Rapport final du projet GEPET-Eau

Mai 2016

Titre du projet : Gestion Efficiente Prédictive ET adaptative de la ressource en Eau des voies navigables dans un contexte de changement climatique

Acronyme : GEPET-Eau

Mots-clés : Gestion prédictive et adaptative, Changement climatique, Voies navigables, Vulnérabilité, Résilience

Responsable/Coordinateur scientifique :

Eric Duviella
Enseignant-Chercheur
Centre commun Armines – Ecole des Mines de Douai (MD)
Département Informatique et Automatique
Unité de Recherche en Informatique et Automatique (URIA)
941, Rue Charles Bourseul, BP 10838
59508 Douai Cedex
Tel : +33 327 712 102, Fax +33 327 712 980
eric.duviella@mines-douai.fr

Organisme(s) / Laboratoire(s) impliqué(s) dans le projet :

URIA – Centre commun Armines – MD
Contact : Eric Duviella, eric.duviella@mines-douai.fr, +33 327 712 102
Département Informatique et Automatique
941, Rue Charles Bourseul, BP 10838
59508 Douai Cedex

VNF 59/62. Direction régionale de Voies Navigables de France
Contact : Karine Chuquet, karine.chuquet@developpement-durable.gouv.fr,
+33 320 005 051
37 rue du Plat BP 725
59034 Lille Cedex

IRSTEA LYON (partenaire associé)
Contact : Eric Sauquet, eric.sauquet@irstea.fr, +33 472 208 913
UR HHLY
3 bis quai Chauveau – CP 220
F-69336 Lyon, France

DREAL Nord-Pas de Calais (partenaire associé)
Contact : Nathalie Gaffet, Nathalie.Gaffet@developpement-durable.gouv.fr,
+33 320 405 554
Division risques naturels, hydrauliques et miniers - Chef prévision crues
44, rue de Tournai
59019 Lille Cedex

Agence de l'eau Artois Picardie (Partenaire associé)
Contact : Florent Guibert, f.guibert@eau-artois-picardie.fr, 03 27 99 83 38
200 rue Marceline
BP 80818
59508 Douai Cedex

SAC – Université Polytechnique de Catalogne (UPC) (partenaire associé)
Contact : Vicenç Puig, Vicenc.Puig@upc.edu, +34 93739862
Jordi Girona, 31
08034 Barcelone, Espagne

- Organisme gestionnaire des crédits
ARMINES – Centre de Douai ; France ; URIA
Contact : Philippe Perceval, philippe.perceval@ensmp.fr, +33 140 519 477
60, Boulevard Saint Michel
75272 Paris Cedex 6

Remerciements

Le projet GEPET-Eau a permis de définir un cadre pour les collaborations de travail qui ont été créées entre gestionnaires, institutions et laboratoires de recherche depuis quelques années. Nous tenons à remercier le programme GICC et son Conseil Scientifique, le Ministère MEDDE, l'ADEME et l'ONERC, ainsi que la DGITM, la DGEC et le CGDD pour leur confiance et l'attribution du financement de ce projet dans le cadre de l'APR 2012.

Nous tenons à remercier les partenaires associés au projet en particulier Karine Chuquet de VNF, Nathalie Gaffet de la Dreal Nord-Pas de Calais, Florent Guibert de l'Agence de l'eau Artois Picardie, Eric Sauquet de l'IRSTEA de Lyon, Vicenç Puig et Joaquim Blesa de Université Polytechnique de Catalogne. Ils se sont impliqués dans le projet et ont apporté des contributions significatives.

Klaudia Horvàth et Houda Nouasse ont apporté une force de travail importante lors de leur PostDoc. Un travail d'équipe performant s'est articulé autour de ces deux personnes avec l'investissement des enseignants-chercheurs et des ingénieurs du département Informatique et Automatique de l'Ecole des Mines de Douai. La thématique de recherche sur l'impact du changement climatique sur les réseaux de voies navigables a suscité un intérêt certain auprès de ces différentes personnes. Les activités de recherche du projet GEPET-Eau ont également bénéficié du travail des élèves ingénieurs de l'Ecole des Mines de Douai.

Résumé

Le projet GEPET-Eau contribue à répondre de façon innovante aux objectifs du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, par la conception d'outils d'étude de la résilience ainsi que la proposition de stratégies de gestion prédictives et adaptatives des Voies Navigables. Il existe en effet peu de travaux dédiés à l'étude de l'impact du changement climatique sur les voies navigables. Le projet présente également l'intérêt d'être articulé autour d'un consortium composé de gestionnaires, d'institutions et de laboratoires de recherche. Ainsi, les contributions scientifiques et techniques ont été construites en considérant des problématiques provenant des systèmes réels. La conception des méthodes et des outils qui a été réalisée en préservant leur propriété générique offre un potentiel notable d'implémentation sur les systèmes réels.

Un travail bibliographique sur les nombreuses études liées aux impacts du changement climatique a été réalisé. Il est très vite apparu que les modèles hydrologiques issus des projections climatiques n'offraient que peu de possibilités d'application directe pour la gestion des voies navigables. Les deux principales raisons résident dans le fait que d'une part il est difficile de transposer directement les conclusions de ces études aux réseaux de voies navigables, et d'autre part il est indispensable d'avoir une connaissance très fine des composants, du comportement et de la dynamique des réseaux de voies navigables. Parmi l'ensemble de ces projets, les résultats du projet national Explore2070 présentent l'intérêt de mettre à disposition l'évolution des débits pour la période 2046-2065 à l'aide d'une cartographique des cours d'eau du bassin Artois-Picardie.

Le travail bibliographique s'est ensuite focalisé sur un projet européen traitant de l'impact du changement climatique sur les réseaux de voies navigables. Bien que les résultats de ce projet soient très riches et particulièrement intéressants, les études se sont davantage concentrées sur les rivières navigables en concluant très rapidement que les réseaux de navigations équipés principalement d'écluses ne seraient pas impactés car la gestion de l'eau est assurée par le contrôle des ouvrages. Cette conclusion parait hâtive en particulier lorsque les marges de gestion des réseaux de voies navigables sont très étroites.

L'amélioration de la connaissance du réseau des voies navigables du Nord Pas de Calais a été réalisée par VNF. Des schémas du système alimentaire du réseau des voies navigables du Nord Pas de Calais indiquant les affluents et les prises d'eau principales, la taille des bassins versants associés à chacun d'eux, ainsi que les débits moyens et les débits d'étiage ont été élaborés par VNF. De plus, de nombreux dossiers d'ouvrages regroupant des informations détaillées par tronçons du réseau ont été construits. Finalement, certaines parties du réseau ont été équipés de point de mesure permettant de constituer une base de données qui par la suite peut être utilisée afin de comprendre et caractériser leurs dynamiques. Ce travail très conséquent est indispensable à l'étude de l'impact du changement climatique sur les voies navigables. En effet, il ne semble pas difficile de présager que le changement climatique aura des effets sur les voies navigables, mais les quantifier requiert obligatoirement une bonne connaissance de leur fonctionnement en période de gestion normale.

A partir de la connaissance du réseau des voies navigables et de la spécification des challenges liés à leur gestion en périodes anormales qui pourront être accrues dans un contexte de changement climatique, des contributions scientifiques ont été proposées. Elles peuvent être définies comme des stratégies de gestion ayant pour objectif principal de garantir les conditions de navigabilité permettant un accroissement de l'utilisation des réseaux de navigation comme alternative au transport terrestre, tout en améliorant l'efficience de la gestion de la ressource en eau. Ces stratégies sont adaptatives et prédictives puisqu'elles sont conçues pour garantir les conditions de navigabilité en particulier en périodes anormales. Une architecture de conduite intégrant ces stratégies de gestion de la ressource en eau des voies navigables dans un contexte de changement climatique a été proposée. Elle est composée de plusieurs modules qui ont été développés, mais s'articule principalement autour de deux modes de gestion : la gestion des volumes et la gestion de débits. La différenciation des modes de gestion se justifie par la nécessité de reproduire la dynamique des voies navigables en considérant deux échelles spatio-temporelles différentes. La première (*i.e.* la gestion des volumes) est *a priori* plus adaptée à l'étude des périodes d'étiage, à l'étude de la résilience des réseaux de voies navigables dans un contexte de changement climatique, et à l'élaboration de stratégies de répartition de la ressource en eau sur l'ensemble du réseau. La seconde (*i.e.* la gestion des débits) est dédiée au maintien des objectifs de gestion, c'est-à-dire la gestion des niveaux de chaque bief, grâce à l'élaboration de techniques de régulation, à l'étude des phénomènes ayant des dynamiques plus importantes telles que les phénomènes de montée des eaux. L'articulation entre ces deux niveaux de gestion est réalisée grâce à l'architecture de conduite des voies navigables.

Les outils développés pour la gestion des volumes sont basés sur un modèle intégré de réseaux de voies navigables, sur des graphes de transport et sur des méthodes d'optimisation quadratiques ou d'optimisation sous contraintes. Une méthodologie a été élaborée afin d'autoriser l'emploi séquentiel de ses outils. Ils ont d'ailleurs été intégrés dans une application offrant une interface utilisateur permettant la conception de réseaux de voies navigables, l'étude de la résilience de ces réseaux et enfin l'optimisation de stratégies de répartition de la ressource en eau. La notion de résilience a également été définie. Plusieurs tests sur des réseaux académiques et sur un sous-réseau des voies navigables du Nord Pas de Calais ont été réalisés. Ils démontrent l'intérêt des outils développés.

La gestion de débit a nécessité tout d'abord la conception d'approches de modélisation permettant de reproduire la dynamique des biefs de voies navigables en tenant compte de leurs spécificités ; systèmes de grandes dimensions, sans pente, caractérisés par des phénomènes de résonance… Des approches classiques de la littérature et un modèle de type boîte-grise (seuls quelques paramètres sont supposés connus *a priori*) ont été adaptées ou développées. Un logiciel de simulation des systèmes hydrauliques à surface libre développé par l'IRSTEA a également été utilisé. Ces approches de modélisation ont été comparées avec les résultats du logiciel de simulation en considérant le bief Cuinchy-Fontinette (CFr) situé dans la région Nord-Pas de Calais. Par la suite, des techniques de régulation de type prédictive (MPC) ou optimal (LQR) ont été développées et testées. Les résultats de simulation obtenus permettent de constater que ces techniques conduisent à une amélioration de la régulation des niveaux dans le bief CFr.

Le projet GEPET-Eau s'est articulé autour de 6 tâches réparties sur une durée de 3,5 ans. Il a permis un rapprochement notable entre le service de gestion hydraulique de VNF et l'URIA de l'Ecole des Mines de Douai. Le travail réalisé a bénéficié du concours d'enseignants-chercheurs et ingénieurs de recherche avec l'appui complémentaire de deux Post-Doctorantes sur une durée de 12 mois chacune, ainsi que de l'expertise des gestionnaires. L'activité réalisée autour du projet GEPET-Eau a conduit à une reconnaissance au niveau régional qui se traduit notamment par une participation à la démarche Cercle, au niveau national et européen grâce au développement de collaborations entre laboratoires de recherche, et au niveau international par la publication de plusieurs communications et articles scientifiques.

Résultats liés aux axes « Approche intégrée » et « Approche territoriale »

Le projet GEPET-Eau, financé dans le cadre du programme GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) - APR2012, s'articule autour des deux axes « Approche intégrée » et « Approche territoriale » détaillés dans l'Appel à Projet.

- ***Approche intégrée*** : *Explorer de nouvelles méthodologies et de nouveaux outils utiles aux stratégies et actions d'adaptation en s'appuyant sur les modèles et scénarios de l'AR5 au fur et à mesure de leur disponibilité*.

  La réponse à la problématique de l'impact du changement climatique sur la gestion des voies navigables a nécessité la conception de nouvelles méthodologies et de nouveaux outils. Une méthodologie a été mise en œuvre par VNF afin de constituer des dossiers d'ouvrages et ainsi améliorer la connaissance du réseau de voies navigables du Nord Pas de Calais. VNF a également proposé une cartographie répertoriant l'ensemble des biefs, des affluents et des prises d'eau, ainsi que la taille des bassins versants associés à chacun d'eux. Cette cartographie a permis de spécifier les débits liés à une situation normale ainsi que ceux liés à des périodes d'étiage. La proposition de ces méthodologies, la réalisation des dossiers d'ouvrages et des cartographies a constitué une base indispensable à l'étude de l'impact du changement climatique. Ces informations sont en effet requises afin d'alimenter en données les outils développés.

  Afin de concevoir des stratégies d'adaptation au changement climatique, une architecture de conduite pour la gestion de la ressource en eau des voies navigables dans un contexte de changement climatique a été conçue. Elle intègre des stratégies de gestion prédictives et adaptatives. Elle s'articule autour de deux modes de gestion dédiés à des échelles spatio-temporelles différentes, le premier permettant de considérer l'ensemble d'un réseau de voies navigables à des pas de temps de plusieurs heures, et le second plus particulièrement à un bief de navigation à des pas de temps de l'ordre de la minute. Les outils développés pour la gestion des volumes sont basés sur un modèle intégré de réseaux de voies navigables, sur des graphes de transport et sur des méthodes d'optimisation quadratiques ou d'optimisation sous contraintes. Ils permettent l'étude de la résilience de réseaux de voies navigables et l'optimisation de la répartition de la ressource en eau selon des critères définis. Une première version d'un logiciel a ainsi été créée afin de faciliter l'utilisation de ces outils.

  Des approches de modélisation ont été adaptées et conçues pour répondre au besoin de reproduire la dynamique des biefs de voies navigables en tenant compte de leurs spécificités. La dynamique des biefs de voies navigables est en effet très complexe à modéliser. Ces modèles ont ensuite été utilisés afin de concevoir des techniques de régulation innovantes. L'objectif de la régulation des biefs de voies navigables consiste à conserver les niveaux proches de leur objectif de gestion en réduisant les effets des bassinées. Ces modèles ont également été utilisés pour concevoir des techniques de détection de défauts capteurs. Ces outils ont été conçus, mis en œuvre et

testés par simulation en considérant le bief Cuinchy-Fontinette (CFr) situé dans la région Nord-Pas de Calais.

Des données issues principalement du projet Explore2070 ont été utilisées afin de quantifier les effets du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau sur le réseau de voies navigables du Nord Pas de Calais. Ainsi l'étude de la résilience de sous-réseaux a été réalisée en tenant compte de ces données.

- ***Approche territoriale***: *Privilégier la co-construction chercheurs-décideurs et le transfert vers les acteurs*

Le projet GEPET-Eau s'inscrit dans la continuité de la collaboration de travail entre l'URIA, VNF initiée dès 2009, à laquelle se sont associés la DREAL Nord-Pas de Calais, l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et l'IRSTEA, et dans le renforcement des activités de recherche conjointes entre l'URIA et l'UPC. Ce travail collaboratif entre gestionnaires et laboratoires de recherche tient tout son intérêt de par la veille scientifique, les avancées significatives sur des techniques novatrices de modélisation, de conduite et de gestion, et leur adaptation à des problématiques concrètes de gestion des voies navigables et de la ressource en eau, tout en bénéficiant de l'approche métier des gestionnaires. L'ensemble des résultats scientifiques valorisés dans le cadre de conférences ou de journaux scientifiques est cosigné par au moins l'URIA et VNF. Par ailleurs, les problématiques du projet GEPET-Eau permettent de proposer chaque année des sujets de projet aux élèves en dernière année de l'Ecole des Mines de Douai. Ces projets à vocations scientifique et technique répondent nécessairement à un objectif d'un partenaire extérieur à l'Ecole d'Ingénieurs, *i.e.* VNF dans le cas présent. Le travail réalisé dans le cadre de certains de ces projets a conduit à des rapports de travail qui ont été diffusés au sein des services de VNF. Cette synergie entre chercheurs et gestionnaires constitue un intérêt certain qu'il s'agit de conserver et de continuellement renforcer. Les avancées scientifiques et techniques qui sont produites par les laboratoires de recherche sont ainsi confrontées à une réalité de terrain et les problématiques identifiées par les gestionnaires peuvent être solutionnées à partir de ces contributions scientifiques.

Indicateurs de réussite

Lors de l'acceptation du projet GEPET-Eau, plusieurs indicateurs de réussite avaient été proposés. Ils sont repris ci-dessous :

- Sensibilisation d'étudiants aux enjeux environnementaux de demain, par leur implication possible dans des projets d'élèves.
    - Depuis le début du projet GEPET-Eau, quatre projets d'étudiants ont été réalisés. Un premier (PST – Projet Scientifique et Technique) d'une durée de 6 mois, et trois autres (PDR – Projet de Découverte de la Recherche) d'une durée de 3 mois. Ces projets intéressent généralement les étudiants ingénieurs et permettent de leur faire découvrir des problématiques environnementales auxquelles les sciences et techniques de l'ingénieur peuvent apporter une réponse.
    - Le travail réalisé dans le cadre de ce projet a particulièrement intéressé deux étudiants et a conduit à l'obtention de deux financements de thèses sur la gestion sous incertitudes de réseaux de voies navigables (Thèse débutée en octobre 2015) et sur la commande tolérante aux défauts de réseaux de voies navigables (Thèse débutée en décembre 2015).
- Application des travaux de recherche théoriques menés par les personnels de recherche (post-doctorants, permanents)
    - Plusieurs contributions scientifiques de pointe dans le domaine de l'Automatique, en particulier sur les approches de modélisation et de contrôle, ont pu être adaptées, conçues et appliquées sur les problématiques de gestion des voies navigables, en particulier la gestion des débits. Ces dernières peuvent être classées dans la catégorie des systèmes dynamiques évolutifs à grande échelle caractérisés par des non linéarités et à retards variables. Ces contributions scientifiques appliquées à la problématique des voies navigables ont conduit à plusieurs publications scientifiques.
    - D'autres méthodologies associées au domaine de l'Intelligence Artificielle ont également été développées et appliquées à la problématique de gestion des voies navigables, en particulier la gestion des volumes. De manière semblable, ces travaux ont été valorisés dans le cadre de publications scientifiques.
- Contribution à la communauté scientifique : publication d'articles en revues et conférences internationales
    - Le très bon bilan du projet GEPET-Eau en termes de publications scientifiques démontre la reconnaissance par la communauté scientifique de la valeur du travail réalisé à la fois dans le domaine de l'Automatique, de l'Informatique appliqué à l'Hydraulique.
- Augmentation de la connaissance : sur la modélisation et la conduite de systèmes environnementaux complexes.
    - Un important travail a été réalisé par VNF afin de mieux connaître le comportement et la dynamique du réseau de voies navigables du Nord Pas de calais en identifiant leurs caractéristiques (taille, équipements,…), leurs

interactions, et les liens entre le réseau et les bassins versants. Plusieurs dossiers d'ouvrage ont ainsi été construits par VNF.

- La connaissance et l'expertise des partenaires du projet ont également été accrues grâce à la confrontation à de nouvelles problématiques complexes, en termes de modélisation d'ouvrages, de contrôle et de conduite de ces systèmes.
- Un travail bibliographique a été réalisé afin d'identifier les projets ainsi que les méthodologies qui ont porté sur l'étude de l'impact du changement climatique sur les voies navigables.

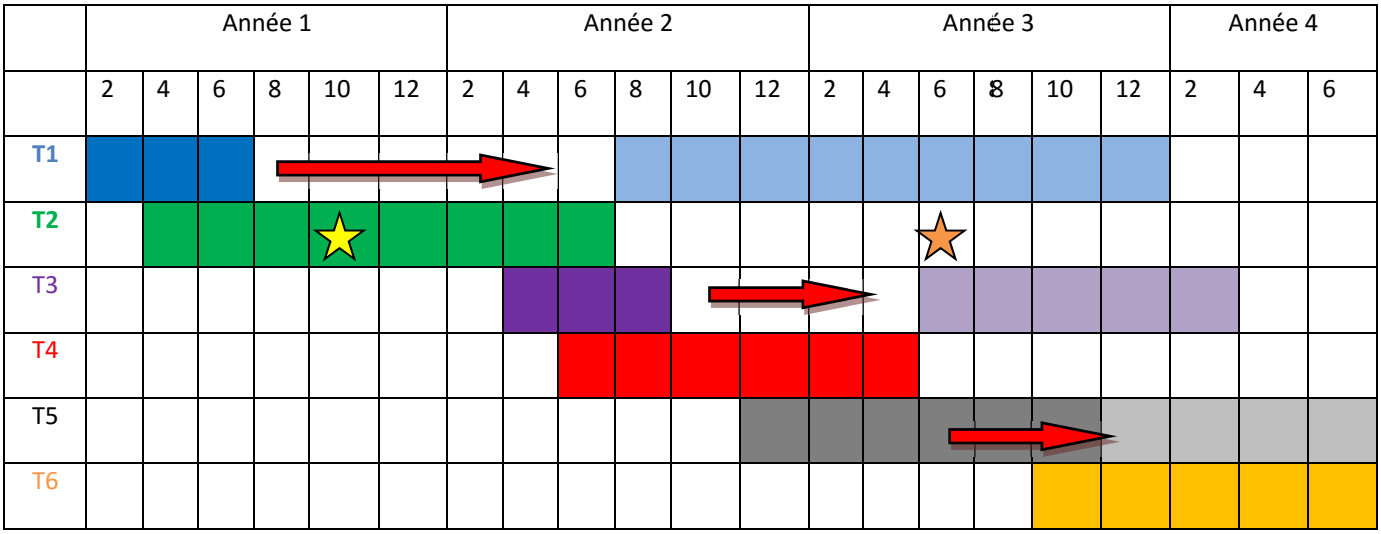
- Valorisation d'un travail de recherche en partenariat avec un gestionnaire
  - Une collaboration de travail efficace s'est mise en place principalement entre l'URIA et VNF. Celle-ci a permis de proposer des contributions scientifiques innovantes en veillant à répondre au mieux aux problématiques réelles du gestionnaire.
  - L'ensemble des publications, ainsi que la participation à des conférences ont été réalisés conjointement.
  - Ce travail partenarial a conduit à une reconnaissance dans le cadre de la démarche CERCLE de la Région Nord Pas de Calais. Nous avons participé aux deux journées CERCLE avec notamment une présentation des activités de GEPET-Eau.
- Valorisation d'un savoir-faire et d'une expérience auprès d'Universités et gestionnaires européens
  - Le savoir-faire des partenaires du projet est reconnu par d'autres Universités en France et en Europe, en particulier l'UPC, TU Delft, l'Université de Séville, le LGP – ENI Tarbes, le LCIS de l'Université de Grenoble, etc. Cette reconnaissance est soulignée par l'invitation à participer à des ouvrages, l'invitation à participer à des sessions invitées lors de conférences internationales, l'organisation de sessions invitées sur les thématiques de la modélisation et de la gestion des systèmes hydrauliques, ainsi que des séjours de travail dans des Universités Européennes (échange de chercheurs avec l'UPC – 1 mois).

Récapitulatifs des personnels impliqués

Partenaire	Personnel		WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6
ARMINES-IA	*E. Duviella*	*Chercheur*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*
ARMINES-IA	*K. Horvath*	*Post Doc*	*X*	*X*	*X*			
ARMINES-IA	*H. Nouasse*	*Post Doc*			*X*	*X*	*X*	*X*
ARMINES-IA	*L. Rajaoarisoa*	*Ing. Rech.*		*X*		*X*		
ARMINES-IA	*A. Doniec*	*Chercheur*				*X*	*X*	
ARMINES-IA	*F. Tempet*	*Ing. Dev.*					*X*	
VNF	*K. Chuquet*	*Chef de Cellule*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*
IRSTEA	*E. Sauquet*	*Chercheur*	*X*		*X*			
UPC	*J. Blesa*	*Chercheur*		*X*				
DREAL	*N. Gaffet*	*Chef de Service*			*X*			

Tableau d'avancement des différentes tâches

Le calendrier du projet reprenant les 6 tâches (WP) à accomplir, et qui a été fourni lors de l'acceptation du projet est repris ci-dessous, avec comme date de démarrage le 1 Janvier 2013 :



Recrutement de Klaudia Horvàth en Post-Doc à partir du 1er Juillet 2013 (1 an).

Recrutement de Houda Nouasse en Post-Doc à partir du 4 Mai 2015 (1 an).

La tâche T1 a été prolongée sur l'ensemble de la durée de projet puisque le travail bibliographique sur les études liées au changement climatique et la possibilité de les appliquer pour la gestion des voies navigables s'est avéré nécessaire. L'avancement des tâches T2 et T4 a bénéficié de la présence de Klaudia Horvàth sur une durée d'une année. Le recrutement d'un deuxième PostDoc a été compliqué et n'a pas pu être réalisé à la suite du départ de Klaudia Horvàth. Pour ces raisons, la réalisation des tâches T3, T5 et T6 ont dues être repoussées. Leur réalisation a été réalisée avec la contribution de Houda Nouasse qui a réalisé un PostDoc d'un an au sein de l'URIA. Le retard par rapport au prévisionnel est lié principalement à la difficulté de recrutement d'un bon candidat avec un profil adapté.

Bilan financier

Le budget prévisionnel au démarrage du projet GEPET-Eau a été respecté. Le budget pour l'achat de matériel et pour les missions dans le cadre du projet GEPET-Eau ont permis l'achat de PC portables pour Klaudia Horvàth et Houda Nouasse durant leur PostDoc, la valorisation des résultats scientifiques du projet dans le cadre de conférences nationales et internationales. De plus, une partie des frais liée au programme de mobilité entre chercheur de l'URIA et de l'UPC a ainsi pu être prise en charge. Pour plus de détail, il est nécessaire de consulter l'annexe financière qui a été remise au coordinateur du programme.

Publications Scientifiques et Communications

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre du projet GEPET-Eau de 2013 à 2016, ont conduit à 3 contributions à ouvrages, 5 journaux scientifiques internationaux, 20 conférences internationales avec actes édités, 7 communications dans des conférences avec actes non édités, 1 rapport de fin de projet, et 1 communication dans le cadre de groupes de travail, 4 organisations de sessions invitées.

Contribution à ouvrage – 3

1. Horvàth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa, R.R. Negenborn et K. Chuquet, "Improvement of Navigation Conditions Using Model Predictive Control - The Cuinchy-Fontinettes Case Study", dans 6th International Conference on Computational Logistics (ICCL), Delft, Netherlands, Edited by: Corman, F; Voss, S; Negenborn, RR, Sponsor(s): Delft Univ Technol, Dept Maritime & Transport Technol, 2015. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24264-4_16

2. Horvàth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Modelling of a navigation reach with unknown inputs: the Cuinchy-Fontinettes case study", dans Advances in Hydroinformatics - SimHydro 2014 - Modeling and Simulation of Fast Hydraulic Transients, Editeurs : P. Gourbesville, J. Cunge et G. Caignaert, 2015. http://www.springer.com/in/book/9789812876140

3. Horvàth K., L. Rajaoarisoa, E. Duviella, J. Blesa, M. Petreczky et K. Chuquet, "Enhancing inland navigation by model predictive control of water level – the Cuinchy-Fontinettes case", dans "Transport of Water versus Transport over Water - Exploring the dynamic interplay between transport and water", Editeurs : Carlos Ocampo-Martinez, Rudy Engenborn, 2015.

Publication dans une revue internationale - 5

1. Horvàth K., L. Rajaoarisoa, E. Duviella, M. Petreczky, R. Negenborn et K. Chuquet, "Model predictive control of a navigation canal considering large operating range in a global change context", journal irrigation and drainage engineering (JIDE), 2016. (révisions soumises)

2. Nouasse H., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa, A. Doniec, E. Duviella et K. Chuquet, "Study of global change impacts on the inland navigation management: Application on the Nord-Pas de Calais network", Transportation Research Procedia, 2016, ISSN: 2352-1465.

3. Horvàth K., H. Nouasse, L. Rajaoarisoa, E. Duviella et K. Chuquet, "Etude de la résilience de réseaux de voies navigables en période d'étiage - Application au réseau du Nord-Pas de Calais", JESA, 2016 (à paraître).

4. Blesa J., K. Horvàth, E. Duviella, V. Puig, Y. Bolea, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Model-based sensor supervision in inland navigation networks: Cuinchy-Fontinettes case study", Journal Maritime Research, Volume 11, Issue 2, 2014.

5. Horvàth K., E. Duviella, J. Blesa, L. Rajaoarisoa, Y. Bolea, V. Puig et K. Chuquet, "Gray-box model of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach", Journal of Intelligent Systems (JISYS), Volume 23, Issue 2, ISSN (Online) 2191-026X, ISSN (Print) 0334-1860, DOI: 10.1515/jisys-2013-0071, Juin 2014.

Communications dans une conférence internationale avec actes édités – 20

1. Mayet A., M. Pierret, H. Nouasse, F. Tempet, G. Lozenguez, A. Doniec et E. Duviella, "Outil de simulation pour l'étude de la résilience et l'optimisation de la gestion des réseaux de voies navigables", MOSIM'16, Montréal, Québec, Canada, 22-4 août 2016. (soumis)

2. Duviella E., H. Nouasse, A. Doniec et K. Chuquet, "Dynamic Optimization Approaches for Resource Allocation Planning in Inland Navigation Networks", ETFA'2016, Berlin, Allemagne, 6-9 Septembre 2016. (soumis)

3. Desquesnes G., H. Nouasse, G. Lozenguez, A. Doniec et E. Duviella, "A Global approach for investigating resilience in Inland Navigation network dealing with climate change context", HIC 2016, Incheon, Corée du sud, 21-26 Aout 2016.

4. Nouasse H., A. Doniec, G. Lozenguez, E. Duviella, P. Chiron, B. Archimède et K. Chuquet, "Constraint satisfaction problem based on flow transport graph to study the resilience of inland navigation networks in a climate change context", IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM, Troyes, France, 28-30 Juin 2016.

5. Nouasse H., A. Doniec, E. Duviella et K. Chuquet, "Efficient management of inland navigation reaches equipped with lift pumps in a climate change context", 4th IAHR Europe Congress, Liege Belgique 27-29 Juillet 2016.

6. Nouasse H., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa, A. Doniec, E. Duviella et K. Chuquet, "Study of global change impacts on the inland navigation management: Application on the Nord-Pas de Calais network", Transport Research Arena, Varsovie, Pologne, 18-21 Avr 2016.

7. Nouasse H., L. Rajaoarisoa, A. Doniec, P. Chiron, E. Duviella, B. Archimède et K. Chuquet, "Study of drought impact on inland navigation systems based on a flow network model", ICAT, Sarajevo, Bosnie Herzégovine, 29-31 Octobre 2015.

