permet la modélisation de leur dynamique tout en considérant la possible influence des bassins versants et des nappes phréatiques. Ce modèle est basé sur le bilan journalier des volumes d'eau entrant et sortant de chaque bief du réseau. Il est utilisé afin d'étudier les conditions limites du bon fonctionnement des réseaux de voies navigables en période d'étiage. L'approche proposée est illustrée dans le cadre du réseau de navigation du Nord-Pas de Calais à partir de données réelles.

ABSTRACT. It is expected that the global change will have impacts on the rivers, channels and inland navigation networks. These forecasts result from studies of several

research laboratories in Europe. Generally, it consists in coupling climate scenarios to hydrological models in order to forecast the water resource state by considering future horizons of several years. This step is relevant only if climate scenario and hydrological models are available. Also, it requires methods dedicated to the reduction of the uncertainties. Otherwise, the resilience study of the inland navigation networks against climate change can be done by designing an integrated model that reproduces their dynamics. This integrated model is able to take into account the influence of watersheds and groundwater. It is based on the daily water volume balance that supply and empty the networks. It allows determining the boundary conditions for the good operation of the inland navigation networks during drought periods. The proposed integrated model is illustrated by considering the inland navigation network of the north of France.

MOTS-CLÉS : modélisation, systèmes à grande échelle, changement climatique, gestion de l'eau, voies navigables.

KEYWORDS: modeling, large scale systems, global change, water management, inland navigation network.

DOI:10.3166/JESA.49.299-323 © 2016 Lavoisier

1. Introduction

Les résultats de nombreuses études sur le climat indiquent sa modification dans les prochaines années avec une élévation globale de la température et une répartition différente des pluies selon les régions et les saisons (Boé *et al.*, 2009 ; Ducharne *et al.*, 2010 ; IWAC, 2009). Ces études sont majoritairement basées sur des scénarios d'évolution climatique proposés par le GIEC (IPCC, 2014), *i.e.* les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathways*; certaines plutôt optimistes, d'autres pessimistes. A partir de ces scénarios et de projections futures issues de modèles climatiques, il est possible d'obtenir des cartographies régionales de température et de pluie sur des horizons de temps allant jusqu'à la fin du siècle.

Couplés à ces modèles climatiques, des modèles hydrologiques permettent de prédire l'impact des scénarios de changement climatique sur les systèmes hydrographiques ; rivières et fleuves. Il en résulte que de façon générale, les périodes d'étiage seront plus fréquentes, longues et critiques (Bates *et al.*, 2008 ; Wanders, Wada, 2015). Ainsi, des projections de ces périodes d'étiage, qui peuvent être caractérisées par plusieurs indicateurs (Hao, Singh, 2015), ont été réalisées à partir du scénario RCP 8.5 pour quantifier leur fréquence, leur durée et leur intensité dans des régions en Chine (Li *et al.*, 2015) et en Corée du sud (Park *et al.*, 2015). Ces périodes d'étiage vont ainsi directement impacter les usages de l'eau, en particulier les besoins en eau potable, pour l'agriculture et l'industrie, mais également la navigation fluviale. En se focalisant sur ce dernier usage, plusieurs études ont été menées afin de déterminer quel sera l'im-

impact du changement climatique sur les réseaux de voies navigables. Le rapport produit par l'organisation PIANC¹ (EnviCom, 2008), permet d'identifier plusieurs conséquences du changement climatique sur la navigation. Par exemple, l'augmentation de la température de l'eau conduira à une vulnérabilité plus importante sur la qualité de l'eau avec notamment la prolifération d'algues, entraînant des difficultés lors de la manœuvre des ouvrages (vannes, écluses, pompes). De façon plus manifeste, les contraintes liées à la baisse de la ressource en eau disponible pour l'alimentation des réseaux de navigation seront plus importantes. Ces résultats sont également partagés par d'autres études en Angleterre (IWAC, 2009; Arkell, Darch, 2006) et en Chine (Wang *et al.*, 2007). Elles mettent en évidence que les contraintes futures liées au changement climatique sur les activités de navigation doivent être anticipées afin de concevoir, le plus en amont possible, les stratégies de gestion des réseaux de navigation qui permettront d'en réduire la vulnérabilité. Cela est d'autant plus important qu'il existe actuellement une forte volonté politique de promouvoir le transport par voies navigables, en particulier en Europe dans le cadre du programme TEN-T² qui vise à améliorer les voies de communication d'est en ouest et du nord au sud en Europe; et plus particulièrement en France où un report modal de 20 % du trafic routier vers le fluvial et le ferroviaire est attendu à horizon 2050. Le transport par voies navigables présente en effet des avantages économiques, environnementaux et de sûreté importants, particulièrement intéressants dans un contexte de changement climatique (Brand *et al.*, 2012; Mallidis *et al.*, 2012; Mihic *et al.*, 1993).

Une démarche complémentaire à l'utilisation des modèles climatiques couplés à des modèles hydrologiques consiste à étudier la résilience des voies navigables avec l'objectif de déterminer les conditions climatiques à partir desquelles les conditions autorisant la navigation ne sont plus réunies. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de disposer d'un modèle intégré du réseau de voies navigables sur une grande échelle spatiale et temporelle de façon à capter la dynamique des phénomènes d'étiage. (Frigo, Bleninger, 2015) proposent un état de l'art des modèles de voies navigables en orientant leur étude sur les problématiques de sédimentation, d'influence des bassins versants, d'impacts de la navigation sur les voies navigables. Dans cet article, l'utilisation de modèles intégrés pour l'étude de la résilience des voies navigables en période d'étiage n'est cependant pas directement abordée. Par ailleurs, plusieurs modèles intégrés de bassins versants ont été proposés dans la littérature (Lerat, 2009; Munier, 2009; Payan, 2007; Perrin, 2000). Ils consistent à représenter la dynamique des bassins versants comme un équilibre entre les volumes d'eau entrants et sortants, en y intégrant des mécanismes d'échange avec les nappes phréatiques ainsi que les dynamiques de barrages-réservoirs. Le modèle intégré du réseau de voies navigables proposé doit tenir compte des spécificités des

1. Permanent International Association of Navigation Congresses

2. http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-guidelines/index_en.htm

réseaux de navigation. Il reste ensuite nécessaire de renseigner ce modèle avec le maximum d'informations disponibles sur la dynamique des ouvrages, les différentes jonctions avec les bassins versants (déversement d'affluent, sources et prélèvements anthropiques, etc), l'estimation des entrées et sorties non mesurées. L'identification des principales sources d'alimentation du réseau des voies navigables en période normale et en période d'étiage est également requise. Elle permet de déterminer les débits moyens et les débits d'étiage du réseau. L'ensemble de ces informations est issu de la bonne connaissance du réseau que possèdent les gestionnaires des voies navigables, ainsi que de l'installation de capteurs et d'actionneurs automatisés, et finalement de systèmes de supervision de type SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (Bugarski *et al.*, 2013; Associates *et al.*, 2008; Malaterre, Chateau, 2007). Les systèmes de supervision permettent en effet, en plus d'une conduite automatisée, une amélioration de la connaissance de leur dynamique par la création de bases de données.

Dans cet article, une démarche permettant l'étude de la résilience des réseaux de voies navigables est proposée. Elle est basée sur la conception d'un modèle intégré de réseaux de voies navigables. Ce modèle a pour objectif de reproduire la dynamique des réseaux de voies navigables composés de biefs interconnectés, avec une période de temps correspondant à un jour. Il peut également permettre la prise en compte des échanges avec les bassins versants et les eaux souterraines. Le modèle proposé est ensuite utilisé pour déterminer la résilience des réseaux de voies navigables en utilisant les débits d'étiage identifiés. Cette étude de résilience en période d'étiage est illustrée avec les données réelles du réseau de voies navigables situé dans la région Nord-Pas de Calais. La structure de l'article est la suivante : la description de la démarche de l'étude de résilience des réseaux de voies navigables en période d'étiage est décrite dans la section 2. La section 3 est dédiée à la description du modèle intégré. Dans la section 4, l'approche de modélisation proposée est mise en œuvre, puis l'étude de la résilience du réseau des voies navigables du Nord-Pas de Calais est présentée. Finalement une conclusion et des perspectives de recherche sont fournies en section 5.

2. Etude de la résilience des voies navigables

Les réseaux de voies navigables sont utilisés essentiellement pour la navigation et permettent le transport de marchandises entre plusieurs ports et plateformes multimodales. La navigation est autorisée lorsque le niveau d'eau se situe à l'intérieur du rectangle de navigation (*voir* figure 1). Si le niveau est en dessous du Niveau Bas de Navigation (NBN) ou au dessus du Niveau Haut de Navigation (NHN), toute navigation doit être stoppée afin d'éviter des avaries sur les bateaux.