8. Horváth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa, R. Negenborn et K. Chuquet, "Improvement of the navigation conditions using a Model Predictive Control - The Cuinchy-Fontinettes case study", International Conference on Computational Logistics, Delft, Pays- Bas, 23-25 Septembre 2015.

9. Horváth K., J. Blesa, E. Duviella et K. Chuquet, "Fault tolerant model predictive control of open channels", USCID Water Management Conference, Phoenix, Arizona, USA, 2-5 Décembre 2014.

10. Duviella E., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Modèle intégré de réseaux de voies navigables pour l'étude de leur résilience dans un contexte de changement climatique", MOSIM, Nancy, France, 5-7 Novembre 2014.

11. Horvàth K., E. Duviella, M. Petreczky, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Model predictive control of water levels in a navigation canal affected by resonance waves", HIC 2014, New York, USA, 17-21 August 2014.

12. Blesa J., K. Horvàth, E. Duviella, V. Puig, Y. Bolea, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Sensors and actuators supervision in Inland Navigation Networks: Cuinchy-Fontinettes case study", Maritime Conference, Barcelona, Spain, 25-27 June 2014.

13. Horvàth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Modelling of a navigation reach with unknown inputs: the Cuinchy-Fontinettes case study", Simhydro, Sofia Antipolis, 11-13 June 2014.

14. Horvath K., M. Petrecsky, L. Rajaoarisoa, E. Duviella et K. Chuquet, "MPC of water level in a navigation canal - The Cuinchy-Fontinettes case study", European Control Conference, Strasbourg, France, June 24-27, 2014.

15. Horvath K., J. Blesa, E. Duviella, L. Rajaoarisoa, V. Puig et K. Chuquet, "Sensor fault diagnosis of inland navigation system using physical model and pattern recognition approach", IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014.

16. Rajaoarisoa L., K. Horvath, E. Duviella et K. Chuquet, "Large-scale system control based on decentralized design. Application to Cuinchy Fontinette Reach", IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014.

17. Duviella E., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Multi-scale modeling approaches of inland navigation networks for their management in a global change context", Transport Research Arena, Paris La Défense, France, 14-17 Apr 2014.

18. Duviella E., L. Rajaoarisoa, J. Blesa et K. Chuquet, "Fault Detection and Isolation of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach", 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Firenze, Italy, December 10-13 2013. .

19. Duviella E., L. Rajaoarisoa, J. Blesa et K. Chuquet. "Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the Cuinchy-Fontinettes reach", IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM, Saint Petersburg, Russia, 19-21 June 2013.

20. Duviella E., J. Blesa, L. Bako, Y. Bolea, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig et K. Chuquet. "Inland navigation channel model: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach", International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC, Paris-Evry University, France, 10-12 Avril 2013.

Communications dans une conférence avec actes non édités - 7

1. Duviella E., "Techniques d'estimation pour la modélisation et le suivi des systèmes environnementaux", Colloque IMT - Ressources naturelles et environnement, Paris, France, 5-6 Novembre 2014.
2. Duviella E. et L. Rajaoarisoa, "Modélisation boîte-grise pour le contrôle des systèmes hydrauliques à surface libre : Application aux biefs de voies navigables", Colloque IMT - Ressources naturelles et environnement, Paris, France, 5-6 Novembre 2014.
3. Duviella E., K. Horvath, J. Blesa, L. Rajaoarisoa, S. Lecoeuche, D. Juge-Hubert, K. Chuquet, E. Sauquet, F. Guibert, N. Gaffet, "GEPET-EAU : A national project for the efficient management of inland navigation networks in a global change context", 7th International Conference on the Global Water and Energy Cycle, The Hague, The Netherlands, 14-17 Juillet 2014.
4. Horvàth K., E. Duviella, J. Blesa, L. Rajaoarisoa, S. Lecoeuche, D. Juge-Hubert, K. Chuquet, E. Sauquet, F. Guibert, N. Gaffet, "GEPET-EAU : Gestion efficiente prédictive et adaptative de la ressource en eau des voies navigables dans un contexte de changement climatique", Colloque IMT - Numérique : Grande échelle et complexité, Paris, France, 26-27 Mars 2014.
5. Duviella E., "Un projet collaboratif pour la gestion des Voies Navigables dans un contexte de changement climatique", Séminaire du DGITM, 27 juin 2014.
6. Duviella E.; "Projet GEPET-Eau : Action de recherche collaborative dans le Nord-Pas de Calais pour l'adaptation au changement climatique des Voies Navigables", Conférence Cercle, Lille, 12 Décembre 2013.
7. Duviella E., M. Sayed-Mouchaweh et K. Chuquet. "Un projet collaboratif pour la gestion des Voies Navigables dans un contexte de changement climatique", Séminaire PNACC, Paris La Défense, 19 Juillet 2013.

Rapport de fin de projet - 1

1. Duviella E., "Rapport final du projet GEPET-Eau", Rapport final, Mai 2016.

Autres communications - 1

1. Duviella E., "Management of Inland navigation networks in a global change context", Journée RT8 - IMT -Ivry, France, 19 mars 2015.

Organisation Session Invitée – 4

1. Duviella E. et J. Blesa, "Monitoring, Fault detection and Supervision for water system management", 3th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, Barcelone, Espagne, September 7-9, 2016.
2. Duviella E., J. Blesa et P. Chiron, "Fault detection techniques for water system management", 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes Paris, France, September 2-4, 2015.
3. Tejada Ruiz A. et E. Duviella, "Smart Water Systems", ECC, European Control Conference, 15-17 Juillet 2015.
4. Horvàth K., E. Duviella et P. Chiron, "Modélisation et simulation des systèmes intégrés au cycle de l'eau dans un contexte de changement climatique", MOSIM, Nancy, 5-7 Novembre 2014.

SOMMAIRE

Objectifs et contraintes de gestion des réseaux de voies navigables 23
Etude de l'impact du changement climatique 27
Architecture de conduite des voies navigables 32
Modèles dynamiques de biefs de voies navigables 34
Modèle volumique de biefs de voies navigables 40
Etude de l'impact du changement climatique basé sur le modèle volumique de biefs 46
Modèle intégré de réseaux de voies navigables 49
Etude de l'impact du changement climatique basé sur le modèle intégré 52
Conclusion 61
Références 63

Cette section a pour objectif de synthétiser les différents résultats scientifiques du projet GEPET-Eau. Dans un premier temps, les objectifs de gestion des réseaux de voies navigables sont rappelés. Les caractéristiques et les spécificités des biefs de voies navigables sont présentées. Ces informations sont nécessaires pour bien comprendre le mode de gestion des réseaux de voies navigables et d'appréhender l'étude de l'impact du changement climatique. Dans un deuxième temps, une synthèse des études bibliographiques sur le changement climatique et les voies navigables est proposée. Des outils et méthodologies permettant d'appréhender les risques liés au changement climatique sont présentés puis positionnés par rapport à une approche basée sur des techniques d'optimisation. Ces outils sont regroupés dans une architecture de conduite des voies navigables pour leur gestion dans un contexte de changement climatique. Les outils et méthodes conçus sont ainsi présentés.

Objectifs et contraintes de gestion des réseaux de voies navigables

En Europe, les réseaux de voies navigables couvrent un très large territoire (*voir* Figure 1). La longueur de ces réseaux est de 8501 km pour la France qui possède ainsi le plus grand réseau, de 7339 km pour l'Allemagne, de 5046 km pour les Pays-Bas, de 1540 km pour la Belgique et de 351 km pour l'Autriche. Ils sont principalement utilisés pour le transport et sont ainsi intégrés au réseau européen sur le transport « Trans-European network » (TEN-T[1]). Le mode de transport par voies navigables bénéficie d'avantages économiques et environnementaux reconnus (Mihic, Golusin & Mihajlovic, 1993 ; Mallidis, Dekker, & Vlachos 2012 ; Brand, Tran, & Anable 2012).

Figure 1 : Réseau de voies navigables en Europe[2].

[1] 1http://ec.europa.eu/transport/themes/ infrastructure/ten-t-guidelines/

[2] http://www.vnf.fr/vnf/img/cms/Tourisme_et_domainehidden/carte_france_europe_transport_deux_mille_onze_201101041503.pdf

En France, les voies navigables se situent principalement dans l'est et le nord de la France (*voir* Figure 2). Le réseau du Nord Pas de Calais est particulièrement important puisqu'il est le plus riche en voies navigables et qu'il est connecté aux réseaux de la Belgique et des Pays-Bas. De plus, avec la construction prévue du canal Seine Nord, son utilisation devrait en être accrue.

Figure 2 : Réseau de voies navigables en France.

Le réseau de voies navigables du Nord Pas de Calais est composé de plus d'une cinquantaine de biefs de navigation interconnectés (*voir* Figure 3). Les biefs sont reliés entre eux par des écluses et parfois par des ouvrages tels que des vannes ou des barrages permettant le transfert d'eau et aussi la régulation de niveaux. Ce réseau est composé de rivières canalisées mais également de voies d'eau artificielles. Ainsi le bief Cuinchy-Fontinettes (CFr) a une position transversale par rapport au sens d'écoulement naturel des rivières environnantes appartenant au bassin versant de la Lys. De nombreux cours d'eau passent en siphon sous ce bief, certains se jettent dedans, et d'autres permettent de l'alimenter ou de le vidanger de manière contrôlée (via la Porte de garde à Aire sur la Lys). Les détails sur les caractéristiques des biefs et des ouvrages sont disponibles dans les dossiers d'ouvrages de VNF.

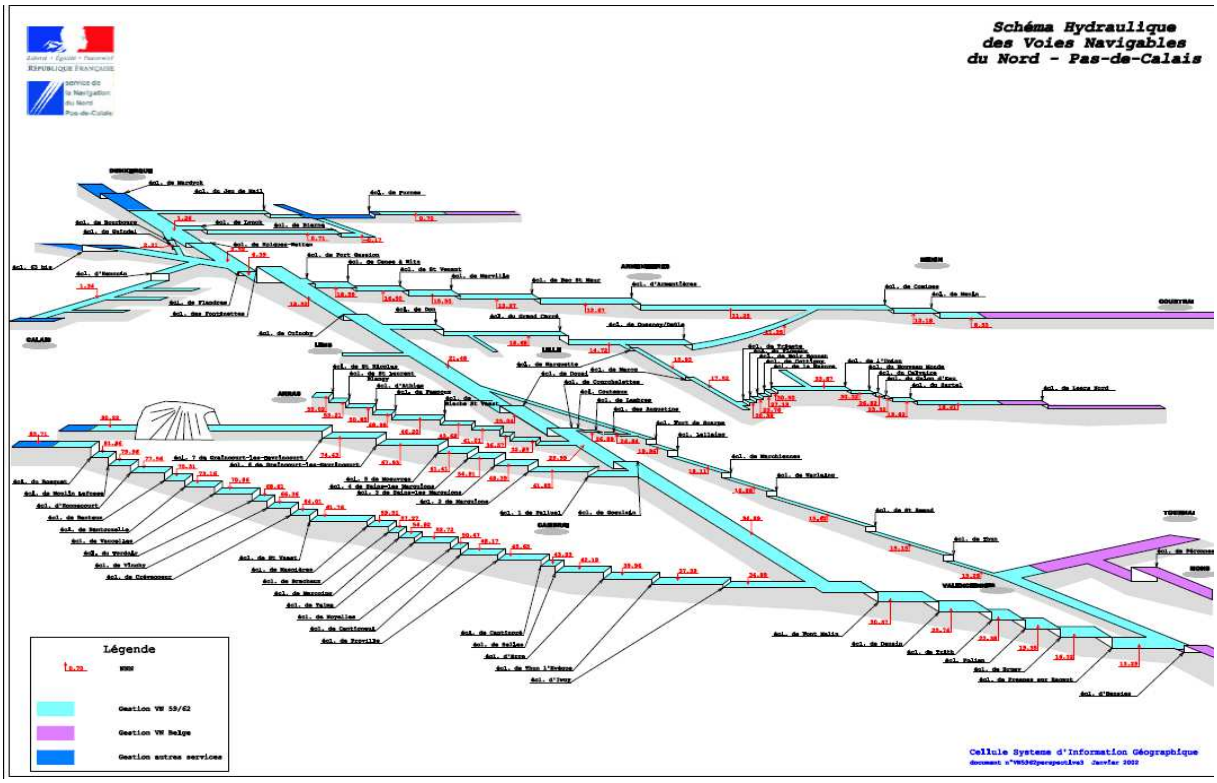


Figure 3 : Schéma hydraulique des voies navigables du Nord Pas de Calais.

La gestion des voies navigables a pour objectif principal de garantir les conditions de navigation au sein de chaque bief de navigation. Il est nécessaire de conserver le niveau des biefs le plus proche possible du Niveau Normal de Navigation (NNN) et à l'intérieur du rectangle de navigation défini par une limite basse (notée NBN) et une limite haute (NHN). Le rectangle de navigation est représenté sur la Figure 4. La navigation doit être stoppée si le niveau d'un bief se situe en dehors du rectangle de navigation.

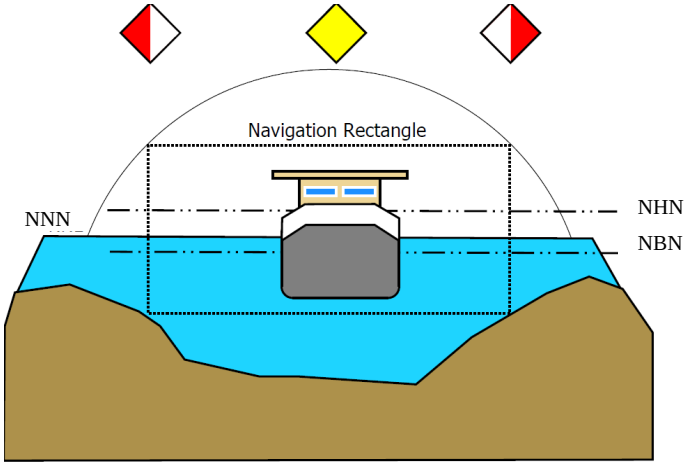


Figure 4 : Rectangle de navigation et Niveau Normal de Navigation (*NNN*).

Le niveau de chaque bief doit être régulé afin de conserver les niveaux proches des NNN. Il est cependant indispensable de bénéficier d'une ressource suffisante en eau. Pour cette raison,

une répartition harmonieuse des volumes d'eau sur l'ensemble des réseaux de voies navigables est requise. Ces deux objectifs sont définis sur des échelles spatio-temporelles différentes avec des contraintes propres. C'est la raison pour laquelle il est opportun de différencier ces deux modes de gestion, en considérant la gestion des volumes (répartition de la ressource en eau) et la gestion des débits (régulation des niveaux).

La répartition des volumes d'eau sur le réseau de voies navigables est soumise à de nombreuses contraintes. Plusieurs biefs de navigation sont alimentés par des affluents naturels de façon non contrôlée. Il existe également de nombreux rejets d'origine anthropique. Finalement, les échanges avec les eaux souterraines ne sont pas quantifiés. Dans son fonctionnement courant, la navigation est autorisée durant 14 heures tous les jours de la semaine avec des limitations le dimanche et des fermetures quelques jours dans l'année. Durant la nuit, la navigation n'est pas autorisée à l'exception de quelques dérogations. L'activation des écluses, *i.e.* une bassinée, crée des déséquilibres dans la répartition des volumes d'eau. Ces déséquilibres sont dus à la taille des écluses qui peuvent être très différentes, mais également à une demande de navigation incertaine et inégalement répartie sur le réseau. A tout cela s'ajoutent les aléas climatiques qui viennent perturber le fonctionnement des réseaux de voies navigables. Dans un contexte de changement climatique, le nombre de périodes d'étiage et de montée des eaux, ainsi que leur amplitude sont prédits à la hausse. Ces événements ajouteront de plus fortes contraintes.

La régulation des niveaux permettant de les conserver proches des NNN doit tenir compte des caractéristiques des biefs de navigation. Ces biefs sont généralement de très grandes dimensions, à fond plat ou avec peu de pente. Ils peuvent être alimentés ou vidangés de façon non contrôlée à plusieurs endroits. Finalement, l'activation des écluses occasionne des phénomènes de résonance avec des vagues de plusieurs centimètres qui se répercutent d'amont en aval avant de s'atténuer au bout de plusieurs minutes ou heures. Ces spécificités doivent être prises en compte lors de la conception d'algorithmes de commande. Il est également indispensable de connaître le fonctionnement des différents ouvrages qui est lié à leur type (vanne noyée, dénoyée, etc., barrage) et à leurs dimensions. Par ailleurs, les algorithmes de commande sont basés sur les mesures issues de capteurs. Leur efficacité est directement dépendante de la qualité des mesures. Il convient alors de s'assurer que les mesures sont fiables, grâce à la conception de techniques de détection de fautes. La régulation des niveaux est indispensable pour une gestion efficiente de la ressource en eau en particulier dans un contexte de changement climatique mais également d'accroissement possible de la navigation.

La présentation des réseaux de voies navigables, de leurs objectifs et contraintes de gestion démontre qu'il s'agit de systèmes très complexes qu'il est nécessaire de gérer le plus efficacement possible afin de garantir une gestion efficiente de la ressource en eau ; celle-ci étant indispensable à la navigation. Les outils et les méthodes développés pour les deux modes de gestion proposés doivent donc se baser dans un premier temps sur la compréhension de leur fonctionnement en mode de gestion courante. Dans un second temps, ces outils et les

méthodes sont adaptés à partir de l'étude des impacts probables liés au changement climatique afin de concevoir des stratégies de gestion prédictive et adaptative.

Etude de l'impact du changement climatique

De nombreux modèles de changement climatique sont proposés dans la littérature ou dans le cadre de projets nationaux ou Européens. Ils sont généralement basés sur les scénarios RCP - Representative Concentration Pathways qui sont produits par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) (IPCC, 2013 ; IPCC, 2014). Ces scénarios tiennent compte des prévisions sur les profils représentatifs de l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols. Selon les prévisions du GIEC, la hausse des températures pourrait dépasser les 4 °C si aucune mesure de réduction des rejets n'est prise. Une prise de conscience internationale a eu lieu et a conduit à l'accord historique sur la mise en œuvre d'actions permettant de limiter la hausse de la température moyenne à 1.5 °C à horizon 2100. Cet accord a été adopté par 195 pays lors de la COP21 le 12 décembre 2015 à Paris (ParisAgreement, 2015), mais doit maintenant se concrétiser.

Le projet DRIAS est un portail mettant à disposition des *projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME).* Sur la figure 5 sont présentés des résultats de simulation de projections de la température selon trois scénarios RCP sur trois périodes futures.

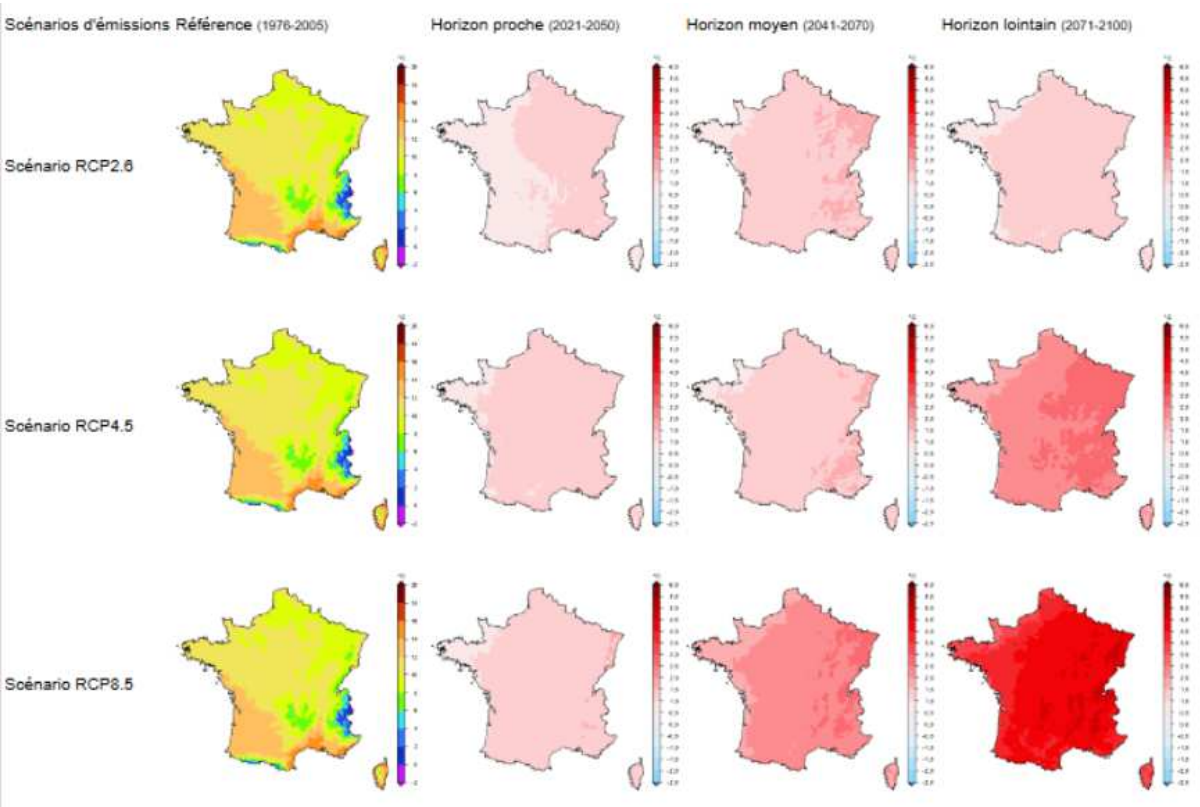


Figure 5 : Projections de la température moyenne en France selon trois scénarios RCP sur trois périodes de temps futures – Résultats du projet DRIAS.

Des cartographies de projections de la pluviométrie selon trois scénarios RCP sur trois périodes futures sont également disponibles (voir figure 6). Des données beaucoup détaillées sont disponibles sur le site web.

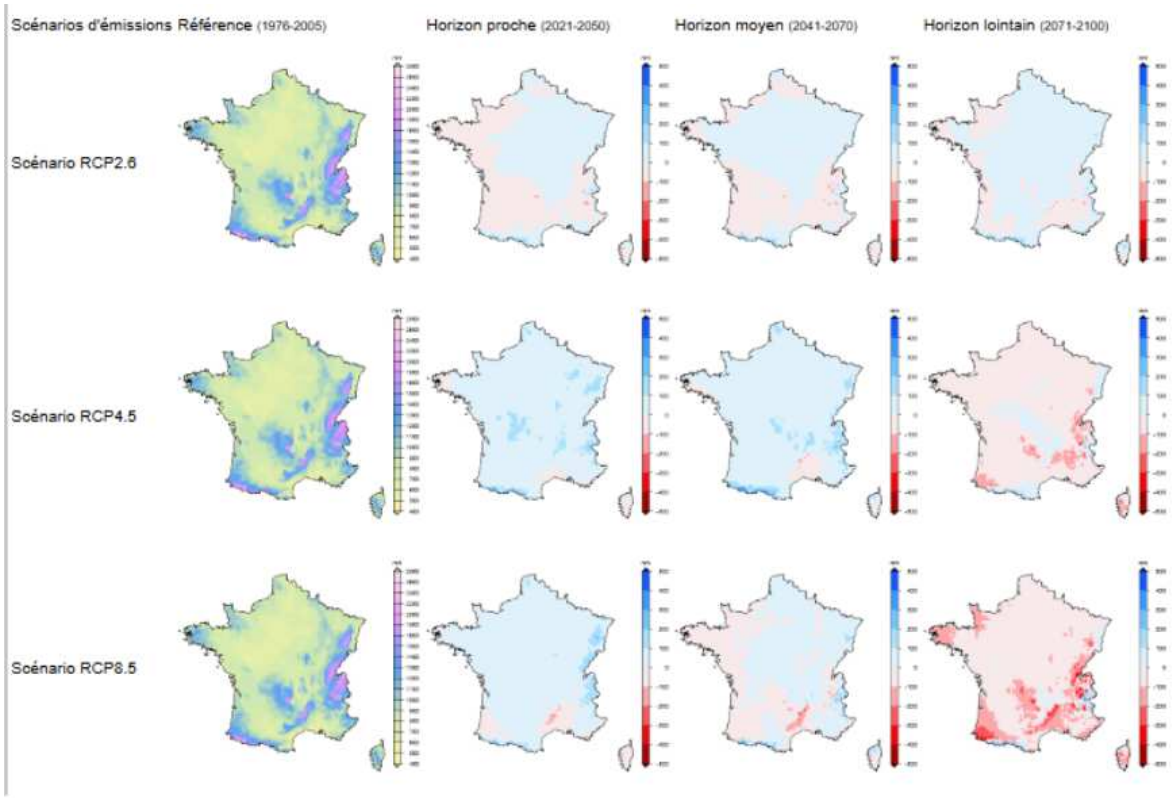


Figure 6 : Projections sur le cumul de précipitations totales en moyenne annuelle en France selon trois scénarios RCP sur trois périodes de temps futures – Résultats du projet DRIAS.

Les projections issues d'autres études et projets conduisent au même constat. Une augmentation moyenne de la température et une diminution du cumul annuel des précipitations sont attendues. Il reste néanmoins nécessaire de coupler ces modèles de prédiction avec des modèles hydrologiques afin de prédire l'impact de ces modifications climatiques sur les cours d'eau. De nombreux projets ont également été proposés (GLOWA , KLIWAS , IMAGINE2030 , ECCONET , R2D2 , EXPLORE2070 , …).

Le projet européen ECCONET[3] propose un état de l'art exhaustif des différentes études et projets à l'échelle européenne jusqu'en 2012. Les contributions de ce projet ont été de mutualiser des modèles climatiques et des modèles hydrologiques avec un focus sur les voies navigables. Les principaux fleuves navigables étudiés étaient le Danube amont, le Rhin et le Main, avec des projections sur les horizons 2021-2050 et 2071-2100. L'impact économique du changement climatique sur les voies navigables a également été étudié avec l'étude et la proposition de mesures d'adaptation. Cependant, les rivières canalisées et canaux équipés d'écluse n'ont pas été pris en compte dans l'étude car il a été considéré qu'ils n'étaient pas impactés par le changement climatique car contrôlés.

[3] http://www.ecconet.eu/deliverables/index.htm

Le projet KLIWAS[4] a également permis la mutualisation de modèles climatiques et de modèles hydrologiques en se focalisant sur l'impact du changement climatique sur les voies navigables. L'application principale a été réalisée sur le Rhin, l'Elbe et le Danube avec une amélioration de la connaissance et des projections sur les horizons 2021-2050 et 2071-2100. Plusieurs objectifs sont visés dans le cadre de ce projet. Parmi eux, il s'agit de déterminer comment sera impactée la navigabilité des voies navigables par rapport aux modifications des régimes hydrauliques, de connaître les modifications sur les capacités et les coûts de transport, mais également d'étudier les modifications liées à la dynamique de sédimentation, les impacts aux niveaux écologiques sur la faune et la flore. La méthodologie mise en œuvre reste classique et est représentée sur la Figure 7. En partant des scénarios RCP, et de modèle climatique global, des techniques de descente d'échelles sont employées pour obtenir des modèles climatiques régionaux. Ces modèles sont corrélés avec des données puis des mécanismes de correction de biais sont utilisés pour enfin aboutir aux modèles hydrologiques. Ces modèles permettent ensuite d'alimenter les modèles hydrauliques, et servent de base aux études de qualité de l'eau, de morphologie et sédimentation, de navigation, etc.

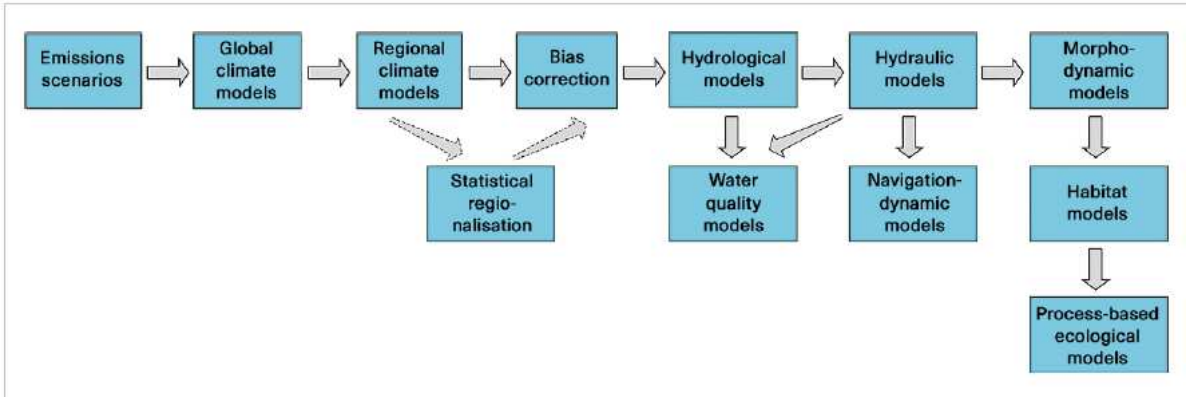


Figure7 : Méthodologie mise en œuvre dans le cadre du projet Kliwas.

Les résultats obtenus sont présentés pour chaque fleuve par bassin versant, en considérant la période estivale et hivernale sur les deux horizons futurs 2021-2050 et 2071-2100. Pour chacune de ces périodes, la hausse moyenne de la température, les modifications du cumul des précipitations, des régimes hydrauliques et finalement de la quantité de ressource disponible, sont fournies. Les conclusions de cette étude pour les trois fleuves sont assez similaires avec une hausse de la température d'environ 2° en été et de 3° en hiver sans modification significative des précipitations, une légère modification en baisse des régimes hydrauliques sur un horizon futur proche 2021-2050. Sur l'horizon futur plus lointain 2071-2100, il est prévu encore une augmentation des températures avec une tendance plus marquée quant à la modification des précipitations. Le cumul des précipitations sera moindre en période estivale et plus élevé en période hivernale. En conséquence, les régimes hydrauliques en période estivale sont clairement marqués en baisse mais aucune tendance distincte ne peut être dégagée pour les périodes hivernales.