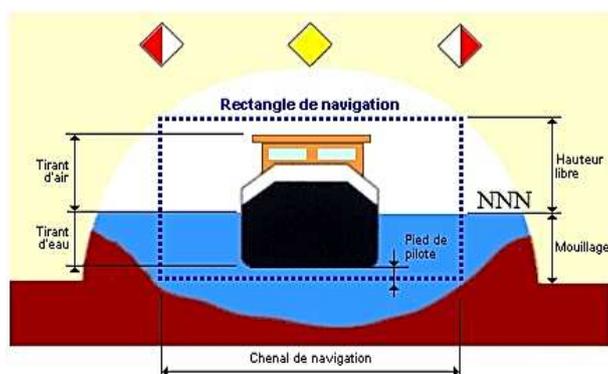


Figure 1. Rectangle de navigation et le Niveau Normal de Navigation - NNN

En période normale, le niveau d'eau doit être régulé autour du NNN, *i.e.* le Niveau Normal de Navigation. Cette régulation est réalisée par le contrôle des ouvrages en amont de chaque bief, *i.e.* tronçon de canal entre deux écluses. L'occurrence de bassinées peut provoquer des perturbations très importantes avec l'apparition de vagues et des phénomènes de résonance. Il est alors nécessaire de concevoir des algorithmes de régulation innovants, tels que ceux proposés dans (Horvath, Petreksy *et al.*, 2014) afin de minimiser les phénomènes de résonance et de conserver le niveau des biefs le plus proche possible du NNN. La mise en œuvre de ces algorithmes suppose que la ressource en amont est toujours disponible. Sous cette condition, l'ensemble des biefs du réseau de voies navigables peut être régulé de façon à respecter les conditions de navigation.

En période d'étiage, la ressource disponible permettant l'alimentation du réseau de voies navigables est limitée. Il s'agit alors de gérer la ressource en eau de façon optimale sur un horizon de temps plus grand. C'est dans ce cadre que l'étude de la résilience de réseau de voies navigables en période d'étiage tient tout son intérêt. La résilience d'un bief de voies navigables est définie comme étant sa capacité à garantir les conditions de navigation quelques soient les conditions climatiques.

L'étude de l'impact du changement climatique sur les réseaux de voies navigables, en particulier les périodes d'étiage, peut être réalisée à partir de modèles hydrologiques des différents bassins versants traversés lorsque ces modèles sont disponibles, ou à partir de modèles intégrés et de la connaissance des débits d'étiage identifiés au niveau de leurs entrées principales. Les réseaux de voies navigables étant généralement artificiels, une grande partie des volumes d'eau les alimentant provient en effet de cours d'eau naturels.

L'étude de la résilience est alors réalisée en trois étapes. La première consiste à proposer le modèle intégré du réseau, de collecter suffisamment de données pour reproduire de façon réaliste son comportement en période de fonctionnement normale. La seconde a pour objectif de calibrer le modèle en caractérisant les entrées et sorties inconnues ainsi que les incertitudes qui y sont associées. Finalement la troisième étape permet de simuler le réseau en période d'étiage à partir des débits d'étiage identifiés au niveau de ses entrées, c'est-à-dire celles qui sont impactées par une diminution de la ressource en eau disponible.

2.1. Modèle intégré de réseaux de voies navigables

Les réseaux de voies navigables sont des systèmes à grande dimension couvrant généralement plusieurs bassins versants. Compte tenu du relief, les réseaux de voies navigables sont généralement équipés d'écluses. Chaque tronçon de voies navigables compris entre deux écluses correspond à un bief, et est noté *NR*. Ainsi un réseau de voies navigables est composé d'un ensemble fini de *NR* interconnectés entre eux.

Les voies navigables sont localisées au centre de bassins versants et ont par conséquent des interactions importantes avec les rivières et parfois avec les eaux souterraines. Celles-ci peuvent alimenter ou être alimentées par les *NR* gravitairement ou au travers d'ouvrages contrôlés telles que les vannes. La connaissance de l'ensemble de ces interactions doit être la plus exhaustive possible afin de permettre la conception d'un modèle de réseaux de voies navigables le plus fiable et réaliste possible.

Le modèle intégré proposé doit offrir la possibilité d'intégrer les interactions entre les *NR*, les rivières et les eaux souterraines. Ce modèle peut également être couplé, lorsqu'ils sont disponibles, à des modèles hydrologiques (Lerat, 2009 ; Munier, 2009). Ces derniers permettent d'estimer les débits des rivières à partir du cumul de pluie et de coefficients tels que l'évapotranspiration (voir figure 2). Par ailleurs, l'influence des barrages réservoirs peut être prise en compte dans le modèle, tel que proposé dans les travaux de (Payan, 2007). Le modèle intégré de réseaux de voies navigables développé dans cet article est détaillé dans la section 3.

2.2. Détermination des entrées du modèle intégré

Les phénomènes d'étiage étant généralement répartis sur de larges échelles spatiales et temporelles, les entrées du modèle intégré ne doivent pas nécessairement être connues ou estimées à un pas spatio-temporel très fin. L'estimation des volumes d'eau alimentant et transitant par le réseau de voies navigables à un pas de temps journalier est alors suffisante afin d'étudier la résilience de ces réseaux en période d'étiage. Il reste néanmoins nécessaire de calculer et d'estimer ces volumes d'eau.

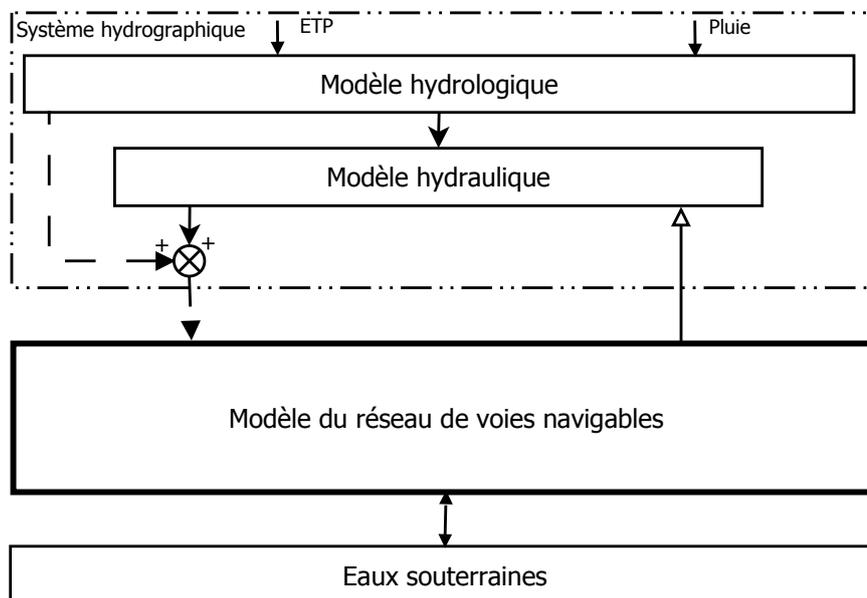


Figure 2. Modèle intégré de réseau de voies navigables couplé à des modèles hydrologiques

Les volumes d'eau transitant par les réseaux de voies navigables peuvent être répartis en différentes catégories. Tout d'abord, il est possible de considérer les volumes contrôlés issus des bassinées, *i.e.* le remplissage ou la vidange d'une écluse. Ils sont déterminés hebdomadairement à partir de la connaissance du volume d'eau consommé par chaque bassinée en fonction du nombre de bateaux traversant chaque *NR*. Ensuite, sont pris en compte les volumes contrôlés provenant des ouvrages tels que les vannes ou les barrages. Ils sont déterminés à partir de leur débit moyen journalier et de modèles de la dynamique de ces ouvrages. Finalement, il est indispensable de prendre en considération les volumes non contrôlés dus aux écoulements gravitaires, à la pluie, à l'évapotranspiration, aux prélèvements et rejets d'origines anthropiques, ainsi qu'aux échanges avec les nappes phréatiques. Ils peuvent être estimés à partir d'une connaissance experte lorsqu'elle est disponible, ou avec davantage de précision, à partir des données mesurées en dehors des périodes de navigation, *i.e.* durant la nuit. En effet, durant les périodes de nuit, il n'y a pas de perturbations dues aux bassinées.

Après avoir déterminé les volumes contrôlés et non contrôlés sur des épisodes temporels de fonctionnement des *NR*, il est possible de reproduire le comportement de chaque *NR* et du réseau de voies navigables grâce au modèle proposé. Cette méthodologie peut être utilisée afin de caler le modèle conçu en

période de fonctionnement normal. Dans un second temps, il est possible d'utiliser ce modèle pour simuler le fonctionnement de réseaux de voies navigables en période d'étiage.

2.3. Simulation des phénomènes d'étiage

Le modèle du réseau de voies navigables proposé est utilisé afin de reproduire son comportement en considérant des données réelles. Afin d'étudier l'impact des périodes d'étiage, en l'absence de modèles hydrologiques, le modèle est simulé en appliquant en entrée les débits d'étiage identifiés à partir de la connaissance experte des gestionnaires. Une autre possibilité consiste à utiliser les données sur le changement climatique issues de projets tels que Explore2070³. Ces données sont disponibles en ligne pour plusieurs bassins versants en France. Ces résultats prévoient une baisse de la ressource en eau entre 15 et 45 % dans le nord de la France, et fournissent les hydrogrammes annuels à horizon 2050-2070. Ainsi, à partir de ces données quantitatives sur le pourcentage de baisse de la ressource en eau disponible, il est possible de réduire les débits en entrée du réseau et ainsi étudier la résilience de réseaux de voies navigables en France.

3. Modèle intégré de réseaux de voies navigables

3.1. Structure du modèle

Le modèle intégré de réseaux de voies navigables qui a été conçu a pour objectif de reproduire la dynamique de réseaux de navigation au pas de temps journalier. L'approche de modélisation proposée permet de considérer différentes configurations de réseaux de voies navigables en considérant les confluent et les diffluent (*voir* figure 3a). Un réseau de voies navigables est composé de s biefs interconnectés NR_i , avec $i \in 1$ à s . Chaque bief NR_i est modélisé comme un réservoir contenant un volume d'eau sur une période prédéfinie (*voir* figure 3b). Il est alimenté et vidangé par des volumes d'eau de manière contrôlée et non contrôlée. La désignation de volumes d'eau contrôlés regroupe les volumes d'eau provenant du contrôle automatique d'ouvrages tels que les vannes, mais également les volumes d'eau issus des bassinées. Bien que ces volumes ne soient pas directement contrôlés, ils sont, ou peuvent être, connus. La désignation de volumes d'eau non contrôlés regroupe les apports et les prélèvements non contrôlés et inconnus.

Ainsi, l'ensemble des volumes contrôlés sont répartis selon :

- les volumes contrôlés issus du réseau alimentant le bief NR_i , *i.e.* les biefs amont, sont notés $V_i^{s,c}$,

3. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>

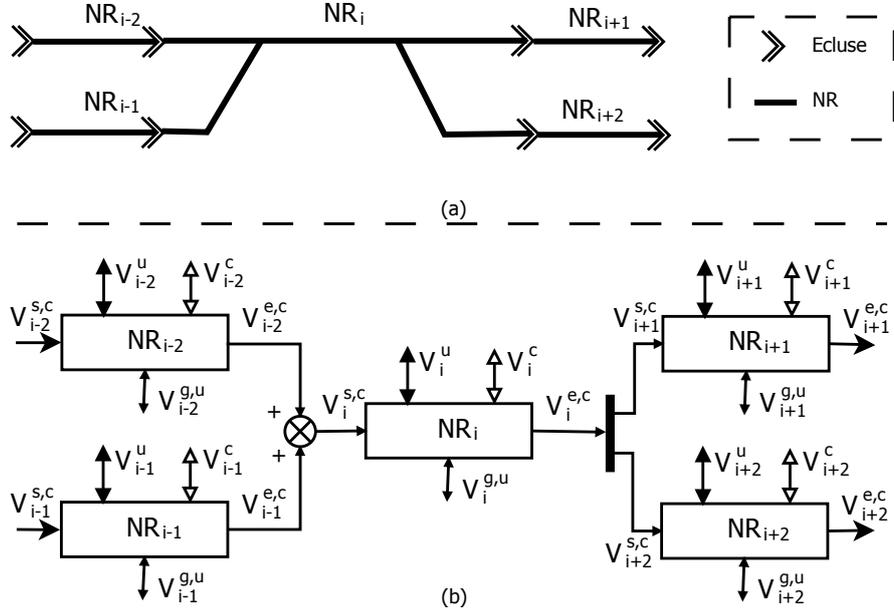


Figure 3. (a) Réseau de voies navigables, (b) modèle intégré correspondant

– les volumes contrôlés issus du réseau vidangeant le bief NR_i , *i.e.* les biefs aval, sont notés $V_i^{e,c}$,

– les volumes contrôlés issus de rivières naturelles qui alimentent ou vidangent le bief NR_i sont notés V_i^c . Ces volumes sont signés, positifs si le bief est alimenté, négatifs dans le cas contraire.

Les volumes d'eau non contrôlés sont répartis selon :

– les volumes non contrôlés issus des rivières naturelles, provenant des phénomènes d'écoulement, d'évapotranspiration, des pluies et finalement d'activités anthropiques, sont notés V_i^u . Ces volumes sont signés en fonction de leur contribution au volume déjà contenu dans le bief NR_i .

– les volumes non contrôlés issus des échanges avec les eaux souterraines, sont notés $V_i^{g,u}$. Ces volumes sont également signés.

Après avoir défini l'ensemble des volumes ayant un impact sur la dynamique du bief NR_i , il est ainsi possible de représenter sa dynamique à partir de la relation (1) :

$$V_{NR_i}(t) = V_{NR_i}(t-1) + V_i^{s,c}(t) + V_i^{e,c}(t) + V_i^c(t) + V_i^u(t) + V_i^{g,u}(t). \quad (1)$$

Cette relation doit bien entendu tenir compte de la configuration du réseau de voies navigables, en particulier les diffluences et les confluences. Pour une confluence, l'ensemble des volumes contrôlés alimentant le bief NR_i sont additionnés. Pour les diffluences, l'ensemble des volumes contrôlés vidangeant le bief NR_i correspond à la somme des volumes contrôlés alimentant les biefs en aval (*voir* relation (2)).

$$\begin{cases} V_i^{s,c}(t) = \sum_{j=\Phi_i(1)}^{\Phi_i(max)} V_j^{e,c}(t), \\ V_i^{e,c}(t) = \sum_{j=\Theta_i(1)}^{\Theta_i(max)} V_j^{s,c}(t), \end{cases} \quad (2)$$

où Φ_i regroupe l'ensemble des indices des biefs alimentant le bief NR_i , et Θ_i , l'ensemble des indices des biefs alimentés par le bief NR_i .

Le modèle intégré de réseaux de voies navigables, bien que défini, doit être enrichi de la connaissance sur les différentes contributions volumiques possibles. En d'autres termes, il s'agit d'identifier l'ensemble des volumes contrôlés et d'estimer la contribution des volumes non contrôlés sur une période de fonctionnement donnée. Cette connaissance provient essentiellement de la connaissance experte des gestionnaires ainsi que de l'étude des données mesurées disponibles.

En règle générale, l'information sur les volumes n'est pas connue. Elle doit donc être générée à partir de la connaissance ou de la détermination des débits alimentant ou vidangeant chaque bief NR_i . Ces débits sont issus de mesures lorsque des débitmètres sont installés sur le réseau, ou bien déterminés à partir des hauteurs d'eau mesurées ainsi que de modèles des ouvrages équipant les biefs (LePocher *et al.*, 2012). La démarche de détermination des débits est illustrée dans la sous-section suivante.

3.2. Identification des paramètres du modèle

Il s'agit dans un premier temps de déterminer les volumes d'eau provenant des bassinées. Le volume d'eau qui correspond à une bassinée d'une écluse est généralement connu. Il s'agit alors de connaître les instants d'occurrence de ces bassinées. Deux solutions, au moins, existent ; la première consiste à étudier les données issues d'un système de supervision SCADA lorsque celui-ci est utilisé afin de connaître les instants correspondant aux bassinées de chaque écluse ; la deuxième a pour but de détecter les bassinées à partir des mesures des hauteurs d'eau à proximité des écluses. En effet, une bassinée occasionne des perturbations en amont et en aval de l'écluse qui peuvent être caractérisées. Les approches d'identification consistent alors à déterminer une signature sur les données mesurées. Par exemple, une approche basée sur les écarts entre plusieurs mesures successives de niveaux d'eau permettent de détecter l'occurrence de bassinées (Horvath, Duviella *et al.*, 2014).

Par la suite, l'ensemble des volumes contrôlés pour chacun des biefs NR_i du réseau de voies navigables doit être identifié. Pour cela, si aucune mesure de

débit n'est disponible, un modèle dynamique de chaque ouvrage équipant les biefs doit être proposé. Il s'agit en général de modèles dynamiques de vannes (Baume *et al.*, 2003; Bos, 1976; Sepúlveda *et al.*, 2009). Ces modèles sont calés avec des données réelles lorsqu'elles sont disponibles. Dans le cas contraire, des coefficients de calage sont préconisés dans la littérature, auxquels sont associés des taux d'erreur d'approximation selon le mode de fonctionnement de l'ouvrage. Il suffit ensuite d'intégrer les débits qui ont été déterminés sur la période souhaitée afin d'obtenir les volumes d'eau contrôlés.