4 http://www.kliwas.de/KLIWAS/EN/Service/Downloads/publications/concluding_report.pdf?__blob=publicationFile

Les projets ECCONET et KLIWAS présentent des intérêts certains sur l'étude de l'impact du changement climatique sur les voies navigables. Ces résultats ne sont cependant pas directement transposables à l'étude de l'impact du changement climatique sur le réseau de voies navigables du Nord Pas de Calais. En effet, les fleuves et les bassins versant étudiés ne sont pas les mêmes. De plus, les voies navigables du Nord Pas de Calais sont majoritairement canalisées et contrôlées. Il serait donc plus intéressant de connaître les effets du changement climatique sur les bassins versants et les affluents du réseau de voies navigables. Ces données sont disponibles grâce au projet EXPLORE2070[5]. Ce projet qui a pris fin en 2012 avait pour objectif de connaître les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à échéance 2070. Les modèles d'EXPLORE2070 ont été appliqués afin d'estimer l'évolution des températures, des précipitations et des débits à horizon 2065. Des cartographies par bassins versants sont disponibles auprès des agences de l'eau, en particulier celle de l'Artois-Picardie[6]. Celle-ci est disponible sur internet et présentée sur la Figure 8.

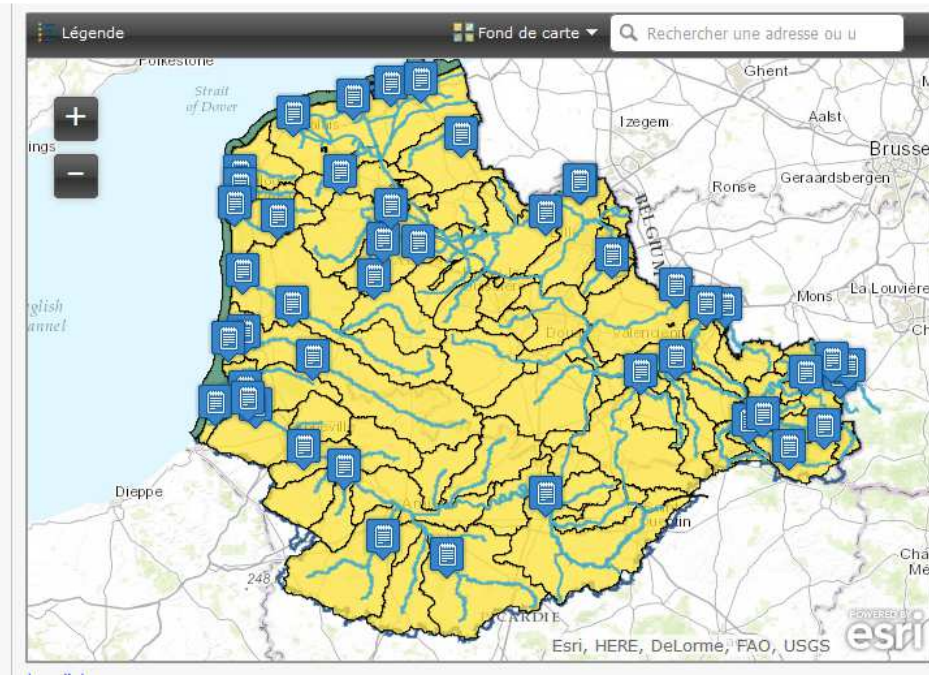


Figure 8 : Accès cartographique aux principaux résultats du projet EXPLORE2070 pour les cours d'eau du bassin Artois-Picardie.

Cette cartographie permet d'accéder aux prévisions des évolutions projetées par rapport au temps présent (moyennes annuelles sur la période 2046-2065) de la température, des précipitations, des débits, selon deux modèles ; GR4J et MODCOU, de plusieurs rivières et bassins versants de la région. Ces informations indiquent une hausse moyenne des températures entre 2.1 et 2.3°sur la période 2046-2065, une baisse de la pluviométrie de 7 à 9 %. Ces résultats sont conforment aux résultats d'autres projets en Europe (Rhin, Elbe). Concernant les débits, les résultats selon les modèles utilisés présentent des différences notables. Par exemple, ils varient de -54% à -22% pour la Somme à Péronne. Ils semblent également beaucoup pessimistes que les résultats obtenus par les autres projets étudiés. Quoi

[5] http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html
[6] http://www.eau-artois-picardie.fr/Resultats-de-l-etude-Explore-2070.html

qu'il en soit, les résultats du projet EXPLORE2070 restent très intéressants et utilisables dans le cadre de notre étude. En effet, ils permettent de définir des scénarios probables sur les hydrogrammes des entrées principales du réseau de voies navigables étudié. De plus, des résultats détaillés sont également disponibles. Ils se présentent sous la forme de fiches telles que celle présentée sur la Figure 9.

Figure 9 : Fiche détaillée de la Somme à Péronne.

L'avantage de ces fiches est qu'elles permettent de détailler mensuellement les évolutions des pluies et des débits. Elles fournissent également des indications sur l'occurrence des crues et des périodes d'étiage. Bien que ces données comportent de très nombreuses incertitudes (comme il est indiqué) elles sont très utiles lors de la définition de scénarios de fonctionnement en périodes d'étiage et de montée des eaux.

Ces informations peuvent être considérées de façon qualitative. En effet, dans beaucoup d'articles scientifiques, il est indiqué qu'une hausse de la température est attendue est qu'elle sera accompagnée d'un dérèglement climatique entraînant une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des périodes de crue et d'étiage (Boé *et al.*, 2009 ; Ducharne *et al.*, 2010). Des études récentes traitent de l'impact de l'activité humaine sur les périodes de crue (Yan *et al.*, 2015) et plus particulièrement d'étiage (Wanders et Wada, 2015). D'autres études basées sur le scénario le plus pessimiste RCP 8.5 conduisent à la quantification de la fréquence, la durée et l'intensité des futures périodes d'étiage dans plusieurs régions de Chine (Li *et al*., 2015) et en Corée du sud (Park *et al.*, 2015). Cependant, la détermination de la fréquence, la durée et l'intensité des futures périodes d'étiage ou de crue n'est *a priori* pas suffisante pour conclure de façon définitive sur les impacts du changement climatique. Il s'agit de connaissances nécessaires mais pas suffisantes. Une des études réalisées dans le cadre du projet GEPET-Eau permet d'illustrer cette conclusion. Elle est présentée par la suite après avoir introduit l'architecture de conduite des voies navigables.

Architecture de conduite des voies navigables

Une nouvelle architecture de conduite intégrant des stratégies de gestion prédictives et adaptatives pour la gestion de la ressource en eau des voies navigables dans un contexte de changement climatique a été conçue (Duviella *et al.*, 2013). Elle est représentée sur la Figure 10. Elle se compose de trois modules entre les blocs *Génération des Objectifs et Contraintes de Gestion* (GOCG) et *Réseau des Voies Navigables* (RVN). Le bloc GOCG regroupe l'ensemble des règles de gestion des voies navigables ainsi que les protocoles de gestion lors d'évènements exceptionnels. Ce module prend en compte les contraintes liées à l'usage de l'eau avec notamment les priorités sur les usages, les objectifs de navigation, mais également les évènements climatiques. Il fournit en sortie des objectifs de gestion et des contraintes de gestion. Le bloc RVN représente le réseau réel.

Le module SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) regroupe l'ensemble des outils permettant l'acquisition des données du réseau des voies navigables et l'envoi de consignes au niveau des actionneurs. Les données reçues sont filtrées et corrigées grâce à des techniques de réconciliation de données (filtrage, correction, etc.). Ce module permet l'enregistrement des mesures et consignes dans une base de données (DB), la définition d'alarme et la conception d'interfaces Homme-Machine pour le télé-contrôle des voies navigables.

Le module d'Accommodation Hybride de la Commande (AHC) est alimenté par le bloc GOCG et le module SCADA qui lui fournissent les contraintes liées à l'usage de l'eau, les objectifs de navigation, les prévisions sur les événements climatiques, les mesures du réseau.

Il fournit en sortie, les consignes à appliquer aux actionneurs du réseau. Il est composé de trois blocs. Le bloc Stratégies de Supervision (SdS) permet la supervision haut niveau du réseau à savoir la détermination de l'état courant des voies navigables. Il s'agit par exemple de déterminer l'état de la ressource en eau. Le module Stratégie de Pronostic (SdP) a pour objectifs la prévision en terme de navigation mais également la prévision des événements pouvant impacter le réseau des voies navigables en tenant compte de l'état actuel du réseau et les prévisions d'événements climatiques. Finalement, le bloc Stratégie de Gestion (SdG) regroupe l'ensemble des règles de gestion et de décision en tenant compte des états actuel et future du réseau, des contraintes liées à l'usage de l'eau et des objectifs de navigation, afin de produire des consignes de fonctionnement.

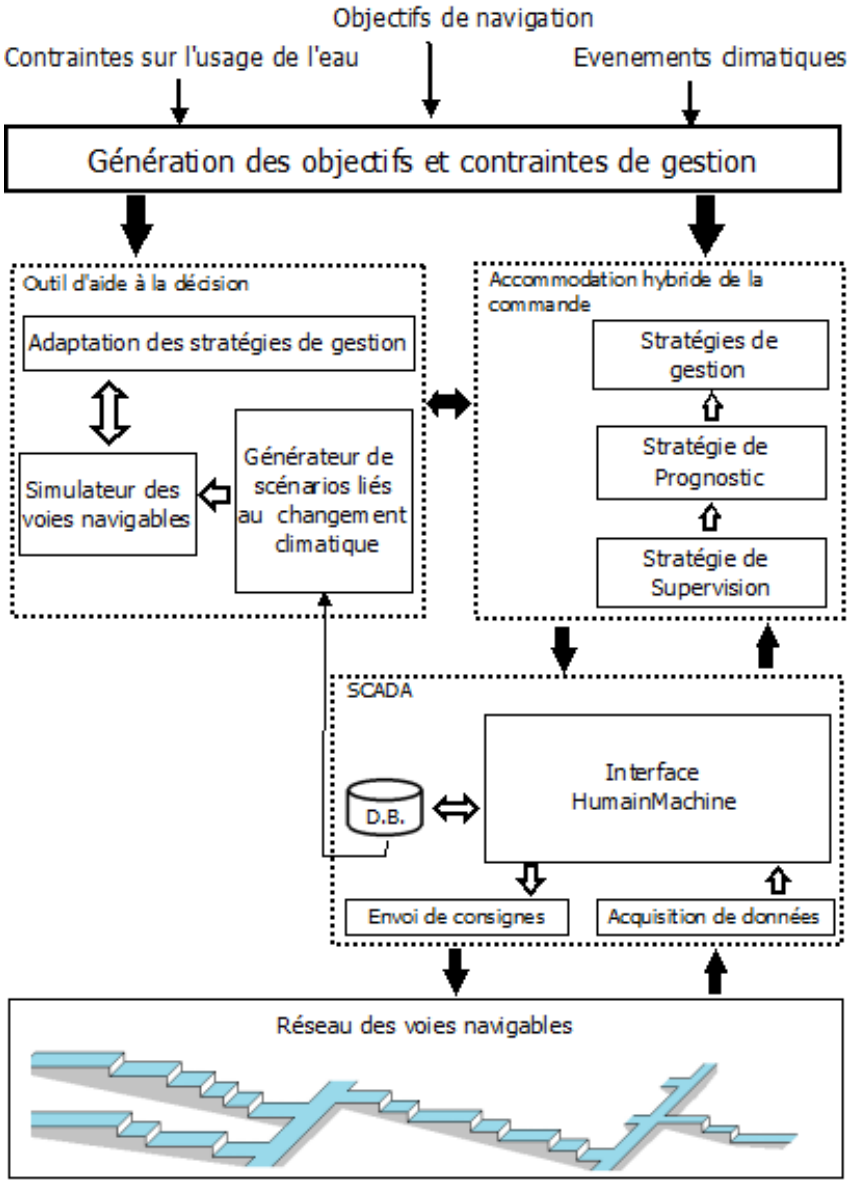


Figure 10 : Architecture de conduite des voies navigables.

Le module d'Outil d'Aide à la Décision (OAD) a en entrée les données fournies par le bloc GOCG, les états actuel et futur du réseau provenant du Module AHC, et les données de l'historique issu du module SCADA. Il fournit en sortie des stratégies de gestion (règles de

gestion) adaptées aux événements courants ou prévus afin d'améliorer, si besoin, l'efficience de la gestion des voies navigables. Il est constitué de trois blocs. Le bloc Génération des Scénarios liés au Changement Climatique (GSCC) permet la conception de scénarios d'événements critiques à partir de l'historique des mesures et de modèles de changement climatique. Le bloc Simulateur des Voies Navigables (SVN) a pour objectif la simulation des événements critiques liés au changement climatique de façon réaliste. Le but est de pouvoir jouer par simulation ces scénarios et tester la résilience des voies navigables. Finalement, le bloc Adaptation des Stratégies de Gestion (ASG) permet l'adaptation des règles de gestion et de les tester par simulation en considérant les scénarios de changement climatique.

Bien entendu le module OAD requiert une connaissance fine de la dynamique des voies navigables. A cette fin, une approche de modélisation multi-échelle a été proposée dans (Duviella *et al.* 2014a). Elle permet de dissocier les deux dynamiques liées à la gestion des voies navigables. Le premier type de modèles de biefs de voies navigables permet de reproduire leur dynamique avec des pas de temps de quelques minutes, tout au plus de quelques heures. Le deuxième type de modèle est dédié à la modélisation des réseaux de voies navigables sur des durées de plusieurs heures, mais également plusieurs jours.

Modèles dynamiques de biefs de voies navigables

Afin de reproduire la dynamique de biefs de voies navigables plusieurs modèles ont été utilisés et adaptés, et un modèle a été développé. Ils présentent chacun leurs avantages et inconvénients. Les modèles utilisés sont issus de la littérature et sont basés uniquement sur les caractéristiques physiques des systèmes étudiés. Il s'agit de modèles de type Boîte-blanche. Le modèle qui a été développé dans le cadre du projet GEPET-Eau est de type Boîte-grise puisque seuls les retards sont considérés comme connus *a priori*. Les paramètres de ce modèle sont identifiés à partir des données mesurées. La figure 11 illustre les deux types d'approche de modélisation utilisés pour la modélisation des biefs de voies navigables.

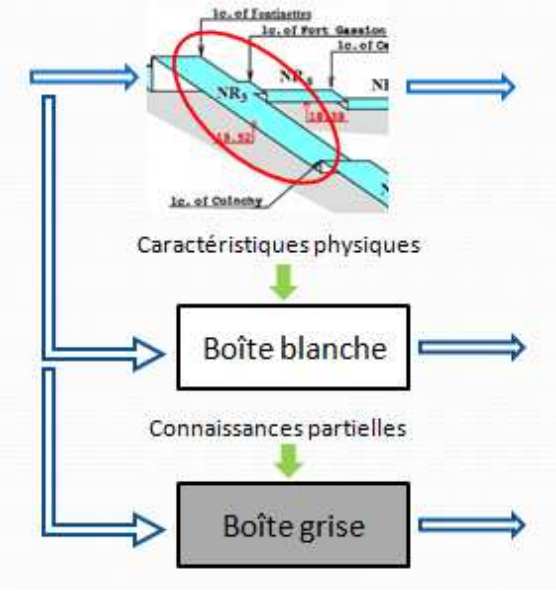


Figure 11 : Approches de modélisation de biefs de voies navigables.

Le premier modèle IDZ (Integral Delay Zero) est issu de la littérature pour des systèmes à surface libre avec pente (Litrico et Fromion, 2004). Il a été adapté afin d'être appliqué aux biefs sans pente. Ces modèles dits de type boîte-blanche sont basés sur la connaissance des paramètres physiques du système.

Classiquement, un bief est défini entre deux points et sa dynamique peut se décomposer en deux zones comme illustré sur la Figure 12. A partir de cette représentation, un modèle linéaire de type entrée/sortie est défini par la relation (1).

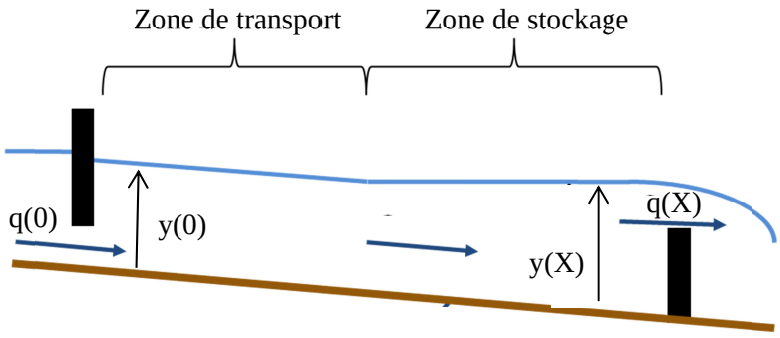


Figure 12 : Bief de canal.

$$\begin{bmatrix} y(0,s) \\ y(X,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(0,s) \\ q(X,s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec $P_{ij}(s) = \frac{ps+1}{As} e^{-\tau s}$, où p représente le zéro, A le gain de l'action intégrale et τ le retard. L'obtention de ces paramètres nécessite la détermination de la profondeur *uniforme* pouvant être approximée comme étant la hauteur d'eau au point de séparation de la zone de transport et celle de stockage. Pour un bief sans pente, cette profondeur *uniforme* est identique sur l'ensemble du canal et correspond à la hauteur au point 0. Les formules permettant l'obtention de ces paramètres ne sont pas reprises ici, mais détaillées dans (Litrico et Fromion, 2004).

Le deuxième modèle IR (Integral Resonance) est également issu de la littérature pour des systèmes à surface libre caractérisés par des phénomènes de résonance (van Overloop *et al.*, 2010). Dans ce cas, la fonction de transfert du modèle linéaire de type entrée/sortie est défini par la relation (2).

$$P_{ij}(s) = \frac{1}{As} \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

avec A le gain de l'action intégrale, ω_0 un coefficient liée aux pulsations du système et ζ à l'amortissement. Les formules permettant l'obtention de ces paramètres ne sont pas reprises ici, mais détaillées dans (van Overloop *et al.*, 2010).

Finalement, un modèle de type boîte-grise a été développé dans le cadre du projet GEPET-Eau (Horvàth *et al.* 2014a, Duviella *et al.* 2013). Le principal intérêt de ce modèle réside dans le fait que ses paramètres sont identifiés à partir de mesures, sachant qu'uniquement le retard est connu *a priori*. Il permet également de considérer facilement plusieurs entrées et sorties comme illustré sur la Figure 13.

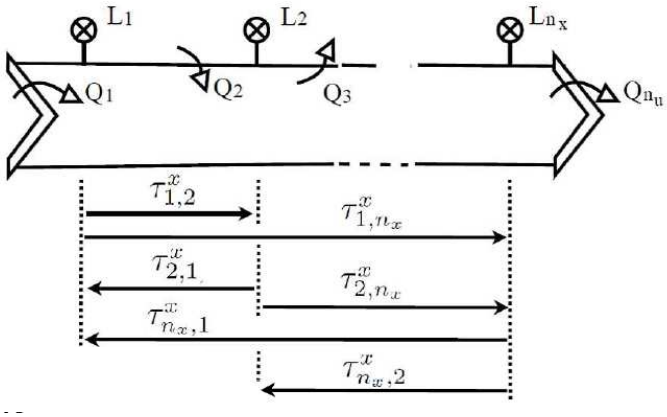


Figure 13 : Bief de voies navigables caractérisé par plusieurs entrées et sorties.

L'expression du modèle est la suivante :

$$y_{k+1} = \boldsymbol{A}\bar{y}_{k|\tau^y} + \boldsymbol{B}\bar{u}_{k|\tau^u} \quad (3)$$

avec $\boldsymbol{A}$ et $\boldsymbol{B}$ les matrices des paramètres à identifier, y le vecteur regroupant les niveaux, et u le vecteur regroupant les entrées/sorties du système. Le vecteur $\bar{y}_{k|\tau^y}$ représente les niveaux aux instants précédents en tenant compte des retards τ^y entre les points de mesure, et $\bar{u}_{k|\tau^u}$ les débits aux instants précédents en tenant compte des retards τ^u entre les entrées/sorties du biefs. La démarche conduisant à l'identification des matrices de paramètres est détaillée dans (Horvàth *et al*. 2014a).

Le développement, le test et la comparaison des trois méthodes de modélisation ont été réalisés en considérant le bief Cuinchy-Fontinettes (CFr) dont la dynamique est caractérisée par une forte résonance. Le CFr est un bief artificiel de plus de 42 km de long situé entre les villes de Cuinchy et d'Arques, où se situent respectivement l'écluse et la vanne de Cuinchy, ainsi que l'écluse de Fontinettes. Le CFr a également la particularité de pouvoir être alimenté ou vidangé par la Porte de Garde, ou vidangé par l'écluse et la vanne de Fort Gassion, situées à Aire sur la Lys à environ 28 km de Cuinchy.

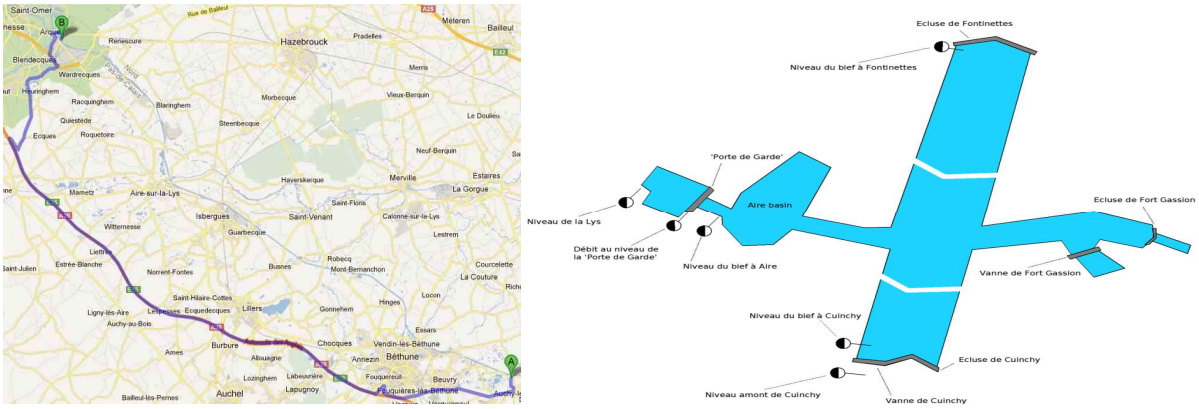


Figure 14 : Plan et schéma du bief Cuinchy-Fontinettes.

La figure 15 représente le niveau d'eau mesuré en amont de l'écluse de Fontinettes sur une durée de 30 heures avec une période de mesure de 15 minutes. La période de navigation se situe entre la 12ème et la 26ème heure. L'impact des bassinées sur le niveau conduit à des vagues avec des amplitudes de plus de 10 cm. Ce phénomène s'avère beaucoup plus accentué lorsqu'une période de mesure de 30 secondes est utilisée. Dans ce cas, l'amplitude avoisine les 15 cm. Entre la 2ème et la 10ème heure, et après la 26ème heure, il n'y a aucune bassinée. Cependant, le niveau oscille toujours en s'atténuant. Le phénomène de résonance est ainsi mis en évidence.

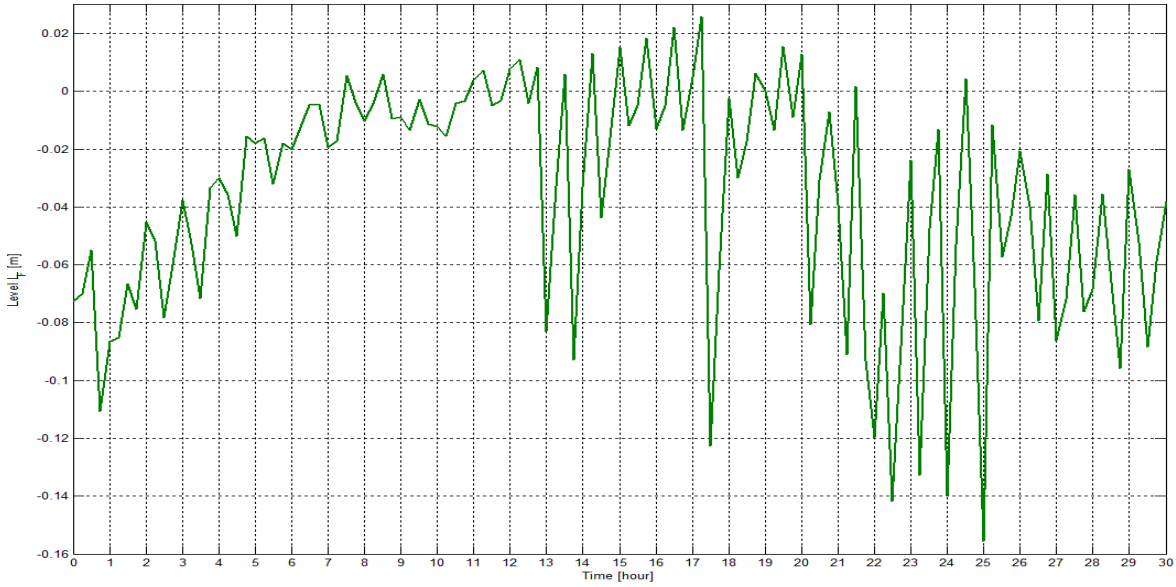


Figure 15 : Niveau en amont de l'écluse de Fontinettes.

Le bief CFr a tout d'abord été modélisé avec le logiciel SIC[7] développé par l'IRSTEA. Un premier modèle simplifié a été implémenté. Il s'agit de considérer un unique profil de forme rectangulaire. Dans un deuxième temps, les 360 profils du CFr issus de mesures bathymétriques ont été implémentées (*voir* figure 16). Dans les deux cas, l'amplitude de la vague générée à la suite d'une bassinée à Fontinettes est reproduite (*voir* figure 17). Le phénomène de résonance est également modélisé puisque l'onde de la vague se répercute d'amont en aval avec un aller-retour d'une durée d'environ 4 heures, et une atténuation au fil du temps. Le modèle SIC avec les 360 profils du CFr conduit à des résultats sensiblement différents du modèle SIC avec le profil simplifié notamment sur la valeur du temps de transfert. Ce dernier varie de quelques minutes entre les deux modèles. La modélisation de l'ensemble des profils offre donc *a priori* une amélioration des simulations mais nécessite la mise à disposition de mesures bathymétriques. Cependant, il semblerait qu'une modélisation sous SIC de biefs en considérant uniquement un profil simplifié soit suffisante dans un premier temps pour la conception et l'évaluation de modèles de biefs de voies navigables, et cela d'autant plus que quel que soit le modèle utilisé, une phase de calage reste indispensable.

[7] http://sic.g-eau.net/preambule

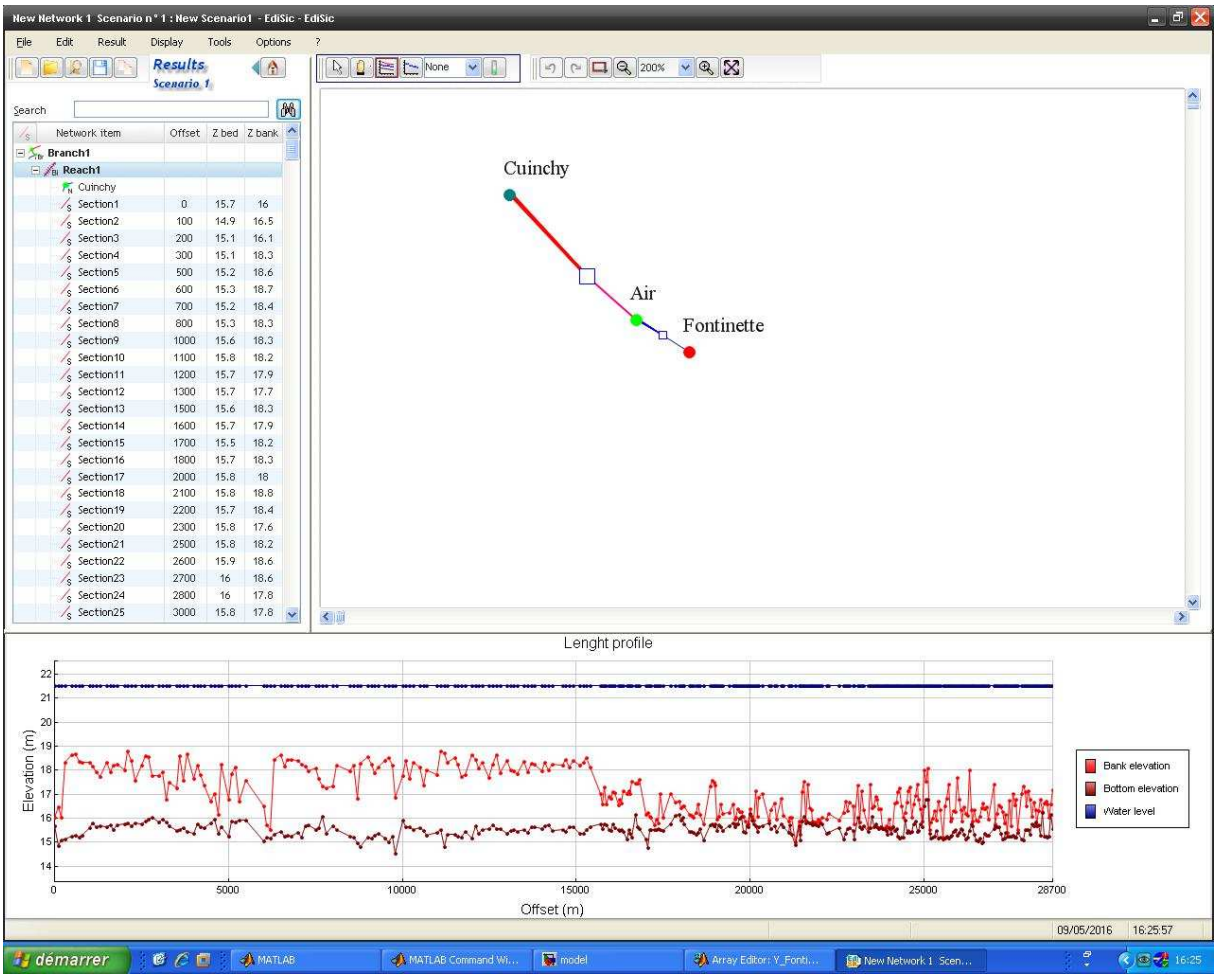


Figure 16 : Capture d'écran du logiciel SIC avec les 630 profils différents implémentés.