Les volumes contrôlés provenant des bassinées ou des ouvrages correspondent aux volumes $V_i^{s,c}(t)$, ou $V_i^{e,c}(t)$ de la relation (1) dans le cas où ces volumes sont échangés au sein du réseau, et au volume $V_i^c(t)$ s'ils sont échangés en dehors du réseau, tels qu'une alimentation par une prise d'eau.

Les volumes d'eau non contrôlés, *i.e.* $V_i^u(t)$ et $V_i^{g,u}(t)$ (*voir* relation (1)) sont considérés comme étant inconnus. Il est possible d'améliorer la connaissance de ces contributions inconnues grâce à des campagnes de mesure ou l'installation de nouveaux capteurs. Une autre approche consiste à estimer la contribution des volumes d'eau inconnus à partir des volumes connus qui ont été déterminés et des mesures sur les hauteurs d'eau des biefs. Il est aussi possible de caractériser les volumes d'eau non contrôlés à partir de ces données fiables en fonction de la saisonnalité, des jours ou des nuits, et d'autres événements tels que les pluies.

Une fois que le modèle intégré de réseaux de voies navigables est disponible, il reste à étudier sa résilience en période d'étiage. La démarche proposée basée sur un modèle intégré d'une partie du réseau de voies navigables du nord de la France est présentée dans la section suivante.

4. Modèle intégré du réseau Cuinghy-Fontinettes

Le réseau de voies navigables étudié est situé dans le nord de la France (*voir* figure 4). Il est composé exclusivement de biefs artificiels connectés par des écluses. Ce réseau couvre plusieurs bassins versants de la région : les bassins de la Lys, de l'Aa de la Deule, etc. Dans cet article, n'est considéré qu'une partie de ce réseau autour du bief Cuinghy-Fontinettes (*voir* figure 5), *i.e.* le NR_3 . Les neuf autres biefs, NR_i avec $i \in 1$ à 9, sont représentés sur la figure 6a afin de prendre en compte leur interaction, la direction des écoulements et la position des vannes et des écluses. A partir de ce graphe, le modèle intégré du réseau est proposé sur la figure 6b en tenant compte de l'ensemble des volumes contrôlés et non contrôlés.

Les volumes contrôlés et non contrôlés doivent être déterminés pour chaque NR . Pour illustrer la démarche permettant la détermination de ces volumes, l'étude s'est focalisée sur le NR_3 entre les écluses de Cuinghy et de Fontinettes. Le NR_3 est traversé par plusieurs rivières naturelles. Certaines passent en dessous du canal par siphon, d'autres se jettent dans le canal, comme le Surgeon,

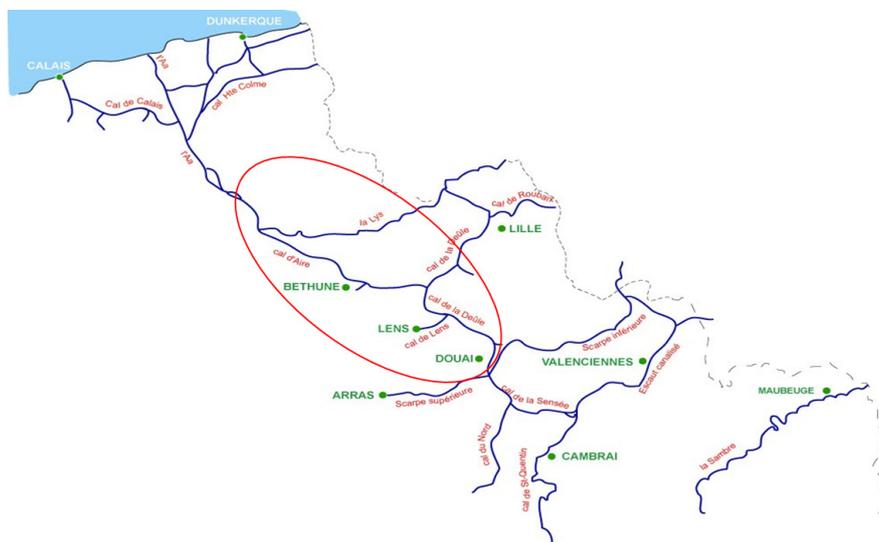


Figure 4. Réseau de voies navigables du nord de la France

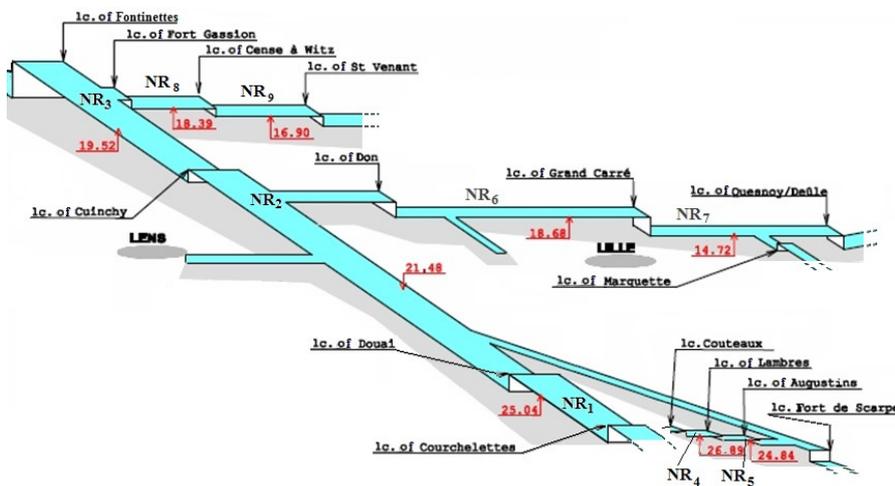


Figure 5. Réseau Quinchy-Fontinettes

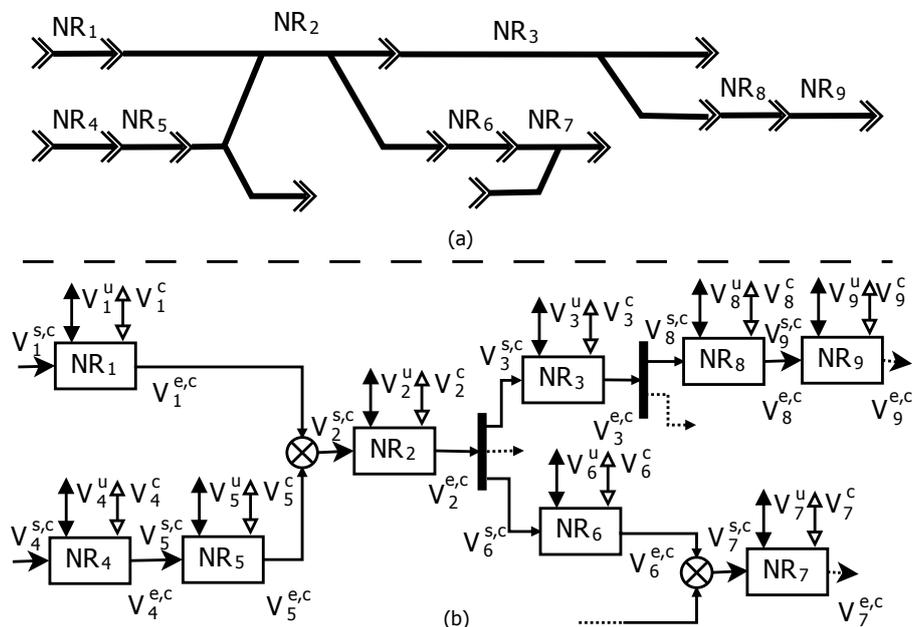


Figure 6. (a) Schéma du réseau Cuinchy-Fontinettes, (b) modèle intégré du réseau

la Longue Becque... Le NR_3 a la particularité de pouvoir alimenter ou être alimenté par la Lys Municipale au niveau de la ville d'Aire-sur-le-Lys. Une vanne levante, la Porte de Garde, permet en effet l'écoulement de l'eau dans les deux sens en fonction des niveaux du canal et de la Lys, en mode noyé ou dénoyé. L'alimentation de la Lys par la vidange du NR_3 peut également être réalisée au niveau de l'écluse et de la vanne à Fort Gassion situé à 28,7 km de Cuinchy. L'écluse et la vanne de Fort Gassion permettent l'alimentation du NR_8 .

Le NR_3 est un bief de 42,3 km de long avec une largeur moyenne de 52 m. Les conditions pour la navigation imposent un NNN à 19,52 m NGF (*Nivellement général de la France*) correspondant à une profondeur de 4,26 m. Le rectangle de navigation actuel correspond au NNN ± 30 cm. Il est ainsi possible d'approximer le volume d'eau contenu dans le NR_3 à un peu plus de 9 millions de m^3 pour un niveau correspondant au NNN.

Le NR_3 est alimenté en amont par des volumes contrôlés au niveau de l'écluse de Cuinchy et d'une vanne abaissante située à côté de l'écluse. Ces volumes d'eau proviennent du NR_2 . La vanne Porte de Garde, l'écluse et la vanne de Fort Gassion permettent elles aussi le contrôle des volumes transitant entre le NR_3 et le NR_8 . Finalement, l'écluse de Fontinettes alimente un bief en aval avec des volumes d'eau contrôlés provenant du NR_3 . Par ailleurs, les volumes non contrôlés du NR_3 proviennent des rivières naturelles qui s'écoulent

dans le canal, des phénomènes tels que la pluie et le ruissellement, des pompages et rejets d'origine anthropique. Plus de 300 prises et rejets ont été répertoriés le long du NR_3 . Ces volumes doivent être déterminés à partir de données mesurées sur le bief.

4.1. Détermination des volumes d'eau

La navigation a un gros impact sur le volume d'eau contenu dans le NR_3 . A chaque bassinée à Cuinchy, ce sont près de $3\,700\ m^3$ qui proviennent du NR_2 et qui alimentent le NR_3 . L'impact de l'écluse de Fontinettes est beaucoup plus conséquent puisqu'il correspond à un prélèvement d'environ $25\,000\ m^3$ à chaque bassinée. Ainsi un bateau traversant le NR_3 va occasionner une consommation d'environ $21\,000\ m^3$ d'eau, ce qui correspond à une diminution du niveau du NR_3 d'environ $1\ cm$. Pour réguler ce niveau d'eau et le conserver autour du NNN, le bief NR_3 doit donc être alimenté au niveau de la vanne de Cuinchy et de la Porte de Garde lorsque cela est possible.

Ainsi, en adaptant l'équation (1) au cas du NR_3 , elle devient :

$$V_{NR_3}(t) = V_{NR_3}(t-1) + V_3^{s,c}(t) + V_3^{e,c}(t) + V_3^c(t) + V_3^u(t), \quad (3)$$

avec $V_3^{s,c}(t)$, le volume d'eau provenant des bassinées à l'écluse et de la vanne de Cuinchy, $V_3^{e,c}(t)$ le volume sortant du bief à l'écluse de Fontinettes, $V_3^c(t)$ le volume contrôlé au niveau de la Porte de Garde à Aire-sur-la-Lys, $V_3^u(t)$ le volume provenant des apports et prélèvements inconnus, tout en considérant qu'il n'y a pas d'échange possible avec les eaux souterraines.

Les volumes d'eau dûs aux bassinées sont alors calculés. Le nombre de bateaux traversant le NR_3 chaque jour est inconnu. Il est néanmoins possible de le déterminer à partir des données mesurées, notamment le niveau d'eau mesuré en amont de l'écluse de Fontinettes, sachant qu'une bassinée de cette écluse occasionne une vague de plus de $15\ cm$ d'amplitude qui se répercute le long du canal. L'utilisation d'algorithmes de détection de bassinées est alors privilégiée afin de comptabiliser le nombre de bateaux transitant par l'écluse de Fontinettes. La figure 7a permet la représentation du relevé du niveau d'eau en amont de Fontinettes pour l'année 2010. Le niveau est mesuré toutes les 15 minutes. Grâce à l'utilisation d'un algorithme de détection de bassinées, les instants d'activation de l'écluse des Fontinettes sont déterminés et représentés sur la figure 7b. La même démarche est utilisée pour l'écluse de Cuinchy. Les résultats obtenus sont consolidés avec les bassinées détectées à Fontinettes, puisqu'il est considéré qu'un bateau empruntant l'écluse de Fontinettes va emprunter l'écluse de Cuinchy dans la même journée. Cette hypothèse ne souffre pas d'une très grande incertitude. Finalement, à partir du nombre de bateaux traversant chaque jour le NR_3 , il est possible de déterminer le volume d'eau contrôlé pour l'année 2010 dû exclusivement à l'activation des écluses (figure 10a).

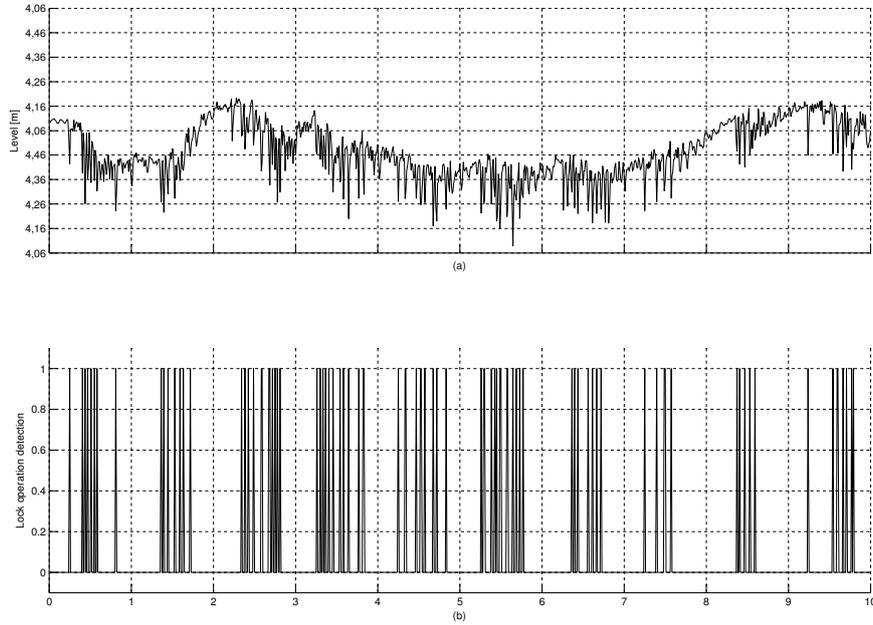


Figure 7. (a) Niveau mesuré à Fontinettes durant les dix premiers jours de l'année 2010, (b) détection de l'occurrence de bassinée

Les volumes d'eau contrôlés au niveau de la vanne de Cuinghy sont déterminés à partir du modèle de l'ouvrage et des mesures des niveaux d'eau. Il s'agit d'une vanne abaissante dont un modèle générique est fourni par l'équation suivante (Horvath, Duviella *et al.*, 2014) :

$$Q(t) = \frac{3\sqrt{3}}{2} C_{dw} \cdot B_w \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{H_1(t) - H_2(t)} H_e(t), \quad (4)$$

avec C_{dw} le coefficient de calage, B_w la largeur de la vanne, H_1 le niveau d'eau amont, H_2 le niveau d'eau aval, H_e le niveau d'ouverture de la vanne, et g l'accélération de la pesanteur.

Le modèle de la vanne de Cuinghy est ainsi calé avec des données réelles. Les volumes d'eau contrôlés correspondant à la vanne de Cuinghy pour chaque jour sont déterminés à partir de la sommation de ces débits sur une journée. Les volumes d'eau correspondant à la vanne de Cuinghy sont fournis sur la figure 10b.

Après avoir déterminé les volumes contrôlés $V_3^{s,c}(t)$ et $V_3^{e,c}(t)$, il est nécessaire de calculer les volumes d'eau contrôlés provenant de la vanne Porte de Garde, *i.e.* $V_3^c(t)$. Ces volumes sont déterminés à partir des débits transitant par cette vanne au cours d'une journée. Les débits sont calculés en utilisant

un modèle dynamique permettant la prise en compte des différents modes de fonctionnement de la Porte de Garde (voir figure 8). En effet, cette vanne peut fonctionner en charge ou à surface libre, en mode noyé, partiellement noyé ou dénoyé, et avec un écoulement dans les deux sens en fonction des hauteurs d'eau H_1 et H_2 .