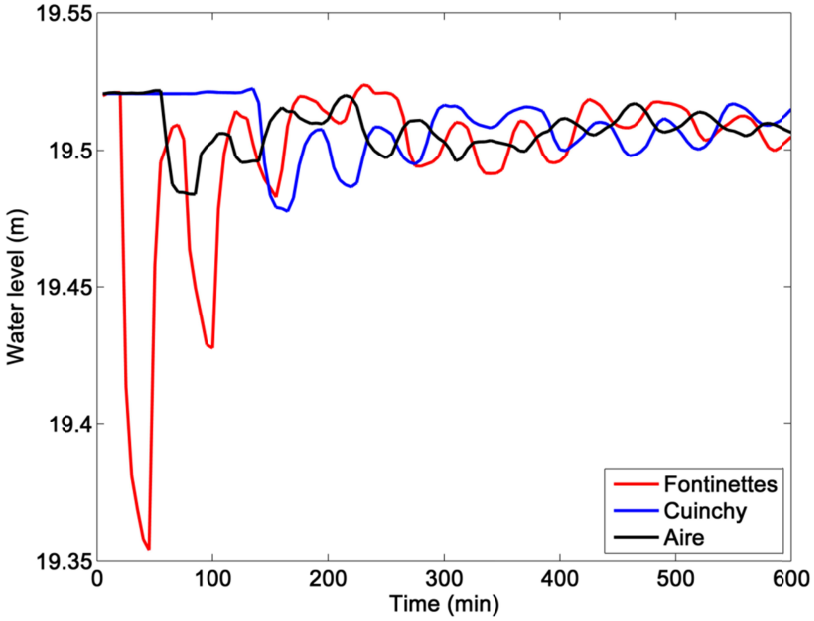


Figure 17 : Niveaux du bief CFr simulés par le logiciel SIC (avec 630 profils) à la suite de l'occurrence d'une bassinée à Fontinettes.

Un scénario de fonctionnement du bief CFr est présenté sur la Figure 18. Celui-ci a été utilisé afin de comparer les trois modèles proposés. Sur ce scénario, il apparaît que le modèle IR est celui qui reproduit le mieux la sortie du logiciel SIC, malgré quelques pics. Le modèle IDZ semble être le plus stable mais il n'est pas conçu pour reproduire les phénomènes de résonance. Finalement, le modèle boîte-grise semble sur ce scénario être le moins performant en particulier durant la première partie de la simulation.

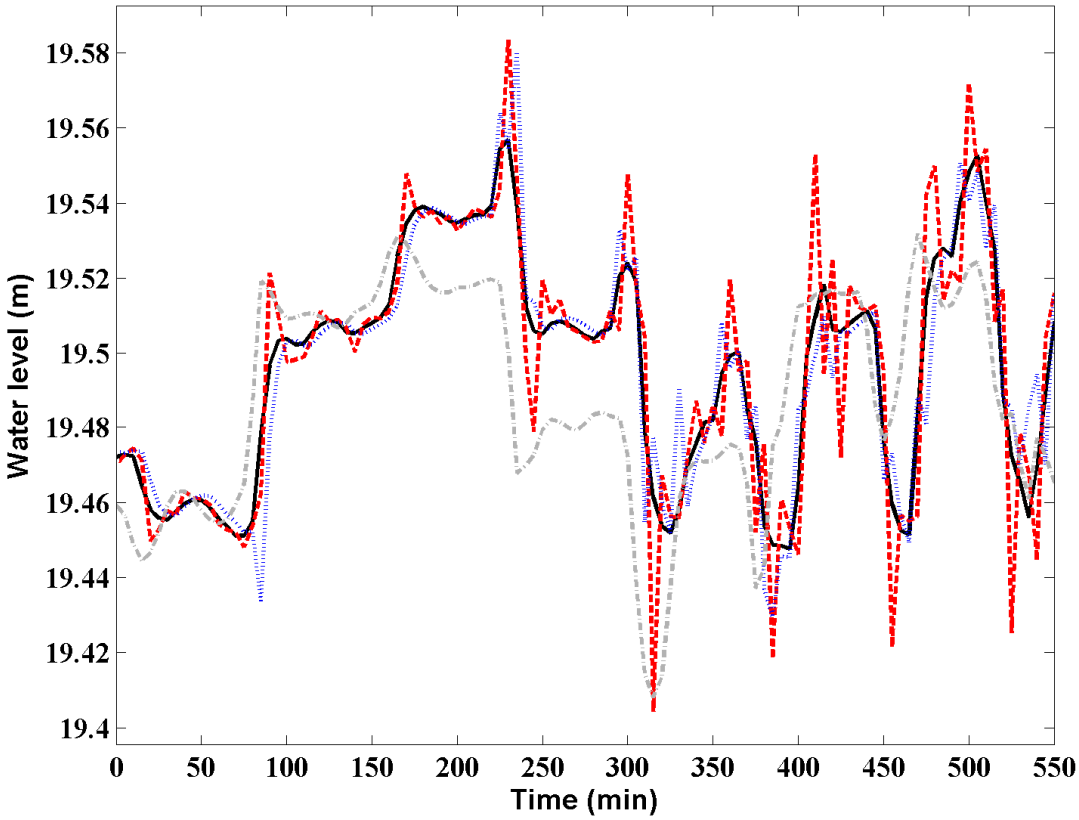


Figure 18 : Niveau en amont de l'écluse de Fontinettes, simulé avec SIC (courbe en pointillés bleus) avec le modèle IDZ (courbe bleue), avec le modèle IR (courbe rouge) et avec le modèle boîte-grise (courbe grise).

A partir des différents tests et comparaisons qui ont été effectuées, le modèle IDZ présente l'avantage d'être facilement généré, et offre des possibilités intéressantes pour la conception de techniques de régulation et de détection de défauts capteurs. Le modèle IR a l'avantage de reproduire les phénomènes de résonance. Sa mise en œuvre pour la conception de techniques de régulation et de détection de défauts capteurs est *a priori* moins *immédiate*. Le modèle boîte-grise offre l'avantage de pouvoir être généré directement à partir de données mesurées sans grande connaissance des caractéristiques physiques des biefs de voies navigables. Il peut également s'accommoder de composantes dynamiques non connues (entrées inconnues).

Ces modèles de biefs de voies navigables ont permis également de concevoir des techniques de régulation (Horvàth *et al.*, 2014c, Horvàth *et al.*, 2014d, Rajaoarisoa *et al.*, 2013,), ainsi que des techniques de détection de défauts de capteurs (Duviella *et al.* 2013b, Blesa *et al.*, 2014a, Blesa *et al.*, 2014b, Horvàth *et al.* 2014e). Ces contributions ne sont pas détaillées ici. Un exemplaire de ces articles est fourni en Annexe 2.

Modèle volumique de biefs de voies navigables

La dynamique de biefs de voies navigables peut être représentée sur une plus longue période en réalisant des bilans journaliers ou correspondants aux périodes de navigation (14 heures) et aux périodes hors navigation (10 heures). Une méthodologie a été proposée dans (Horvàth *et al*. 2014b, Horvàth *et al*. 2015a). Il est nécessaire dans un premier temps de modéliser chaque ouvrage permettant l'alimentation ou la vidange de chaque bief du réseau ou sous-réseau de voies navigables considéré. Lorsque l'information n'est pas disponible, la détection de l'occurrence des bassinées doit être réalisée à partir d'un traitement sur les données ou la conception d'observateurs. Finalement, un bilan volumique est utilisé afin de caractériser les volumes provenant des entrées non contrôlées, de l'évapotranspiration, des échanges avec les eaux souterraines. Cette méthodologie est illustrée sur le bief CFr. Les modèles de deux vannes équipant le CFr sont générés (*voir* figure 19).

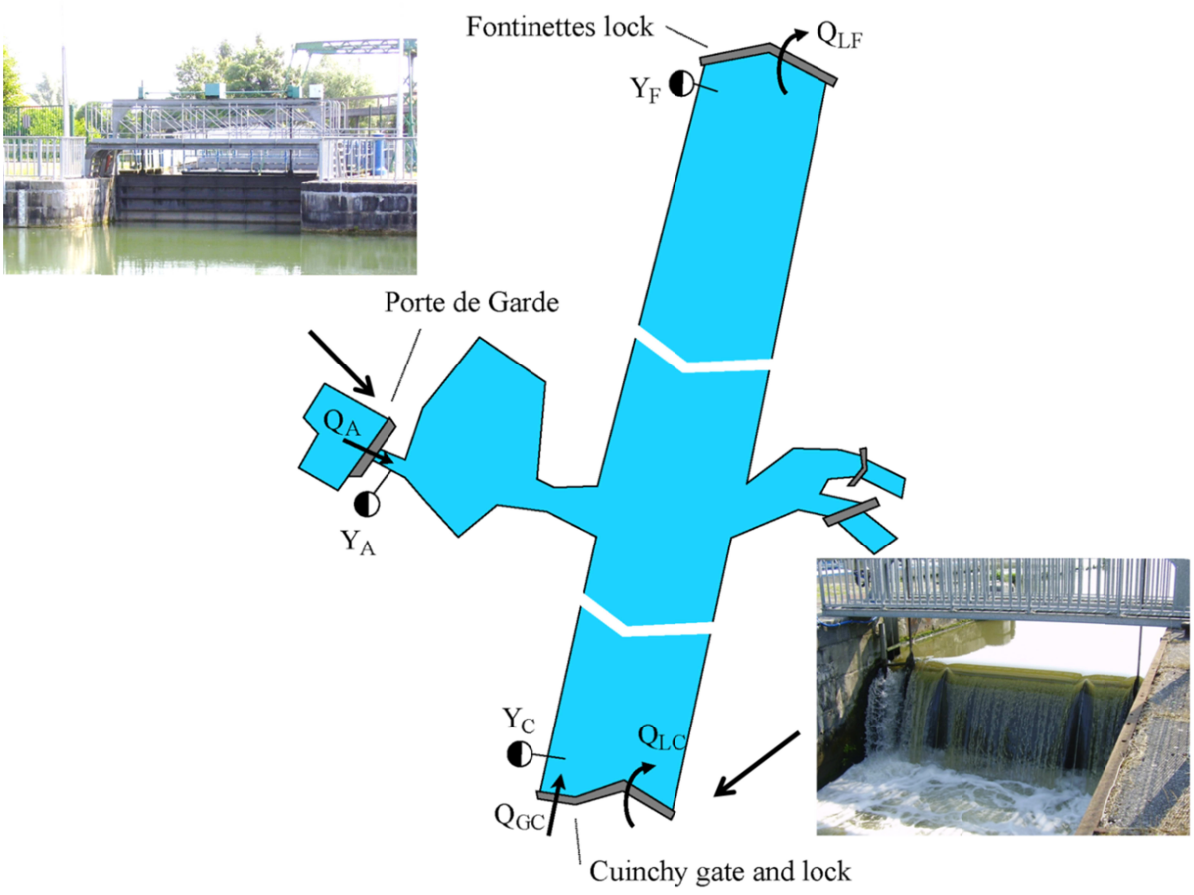


Figure 19 : Schéma du bief CFr, positionnements et photographies des vannes.

La vanne de Cuinchy est une vanne abaissante (*voir* figure 20.a). L'équation de sa dynamique dépend des niveaux amont et aval, *i.e.* $H_1(t)$ et $H_2(t)$, de la longueur B_w de la vanne et d'un coefficient de calage C_{dw}. Elle est fournie ci-dessous :

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

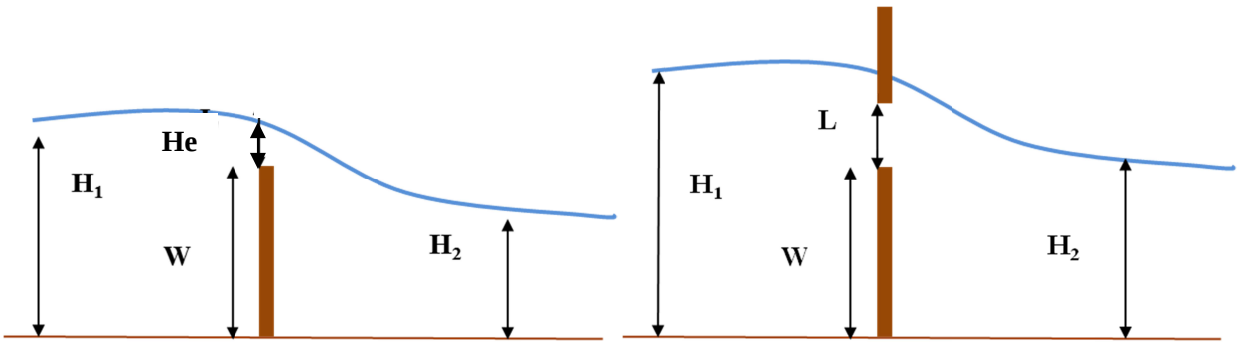


Figure 20 : Schéma de vanne en mode dénoyé et en mode noyé.

La vanne Porte de garde à Aire sur la Lys présente une dynamique assez particulière, car elle peut être utilisée en mode dénoyé ou en mode noyé (*voir* figure 20.b), avec un écoulement possible dans les deux sens. En fonction de la valeur des niveaux $H_1(t)$ et $H_2(t)$, de l'ouverture de la vanne L, la vanne présente 5 dynamiques différentes.

- Régime dénoyé libre :

$$Q_{wf}(t) = C_{dw} B_w \sqrt{2g}\,\frac{2}{3}\sqrt{H_1(t) - H_e(t)} \tag{5}$$

- Régime dénoyé submergé – Relation (4)
- Régime noyé submergé :

$$Q_g(t) = B_g \sqrt{2g}\left(k_F \mu H_1(t)^{3/2} - k_{F1}\mu_1 (H_1(t) - L(t))^{3/2}\right) \tag{6}$$

- Régime noyé partiellement submergé :

$$Q_g(t) = B_g(t) \sqrt{2g}\left(k_F \mu H_1(t)^{3/2} - \mu_1 (H_1(t) - L(t))^{3/2}\right) \tag{7}$$

- Régime noyé non submergé :

$$Q_g(t) = B_g \sqrt{2g}\left(\mu H_1(t)^{3/2} - \mu_1 (H_1(t) - L(t))^{3/2}\right) \tag{8}$$

Le passage d'un mode de fonctionnement à un autre dépend du signe de la différence entre les hauteurs $H_1(t)$ et $H_2(t)$, du signe de la différence entre d'une part $H_i(t)$ et d'autre part W+L, et finalement du coefficient :

$$\alpha = 1 - 0.14\frac{H_i}{W}, \alpha_1 = \alpha(H_i - W) \tag{9}$$

Les équations proposées restent génériques et peuvent être utilisées pour d'autres vannes. Il est cependant nécessaire de caler les modèles grâce à la détermination des coefficients de calage.

Par la suite, des méthodes permettant la détection de l'occurrence de bassinées ont été proposées. Parmi elles, une première technique est basée sur l'observation de données et un seuil de détection. Une deuxième technique est basée sur la génération d'un observateur. Cette dernière n'est pas présentée car elle n'a pas apporté de gain notable par rapport à la première technique.

L'algorithme de détection de bassinées est basée sur les principes suivants :

- il y a au moins trois points de mesure différents entre deux bassinées,
- une bassinée est détectée si la différence entre deux mesures consécutives est supérieure à un seuil Th_2,
- une bassinée est détectée si la somme des différences entre trois points successifs est supérieure au seuil Th_2, à la condition que chacune de ces différences soit supérieure à un seuil Th_1 tel que $2Th_1 < Th_2$.

La figure 21 permet d'illustrer ce principe. La différence entre les points aux instants 7 et 8 est supérieure à Th_2, donc une bassinée est détectée. Les différences entre les points aux instants 2 et 3, puis aux instants 3 et 4 sont supérieures à Th_1, et leur somme est supérieure à Th_2. Une bassinée est donc aussi détectée.

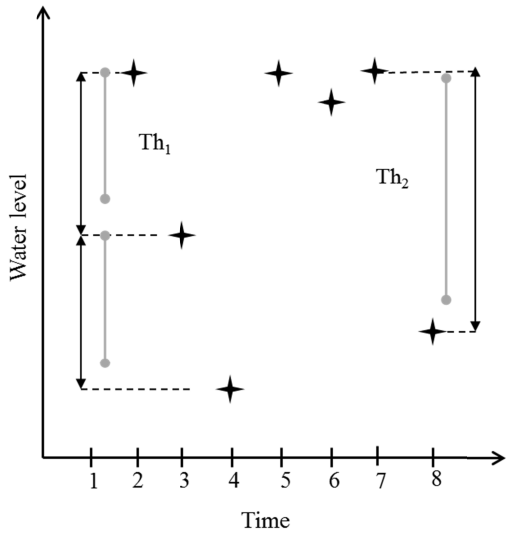


Figure 21 : Illustration de la technique de détection de bassinées.

Cette approche est appliquée sur des données réelles provenant des capteurs du bief CFr. Les données réelles mesurées en amont de Fontinettes en 2010 sont représentées sur la figure 22.a. Le niveau est mesuré toutes les 15 minutes. Grâce à l'utilisation de l'algorithme de détection de bassinées, les instants d'activation de l'écluse de Fontinettes sont déterminés et représentés sur la figure 22.b. Cet exemple permet d'illustrer la démarche sur des données réelles. Il n'est cependant pas possible de vérifier la performance de l'algorithme de détection de bassinées sur ces données puisque l'information sur le nombre et les instants d'occurrence réelle des bassinées est inconnue sur cet épisode.

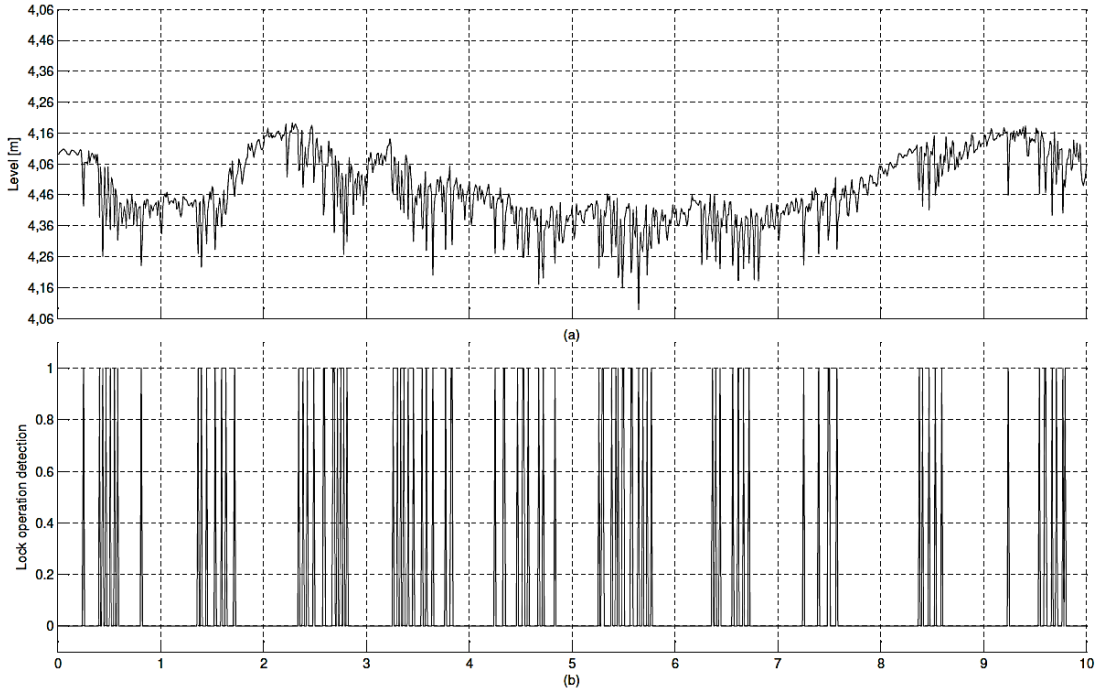


Figure 22 : (a) Niveau mesuré à Fontinettes durant les dix premiers jours de l'année 2010, (b) détection de l'occurrence de bassinées.

Afin de vérifier la performance de l'algorithme, d'autres données provenant du bief CFr sont utilisées. Les périodes sont sélectionnées en fonction de la disponibilité des données et de la disponibilité de relevés d'occurrence de bassinées. Les résultats présentés correspondent au mois de décembre 2007. La figure 23 présente les résultats pour les bassinées de l'écluse de Cuinchy, avec en trait noir le nombre de bassinées relevé et en gris l'estimation du nombre de bassinées. Sur cet épisode, l'approche de détection a tendance à surestimer de 2 ou 3 le nombre de bassinées à Cuinchy.

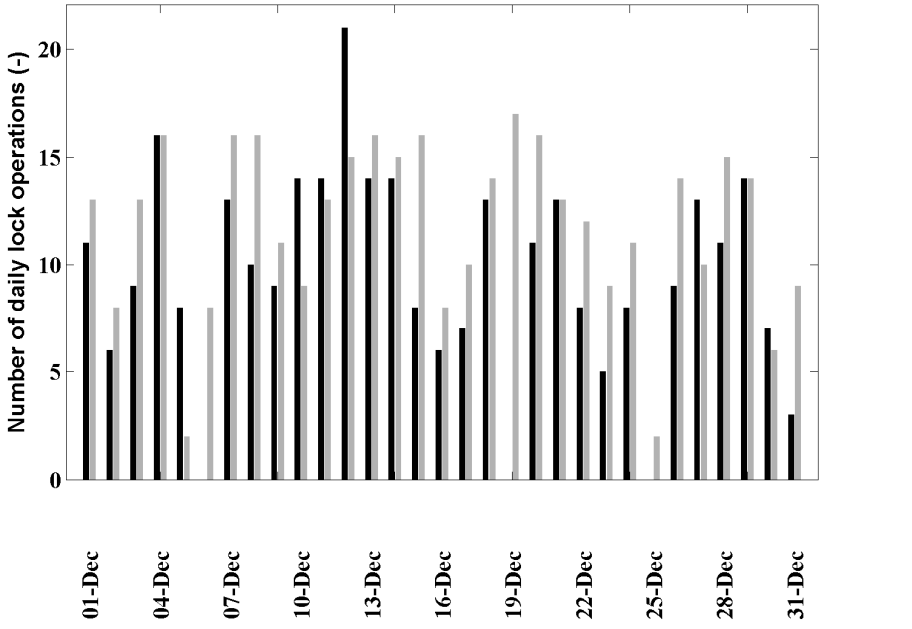


Figure 23 : Illustration de la technique de détection de bassinées à Cuinchy.

La figure 24 présente quant à elle les résultats pour les bassinées de l'écluse de Fontinettes, avec en trait noir le nombre de bassinées relevé et en gris l'estimation du nombre de bassinées. Dans ce cas, l'erreur entre le nombre réel de bassinées et le nombre estimé ne présente pas de tendance très nette. Par contre, cette erreur est en générale inférieure à celle sur Cuinchy. Cette conclusion est conforme à ce qui pouvait être attendu car l'occurrence des bassinées à Fontinettes sont beaucoup plus marquées sur les données mesurées.

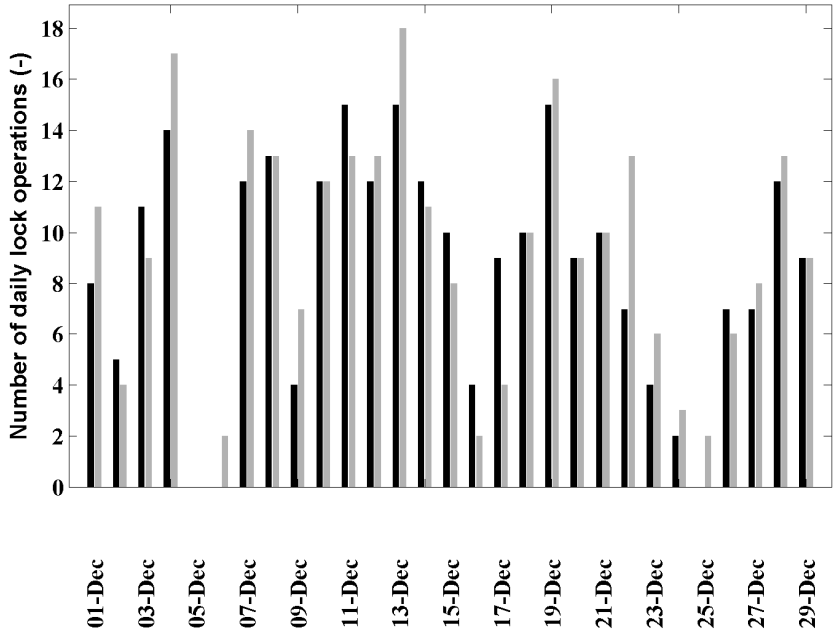


Figure 24 : Illustration de la technique de détection de bassinées à Fontinettes.

Les résultats obtenus peuvent également être consolidés en comparant le nombre estimé de bassinées détectées à Fontinettes avec celui à Cuinchy. Pour cela, il faut émettre l'hypothèse que la majorité des bateaux empruntent les deux écluses au cours de la même journée. Cette hypothèse ne souffre pas *a priori* d'une très grande incertitude.

En se basant sur les modèles des ouvrages et l'algorithme de détection des bassinées, un modèle volume est proposé afin de représenter la dynamique de chaque bief sur une période de temps de plusieurs heures. L'écart de débit entre deux instants est défini par :

$$\frac{dV}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t) - q_{evap}(t) + q_{runoff}(t) + q_{pre}(t) + q_{gw}(t) + q_{ant}(t) \quad (10)$$

où V est le volume, $q_{in}(t)$ la somme des débits entrants dans le bief, $q_{out}(t)$ la somme des débits sortants, q_{evap} la perte d'eau due à l'évapotranspiration, q_{runoff} les débits liés aux écoulements naturels, q_{pre} la contribution des précipitations, q_{gw} les débits correspond aux échanges possibles avec les eaux souterraines, et finalement q_{ant} les débits d'origine anthropiques. Lorsque tous les phénomènes hydrologiques sont inconnus, ils peuvent regroupés dans un seul terme $q_u(t)$, tel que :

$$q_u(t) = -q_{evap}(t) + q_{runoff}(t) + q_{pre}(t) + q_{gw}(t) + q_{ant}(t) \quad (11)$$

En déterminant la différence de volumes entre deux instants consécutifs, il est possible d'estimer la contribution des débits non contrôlés :

$$q_u(k) = \frac{V(k) - V(k-1)}{\Delta T_m} - \sum_{l=1}^{\Delta T_m / \Delta T} q_{in}(l) + \sum_{l=1}^{\Delta T_m / \Delta T} q_{out}(l) \qquad (12)$$

avec ΔT_m la période de temps du modèle et ΔT celle des données mesurées.

Cette méthodologie a été appliquée au bief CFr sur la période de février 2009 afin d'estimer l'importance des débits non contrôlés et de pouvoir les caractériser. Les débits contrôlés sont déterminés à partir des modèles des vannes, du nombre de bassinées et des volumes de chaque écluse. L'estimation des débits journaliers non contrôlés est représentée sur la figure 25 en trait noir continu. L'incertitude associée à la détermination de chaque débit non contrôlé est représentée en gris. Elle est déterminée à partir de l'incertitude associée à chaque modèle.

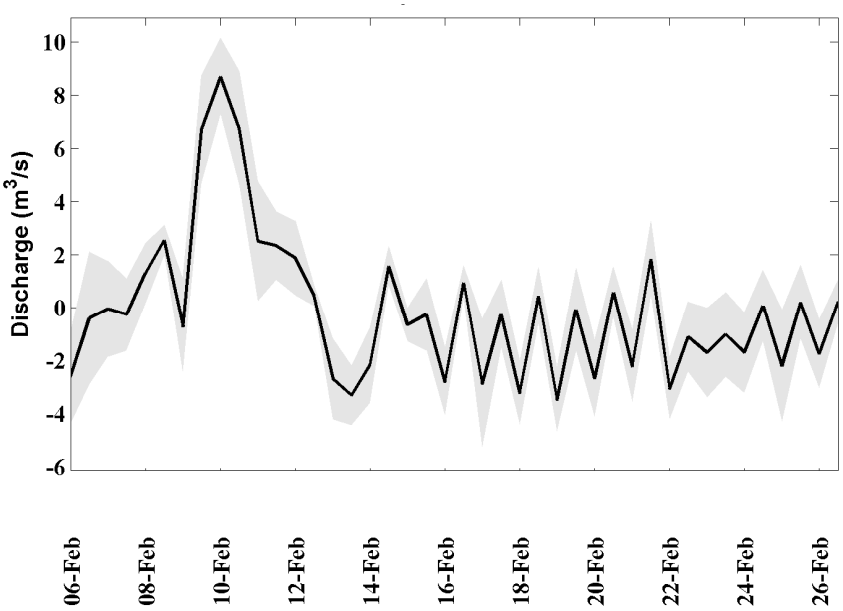


Figure 25 : Estimation des débits non contrôlés et les incertitudes associées.

Les périodes de navigation et de nuit ont par la suite été étudiées de manière séparée. Durant la nuit, il n'y a pas de navigation et donc les incertitudes liées aux volumes provenant des bassinées sont réduites. La figure 26 illustre les résultats obtenue en différenciant les deux périodes, avec en trait noir les débit incontrôlés le jour et en trait gris les débit incontrôlés la nuit. Les incertitudes sont représentées sous la forme d'enveloppes entourant les courbes.

Sur cet épisode, il est possible de constater qu'une contribution importante a eu lieu le 10 février. Il est probable que cet apport d'eau provienne d'un épisode de pluie intense. D'autre part, les débits non contrôlés la nuit sont généralement positifs à l'exception du 5 et 6 février. Ce phénomène est cohérent avec les observations puisque le bief CFr a tendance à se remplir la nuit. Les résultats obtenus démontrent que les débits non contrôlés ont une influence significative sur l'état et la dynamique des biefs de voies navigables.