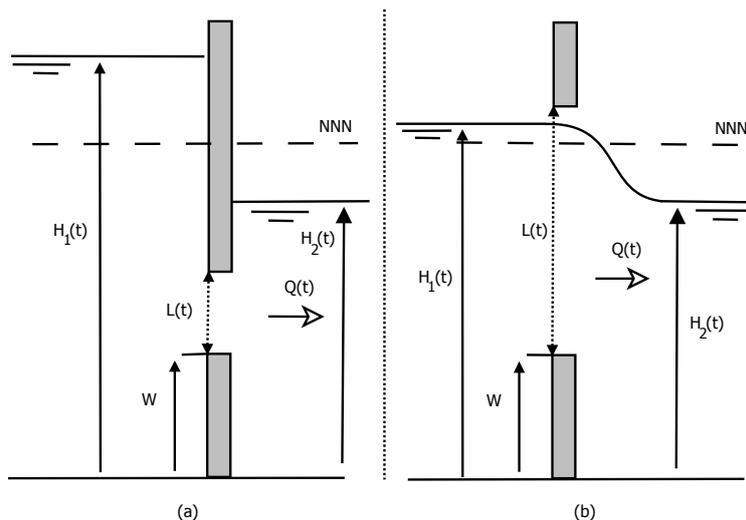


Figure 8. Vanne en (a) régime en charge, (b) à surface libre, avec un seuil d'une hauteur W , et les niveaux d'eau amont $H_1(t)$ et aval $H_2(t)$, ainsi que l'ouverture de la vanne $L(t)$

La prise en compte de l'ensemble de ces modes de fonctionnement est réalisée à partir de la conception d'un modèle hybride qui a été proposé dans (LePocher *et al.*, 2012), puis amélioré dans (Horvath, Duviella *et al.*, 2014). Ce modèle est représenté par la figure 9. L'ensemble dénombrable \mathcal{Q} des états discrets est défini par :

$$q \in \mathcal{Q} = \{N, O_{cr}^S, O_{cr}^F, O_{rc}^S, O_{rc}^F, U_{cr}^S, U_{cr}^P, U_{cr}^F, U_{rc}^S, U_{rc}^P, U_{rc}^F\}, \quad (5)$$

avec :

- N : Aucun écoulement,
- O_{cr}^S : Régime à surface libre noyé avec un sens d'écoulement du bief vers La Lys,
- O_{cr}^F : Régime à surface libre dénoyé avec un sens d'écoulement du bief vers La Lys,
- O_{rc}^S : Régime à surface libre noyé avec un sens d'écoulement de La Lys vers le bief,

- O_{rc}^F : Régime à surface libre dénoyé avec un sens d'écoulement de La Lys vers le bief.
- U_{cr}^S : Régime en charge noyé avec un sens d'écoulement du bief vers La Lys,
- U_{cr}^P : Régime en charge partiellement noyé avec un sens d'écoulement du bief vers La Lys,
- U_{cr}^F : Régime en charge dénoyé avec un sens d'écoulement du bief vers La Lys,
- U_{rc}^S : Régime en charge noyé avec un sens d'écoulement de La Lys vers le bief,
- U_{rc}^P : Régime en charge partiellement noyé avec un sens d'écoulement de La Lys vers le bief,
- U_{rc}^F : Régime en charge dénoyé avec un sens d'écoulement de La Lys vers le bief.

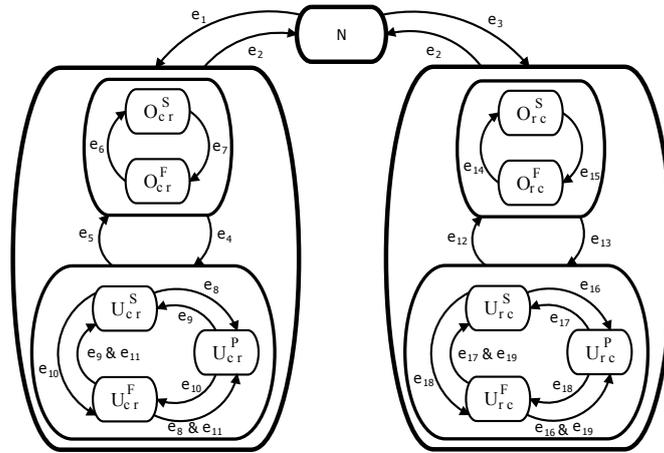


Figure 9. Modèle hybride de la vanne Porte de Garde

Les transitions entre les différents états sont regroupées dans l'ensemble \mathcal{E} , tels que $e_i \in \mathcal{E}$ et fournies ci-dessous en considérant H_1 le niveau du bief et H_2 le niveau de la Lys :

$$\begin{array}{ll}
- e_1 : H_1 > H_2 \ \& \ L > 0 & - e_{11} : \alpha < H_2/H_1 \\
- e_2 : H_1 = H_2 \ || \ L = 0 & & - e_{12} : H_2 \leq H_e + L \\
- e_3 : H_1 < H_2 \ \& \ L > 0 & - e_{13} : H_2 > H_e + L \\
- e_4 : H_1 > H_e + L & & - e_{14} : H_1 > H_e \\
- e_5 : H_1 \leq H_e + L & & - e_{15} : H_1 \leq H_e \\
- e_6 : H_2 > H_e & & - e_{16} : H_1 \geq \beta H_2 + (1 - \beta)L \\
- e_7 : H_2 \leq H_e & & - e_{17} : H_1 < \beta H_2 + (1 - \beta)L \\
- e_8 : H_2 \geq \beta H_1 + (1 - \beta)L & & - e_{18} : \alpha \geq H_1/H_2 \\
- e_9 : H_2 < \beta H_1 + (1 - \beta)L & & - e_{19} : \alpha < H_1/H_2 \\
- e_{10} : \alpha \geq H_2/H_1 & &
\end{array}$$

avec $\alpha = 1 - 0.14 \frac{H_2}{H_e}$ et $\beta = \alpha(H_2(t) - H_e)$ si $H_1 > H_2$; $\alpha = 1 - 0.14 \frac{H_1}{H_e}$ et $\beta = \alpha(H_1(t) - H_e)$ sinon.

Finalement, l'ensemble des fonctions continues est regroupé dans \mathcal{F} , tel que $f_q \in \mathcal{F}$. Ainsi, une fonction de la dynamique continue est associée à chaque état discret, et peut être exprimée par :

$$Q_q(t) = f_q(H_1(t), H_2(t), L(t), H_e, B_w, g, C_{dw}, c_q, \mu, \mu_1, k_f, k_{f_1}), \quad (6)$$

où $q \in \mathcal{Q}$ représente un état discret, $H_1(t)$, $H_2(t)$ et $L(t)$ les variables continues, H_e , B_w et g des constantes physiques, et C_{dw} , c_q , μ , μ_1 , k_f , et k_{f_1} des coefficients de calage qui peuvent être nuls selon les états discrets.

Ainsi, pour les états O^S , *i.e.* un régime à surface libre noyé, le débit est exprimé par (Bos, 1976) :

$$Q_{O^S}(t) = \frac{3\sqrt{3}}{2} c_q B_w \sqrt{2g} \frac{2}{3} \sqrt{H_1(t) - H_2(t)} H_e, \quad (7)$$

où C_q est le coefficient de calage, H_e le niveau entre le haut du seuil de la vanne et le NNN, B_w la largeur de la vanne, $H_1(t)$ et $H_2(t)$ les niveaux en amont et en aval.

Concernant une vanne en régime à surface libre dénoyé O^F , le débit est exprimé par (Baume *et al.*, 2003) :

$$Q_{O^F}(t) = c_q B_w \sqrt{2g} \frac{2}{3} \sqrt{H_1(t) - H_e}. \quad (8)$$

Pour une vanne en régime en charge dénoyé U^F , le débit est exprimé par :

$$Q_{U^F}(t) = B_w \sqrt{2g} (\mu H_1(t)^{3/2} - \mu_1 (H_1(t) - L(t))^{3/2}), \quad (9)$$

avec $L(t)$ l'ouverture de la vanne, μ , μ_1 des coefficients de calage.

Le débit en régime en charge partiellement noyé U^P correspond à :

$$Q_{UP}(t) = B_w \sqrt{2g}(k_f \mu H_1(t))^{3/2} - \mu_1(H_1(t) - L(t))^{3/2}, \quad (10)$$

avec k_f un coefficient de calage,

et finalement pour le régime en charge noyé U^S :

$$Q_{US}(t) = B_w \sqrt{2g}(k_f \mu H_1(t))^{3/2} - k_{f_1} \mu_1(H_1(t) - L(t))^{3/2}, \quad (11)$$

où k_{f_1} est également un coefficient de calage. Les coefficients de calage peuvent être obtenus selon (Feller, 1971).

En considérant les ensembles \mathcal{Q} , \mathcal{E} et \mathcal{F} , il est possible de spécifier les conditions d'évolution de la manière suivante : $(O_{cr}^S, e_7) = O_{cr}^F \equiv Q_{OF}(t)$.

A partir de ce modèle hybride, des niveaux et de l'ouverture de la vanne mesurés, les volumes d'eau contrôlés provenant de la vanne Porte de Garde, *i.e.* $V_3^c(t)$, sont calculés et représentés, avec un pas de temps journalier, sur la figure 10.c. Les volumes d'eau au niveau de l'écluse et de la vanne de Fort Gassion ne sont pas considérés car durant l'année 2010, elles n'étaient qu'à de très rares occasions manoeuvrées.

Finalement, les volumes non contrôlés $V_3^u(t)$ sont estimés en fonction de la mesure des niveaux durant les périodes de nuit durant l'année 2010 (Horvath, Duviella *et al.*, 2014), puis projetés sur la période de jour sous l'hypothèse que les apports et prélèvements non contrôlés sont sensiblement les mêmes durant la journée. Un volume d'eau moyen journalier est ainsi déterminé et représenté sur la figure 10.d. Finalement, les échanges avec les eaux souterraines ne sont pas pris en compte pour le NR_3 .

Ainsi, à partir des volumes contrôlés et non contrôlés qui ont été précédemment déterminés, il est possible de calculer le volume journalier du NR_3 . Afin d'obtenir une information sur le niveau journalier du NR_3 , noté $L_{NR_3}^{\hat{D}}$, un profil moyen du NR_3 est considéré. Le niveau journalier du NR_3 est représenté sur la figure 11a en trait rouge discontinu. Ce niveau est ensuite comparé au niveau journalier correspondant à la moyenne journalière des mesures de niveau du NR_3 , notée $L_{NR_3}^D$ et représentée sur la figure 11a en trait bleu continu. L'erreur moyenne de niveau sur l'année 2010 est de -0.01 m, avec un maximum correspondant à -0.19 m. Cette erreur maximale correspond à un pic à l'échantillon 270. Finalement, l'erreur entre $L_{NR_3}^D$ et $L_{NR_3}^{\hat{D}}$ est utilisée pour calculer l'erreur sur l'estimation des volumes d'eau non contrôlés. Cette erreur est représentée sur la figure 11b en trait rouge discontinu. L'erreur moyenne de volume sur l'année 2010 correspond à environ une bassinée à Fontinettes, soit $26\,000$ m³. A partir de ces résultats, il est donc possible de conclure que la méthodologie d'estimation des volumes contrôlés et non contrôlés conduit à un modèle fiable du comportement du bief NR_3 en période de fonctionnement normale.

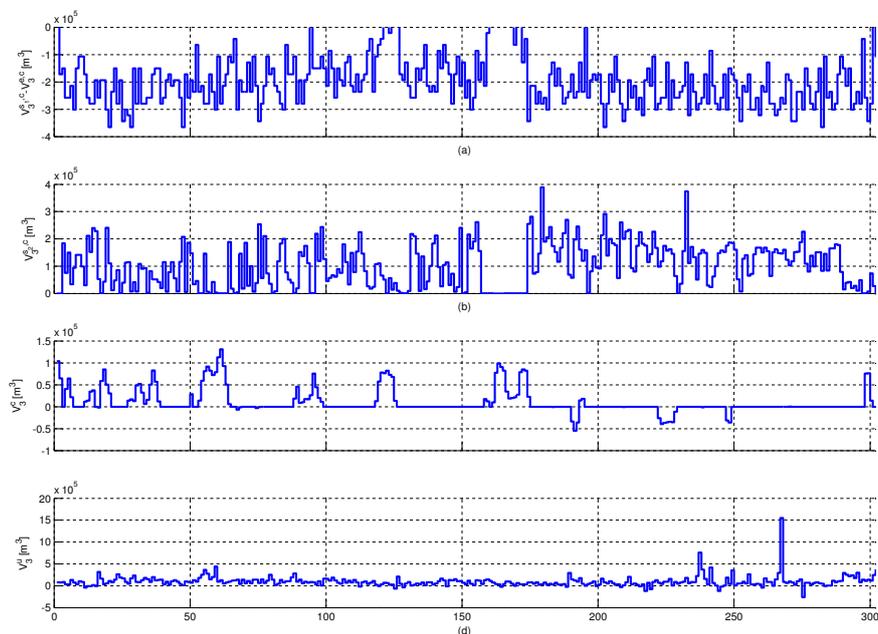


Figure 10. Volumes d'eau contrôlés provenant de l'activation (a) des écluses, (b) de la vanne de Cunchy, (c) de la Porte de Garde et (d) les volumes d'eau non contrôlés pour l'année 2010

4.2. Simulation d'un scénario d'étiage

Afin de construire un scénario d'étiage, les données issues du projet Explore2070 sont utilisées. Une cartographie de la région Nord-Pas de Calais est disponible en ligne sur internet ⁴. Cette cartographie interactive est représentée sur la figure 12.

Il suffit de sélectionner les sites en amont du réseau de voies navigables étudié afin de disposer des prédictions de pourcentage de baisse des débits à horizon 2050–2070. En considérant le bief NR_3 , les prévisions disponibles sur le débit de la rivière Laquette à Witternes, et de la Lys à Delettes correspondent respectivement à un pourcentage de baisse de 29 % et 23 %. Il s'agit de deux rivières qui se situent approximativement au centre du NR_3 et qui peuvent réalimenter le bief par l'intermédiaire de la Porte de Garde.

Le scénario permettant d'étudier la résilience du NR_3 consiste alors à diminuer de 25 % les volumes d'eau provenant de l'apport des rivières naturelles au niveau de la Porte de Garde sans toutefois diminuer les volumes non contrôlés

4. <http://www.eau-artois-picardie.fr/Resultats-de-l-etude-Explore-2070.html>

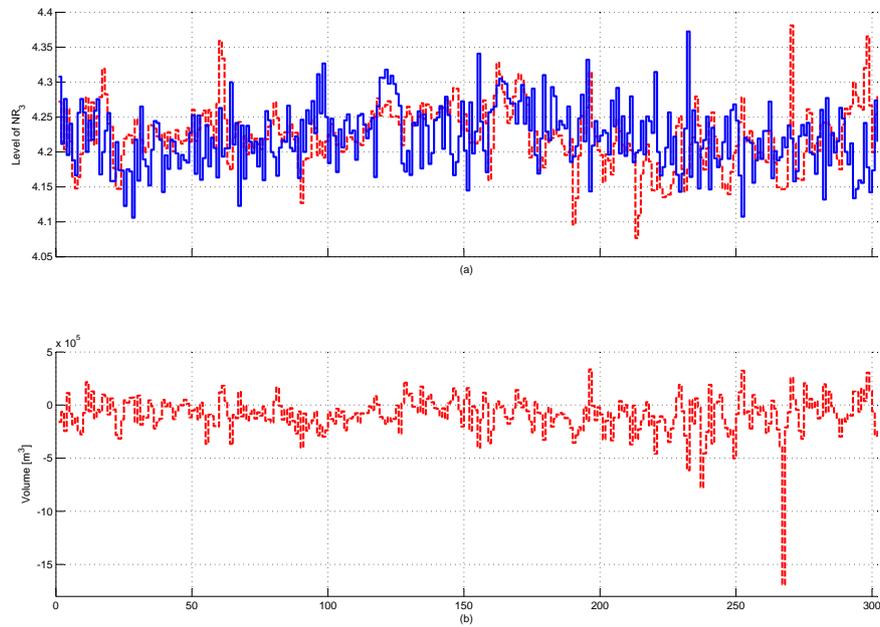


Figure 11. (a) Niveau moyen du NR₃ pour l'année 2010 : $L^D_{NR_3}$ en trait rouge discontinu, $L^D_{NR_3}$ en trait bleu continu, (b) erreur sur le volume du NR₃ correspondante



Figure 12. Cartographie interactive de 45 sites du bassin Artois-Picardie sur lesquels les modèles d'Explore2070 ont été appliqués

pouvant provenir du déversement d'autres rivières naturelles. Comme l'étude est focalisée sur le bief NR_3 , les volumes d'eau contrôlés provenant de l'amont du réseau ne sont pas impactés par une baisse dans ce scénario ; ce qui serait certainement le cas en considérant les sources d'alimentation de l'ensemble du réseau. Le niveau d'eau du NR_3 en situation normale provenant du modèle, *i.e.* $L_{NR_3}^{\hat{D}}$, est représenté sur la figure 13 en trait bleu continu. Sur cette figure sont également indiquées la profondeur d'eau correspondant au NNN (4,26 m) ainsi que les profondeurs correspondant aux NHN et NBN. Le niveau d'eau du NR_3 en période simulée d'étiage provenant du modèle, *i.e.* $L_{NR_3}^{\hat{P}}$, est représenté sur la figure 13 en trait rouge discontinu.