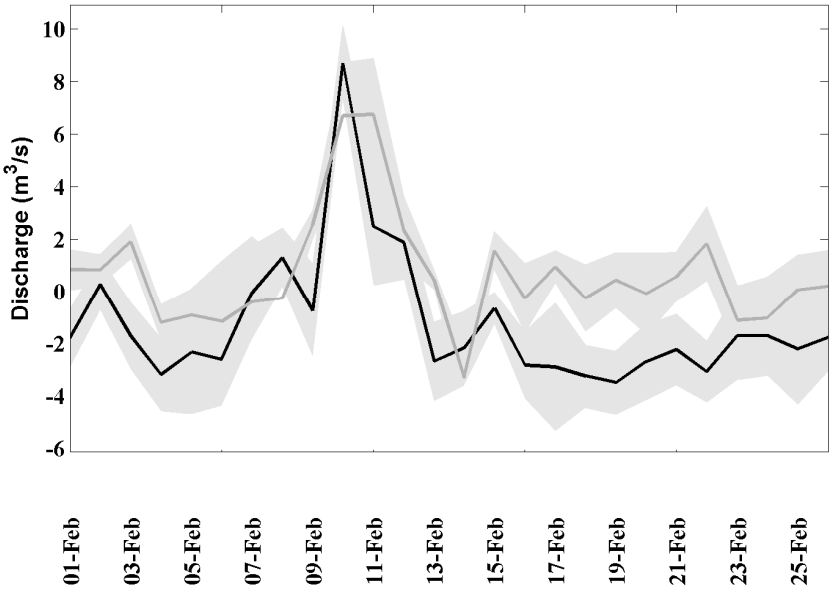


Figure 26 : Estimation des débits non contrôlés durant le jour et la nuit avec les incertitudes associées.

Cette méthodologie est générique et peut être appliquée à tous les biefs. Elle requiert cependant la disponibilité de données fiables. L'incertitude associée à l'estimation des débits non contrôlés peut être réduite en fonction de la précision des modèles de chaque ouvrage et de l'amélioration de la connaissance sur les biefs étudiés. Finalement, cette approche permet de caractériser statistiquement les débits non contrôlés. Il serait alors nécessaire de les caractériser sur des périodes connues en fonction de la disponibilité des données, de tenter d'en dégager une dynamique liée par exemple à une saisonnalité, puis de tenter de proposer des hypothèses quant aux possibles impacts du changement climatique sur ces débits non contrôlés. Il reste cependant possible d'utiliser les méthodes et outils proposés pour estimer quel aurait été l'impact d'un évènement climatique sur des biefs de voies navigables en rejouant des scénarios basés sur des données passées (Horvàth *et al*. 2016, Duviella *et al*. 2014b).

Etude de l'impact du changement climatique basé sur le modèle volumique de biefs

Les données sélectionnées correspondent au bief CFr pour l'année 2010. La mise en œuvre des outils développés permettent d'estimer les volumes d'eau contrôlés journaliers provenant de l'activation des écluses de Cuinchy et de Fontinettes. Ces volumes d'eau sont représentés sur la figure 27.a comme la différence entre les volumes apportés par l'écluse de Cuinchy et les volumes retirés par l'activation de l'écluse de Fontinettes. Les contributions volumiques journalières de la vanne de Cuinchy et de la vanne Porte de Garde sont représentées respectivement sur la figure 27.b et figure 27.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 *a priori* manœuvrées qu'à de rares occasions. Finalement, les volumes d'eau non contrôlés journaliers ont été déterminés en utilisant le modèle volumique proposé. Ces volumes d'eau sont représentés sur la figure 27.d.

Pour obtenir une information sur le niveau journalier du CFr, le profil moyen du bief est considéré. Ce niveau journalier est représenté sur la figure 28.a en trait rouge discontinu. Il est ensuite comparé au niveau journalier correspondant à la moyenne journalière des mesures de niveau du CFr qui est représenté 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. A partir de l'erreur moyenne sur les niveaux de l'année 2010, il est possible de calculer l'erreur moyenne sur les volumes de l'année 2010. Celle-ci correspond à environ 26 000 m^3, soit l'équivalent une bassinée à Fontinettes (voir figure 28.b). Il est alors possible de conclure que la méthodologie d'estimation des volumes contrôlés et non contrôlés conduit à un modèle fiable du comportement du bief CFr en période de fonctionnement normale.

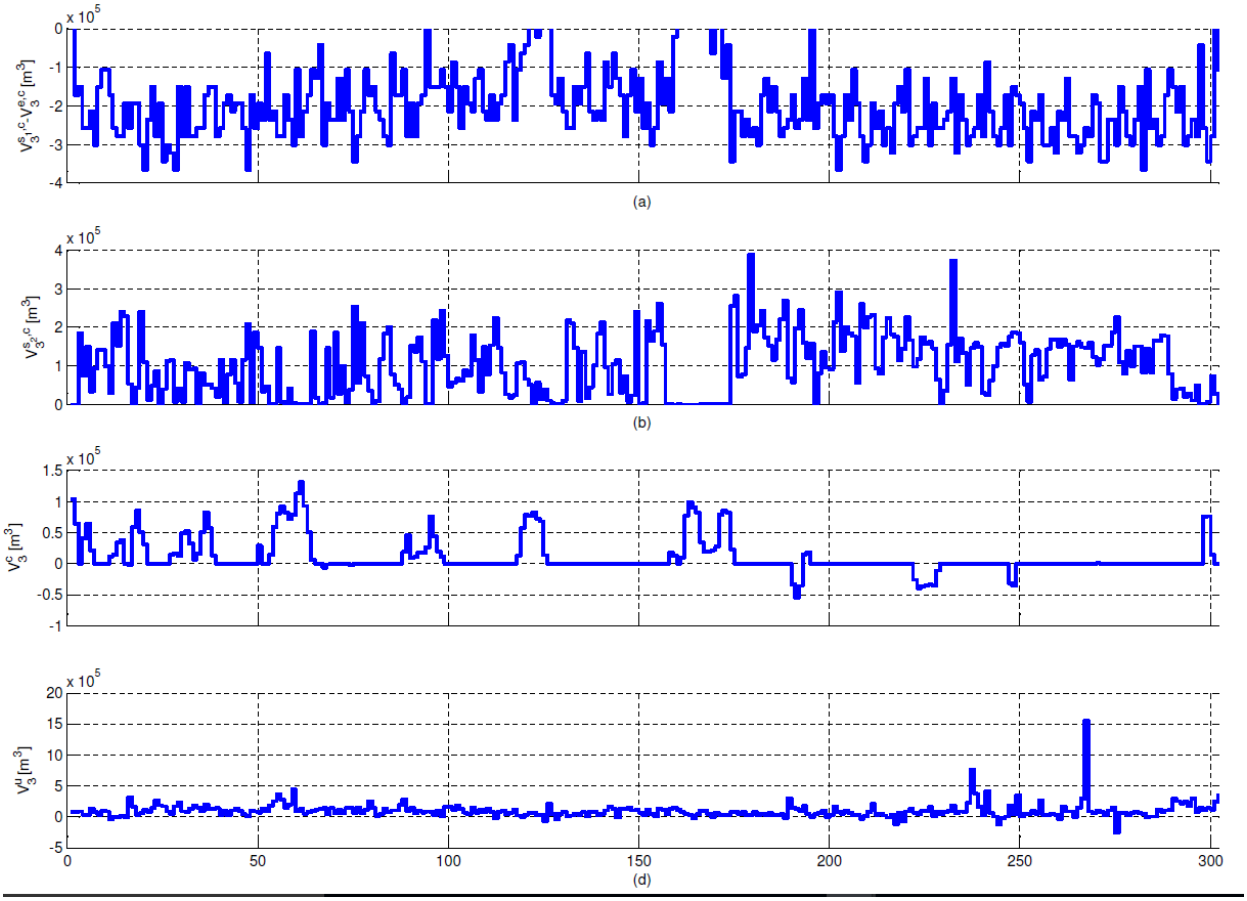


Figure 27 : Volumes d'eau contrôlés provenant de l'activation (a) des écluses, (b) de la vanne de Cuinchy, (c) de la Porte de Garde et (d) volumes d'eau non contrôlés pour l'année 2010.

La construction d'un scénario d'étiage est réalisée à partir des données issues du projet Explore2070, et en particulier de la cartographie de la région Nord-Pas de Calais disponible sur internet. Les fiches sur les sites en amont les plus proches du bief CFr sont utilisés. Les prévisions disponibles sur le débit de la rivière Laquette à Witternesse, et de la Lys à Delettes correspondent respectivement à un pourcentage de baisse de 29 % et 23 %. Ces deux rivières peuvent réalimenter le bief par l'intermédiaire de la Porte de Garde.

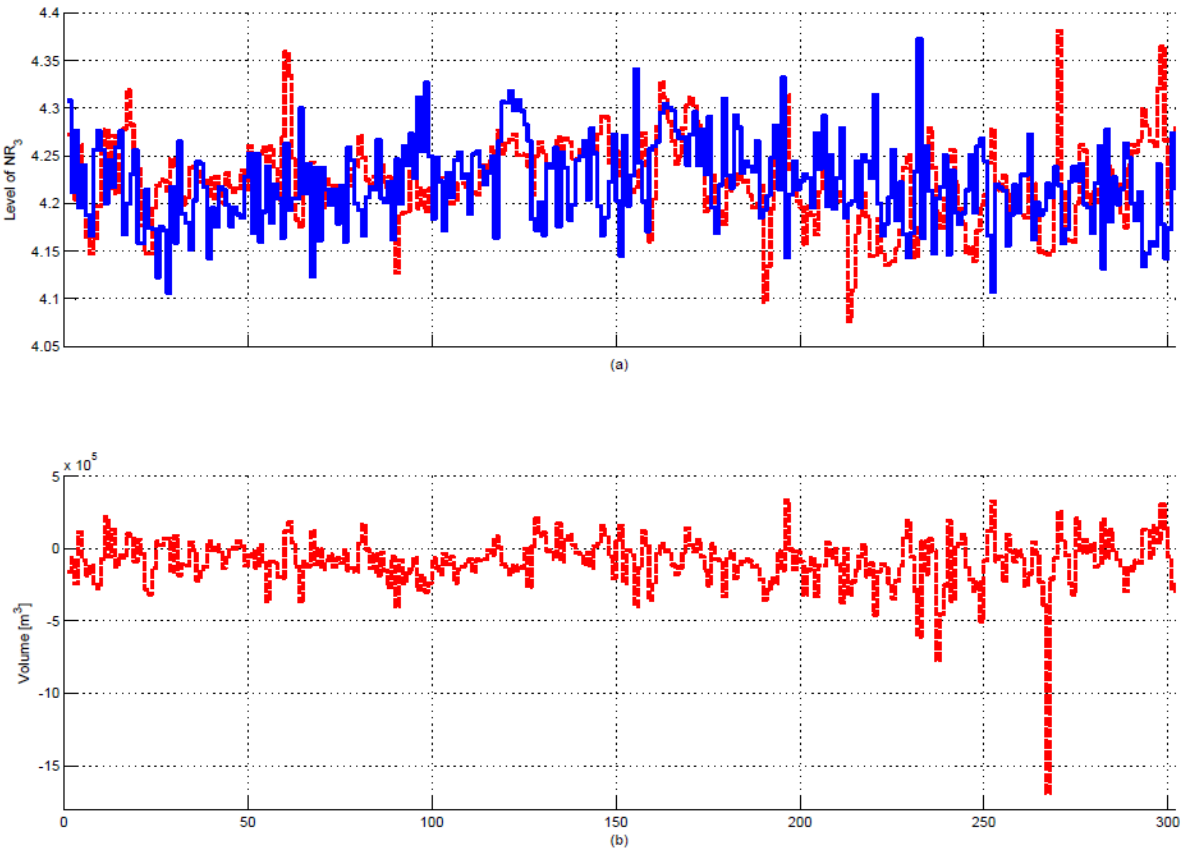


Figure 28 : (a) Niveaux moyens du CFr pour l'année 2010, (b) erreur sur le volume.

Le scénario défini correspond à une diminution de 25 % des volumes d'eau disponibles au niveau de la Porte de Garde sans toutefois diminuer les volumes non contrôlés pouvant provenir du déversement d'autres rivières naturelles. Il est supposé que les volumes d'eau contrôlés provenant de l'amont du réseau ne sont pas impactés par une baisse dans ce scénario. Cette hypothèse serait certainement erronée en considérant les sources d'alimentation de l'ensemble du réseau. Le niveau d'eau du CFr en situation normale provenant du modèle, est représenté sur la figure 29 en trait bleu continu. Sur cette figure sont également indiqués le NNN et les niveaux correspondants aux NBN et NHN définissant le rectangle de navigation. Le niveau d'eau en période simulée d'étiage provenant du modèle est représenté en trait rouge discontinu.

Le scénario d'étiage proposé est basé sur les prévisions du modèle du projet Explore2070. Il reste cependant très optimiste dans le sens où les apports d'eau non contrôlés et les apports d'eau contrôlés provenant de l'amont du bief CFr devraient être également 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.

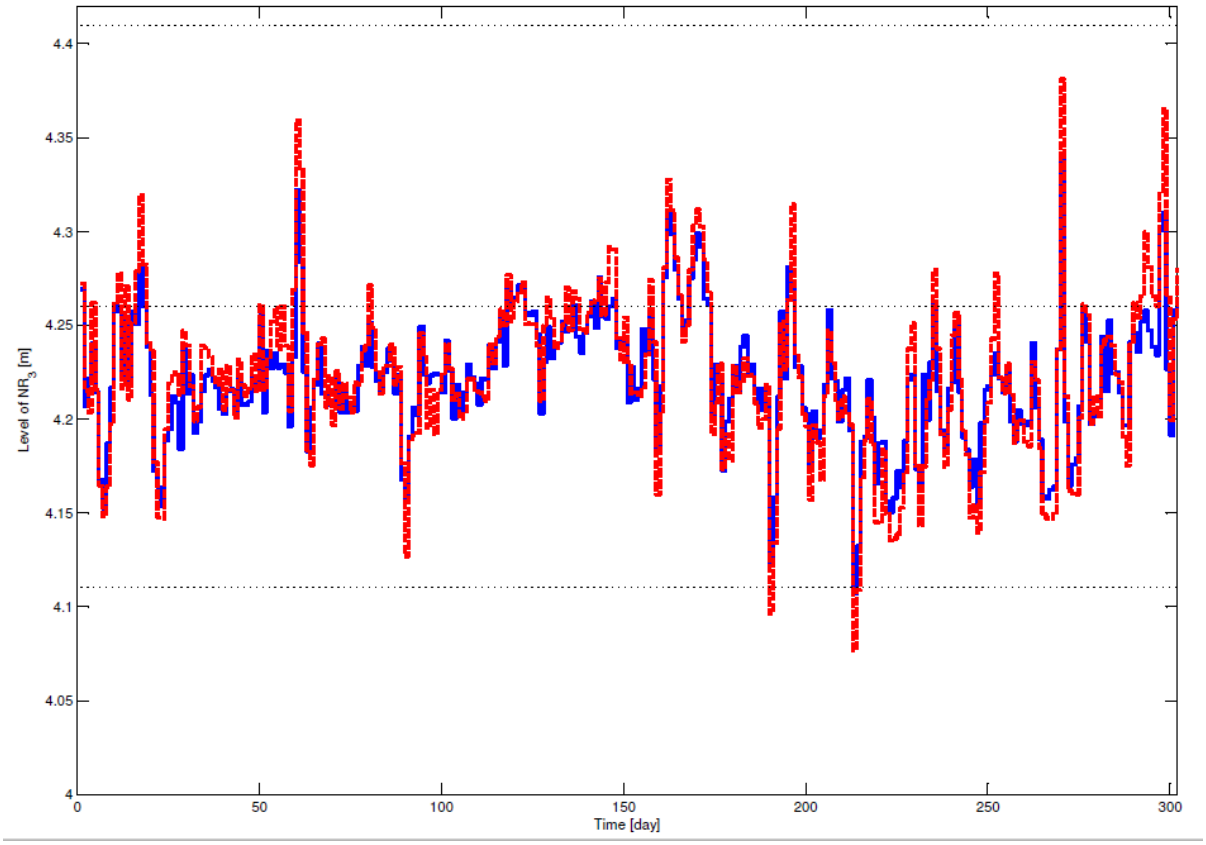


Figure 29 : Niveaux d'eau du CFr en situation normale (trait bleu continu) et en période d'étiage simulée (trait rouge discontinu).

Ces résultats indiquent qu'une baisse de la ressource en eau disponible conduira à des contraintes plus importantes pour la gestion des voies navigables en période d'étiage. Ces résultats de simulation 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 lors de ces deux journées.

Cet exemple est intéressant, puisqu'il montre que des informations sur une augmentation ou une diminution de la ressource en eau disponible sont nécessaires mais pas suffisantes dans la mesure où les outils développés ne tiennent pas compte des modifications que pourraient apporter les gestionnaires sur les stratégies de gestion. Pour tenter d'y apporter une réponse, un outil d'optimisation basé sur le modèle intégré de réseaux de voies navigables a été développé.

Modèle intégré de réseaux de voies navigables

Un modèle intégré de réseaux de voies navigables est proposé dans (Duviella *et al*. 2014a). La construction de ce modèle bénéficie des méthodologies de modélisation de biefs qui viennent d'être détaillées. Sur la figure 30 sont représentés les éléments du modèle proposé. Chaque bief du réseau, noté NR, est modélisé par un bloc permettant le calcul du bilan volumique en tenant compte des volumes d'eau entrant et sortant du bief qu'ils soient connus, contrôlés ou

incontrôlés. Les volumes non connus peuvent être estimés avec un intervalle de confiance. L'ensemble des blocs représentant les biefs du réseau sont ensuite connectés en fonction de la configuration du réseau (*voir* figure 30.a). Les connections de type confluence et diffluence sont ainsi prises en compte.

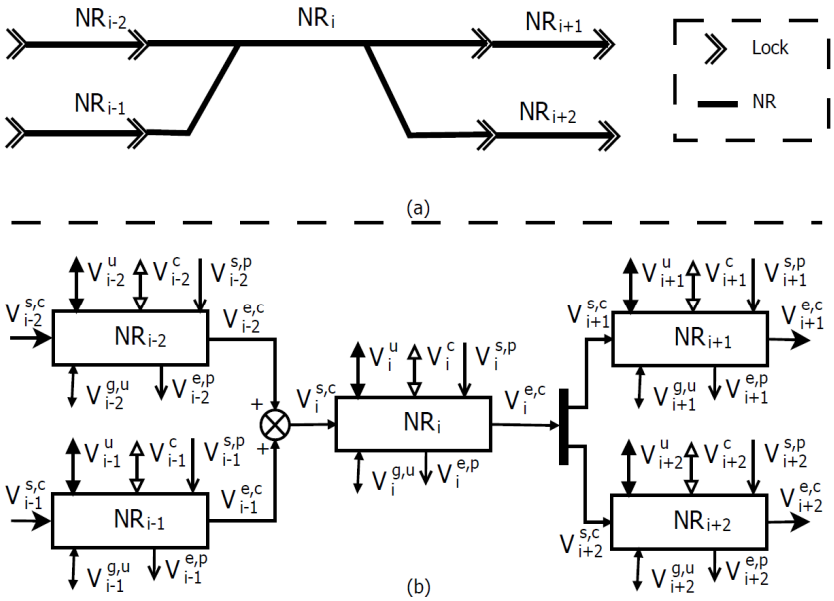


Figure 30 : (a) Schémas d'un réseau de voies navigables, (b) modèle correspondant.

L'ensemble des volumes contrôlés est défini par :

- les volumes contrôlés provenant des NR amont et alimentant le NR_i sont regroupés dans la variable $V_i^{s,c}$ (s : alimentation (*supply*) et c : contrôlé (*controlled*)),
- les volumes contrôlés vidangeant le NR_i sont regroupés dans la variable $V_i^{e,c}$ (e : vidange (*empty*)),
- les volumes contrôlés provenant des prises d'eau pouvant alimenter ou vidanger le NR_i sont regroupés dans la variable V_i^c. Ces volumes sont signés ; *i.e.* positifs si le bief est alimenté, négatifs dans le cas contraire,
- les volumes contrôlés provenant de pompes alimentant le NR_i sont regroupés dans la variable $V_i^{s,p}$ (p : pompe (*pumped*)),
- les volumes contrôlés vidangés par les pompes depuis le NR_i sont regroupés dans la variable $V_i^{e,p}$.

L'ensemble des volumes non contrôlés est défini par :

- les volumes non contrôlés issus des déversements, des pluies, des activités anthropiques, etc., sont regroupés dans la variable V_i^u (u : incontrollé (*uncontrolled*)). Ces volumes sont signés,
- les volumes non contrôlés provenant des échanges avec les eaux souterraines sont regroupés pour le NR_i dans la variable $V_i^{g,u}$ (g : eaux souterraines (*groundwater*)). Ces volumes sont signés.

L'équation caractérisant la dynamique du volume contenu dans le NR_i est défini par :

$$V_i(t) = V_i(t-1) + V_i^{s,c}(t) - V_i^{e,c}(t) + V_i^{c}(t) + V_i^{s,p}(t) - V_i^{e,p}(t) + V_i^{u}(t) + V_i^{g,u} \qquad (13)$$

avec t l'instant courant et t-1 l'instant précédent.

La configuration du réseau est prise en compte lors du calcul des volumes de chaque bief. Pour une confluence, les volumes contrôlés provenant de tous les NR directement en amont alimentant le NR_i sont additionnés. Pour une diffluence, tous les volumes contrôlés qui vidangent le NR_i correspondent à la somme des volumes contrôlés alimentant tous les NR directement en aval. Les volumes contrôlés par les pompes sont calculés de manière identique. Ainsi :

$$\begin{cases} V_i^{s,c}(t) = \sum_{j\in\Omega_i} V_i^{e,c}(t) \\ V_i^{e,c}(t) = \sum_{j\in\Theta_i} V_i^{s,c}(t) \end{cases} \qquad (14)$$

avec Ω_i l'ensemble des indices des NR alimentant le NR_i et Θ_i l'ensemble des indices des NR alimentés par le NR_i.

La qualité du modèle intégré dépend des connaissances sur tous les échanges possibles entre les biefs, avec les affluents et les cours d'eau naturel, avec les eaux souterraines, etc. Cependant, il est possible de regrouper toutes des incertitudes dans les variables caractérisant les volumes non contrôlés. Il est également possible de borner chacune des variables considérées. Les volumes contrôlés provenant de l'occurrence des bassinées dépendent directement de leur nombre sur la période considérée et des volumes d'eau qui transitent à chaque bassinée.

Les modèles intégrés peuvent être facilement implémentés sous l'outil Matlab/Simulink à partir duquel des simulations peuvent être paramétrées et lancées. Ainsi à partir de l'approche de modélisation des réseaux de voies navigables, il est possible de mieux comprendre et de reproduire le fonctionnement des biefs ainsi que leurs interactions. Dans un second temps, des scenarios reproduisant les effets possibles d'une évolution du climat et une augmentation de la demande de navigation peuvent être étudiés. Il est ainsi possible d'étudier la résilience des voies navigables. La résilience est définie comme étant la capacité des voies navigables à garantir les conditions autorisant la navigation et leur faculté à retrouver ces conditions après l'occurrence d'évènements extrêmes.

Dans un troisième temps, des stratégies de répartition optimale de la ressource en eau peuvent être conçues afin de garantir au mieux les conditions de navigation sur l'ensemble des réseaux des voies navigables. L'étude de l'impact du changement climatique sur les réseaux de voies navigables tient alors tout son sens, puisque la génération de scénarios liés à une augmentation ou une diminution de la ressource en eau disponible et accompagnée de la mise en œuvre de stratégies de répartition optimale de la ressource en eau. Dans le cas où il ne serait pas possible d'autoriser la navigation dans au moins un bief du réseau, après avoir optimiser la répartition de la ressource en eau, cela signifierait que le réseau de voies navigables étudié ne peut pas faire face à un événement climatique de cette ampleur.

Etude de l'impact du changement climatique basé sur le modèle intégré

Pour faciliter la conception de stratégies de répartition optimale de la ressource en eau, le modèle intégré proposé est transformé en un graphe de transport (Nouasse *et al*. 2015). Puis, le problème de répartition optimale de la ressource en eau sur le réseau est défini comme un problème d'optimisation de flots.

Les réseaux de voies navigables sont donc modélisés à partir de graphes de transport définis par G=(X, A), avec X l'ensemble des nœuds et A l'ensemble des arcs. Chaque bief de navigation est noté NR_i, avec $i \in \Pi$ où Π représente l'ensemble des biefs. Un bief de navigation NR_i est représenté par un nœud. Les nœuds sont répartis et connectés selon la configuration du réseau. Les échanges d'eau entre les NR_i sont modélisés par des flots selon les arcs existants. Ainsi, à chaque arc α est associé un flot ϕ_α (noté également ϕ_{ij}, avec i l'index du nœud sortant et j l'index du nœud entrant). Il représente la quantité d'eau échangée. Le graphe est complété par deux autres nœuds fictifs ; un nœud source noté O et un nœud puit noté N (*voir* figure 31). Les flots provenant du nœud O caractérisent l'ensemble des volumes d'eau provenant de l'extérieur du réseau, tels que ceux issus des rivières naturelles et des affluents. Les flots vers le nœud N regroupent tous les volumes d'eau sortant du réseau. Les quantités d'eau échangées entre deux biefs dépendent des caractéristiques des ouvrages les séparant. Pour une vanne, le volume d'eau pouvant transiter est calculé comme le débit maximal possible sur la période de temps T_M considérée. Pour une écluse, ce volume est calculé comme le volume du sas de l'écluse multiplié par le nombre de bassinées b sur la période de gestion T_M. Une bassinée correspond au remplissage et à la vidange du sas de l'écluse nécessaire pour le transfert de bateaux. Il est alors possible de borner chaque flot par :

$$l_\alpha \leq \phi_\alpha \leq u_\alpha \qquad (15)$$

avec l_α et u_α les capacités maximale et minimale, respectivement.

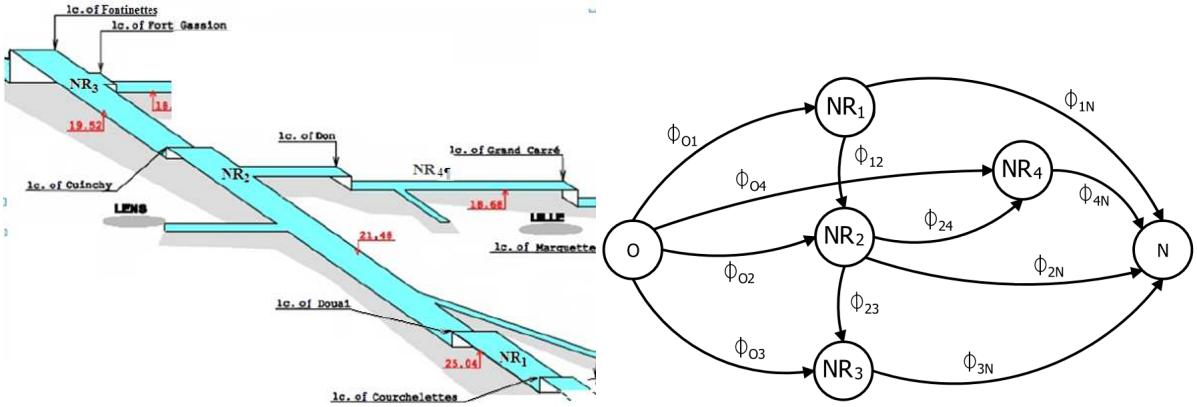


Figure 31 : Sous-réseau de voies navigables et Graphe de transport correspondant.

Comme la gestion des voies navigables consiste à conserver le niveau d'eau de chaque bief proche du NNN et à l'intérieur du rectangle de navigation, il est possible de définir un volume d'eau objectif pour chaque bief. Ce volume est défini comme une capacité (ou une demande) d_i avec $i \in \Pi$. Cette capacité est exprimée en relatif par rapport au volume correspondant au NNN. Ainsi si le niveau du NR_i est égal au NNN, la capacité est d_i=0. Cette capacité est bornée par la relation (16).

$$V_i^{NNN} - V_i^{NHN} \leq d_i \leq V_i^{NNN} - V_i^{NBN} \quad (16)$$

avec V_i^{NNN} le volume correspondant au niveau NNN (identiquement pour NHN et NBN).

La capacité d_i est associée à chaque nœud du graphe. Elle est en mesure d'évoluer au cours du temps en fonction des échanges entre les nœuds. Il s'agit donc d'une capacité dynamique exprimée pour chaque pas de temps k par $d_i(k)$. Une relation exprimant la valeur de cette capacité au cours du temps est définie par :

$$d_i(k) = \phi_{\alpha+}(k) - \phi_{\alpha-}(k) \quad (17)$$

avec $\phi_{\alpha+}(k)$ l'ensemble des flots des arcs entrant dans le nœud i et $-\phi_{\alpha-}(k)$ celui des arcs en sortant, à l'instant k.

La répartition des volumes d'eau entre les nœuds doit être faite en tenant compte des capacités de chaque nœud et arc. Pour ces raisons, un problème d'optimisation sous contraintes (CSP) est défini. L'algorithme correspondant est décrit ci-dessous. Il a pour but de maximiser l'ensemble des flots $\boldsymbol{\phi}$ ($\phi_\alpha \in \boldsymbol{\phi}$), tout en conservant les capacités $d_i(k)$ les plus proches de zéro (NNN), et au moins à l'intérieur des intervalles définis (voir relations 15 et 16). Si la capacité $d_i(k)$ est négative, il est nécessaire d'alimenter le NR_i; et de le vider si elle est positive.

Entrées : graphe G, T_M, b, l_α, u_α, V_i^{NNN}, V_i^{NHN}, V_i^{NBN}
Sorties : $\boldsymbol{\Phi}$, d_i

For ϕ_α, $\alpha \in A$
Ajouter ϕ_α comme variable du CSP avec $[l_\alpha; u_\alpha]$ comme intervalle,

Ajouter d_i comme variable du CSP avec $[V_i^{NNN} - V_i^{NHN}; V_i^{NNN} - V_i^{NBN}]$ comme intervalle,
Ajouter $d_i = \phi_{\alpha+} - \phi_{\alpha-}$, $i \in \Pi$, comme contrainte du CSP
EndFor
Résoudre le CSP pour obtenir les valeurs $\phi_\alpha \in \boldsymbol{\Phi}$ et d_i

---

Cet algorithme a été étendu dans (Nouasse *et al.*, 2016) afin de prendre en compte des priorités sur les flots. En effet, il est parfois nécessaire de privilégier un échange d'eau entre deux NR consécutifs plutôt qu'entre un NR et une rivière naturelle. Les extensions de cet algorithme consistent à intégrer des contraintes fortes puis à les relaxer en fonction de l'obtention d'une solution optimale (plus de détails sont disponibles dans l'article (Nouasse *et al.*, 2016).

Afin de faciliter la mise en œuvre de ces méthodes et outils, un logiciel de simulation a été conçu (Desquesnes *et al.*, 2016). Il permet de modéliser les interactions entre les biefs de réseaux de voies navigables, de prendre en compte leurs caractéristiques, de simuler leur fonctionnement, et d'optimiser la répartition de la ressource en eau à partir des algorithmes proposés. Ce logiciel offre une interface utilisateur permettant de modéliser un réseau de voies navigables. Cette interface utilise HTML 5, CSS et trois frameworks Javascript : jointJS pour la gestion des diagrammes, JQuery pour la gestion des évènements utilisateurs et Bootstrap pour les différents éléments graphiques : boutons, barres de progression, etc.

La figure 32 illustre la modélisation du sous-réseau de voies navigables présentées sur la figure 31. L'utilisateur a la possibilité d'intégrer un rectangle bleu ciel dans la fenêtre du logiciel. Ce rectangle représente un bief (NR). Chaque rectangle bleu ciel peut alors être paramétré avec :

- les dimensions du bief - longueur, largeur et profondeur,
- les limites définissant le rectangle de navigation,
- les débits provenant des vannes contrôlées qui alimentent ou vident le bief à partir des rivières naturelles, *i.e.* en dehors du réseau considéré (ils apparaissent dans un rectangle bleu foncé au-dessus du rectangle bleu ciel),
- les débits non contrôlés provenant de déversements dans ou en dehors du bief (ils apparaissent dans un rectangle rouge au-dessus du rectangle bleu ciel),
- le volume des sas de chaque écluse, en amont et en aval du bief,
- les débits des ouvrages, vannes et barrages, situés entre les biefs.

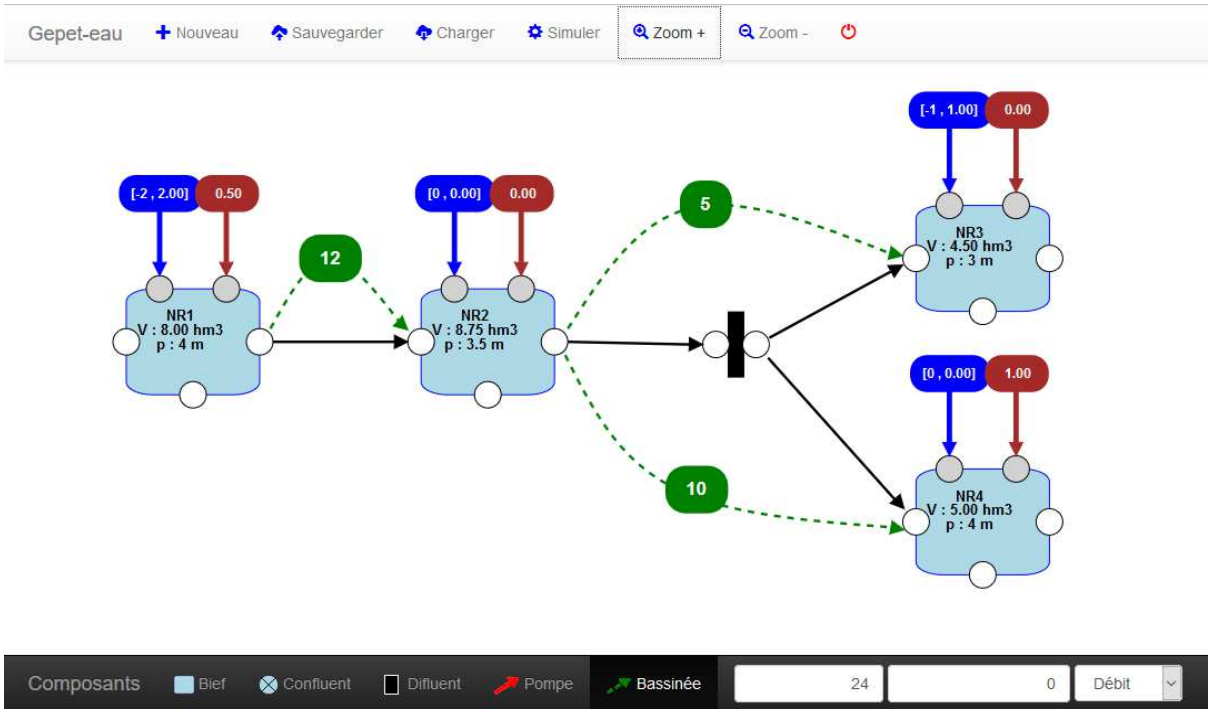


Figure 32 : Interface du logiciel de simulation de réseaux de voies navigables.

Les arcs sont représentés par des flèches noires pouvant relier les rectangles (NR) entre eux selon la configuration du réseau. Pour simplifier la représentation de ces réseaux, deux autres éléments peuvent être ajoutés ; il s'agit de la représentation d'un confluent et d'un diffluent. Les flèches vertes permettent de spécifier le nombre de bassinées entre deux biefs. Il est également possible de modéliser les pompes de relevage par l'intermédiaire de flèches rouges reliant, par exemple, un bief aval à un bief amont.

Il est possible de définir un pas de temps de simulation en heures (en bas à gauche). Ce pas de temps correspond à la période T_M. Finalement, un pourcentage correspondant à la ressource disponible peut être réglé afin de simuler des périodes d'étiage (manque d'eau) ou des

périodes de montée des eaux. Ainsi des scénarios issus d'études sur l'impact du changement climatique peuvent être simulés. Il est alors plus aisé de considérer les résultats du projet Explore 2070. Une notice d'explication du logiciel est fournie en Annexe 1.

Lors du lancement d'une simulation, l'ensemble des contraintes issues du graphe de transport est généré en tenant compte du nombre de bassinées, du temps de simulation, et de la disponibilité de la ressource. A partir de ces contraintes, le problème d'optimisation est résolu en utilisant le solveur Open Source Java Choco (Jussien *et al.*, 2008). Si une solution est trouvée, celle-ci est représentée sur l'interface au niveau de chaque arc, soit en débit soit en volume. Lorsqu'aucune solution n'est trouvée, un message l'indique au niveau de l'interface. Il est alors nécessaire de relaxer certaines contraintes.

Plusieurs cas d'études ont été considérés et simulés (Nouasse *et al.*, 2015 ; Nouasse *et al.*, 2016). Le logiciel qui a été développé permet la modélisation simple et rapide de réseaux de voies navigables, puis de la définition de scénarios de fonctionnement. Il est ainsi possible d'étudier les impacts d'événements liés au changement climatique ou l'augmentation de la demande de navigation. La résilience de ces réseaux face à ces situations peut alors être étudiée.

Afin d'illustrer le fonctionnement du logiciel développé et montrer ses capacités à étudier des scénarios de fonctionnement extrêmes, un sous-réseau des voies navigables du Nord Pas de Calais est considéré. Il s'agit des NR2, NR3 et NR4 représentés sur la Figure 31. Ils se situent entre la ville de Douai, Arques et Lille. Le bief NR1 du sous-réseau de la Figure 31 n'est pas pris en compte puisqu'il s'agit d'un bief de transfert qui offre peu d'intérêt pour l'illustration du fonctionnement du logiciel et la description des résultats obtenus. Les dimensions des biefs NR2, NR3 et NR4 sont fournies dans le Tableau 1.

NR	2	3	4
Longueur	56 859	42 300	25 694
Largeur	41,8	52	45,1
Profondeur - NNN	2,37	4,3	2,7
Limite haute – NHN	0,3	0,3	0,3
Limite basse – NBN	0,2	0,2	0,2

Tableau 1 : Dimensions des biefs NR_i et limites de navigation définissant le rectangle de navigation en [m].

Le NR_2 est équipé en amont de l'écluse de Douai et d'une vanne d'alimentation au niveau de l'écluse des Augustins. Il est alimenté par au moins quatre rivières naturelles de manière incontrôlée. Il permet l'alimentation du NR_3 grâce à l'écluse et la vanne de Cuinchy situées en aval. De manière identique, il est lié au NR_4 par l'écluse et le barrage de Don situés également en aval. Le bief NR_3 est alimenté de manière incontrôlée par les rivières Le Surgeon et Fontaine de Bray et de manière contrôlée au niveau de la vanne Porte de Garde située à Aire-sur-la-Lys. L'écluse de Fontinettes qui se situe en aval du NR_3 a une très importante consommation de volume d'eau compte tenu de ses dimensions. Finalement le bief NR_4 est alimenté de manière incontrôlée par des déversements réguliers. Il est équipé par l'écluse et la vanne de Grand Carré près de Lille. Les caractéristiques de ces ouvrages, affluents et prises

d'eau sont récapitulées dans le Tableau 2 (les données sont issues des dossiers d'ouvrages de VNF). Pour les écluses, il s'agit du volume correspondant à une bassinée. Un intervalle de fonctionnement est fourni pour les autres ouvrages contrôlés. Pour les affluents et prises d'eau, une valeur correspondant à un débit moyen relevé est donnée. Les caractéristiques de l'écluse et des ouvrages en aval du NR_2 ne sont pas spécifiées car elles sont identiques aux caractéristiques des écluses et des ouvrages en amont des NR_3 et NR_4.

NR	2	3	4
Ecluse Amont	4 200*	3 523	5 904
Ecluse Aval	-	23 000	7 339
Ouvrage Amont	[1,1 ; 1,5]	[1 ; 1,9]	[0,8 ; 1,2]
Ouvrage Aval	-	-	-
Affluents	6,56	0,63	1,2

Tableau 2 : Caractéristiques des écluses et ouvrages du sous-réseau étudié avec les volumes des écluses exprimés en [m^3], et les débits des ouvrages en [m^3/s] (* le volume de la bassinée de l'écluse de Douai est approximée afin de pouvoir illustrer de la méthodologie).

Le graphe de transport permettant de modéliser le sous-réseau étudié est représenté sur la figure 33. Les données fournies permettent de calculer les contraintes associées à chaque arc et nœud en fonction du nombre de bassinées de chaque NR, *i.e.* b_1, b_2 et b_3, et de la période T_M de la manière suivante :

- $7{,}66\times T_M+4\,200\times b_1 \leq \phi_{O2} \leq 8{,}06\times T_M+4\,200\times b_1$,
- $0 \leq \phi_{2N} \leq 0$,
- $1\times T_M+3\,523\times b_2 \leq \phi_{23} \leq 1{,}9\times T_M+3\,523\times b_2$,
- $0{,}8\times T_M+5\,904\times b_3 \leq \phi_{24} \leq 1{,}2\times T_M+5\,904\times b_3$,
- $0{,}63\times T_M \leq \phi_{O3} \leq 5{,}63\times T_M$,
- $1{,}2\times T_M \leq \phi_{O4} \leq 1{,}2\times T_M$,
- $23\,000\times b_2 \leq \phi_{3N} \leq 5\times T_M+23\,000\times b_2$,
- $7\,339\times b_3 \leq \phi_{4N} \leq 7\,339\times b_3$,
- $-713\,012 \leq d_2 \leq 473\,541$,
- $-659\,880 \leq d_3 \leq 439\,920$,
- $-347\,640 \leq d_4 \leq 231\,760$.

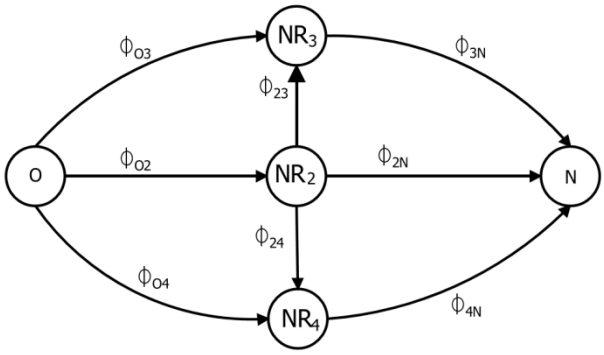


Figure 33 : Graphe de transport du sous-réseau Douai-Arques-Lille.

Le réseau est implémenté sur l'interface du logiciel. Chaque élément de l'interface est ensuite renseigné à partir des données fournies dans les Tableaux 1 et 2. Ces données sont utilisées afin de générer automatiquement l'ensemble des contraintes du problème d'optimisation.

Il est ensuite nécessaire de définir des scénarios en spécifiant le pas de temps de simulation en heures T_M, le nombre de bassinées b_i entre les différents biefs NR_i, et finalement l'état de la ressource disponible. Les paramètres des scénarios sont repris dans le Tableau 3. Le scénario 1 est défini avec une période T_M = 14 heures qui correspond à la durée journalière de navigation usuelle, un nombre de bassinées entre NR_2 et NR_3 et entre NR_3 et NR_4 de 10 et 9 respectivement, et finalement une disponibilité de la ressource en eau totale.

Scénario	1	2	3	4
T_M [h]	14	24	14	14
Bassinées b_1	19	28	19	19
Bassinées b_2	10	15	10	10
Bassinées b_3	9	13	9	9
Ressource %	100	100	60	160

Tableau 3 : Scénarios de fonctionnement du sous-réseau Douai-Arques-Lille.

Le scénario 2 simule une augmentation de la période de navigation T_M = 24 heures accompagnée d'une demande en navigation accrue. Une période d'étiage est simulée avec le scénario 3 puisqu'uniquement 60% de la ressource est disponible. Finalement, le scénario 4 permet de considérer une période de montée des eaux avec 60% de plus des débits non contrôlés alimentant le sous-réseau. Les Figures de 34 à 37 sont des captures d'écran montrant les résultats pour chacun des scénarios simulés.

Ces résultats sont repris en détail dans le Tableau 4 afin d'être mieux analysés. Chaque volume d'eau qui transite par chaque arc du graphe de transport sur les périodes de gestion définies est indiqué en milliers de m^3. Dans le Tableau 4 sont également indiqués les volumes résiduels au niveau de chaque nœud (NR).

Scénario	1	2	3	4
ϕ_{O2}	466	779	311	698
ϕ_{2N}	0	0	0	0
ϕ_{23}	86	160	86	111
ϕ_{24}	93	145	93	114
ϕ_{O3}	32	54	19	51
ϕ_{O4}	60	104	36	97
ϕ_{3N}	230	345	230	230
ϕ_{4N}	66	95	66	66
d_2	-287	-473	-132	-473
d_3	112	130	125	68
d_4	-87	-154	-64	-144

Tableau 4 : Volumes d'eau en [10^3 × m3] transitant par chaque arc du graphe de transport (Figure 33) et restant dans chaque bief pour chacun des quatre scénarios définis.

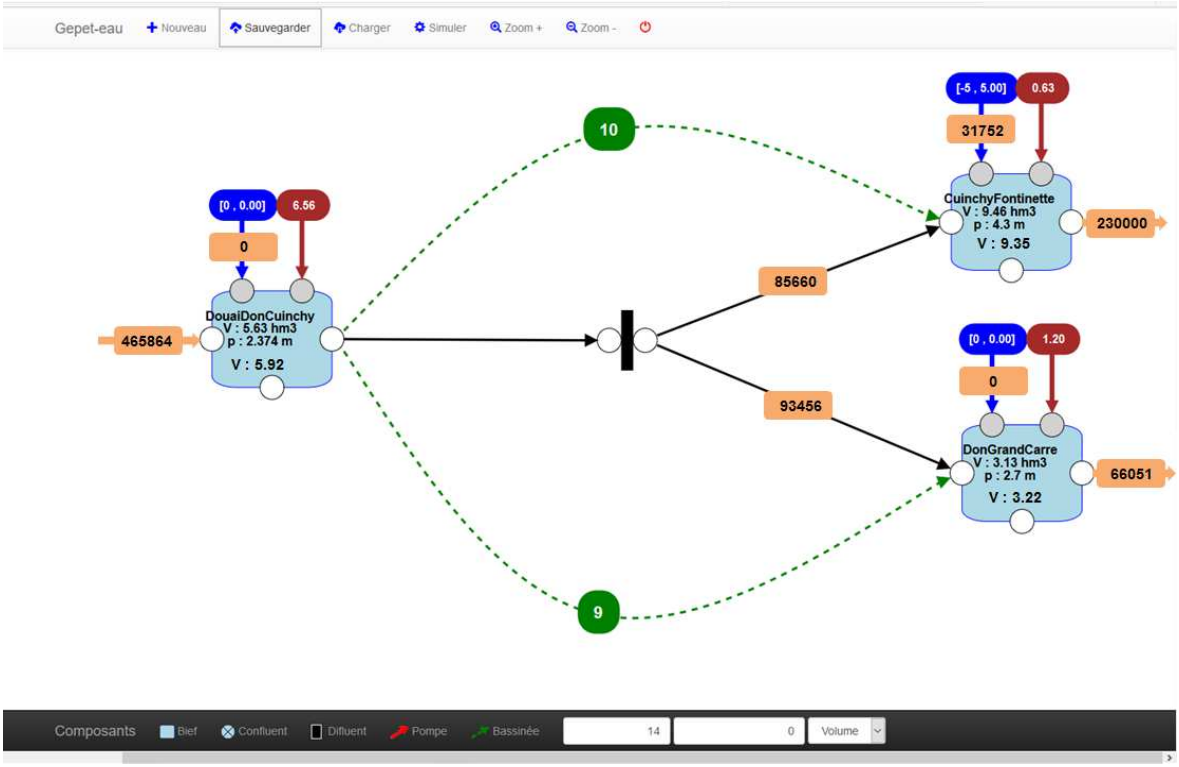


Figure 34 : Résultats du scénario 1.

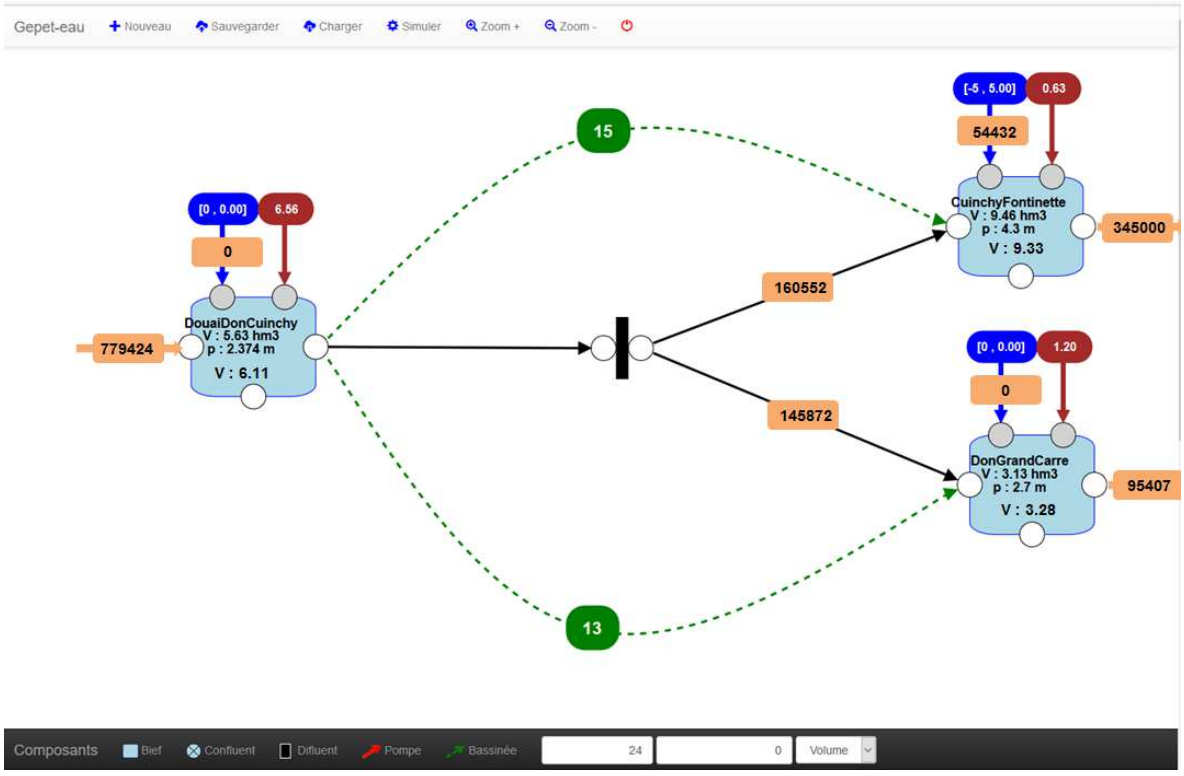


Figure 35 : Résultats du scénario 2.

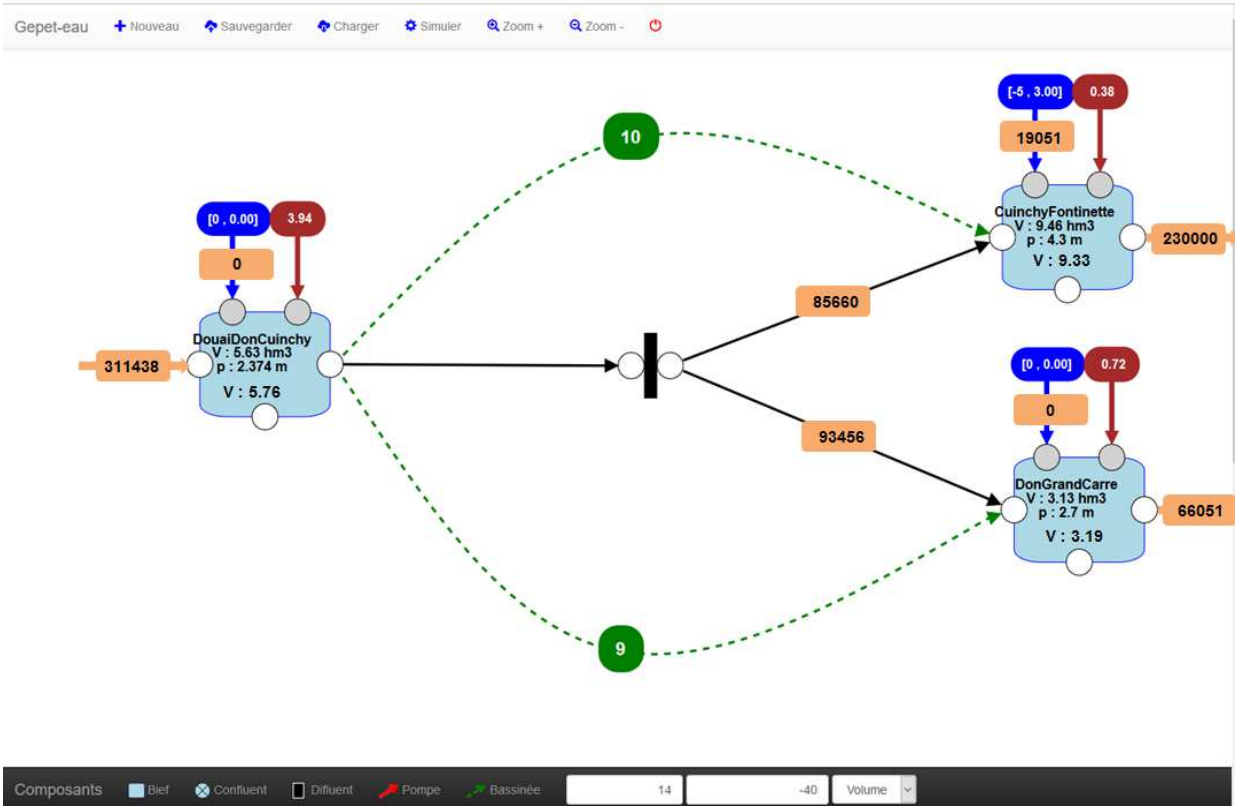


Figure 36 : Résultats du scénario 3.

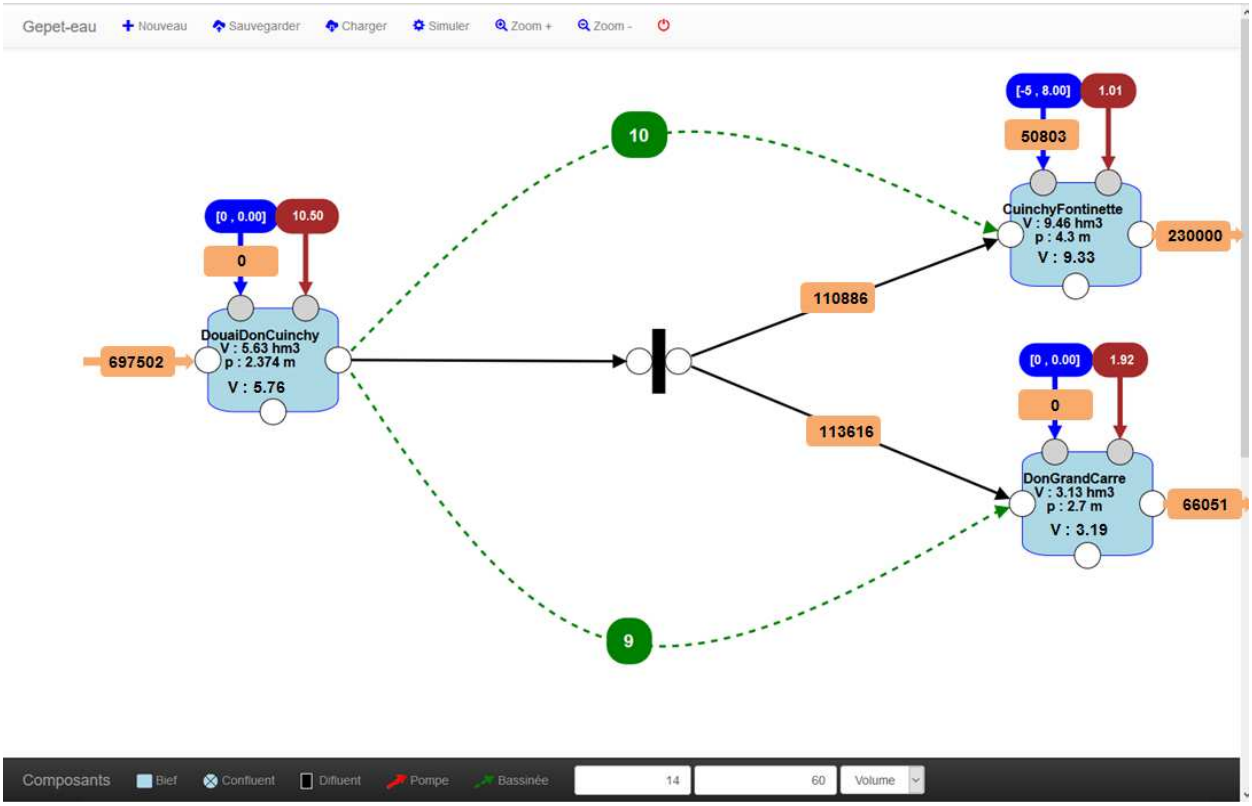


Figure 37 : Résultats du scénario 4.

La répartition des volumes d'eau selon les scénarios permet toujours la navigation avec des volumes importants stockés dans les biefs NR_2 et NR_4, et des volumes d'eau en manque dans le bief NR_3. En effet, les biefs NR_2 et NR_4 n'ont pas une capacité importante d'évacuation des volumes d'eau, et le bief NR_3 n'a pas une grande capacité d'alimentation et est équipé d'une écluse en aval qui consomme une grande quantité d'eau à chaque bassinée.

Pour ces raisons, en période d'augmentation de la demande de navigation (scénario 2), les biefs NR_2 et NR_3 sont les plus critiques. En période d'étiage (scénario 3), c'est le bief NR_3 qui présente le plus de risque de ne pas garantir les conditions de navigation. Finalement, en période de montée des eaux (scénario 4), le bief NR_2 présente le plus de risques à cause de sa faible capacité d'évacuation. L'étude de la résilience du sous-réseau est réalisée de cette manière. Il est aussi possible d'augmenter davantage le nombre de bassinées, et d'accroître l'amplitude des périodes d'étage et de crue, tout en considérant des scénarios réalistes. Par ailleurs, l'utilisation de l'algorithme d'optimisation permet d'augmenter la capacité du sous-réseau de voies navigables à résister aux phénomènes extrêmes.

Au final, l'architecture de conduite permettant la prise en compte à la fois des outils de gestion des volumes et de gestion des débits a été utilisée dans (Nouasse *et al*. 2016b). L'intérêt de l'utilisation conjointe de ces outils réside dans le fait que les outils de gestion des volumes permettent une répartition de la ressource en eau sur le réseau de voies navigables en spécifiant les consignes en terme de volumes ou de débits associées à chaque ouvrage, puis les outils de gestion des débits sont mis en œuvre afin d'assurer le respect de ces consignes en rejetant le cas échéant les perturbations. Le détail de cette contribution se trouve dans l'article de la conférence également fourni en Annexe 2.

CONCLUSION

Le projet GEPET-Eau a contribué aux objectifs du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, en se focalisant sur l'étude des voies navigables et de l'impact du changement climatique. Il s'est orienté sur un axe de recherche innovant en Automatique et Informatique soutenu par la construction d'un consortium regroupant des chercheurs et des gestionnaires. Ce document montre la consistance des contributions scientifiques et techniques réalisées au cours de ce projet. Les méthodes et outils développés sont génériques et peuvent être appliqués à d'autres biefs de voies navigables. Les bases d'un outil d'étude de la résilience des réseaux de voies navigables dans un contexte de changement climatique et d'optimisation de la ressource en eau ont été développées et implémentés sous la forme d'un logiciel. Les fonctionnalités de ce logiciel devront encore être développées. La synthèse des travaux qui a été réalisée n'est cependant pas totalement exhaustive, puisque certaines contributions du projet GEPET-Eau n'ont pas été détaillées, bien que les algorithmes de régulation et de détection de fautes soient requis pour une gestion efficiente de la ressource en eau des réseaux de voies navigables. Ces travaux sont fournis en Annexe et nous invitons les lecteurs à s'y référer. Par ailleurs, le projet GEPET-Eau a permis d'accumuler de la connaissance sur le réseau de voies navigables du Nord Pas de Calais avec la production de nombreux dossiers d'ouvrages et de cartographies du réseau.

Les résultats du projet GEPET-Eau a conduit à une reconnaissance au niveau régional qui se traduit notamment par une participation à la démarche Cercle[8], au niveau national et européen grâce au développement de collaborations entre laboratoires de recherche, et au niveau international par la publication de plusieurs communications, articles scientifiques et organisations de sessions invitées.