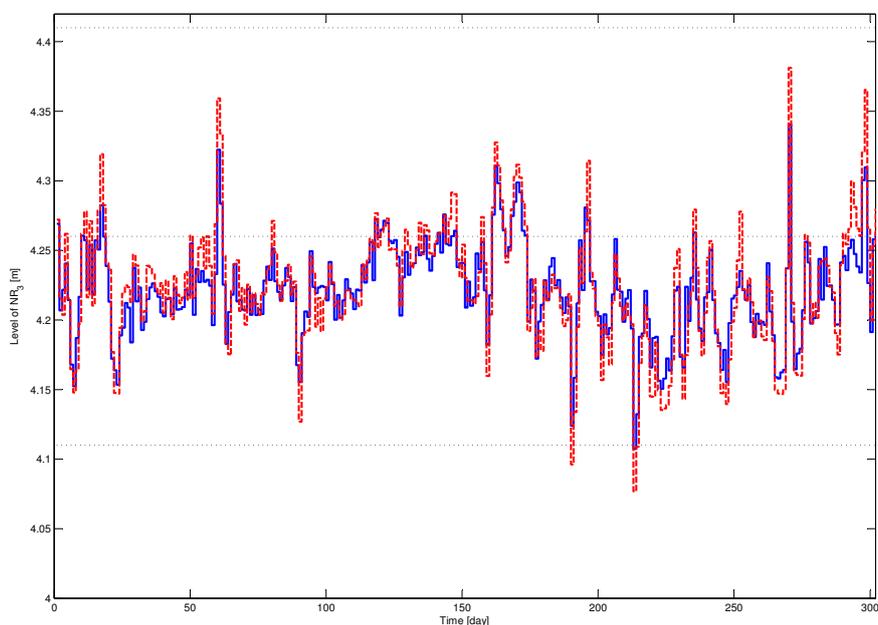


Figure 13. $L_{NR_3}^{\hat{D}}$ en trait rouge discontinu et $L_{NR_3}^{\hat{P}}$ en trait bleu continu du bief NR_3 avec un scénario correspondant à une baisse de 25 % de l'eau provenant des rivières naturelles contrôlées, avec la représentation des seuils NNN, NBN et NHN

Le scénario d'étiage proposé est conforme aux prévisions du modèle du projet Explore2070, mais reste très minimaliste dans le sens où les apports d'eau non contrôlés et les apports d'eau contrôlés provenant de l'amont du bief NR_3 devraient être bien entendu aussi impactés par une diminution. Bien que très optimiste, la simulation de ce scénario montre que si les apports d'eau provenant des rivières naturelles diminuent de 25 %, la navigation n'aurait pas été autorisée pendant deux jours durant l'année 2010.

Les résultats de simulation obtenus sont cependant à considérer avec précaution, en particulier les deux jours durant lesquels la navigation n'aurait pas été autorisée. En effet, l'expertise des gestionnaires des voies navigables leur aurait permis d'adapter la conduite du réseau afin de garantir les conditions de navigation. Ces résultats indiquent cependant qu'une baisse de la ressource en eau disponible conduira à des contraintes plus importantes lors de la gestion des voies navigables en période d'étiage.

5. Conclusion et perspectives

Dans cet article, une démarche pour la conception de scénarios de périodes d'étiage et pour l'étude de la résilience des réseaux de voies navigables est présentée. Elle s'appuie sur la conception d'un modèle intégré de réseaux de voies navigables qui permet la modélisation par un bilan volumique journalier de leur dynamique. Une méthodologie permettant d'estimer les contributions volumiques contrôlées et non contrôlées, c'est-à-dire provenant de la commande d'un ouvrage et d'un rejet non connu, est également décrite. L'ensemble de ces contributions est illustré dans le cadre du réseau de voies navigables du nord de la France, en se focalisant sur le bief Cunchy-Fontinettes. Bien que très optimiste, le scénario d'étiage conçu conduit à des périodes durant lesquelles la navigation n'aurait pas été autorisée durant l'année 2010. Une perspective immédiate est l'utilisation de l'ensemble des méthodologies proposées en considérant une plus grande partie du réseau de voies navigables du nord de la France. L'ensemble de ce travail servira à l'évaluation des performances d'une architecture de conduite adaptative des voies navigables dans un contexte de changement climatique. Cette architecture met en œuvre une approche de gestion multicouche conduisant à une répartition harmonieuse des volumes d'eau sur l'ensemble des réseaux de voies navigables puis à une régulation du niveau de chaque bief. Elle vise à l'amélioration de la résilience des voies navigables face aux effets du changement climatique en tenant compte des incertitudes liées à leur prévision, mais également face à une augmentation de la demande de navigation.

Remerciements

Ce travail est une contribution au projet GEPET'Eau financé dans le cadre du programme GICC du MEDDE, avec la participation de l'ORNERC et de la DGITM. <https://gepeteau.wordpress.com/>

Bibliographie

- Arkell B., Darch G. (2006). Impact of climate change on london's transport network. *Proceedings of the ICE - Municipal Engineer*, vol. 159, p. 231-237.
- Associates I. W., House C., Lane S., Beckwithshaw, HARROGATE, HG3 *et al.* (2008). Report for the inland waterways advisory council information and com-

- munication technology for the uk's inland waterways. *Technical report, July*.
- Bates B., Kundzewicz Z., Wu S., Palutikof J. (2008). Climate change and water. *Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva*.
- Baume J.-P., Malaterre P.-O., Vion P.-Y. (2003). Simulation of irrigation canals. *Theoretical Concepts Modeling Approach*, vol. II.
- Boé J., Terray L., Martin E., Habetsi F. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in french river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, vol. 45.
- Bos M. (1976). Discharge measurement structures. *Publication (International Institute for Land Reclamation and Improvement)*.
- Brand C., Tran M., Anable J. (2012). The uk transport carbon model: An integrated life cycle approach to explore low carbon futures. *Energy Policy*, vol. 41, p. 107-124.
- Bugarski V., Backalic T., Kuzmanov U. (2013). Fuzzy decision support system for ship lock control. *Expert Systems with Applications*, vol. 40, p. 3953-3960.
- Ducharne A., Habets F., Pagé C., Sauquet E., Viennot P., Déqué M. *et al.* (2010). Climate change impacts on water resources and hydrological extremes in northern france. *XVIII Conference on Computational Methods in Water Resources, June, Barcelona, Spain*.
- EnviCom. (2008). Climate change and navigation - waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation. *EnviCom - Task Group 3*.
- Feller W. (1971). An introduction to probability theory and its applications. *Wiley series in probability and mathematical statistics: Probability and mathematical statistics*.
- Frigo A. L., Bleninger T. B. (2015). A review of the navigability modeling for inland waterways. *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June - 3 July, The Hague, the Netherlands*.
- Hao Z., Singh V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, vol. 527, p. 668-678.
- Horvath K., Duviella E., Rajaoarisoa L., Chuquet K. (2014). Modelling of a navigation reach with unknown inputs: the cuinchy-fontinettes case study. *Simhydro, Sofia Antipolis, 11-13 June*.
- Horvath K., Petrecsky M., Rajaoarisoa L., Duviella E., Chuquet K. (2014). Mpc of water level in a navigation canal - the cuinchy-fontinettes case study. *European Control Conference, Strasbourg, France, June 24-27*.
- IPCC. (2014). Climate change 2014. *The Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. Meyer, Synthesis Report, https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf*.
- IWAC. (2009). Climate change mitigation and adaptation. implications for inland waterways in england and wales.

- LePocher O., Duviella E., Bako L., Chuquet K. (2012). Sensor fault detection of a real undershot/overshot gate based on physical and nonlinear black-box models. *Safeprocess'12, Mexico, Mexico, 29-31 August*.
- Lerat J. (2009). Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques? vers un modèle intégré de simulation des crues. *PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie/Cemagref*.
- Li Y., Huang H., Ju H., Lin E., Xiong W., Han X. *et al.* (2015). Assessing vulnerability and adaptive capacity to potential drought for winter-wheat under the rcp 8.5 scenario in the huang-huai-hai plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Malaterre P. O., Chateau C. (2007). Scada interface of the sic software for easy real time application of advanced regulation algorithms. *second Conference on SCADA and Related Technologies for Irrigation System Modernization - A USCID Water Management Conference, Denver, Colorado, June 6-9*.
- Mallidis I., Dekker R., Vlachos D. (2012). The impact of greening on supply chain design and cost: a case for a developing region. *Journal of Transport Geography*, vol. 22, p. 118-128.
- Mihic S., Golusin M., Mihajlovic M. (1993). Policy and promotion of sustainable inland waterway transport in europe - danube river. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 1801-1809.
- Munier S. (2009). Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé. *PhD thesis, AgroParisTech/Cemagref*.
- Park C.-K., Byun H.-R., Deo R., Lee B.-R. (2015). Drought prediction till 2100 under {RCP} 8.5 climate change scenarios for korea. *Journal of Hydrology*, vol. 526, p. 221-230.
- Payan J. (2007). Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. *PhD thesis, AgroParisTech/Cemagref*.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *PhD thesis, INPG/Cemagref*.
- Sepúlveda C., Gómez M., Rodellar J. (2009). Benchmark of discharge calibration methods for submerged sluice gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 135, p. 676-682.
- Wanders N., Wada Y. (2015). Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, vol. 526, p. 208-220.
- Wang S., Kang S., Zhang L., Li F. (2007). Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the zamu river basin of northwest china. *Hydrological Processes*, vol. 22, p. 2502-2510.