Le projet GEPET-Eau présente également l'intérêt d'avoir pu associer des laboratoires de recherche et des gestionnaires. Ce travail collaboratif doit se poursuivre et se renforcer afin d'améliorer les contributions scientifiques et techniques en cohérence avec les attentes des gestionnaires. Il est nécessaire de réfléchir à la mise en place d'actions permettant de renforcer davantage ces collaborations. Le développement du logiciel conçu pourra être ainsi poursuivi. Les perspectives de travail sont nombreuses compte tenu de la complexité des réseaux de voies navigables et de la prédiction des impacts du changement climatique. Il serait en outre intéressant de déterminer les mécanismes permettant le passage d'une gestion non structurelle (optimisation de la gestion du réseau de voies navigables sans modification de ses ouvrages), à une gestion structurelle (modification ou implantation de nouveaux ouvrages) permettant d'accroître, si nécessaire, sa résilience aux effets du changement climatique et à l'augmentation de la demande de navigation. Finalement, la gestion des voies navigables étant située au centre de territoires et nécessitant l'usage de la ressource en eau qui doit être partagée, la prise en compte d'objectifs et de contraintes liés à un usage plus large de la ressource en eau pourrait s'avérer intéressant. Compte tenu des résultats du projet GEPET-Eau et de toutes les problématiques qui se sont dégagées au fur et à mesure de l'avancée du

[8] https://www.nordpasdecalais.fr/upload/docs/application/pdf/2013-12/strategie_climat_sraddt_26_septembre_2013.pdf - Page 108

projet, une suite à GEPET-Eau tient tout son sens. Il sera cependant nécessaire de construire une proposition innovante permettant de répondre aux problématiques des gestionnaires au niveau régional, national *voire* européen en s'appuyant sur un consortium élargi afin de bénéficier d'un faisceau plus vaste de savoir-faire et de compétences.

Références

(Boé *et al.*, 2009) : Boé J., L. Terray, E. Martin et F. Habetsi, 2009, “Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century”, Water Resources Research, Volume 45.

(Blesa *et al.*, 2014a) : Blesa J., K. Horvàth, E. Duviella, V. Puig, Y. Bolea, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, "Model-based sensor supervision in inland navigation networks: Cuinchy-Fontinettes case study", JMR, Journal Maritime Research, Volume 11, Issue 2, 2014.

(Blesa *et al.*, 2014b) : Blesa J., K. Horvàth, E. Duviella, V. Puig, Y. Bolea, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Sensors and actuators supervision in Inland Navigation Networks: Cuinchy-Fontinettes case study”, MC, Maritime Conference, Barcelona, Spain, 25-27 June 2014.

(Desquesnes *et al.*, 2016) : Desquesnes G., H. Nouasse, G. Lozenguez, A. Doniec et E. Duviella, “A Global approach for investigating resilience in Inland Navigation network dealing with climate change context”, HIC 2016, Incheon, Corée du sud, 21-26 Aout 2016.

(Ducharne *et al.*, 2010) : Ducharne A., F. Habets, C. Pagé, E. Sauquet, P. Viennot, M. Déqué, S. Gascoin, A. Hachour, E. Martin, L. Oudin, L. Terray et D. Thiéry, 2010, “Climate change impacts on Water Resources and Hydrological Extremes in Northern France”, XVIII Conference on Computational Meth-ods in Water Resources, June, Barcelona, Spain.

(Duviella *et al*. 2013) : Duviella E., L. Rajaoarisoa, J. Blesa et K. Chuquet. “Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the Cuinchy-Fontinettes reach”, IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM, Saint Petersburg, Russia, 19-21 June 2013.

(Duviella *et al*. 2014a) : Duviella E., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Multi-scale modeling approaches of inland navigation networks for their management in a global change context”, TRA, Transport Research Arena, Paris La Défense, France, 14-17 Apr 2014.

(Duviella *et al*. 2014b) : Duviella E., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Modèle intégré de réseaux de voies navigables pour l'étude de leur résilience dans un contexte de changement climatique”, MOSIM, Nancy, France, 5-7 Novembre 2014.

(Duviella *et al*. 2013) : Duviella E., J. Blesa, L. Bako, Y. Bolea, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig et K. Chuquet. “Inland navigation channel model: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach”, International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC, Paris-Evry University, France, 10-12 Avril 2013.

(Duviella *et al*. 2013b) : Duviella E., L. Rajaoarisoa, J. Blesa et K. Chuquet, “Fault Detection and Isolation of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach”, 52nd IEEE CDC, Conference on Decision and Control, Florence, Firenze, Italy, December 10-13 2013.

(Horvàth *et al*. 2016) : Horvàth K., H. Nouasse, L. Rajaoarisoa, E. Duviella et K. Chuquet, “Etude de la résilience de réseaux de voies navigables en période d'étiage - Application au réseau du Nord-Pas de Calais”, JESA, 2016. (A paraître)

(Horvàth *et al*. 2015a) : Horvàth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Modelling of a navigation reach with unknown inputs: the Cuinchy-Fontinettes case study”, dans Advances in Hydroinformatics - SimHydro 2014 - Modeling and Simulation of Fast Hydraulic Transients, Editeurs : P. Gourbesville, J. Cunge et G. Caignaert, 2015. http://www.springer.com/in/book/9789812876140.

(Horvàth *et al*. 2014a) : Horvàth K., E. Duviella, J. Blesa, L. Rajaoarisoa, Y. Bolea, V. Puig et K. Chuquet, “Gray-box model of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach”, Journal of Intelligent Systems (**JISYS**), Volume 23, Issue 2, ISSN (Online) 2191-026X, ISSN (Print) 0334-1860, DOI: 10.1515/jisys-2013-0071, Juin 2014

(Horvàth *et al*. 2014b) : Horvàth K., E. Duviella, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Modelling of a navigation reach with unknown inputs: the Cuinchy-Fontinettes case study”, Simhydro, Sofia Antipolis, 11-13 June 2014.

(Horvàth *et al*. 2014c) : Horvàth K., E. Duviella, M. Petreczky, L. Rajaoarisoa et K. Chuquet, “Model predictive control of water levels in a navigation canal affected by resonance waves”, HIC, New York, USA, 17-21 August 2014.

(Horvàth *et al*. 2014d) : Horvath K., M. Petrecsky, L. Rajaoarisoa, E. Duviella et K. Chuquet, “MPC of water level in a navigation canal - The Cuinchy-Fontinettes case study”, ECC, European Control Conference, Strasbourg, France, June 24-27, 2014.

(Horvàth *et al*. 2014e) : Horvath K., J. Blesa, E. Duviella, L. Rajaoarisoa, V. Puig et K. Chuquet, “Sensor fault diagnosis of inland navigation system using physical model and pattern recognition approach”, IFAC WC, World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014.

(IPCC, 2013) : Summary for policymakers. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, 2013.

(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.

(Li *et al*. 2015) : Li Y., H. Huang, H. Ju, E. Lin, W. Xiong, X. Han, H. Wang, Z. Peng, Y. Wang, J. Xu, Y. Cao et W. Hu, “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, 2015.

(Jussien *et al*. 2008) : Jussien N., G. Rochart et X. Lorca, “Choco: an Open Source Java Constraint Programming Library”, CPAIOR08 Workshop on Open-Source Software for Integer and Constraint Programming (OSSICP08), 2008.

(Litrico et Fromion, 2004) : X. Litrico and V. Fromion. “Simplified modeling of irrigation canals for controller design”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(5):373–383, 2004.

(Nouasse *et al*. 2016) : Nouasse H., A. Doniec, G. Lozenguez, E. Duviella, P. Chiron, B. Archimède et K. Chuquet, “Constraint satisfaction problem based on flow transport graph to study the resilience of inland navigation networks in a climate change context”, IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM, Troyes, France, 28-30 Juin 2016.

(Nouasse *et al*. 2016b) : Nouasse H., K. Horvàth, L. Rajaoarisoa, A. Doniec, E. Duviella et K. Chuquet, “Study of global change impacts on the inland navigation management: Application on the Nord-Pas de Calais network”, TRA, Transportation Research Procedia, 2016, ISSN: 2352-1465.

(Nouasse *et al*. 2015) : Nouasse H., L. Rajaoarisoa, A. Doniec, P. Chiron, E. Duviella, B. Archimède et K. Chuquet, “Study of drought impact on inland navigation systems based on a flow network model”, ICAT, Sarajevo, Bosnie Herzégovine, 29-31 Octobre 2015.

(van Overloop *et al*., 2010) : van Overloop, P.-J., Miltenburg, I. J., Bombois, X., Clemmens, A. J., Strand, R., and van de Giesen, N. (2010). “Identification of resonance waves in open water channels”. Control Engineering Practice, 18(8):863-872.

(ParisAgreement, 2015) : Adoption of the Paris agreement- Proposal by the President - Draft decision - CP.21, UNFCCC. Archived from the original on 2015-12-12. Retrieved 2015-12-12.

(Park *et al.*, 2015) : Park C.-K., H.-R. Byun, R. Deo et B.-R. Lee, “Drought prediction till 2100 under RCP 8.5 climate change scenarios for Korea”, Journal of Hydrology, Volume 526, Pages 221-230, 015.

(Rajaoarisoa *et al*. 2014) : Rajaoarisoa L., K. Horvath, E. Duviella et K. Chuquet, “Large-scale system control based on decentralized design. Application to Cuinchy Fontinette Reach”, IFAC WC, World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014.

(Wanders et Wada, 2015) : Wanders N. et Y. Wada, “Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought”, Journal of Hydrology, Volume 526, Pages 208-220, 2015.

(Yan *et al.*, 2015) : Yan D., S. E. Werners, F. Ludwig, H. Qing Huang, “Hydrological response to climate change: The Pearl River, China under different RCP scenarios”. Journal of Hydrology: Regional Studies, Volume 4, Part B, Pages 228-245, ISSN 2214-5818, http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.006, 2015.

ANNEXE 1 : NOTICE D'UTILISATION DU LOGICIEL

MINES
Douai

Notice Utilisation Gepet-Eau

Alizée Mayet – Manon Pierret

Mai 2016

Sommaire

Sommaire 1
Notice GEPET-EAU 2
Le Menu Principal 2
Passage d'un plan du réseau au modèle Gepet-Eau 3
Modélisation d'un sous-réseau 5
1. Générer les biefs 5
2. Relier les biefs 5
a) Liaison simple 5
b) Confluence 6
c) Diffluence 6
3. Renseigner les données des biefs 7
4. Indiquer les pompes 9
5. Indiquer le nombre de bassinées 9
Simulation d'un sous-réseau/modèle 10
1. Lancer une simulation 10
2. Lire les résultats 10

Notice GEPET-EAU

Le logiciel Gepet-Eau permet d'une part la modélisation des réseaux de voies navigables par la prise en compte des biefs et de leurs interactions, et d'autre part l'optimisation de la répartition de la ressource en eau, en périodes normale, de montée des eaux ou d'étiage. Il offre une interface utilisateur (Figure 1) permettant une construction aisée de modèles.

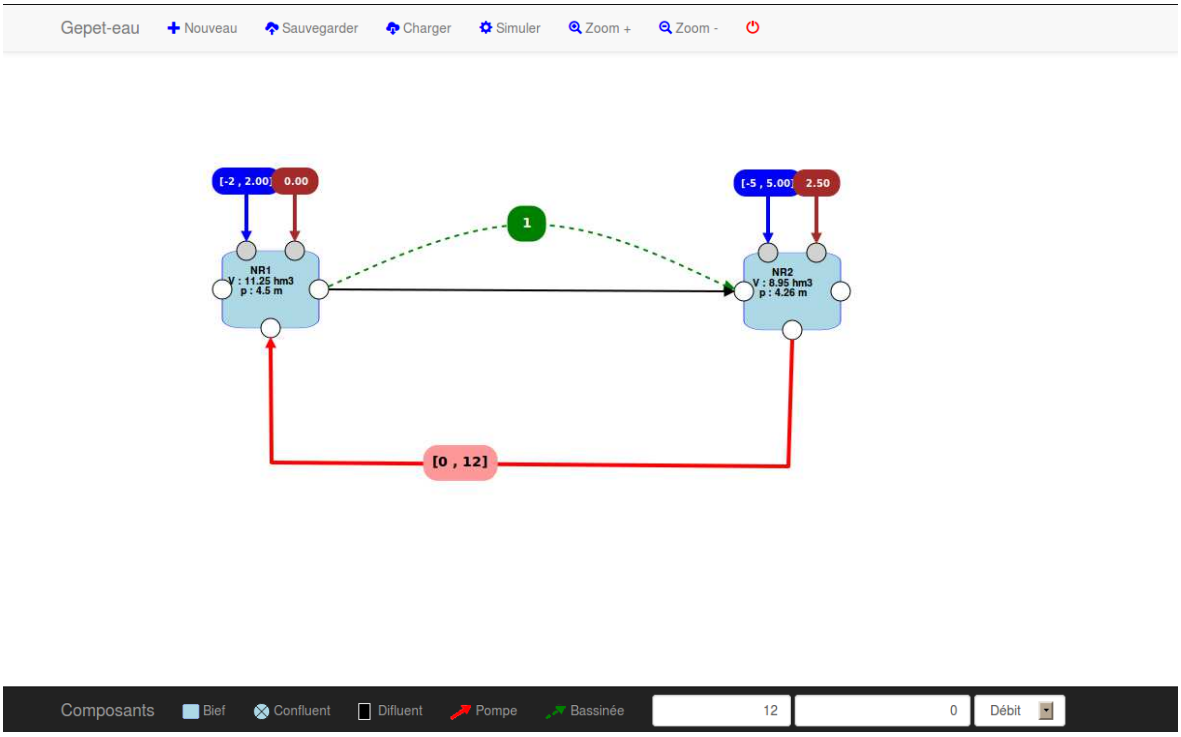


Figure 1 - Page d'accueil Gepet-Eau

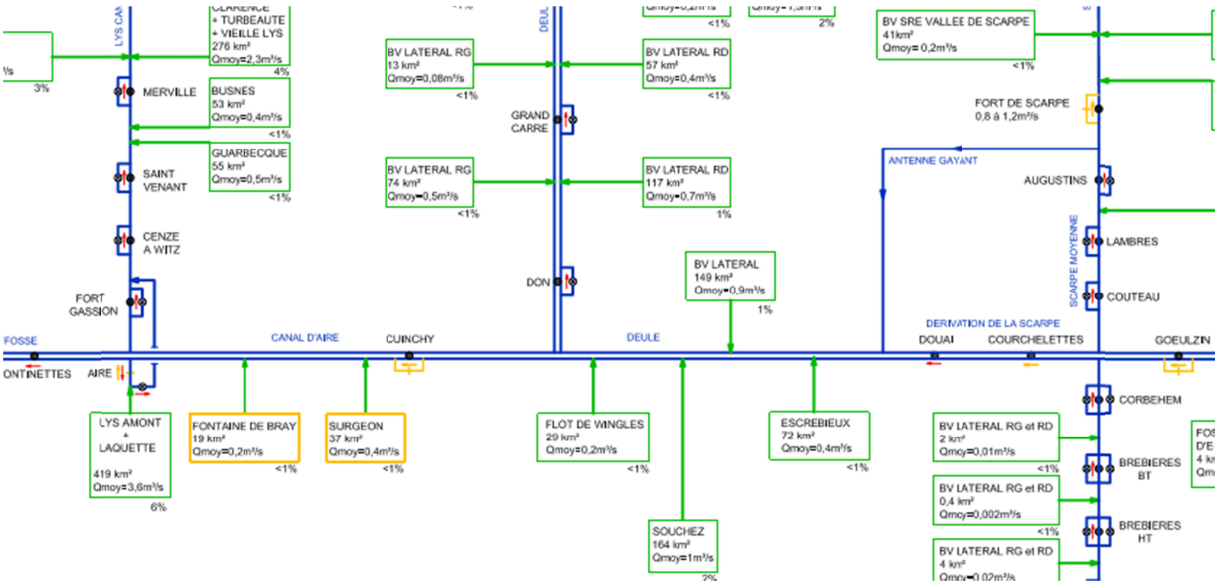
Le Menu Principal

Boutons de la barre d'outils supérieure :

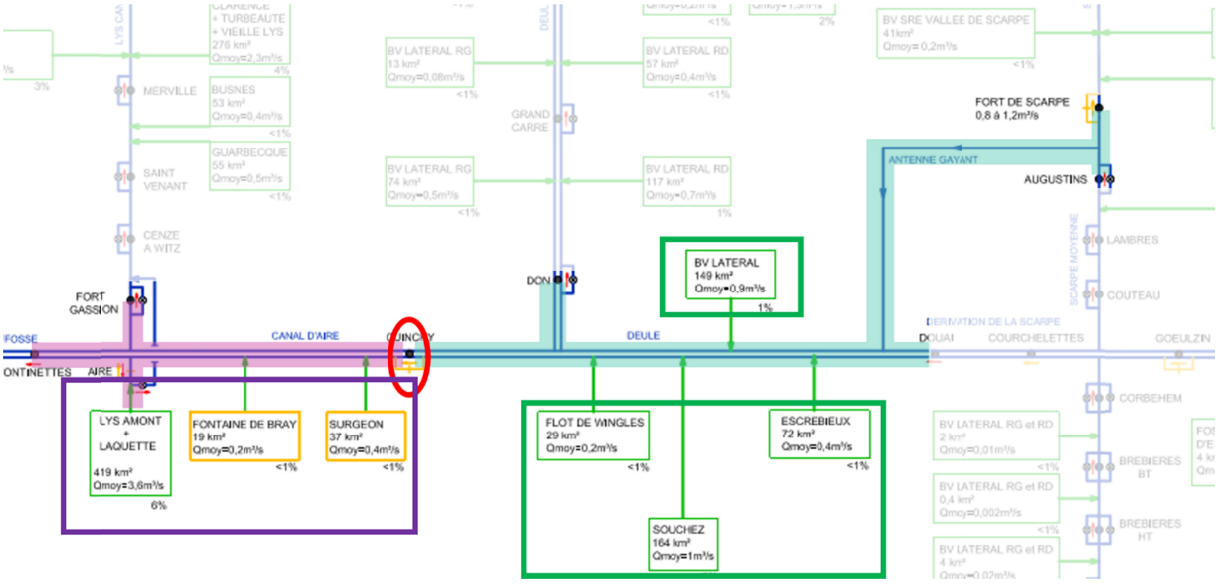
Nouveau	Créer un nouveau modèle. Attention, il n'est possible d'ouvrir qu'un fichier à la fois. Penser à sauvegarder.
Sauvegarder	Sauvegarder le modèle en cours pour pouvoir l'ouvrir ultérieurement.
Charger	Ouvrir la liste des modèles déjà enregistrés.
Simuler	Lancer la simulation. Les paramètres de la simulation sont à changer en bas de la page. La simulation indique les débits ou les volumes qui sont échangés entre les différents biefs.
Zoom + ou -	Changer le niveau de zoom.
⏻	Se déconnecter.

Passage d'un plan du réseau au modèle Gepet-Eau

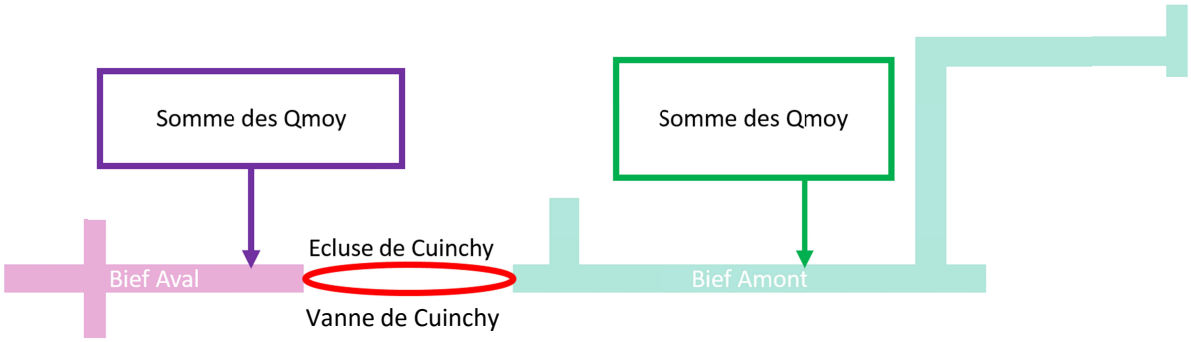
1) Une partie d'un réseau des voies navigables est considérée :



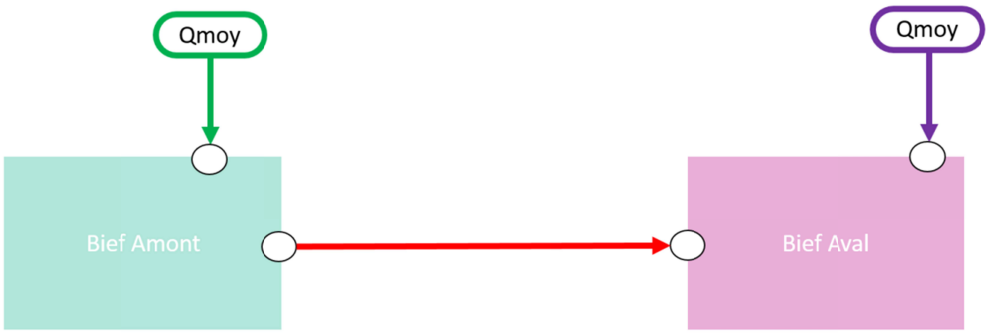
2) Les deux biefs étudiés sont mis en évidence, ainsi que les ouvrages qui les relient (écluse et vanne).
Ici, les biefs sont surlignés, les affluents et prises d'eau provenant des bassins versants sont encadrés et les ouvrages sont entourés en rouge.



3) Un bief étant modélisé par un seul composant, les débits moyens (Qmoy) de ses affluents et prises d'eau sont additionnés pour obtenir un débit total. Ici le bief amont est le bief vert et le bief aval est le bief violet.



4) Les biefs sont représentés sous forme de rectangles, les débits moyens (Qmoy) des affluents et prises d'eau sous forme de données entrantes. Les ouvrages reliant les deux biefs sous forme d'arc orienté allant du bief amont au bief aval.



5) Cette modélisation est réalisée dans le logiciel Gepet-Eau. Le sens d'écoulement de l'eau se fait selon le sens des flèches, préférablement de la gauche vers la droite.

Modélisation d'un sous-réseau

Pour modéliser un réseau ou un sous-réseau de voies navigables, il faut générer les différents biefs qui le composent et spécifier leurs interactions. Les biefs sont à relier entre eux au fur et à mesure qu'ils sont créés.

À tout moment, il est possible de supprimer un élément en cliquant sur qui apparait lorsque la souris est sur l'élément.

Méthode de modélisation d'un réseau ou un sous-réseau à l'aide du Menu Composants :

1. Générer les biefs
2. Relier les biefs par des liaisons simples, des confluents ou des diffluents
3. Renseigner les données des biefs
4. Indiquer le nombre de bassinées
5. Indiquer les pompes éventuelles

Figure 2 – Menu Composants

1. Générer les biefs

- Cliquer sur 'Bief' dans le Menu Composants et placer le rectangle qui apparait.
- Placer tous les biefs du modèle avant de les relier et de renseigner leurs caractéristiques.

Un bief est symbolisé par un rectangle. Les ronds blancs sont les points d'entrées et de sorties du bief. Les ronds gris correspondent aux interactions du bief avec l'environnement extérieur au réseau.

2. Relier les biefs

Il existe plusieurs types de liaisons entre les biefs, en fonction de la répartition du réseau. La flèche noire permet de relier des biefs entre eux, dans le sens amont → aval.

a) Liaison simple

Quand un bief se déverse dans un autre bief, une liaison simple est utilisée.

- Placer le curseur sur un rond blanc du bief. Quand le curseur devient une croix, maintenir cliqué pour créer un lien. La liaison est effective si le curseur redevient une croix au niveau du rond blanc d'arrivée.

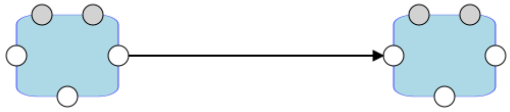


Figure 3 - Liaison de biefs

b) Confluence

Quand plusieurs biefs se déversent dans un autre bief, une confluence est utilisée.

- Cliquer sur 'Confluent' dans le Menu Composants et placer le symbole qui apparait.
- Relier la sortie des biefs en aval à l'entrée du confluent.
- Relier la sortie du confluent à l'entrée du bief amont.

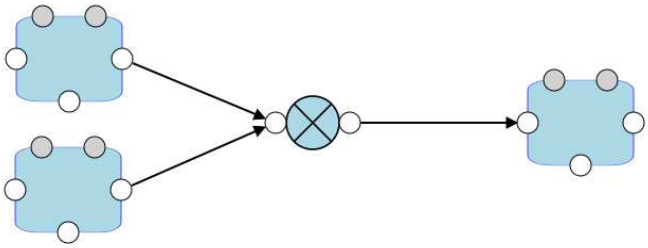


Figure 4 - Représentation d'une confluence

c) Diffluence

Quand un bief se déverse dans plusieurs biefs, une diffluence est placée.

- Cliquer sur 'Diffluent' dans le Menu Composants et placer le symbole qui apparait.
- Relier la sortie du bief aval à l'entrée du confluent.
- Relier la sortie du confluent à l'entrée des biefs en amont.

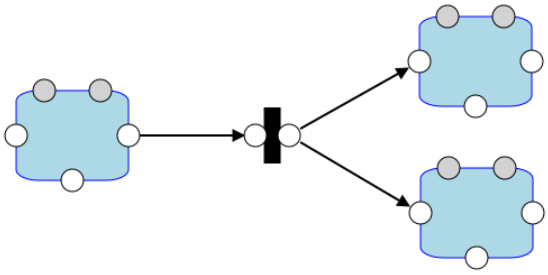


Figure 5 - Représentation d'une diffluence

3. Renseigner les données des biefs

Après avoir relié les biefs entre eux, il faut renseigner leurs données.

- Double-cliquer sur le bief pour ouvrir la fenêtre de propriétés et renseigner ses caractéristiques.
- Enregistrer pour quitter en sauvant les modifications. Toutes les informations doivent être renseignées pour pouvoir enregistrer.

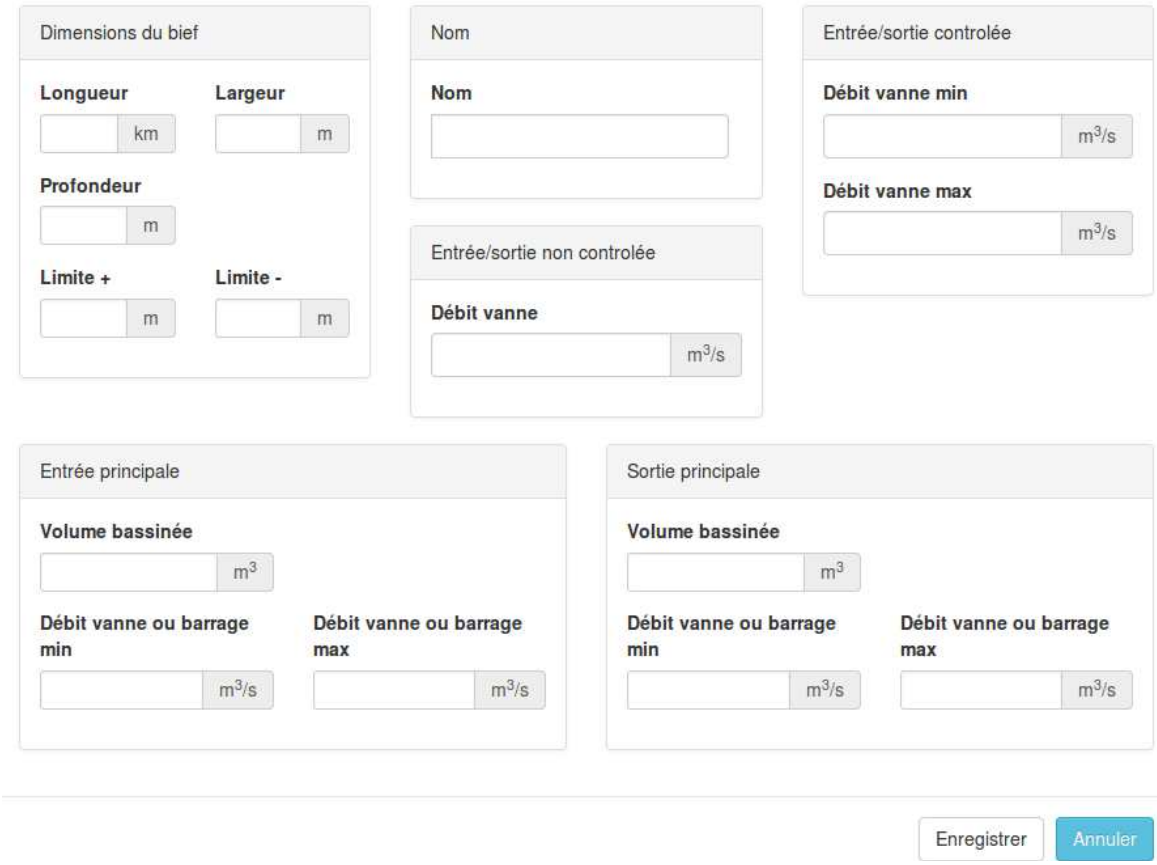


Figure 6 - Caractéristiques d'un bief

Dimensions du bief : Profondeur	Profondeur moyenne du bief
Dimensions du bief : Limite + et -	Limites hautes et basses du rectangle de navigation
Entrée/sortie contrôlée	Débits contrôlés des affluents, des vannes ou des prises d'eau
Entrée/sortie non contrôlée	Débits des eaux issues de rivières naturelles, ou dus à des phénomènes d'écoulement, d'évapotranspiration, de pluies, d'activités anthropiques et d'échanges avec les eaux souterraines
Entrée principale	Données de l'écluse en amont du bief
Sortie principale	Données de l'écluse en aval du bief

Lorsque deux biefs sont reliés entre eux, la sortie principale du bief amont correspond à l'entrée principale du bief aval. C'est en effet la même écluse. Les valeurs de l'entrée principale du bief aval seront donc grisées, inchangeables, et égales aux valeurs de la sortie principale du bief amont.

Dans le cas d'un confluent, l'entrée principale du bief aval n'est pas modifiable, car il y a plusieurs écluses d'entrée.

Dans le cas d'un diffluent, la sortie principale du bief amont n'est pas modifiable, car il y a plusieurs écluses de sortie.

Finalement, un bief est symbolisé par un rectangle bleu, avec :

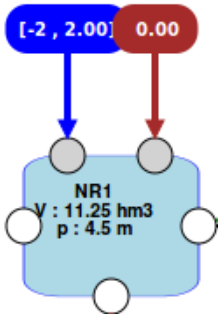


Figure 7 - Bief

- NR1 le nom du bief.
- V son volume qui est calculé en fonction de ses caractéristiques géométriques.
- P sa profondeur.
- Les ronds blancs sont les points d'entrées et de sorties du bief :
  - Le rond de gauche correspond à l'entrée.
  - Le rond de droite correspond à la sortie.
  - Le rond inférieur est utilisé pour les pompes si nécessaire.
- Les ronds gris correspondent aux interactions avec l'environnement extérieur au réseau :
  - L'intervalle en bleu indique la plage de débit possible pour l'entrée/sortie contrôlée (données en m^3/s). Un débit négatif correspond à une sortie, un débit positif à une entrée.
  - La donnée en rouge correspond au débit des entrées/sorties non contrôlées.

4. Indiquer les pompes

Il est possible de faire remonter de l'eau d'un bief à l'autre par l'intermédiaire d'une pompe.

- Cliquer sur 'Pompe' dans le Menu Composants
- Relier le bief aval vers le bief amont, en se plaçant au point de sortie annexe du bief, qui est représenté par un point blanc sous le bief.
- La pompe est représentée par une flèche rouge, placée dans le sens inverse au sens naturel de l'écoulement.
- Double-cliquer sur la flèche pour renseigner les débits minimum et maximum que peut fournir la pompe.

Figure 8 - Caractéristiques d'une pompe

5. Indiquer le nombre de bassinées

- Cliquer sur 'Bassinée' dans le Menu Composants.
- Relier la sortie du bief amont vers l'entrée du bief aval.
- La bassinée est représentée par une flèche verte en pointillés.
- Double-cliquer sur la flèche pour renseigner le nombre de bassinée entre les deux biefs durant la durée de la simulation.

Figure 9 - Caractéristiques d'une bassinée

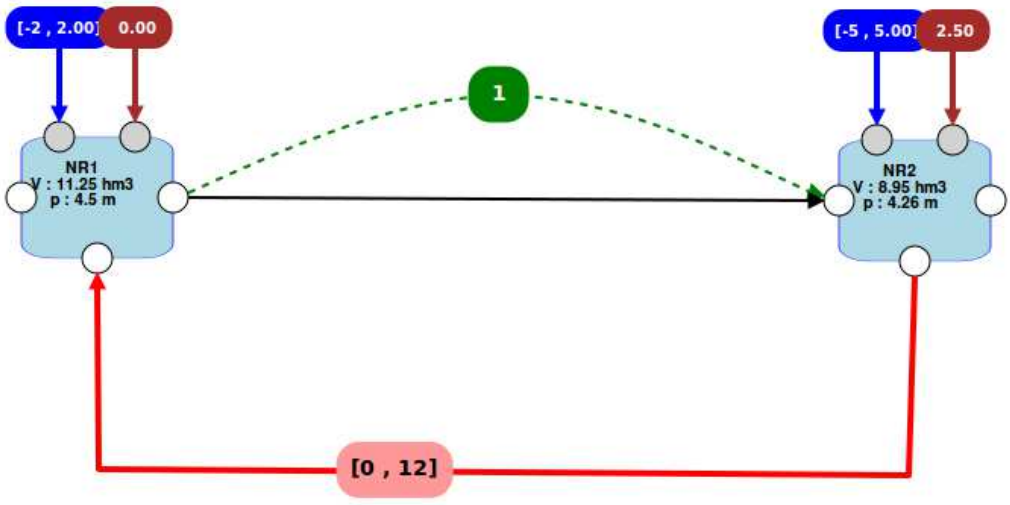


Figure 30 - Exemple avec pompe et bassinée

Simulation d'un sous-réseau/modèle

1. Lancer une simulation

Après avoir modélisé le réseau ou sous-réseau de voies navigables en renseignant toutes les parties nécessaires (débits disponibles, capacités des entrées, etc.) il est possible de lancer des simulations pour étudier la résilience du système, *i.e.* la capacité du réseau à compenser les aléas. Les scénarios de simulation sont paramétrables.

- Renseigner les paramètres de la simulation dans la barre de menu inférieure.
- Cliquer sur 'Simuler' dans le Menu Principal.

Figure 11 - Paramètres de la Simulation

Case 1	Durée de la simulation (en heures)
Case 2	Pourcentage positif ou négatif appliqué sur le débit de la vanne Entrées/Sorties non contrôlées et sur le débit max de la vanne Entrées/Sorties contrôlées. Un pourcentage négatif permet de simuler une situation d'étiage, un pourcentage positif une période de montée des eaux
Case 3	Unité du résultat de la simulation (en débit (m^3/s) ou en volume (m^3))

2. Lire les résultats

Les chiffres dans les cases orange sont les débits ou volumes qui passent dans les liaisons. Il est possible d'afficher soit le débit soit le volume en choisissant l'option désirée dans la barre-menu inférieure. Cela permet par exemple d'indiquer quel débit devra être demandé à une vanne sur la période indiquée.

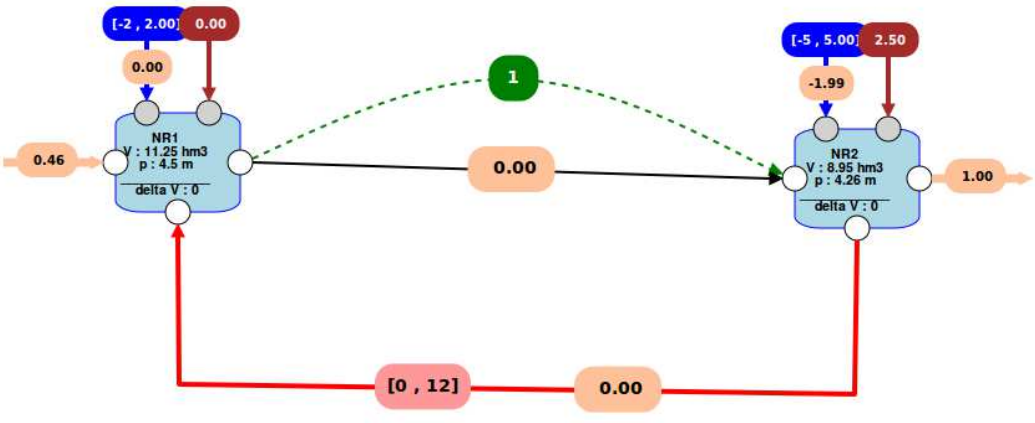


Figure 12 - Résultats de la Simulation

ANNEXE 2 : COPIE des ARTICLES sur la COMMANDE ET LA DETECTION DE FAUTES

2014 European Control Conference (ECC)
June 24-27, 2014. Strasbourg, France

MPC control of water level in a navigation canal - The Cuinchy-Fontinettes case study

Klaudia Horváth[1] , Mihály Petreczky[1], Lala Rajaoarisoa[1], Eric Duviella[1] and Karine Chuquet[2]

Abstract— **The paper describes an application of MPC to maintaining the water level of navigation canals. The task is to ensure that the water level is within a certain range to enable navigation. The proposed method is tested on the case of Cuincy-Fontinettes reach, which is a navigation canal in North France. The water level is disturbed by known and unknown inputs to the canal. These inputs are the lock movements. While now only local control exists, in this work we propose a distant downstream MPC controller to control the water level in the canal reach. The controller is implemented and tested by numerical simulation using the numerical solution of the Saint-Venant (SV) equations. The controller is able to reduce the water level deviations caused by the lock operation.**

I. INTRODUCTION

An inland navigation network consists of several interconnected rivers and artificial channels. Due to the differences in altitude, several locks are needed to ensure navigation. These locks generally operate on few meters of level difference. During their operation, they are filled with water from upstream and release their water volume downstream within a short period of time. These operations cause disturbances. The effect of these disturbances depend on the volume of the locks. If the volume is small, then the waves that are generated by extracting and releasing of water are not significant. However, when the lock overcomes big level differences, it has a big volume and the generated disturbance can change the water level in the canal. However, in order to ensure navigation, the water level should be kept in around a certain value, called *the Normal Navigation Level (NNL)*.

The aim of this work is to propose control strategies to keep the water level high enough (around NNL), despite disturbances. This is achieved by actively controlling the inflows. The method which we propose to use is model predictive control (MPC).

Our interest in navigational canals is motivated by their role in transportation. Inland navigation is an efficient and ecologically friendly alternative to overland transport [1], [2]. The European Union recognizes the great potential of inland navigation and encourages the use of ICT to improve inland navigation [3]. For this reason, inland navigation has attracted considerable attention from ICT research community in recent years. For example, operations research tools were used in [4] to improve logistics of inland navigation, and simulation tools were presented [5].

There is a lot of literature on automatic control of water systems, a summary of the developments can be found in [6], [7]. Most of the existing literature focuses on irrigation canals. The application of model predictive control for water systems has been investigated for a long time. It was applied in a decentralized fashion in [8] and centralized one in [9] to control of irrigation canals. MPC has been used for controlling different water systems to achieve different goals: maintain the ecological flow [10], control water levels [11] or discharges [12] or even to control water quality [13], or for risk mitigation [14], control of hydro-power plants [15] or to drainage canals [16], [17]. The first actual demonstration of MPC on an irrigation canal was in 2010 by van Overloop [18].

We propose to study the problem of control of navigational canals through the example of the *Cuinchy-Fontinettes reach (denoted by CFR in the sequel)*, which belongs to the navigation system of the north of France. The study of this case has already started: first, a model was built for the reach [19]. Then MPC was developed based on a gray box model [20]. These studies and this paper contributes to the large scale model of the navigation network of the north of France [21]. In this paper we continue this line of research, but instead of the gray box model we work with a white box model and also discuss the possible use of other control strategies. In addition, we propose to use observers so that the final controller does not require full state measurement. A future step is to try to model the resonance with the help of white box models like in [22].

The paper is structured as follows: in Section II the studied system is introduced. In Section III the modelling of the CFR for control purposes is developed. Controllers based on the simple model are developed in Section IV. The results are presented and discussed in Section V and finally the work is concluded in Section VI.

II. THE CUINCY-FONTINETTES REACH

The Cuincy-Fontinettes Reach (abbreviated as CFR) belongs to the navigation system of the north of France. The reach is 42300 m long and approximately 50 m wide. It is bounded at the upstream end by the lock of Cuinchy and at the downstream end by the lock of Fontinettes (Fig. 1). In the middle of the reach there is another inflow, from the river Aire, and there is also a point of measurement (and control) of the water level. Aire is located 28700 m downstream from Cuinchy. The physical data of the CFR is summarized in Table I. In these navigation canals the objective of the operation is to ensure navigation, that is maintain the water level in a certain range around the NNL. In case of the CFR the NNL=19.52 m, corresponding to a 3.8 m water depth. In

[1]URIA, Mines Douai, France {klaudia.horvath,eric.duviella, lala.rajaoarisoa,mihaly.petreczky}@mines-douai.fr
[2]Voies Navigables de France, Lille, France karine.chuquet@vnf.fr

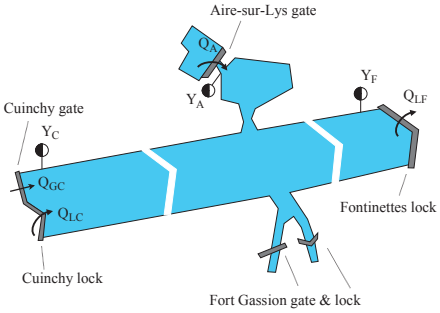


Fig. 1. The CFR with the inputs, disturbances and measured water levels

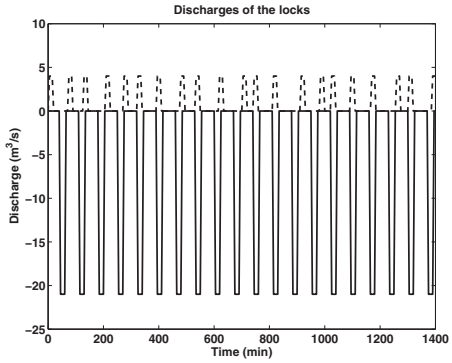


Fig. 2. The discharges of the lock operations during a day with 20 minutes operations, dashed line lock Cuinchy with black line Fontinettes

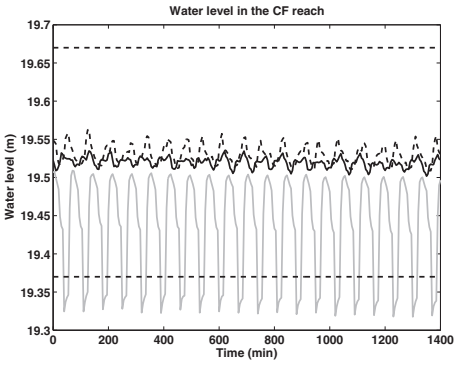


Fig. 3. Water levels, with gray: Fontinettes, with black: Aire and with dashed line Cuinchy, horizontal dashed black line: navigation condition (numerical simulation)

order to ensure navigation the water level should be between 19.52 m $\pm$ 15 cm. The water level is disturbed by known and unknown inflows. The most significant inflow is caused by lock operations upstream and downstream of the reach. These disturbances depend on the volume of the locks. In case of the CFR as the lock of Fontinettes overcomes 13 m of level difference its filling causes (25000 m^3) causes a considerable disturbance. The operation of filling creates a wave with an amplitude more than 12 cm. This wave travels upstream, bounces back, and travels back and does so several times.

The wave generated by the operation of the lock of Cuinchy causes less disturbance, since the volume of that lock is only 3700 m^3 - therefore here it is not discussed separately.

The water level of the system is determined by the operation of the locks. In Fig. 2 a typical lock operation is shown: 20 operations of lock Cuinchy and of lock Fontinettes distributed within 24 hours. Currently, the locks operate during daytime, but in the future it is planned to extend this period. The operation time of Fontinettes is 20 minutes (it can vary between 15 and 30 minutes). Unfortunately, the current way of operating the locks does not prevent the water level from dropping below the level which is necessary for navigation. Indeed, on Fig. 3 such a situation is presented. The data used on Fig. 3 come from numerical simulation using real-life scenario. On Fig. 3 one can see a situation, where the water levels at Cuinchy and at Aire are in the navigation range, however, but the level of Fontinettes is below the lower limits of NNL whenever a lock operation is carried out. There are two solutions for this problem. Either one changes the lock operations (the shape of the input hydrograph), or one tries to control the water level by controlling the gate operations at Cuinchy and Aire. In this paper, we pursue the latter option. The reason for this is that it may be more difficult to change the way locks are operated than to control the gates. First, the timing of lock operations depends on the arrival of vessels, which is difficult to influence. In addition, if lock operations take too much time, then the number of vessel passing through the canal will decrease, which would result in loss of revenue. However, in the future we plan to explore the possibility of changing lock operations.

III. Modelling the reach for control purposes

In order to model the canal reach for control purposes the IDZ model [23] was used. Before explaining the details, we would like to recall the main idea behind IDZ models.

A. IDZ models for a single canal

IDZ models represent a linearization the dynamics of one canal around the set point. More precisely, it models the effect of discharge on the water level. The input is the upstream discharge minus the discharge level around which we linearize (steady state discharge), the output is the water level measured downstream minus the steady state water level. Similarly to the frequently used Integrator Delay (ID) model [24], the model captures the two most important phenomena: integrator and delay. On low frequencies the canal pool acts as an integrator, that is the water level increases with the integral value of the discharge, like a

Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Manning's c. (-)	Discharge m^3/s
42300	52	3.8	0.035	0.6

TABLE I
PHYSICAL DATA OF THE CFR

tank. The value of this integrator is the reciprocal of the surface of the canal reach, the backwater area, A_s. It can be approximated as the product of the width and the length of the canal:

$$A_s = BL, \tag{1}$$

where B is the width and L is the length of the canal reach.

The delay is the time it takes for a wave to travel from the point of disturbance to the point of measurement. It is slightly different in the upstream (τ_u) and in the downstream direction (τ_d) and it can be obtained as:

$$\tau_u = \frac{L}{C - V} \tag{2}$$

and

$$\tau_d = \frac{L}{C + V} \tag{3}$$

where V is the velocity and C is the celerity:

$$C = \sqrt{gH} \tag{4}$$

where g is the acceleration of gravity and H is the water level.

The IDZ model contains a zero, that accounts for the first fast increase in water level after a disturbance occurs. The calculation of the zero is not detailed here, see [23]. The general form of the transfer functions can be written as:

$$G(s) = \frac{p_1 s + 1}{A_s s} e^{-\tau s}, \tag{5}$$

where the parameter p_1 accounts for the zero and τ can be τ_s or τ_d depending of the direction of the disturbance.

B. Application to CFR models

Each transfer function of the CFR system is modelled by the IDZ model. There are two inputs to the system: the discharge at the gate of Cuinchy (Q_{GC}) and the discharge at the gate of Aire (Q_A). The system has three outputs: the water level upstream, at Cuinchy (Y_C), the water level at the input of Aire (Y_A) and the water level downstream, at Fontinettes (Y_F). The disturbances to the system are the operations of the locks: Q_{LC} is the input discharge caused by the operation of the lock of Cuinchy and Q_{LF} is the discharge taken out from the system caused by the operation of the lock of Fontinettes. For this work, these disturbances are unknown for the controller. In this paper, we will be interested in the linearized behavior around the equilibrium point $Q_A^0 = 0.6m^3/s$, $Q_{GC}^0 = 0.6m^3/s$ and $Y_A^0 = Y_C^0 = Y_F^0 = NNL = 3.8m$ (see also in Table I). Define the continuous-time signal

$$E(t) = \begin{bmatrix} Y_C(t) - NNL & Y_A(t) - NNL & Y_F(t) - NNL \end{bmatrix},$$

$t \in [0, +\infty)$, whose entries are the differences between the water levels Y_C, Y_A and Y_F and the desired level NNL at which the canal is navigable. The transfer function of the linearized system is then

$$G_{CFR} = \begin{bmatrix} G_{CC} & G_{AC} \\ G_{CA} & G_{AA} \\ G_{CF} & G_{AF} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Name	Backwater surface ($\mathbf{m^2}$)	τ (s)	p_1 (-)
G_{CC}	1492 $\times 10^3$	0	9401
G_{AC}	1492 $\times 10^3$	4703	4618
G_{CA}	1492 $\times 10^3$	4698	4618
G_{AA}	1492 $\times 10^3$	0	9238
G_{CF}	2100 $\times 10^3$	6925	6749
G_{AF}	707 $\times 10^3$	2226	2209

TABLE II

PROPERTIES OF THE THREE REACHES

i.e. if $\hat{E}$ is the Laplace transform of E and $\hat{Q}$ is the Laplace transform of $Q(t) = \begin{bmatrix} Q_{GC} - Q_{GC}^0, & Q_A - Q_A^0 \end{bmatrix}$, then

$$\hat{E} = G_{CFR}\hat{Q}.$$

Here $G_{CC}, G_{AC}, G_{CA}, G_{AA}, G_{CF}, G_{AF}$ are transfer function of IDZ type, i.e. they are all of the form (5). The parameters of these transfer functions are summarized in Table II. Note that the transfer function G_{CFR} of the linearized model only approximates the effect of the input discharges Q_A and Q_{GC} on the level difference E, the effect of the disturbances Q_{LC} and Q_{LF} is not modelled.

IV. CONTROLLER DEVELOPMENT

The control objective is to keep the three outputs (Y_C, Y_A and Y_F) close to set-point while disturbances occur (Q_{LC} and Q_{LF}) by controlling the two inputs (Q_{GC} and Q_A) without violating the physical constraints of the system: the discharge and Cuinchy and Aire has to satisfy the constraints (7) and (8) below.

$$0 \leq Q_{GC}(t) \leq 10\,[m^3/s] \tag{7}$$

and

$$-7 \leq Q_A(t) \leq 7 \quad [m^3/s]. \tag{8}$$

for all $t \in [0, +\infty)$. The transfer functions presented in Section III express the relation between the water level and the input/output discharges. In order to be able to apply MPC, we transformed the continuous-time transfer function from (6) to a discrete-time one and computed its minimal state-space representation. In addition, instead of using the upstream discharge as input, we use the *change of the discharge* as control input. Consequently, the discretized transfer functions have to be composed with an integrator. The reason for the change of inputs is purely technical, we found it easier to construct the MPC cost function for this new input than for the original one. Since MPC yields a state feedback, while the full state of the system is not measurable, we also developed an observer in order to estimate the state of the model. The final controller is obtained by combining the state feedback provided by MPC with this observer. Finally, the performance of the controller was evaluated by simulating it using a model of the plant implemented in SIC. The latter model is based on Saint-Venant equations, and it is known to be a fairly accurate representation of the physical reality. In particular, it models several non-linear phenomena which are ignored by IDZ type models.

Below we describe the steps mentioned above one by one.

a) Sampling the linearized model: The transfer function G_{CFR} is transformed to a discrete-time transfer function G^d_{CFR} using the zero order hold with sampling time $T_s = 300s$. Hence, if we define the discrete time signals $e(k) = E(kT_s)$ and $Q^d(k) = Q(kT_s)$, $k = 0, 1, 2, \ldots$ and we denote their z-transforms by $\hat{e}$ and $\hat{Q}^d$, respectively, then

$$\hat{Y}^d = G^d_{CFR}\hat{Q}^d \tag{9}$$

holds.

b) Setting the rate of change of the discharge as input: The discrete-time transfer functions were all composed with an integrator $\frac{1}{z-1}$, i.e. we define the transfer matrix

$$H(z) = G^d_{FCR}(z)\frac{1}{z-1} \tag{10}$$

If we define now the discrete-time signal u as $u(0) = 0$ and

$$u(k) = Q^d(k) - Q^d(k-1)$$

then $\hat{e} = H\hat{u}$,, where $\hat{u}, \hat{e}$ denote th z-transforms of u and e respectively.

c) Constructing a state-space model: Using standard tools, we compute a minimal state-space representation

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ e(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{11}$$

of the transfer matrix H. In order to be able to formulate constraints on $Q^d(k)$ we extend the state by Q^d to obtain the following model

$$\begin{aligned} z(k+1) &= \tilde{A}z(k) + \tilde{B}u(k) \\ e(k) &= \tilde{C}z(k) \end{aligned} \tag{12}$$

where $z(k) = \begin{bmatrix} x^T(k), & Q^d(k) \end{bmatrix}^T$ and

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ I_2 \end{bmatrix}, \\ \tilde{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$$

where I_2 denotes the 2×2 identity matrix.

d) MPC state feedback: In order to compute the control law, we will apply MPC to the state-space representation (12). The resulting state feedback $u(k) = g(z(k))$ will be of the following form. Set $\lambda = 40$ and consider the matrices $R = 40.000I_2$ and $P = 40.000I_3$, where I_2 and I_3 are the 2×2 and 3×3 identity matrices. The matrices R and P will serve as weights and λ will serve as prediction horizon. Define

$$g(z) = u^*(k \mid k) \tag{13}$$

where $u^* = (u^*(k \mid k), u^*(k+1 \mid k), \ldots, u^*(k+\lambda-1 \mid k))$ is the solution to the following optimization problem:

$$\begin{aligned} &\min_{u=(u(k|k),u(k+1|k),\ldots,u(k+\lambda-1|k))\in\mathbb{R}^{2\lambda}} J(z,u) \\ &J(z,u) = \sum_{j=1}^{\lambda} e\,(k+j\,|k)^T\, Pe\,(k+j\,|k) \\ &+ \sum_{j=0}^{\lambda-1} u\,(k+j\,|k)^T\, Ru\,(k+j\,|k)\,, \\ &\text{subject to the following constraints:} \\ &z(k \mid k) = z \\ &\forall j = 1, \ldots, \lambda : \\ &z(k+j+1 \mid k) = \hat{A}z(k+j \mid k) + \hat{B}u(k+j \mid k) \\ &e(k+j \mid k) = \hat{C}z(k+j \mid k) \\ &0 \le z_{n+1}(k+j \mid k) \le 10\,[m^3/s] \\ &-7 \le z_{n+2}(k+j \mid k) \le 7 \quad [m^3/s] \end{aligned} \tag{14}$$

Here n denotes the size of the state-space of (11), and $z_i(k+j \mid k)$ denote the ith entry of $z(k+j \mid k)$. Note that the last two inequalities above represent the constraints (7)–(8).

The minimization can be carried out for example by using quadratic programming [25]. In this work the built in MATLAB function is used for this purpose [26]. More information about the development of the MPC can be found in [27] and [28].

e) Constructing the observer: Since applying MPC to (12) requires the knowledge of the current state $z(k)$ at every step k, we used an observer to estimate the state $z(k)$. Since the component $Q^d(k)$ is clearly observable, we used the following reduced order observer

$$\begin{aligned} &\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(e(k) - C\hat{x}(k)), \quad \hat{x}(0) = 0 \\ &\hat{Q}^d(k+1) = \hat{Q}^d(k) + u(k), \quad \hat{Q}_d(0) = 0 \end{aligned} \tag{15}$$

where the matrices A,B,C are the same as in (11) and L is computed as the minimax observer [29], [30], [31]

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + \eta(k) \\ e(k) &= Cx(k) + \nu(k) \end{aligned} \tag{16}$$

where η and ν are deterministic noise processes satisfying

$$\sum_{k=0}^{\infty}(\eta^T(k)W_1\eta(k) + \nu^T(k)W_2\nu(k)) \le 1, \tag{17}$$

with $W_1 = (1000 * I_n + 5000e_1e_1^T)^{-1}$, $W_2 = I_3$, n is the dimension of the state-space of (11), I_n,I_2 are the $n \times n$ and 2×2 identity matrices, $e_1 = (1, 0, \ldots, 0)^T \in \mathbb{R}^n$. The matrices W_1 and W_2 are weight matrices and represent our assumptions on the energy of the disturbances η and ν. The minimax observer for (16) is the observer of the form

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(e(k) - C\hat{x}(k)) \tag{18}$$

such that the worst case estimation error $\limsup_{k\to\infty} \sup_{\nu,\eta} |l^T(x(k) - \hat{x}(k))|$ is minimal for any vector $l \in \mathbb{R}^n$, where the the supremum is taken

over all signals ν and η which satisfy (17). The problem of constructing a minimax observer can be shown to be closely related to designing a Kalman-filter [30] for suitable stochastic noises. It follows from minimality of (11) that (C, A) is an observable pair, and hence by [29], [30], [31] a minimax observer exists and the corresponding L is such that $(A - LC)$ is a stable matrix. Moreover, if $v = -Ks$ is the feedback solution of the dual LQR control problem

$$\begin{aligned} &\min_{v} \sum_{k=0}^{\infty} (s(k)^T W_1^{-1} s(k) + v^T(k) W_2^{-1} v(k)) \\ &s(k+1) = A^T s(k) + C^T v(k), \end{aligned} \tag{19}$$

then $L = K^T$ is the gain of the minimax observer (18). Note that the existence of a solution to (19) is guaranteed by the fact that (C, A) is an observable pair and hence (A^T, C^T) is a controllable pair.

Note that if the linear model H had been accurate and the disturbances had not been significant, then any choice of L such that $(A - LC)$ is stable would have been sufficient. Indeed, we tried to use pole placement to obtain such an L. However, when simulations were run in SIC with the full (nonlinear) model of the canal including the disturbances caused by the locks of Cuinchy and Fontinette, it became clear that pole placement worked much worse than minimax observers, even after a significant amount of tuning of the former. This is probably due to the fact that H is just a linearization of the original system and unknown and unmodelled disturbances are present in the system. Hence, it is not surprising that minimax observers perform better, since they were designed exactly for such situations.

Note that the component $\hat{Q}^d(k)$ of the observer (15) tracks exactly the state component of (12) which represents $Q^d(k)$, i.e. $Q^d(k) = \hat{Q}^d(k)$.

f) Control architecture: The controller obtained by using MPC was combined with the observer (15) as follows: when computing the next control input $u(k)$, the estimates $\hat{x}(k)$ and $\hat{Q}^d(k)$ of the observer (15) were used instead of $z(k)$. Notice that the physical control input should be $Q^d(k) + Q^0$, where $Q^0 = (Q^0_{GC}, Q^0_A) = (0.6, 0.6)^T$ is the stead-state input corresponding the set point $(NNL, NNL, NNL)^T$. Hence, the output of the controller should not be $u(k)$ but $Q^d(k) + Q^0$. Moreover, what is physically measured is not the error $e(k)$ but the values $Y_C(kT_s)$, $Y_A(kT_s)$ and $Y_F(sT_s)$. That is, if y denotes the discrete time signal

$$y(k) = \begin{bmatrix} Y_C(kT_s), & Y_A(kT_s) & Y_F(kT_s) \end{bmatrix}^T \quad \forall k = 0, 1, \dots$$

then the final controller is a dynamical system whose inputs are $y(k)$, whose outputs are $Q^d(k)$, and which is defined as

$$\begin{aligned} &e(k) = y(k) - \begin{bmatrix} NNL, & NNL, & NNL \end{bmatrix} \\ &u(k) = g(\begin{bmatrix} \hat{x}^T(k) & \hat{Q}^d(k) \end{bmatrix}^T) \\ &\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(e(k) - C\hat{x}(k)) \quad \hat{x}(0) = 0 \\ &\hat{Q}^d(k+1) = \hat{Q}^d(k) + u(k) \quad \hat{Q}_d(0) = 0 \\ &Q^d(k) = \hat{Q}^d(k) + u(k) + Q^0 \end{aligned} \tag{20}$$

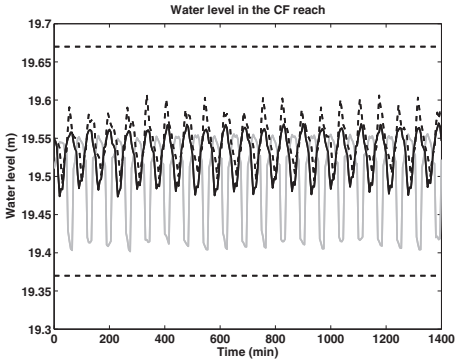


Fig. 4. Controlled levels with MPC, with gray: Fontinettes, with black: Aire and with dashed line Cuinchy, horizontal dashed black line: navigation condition

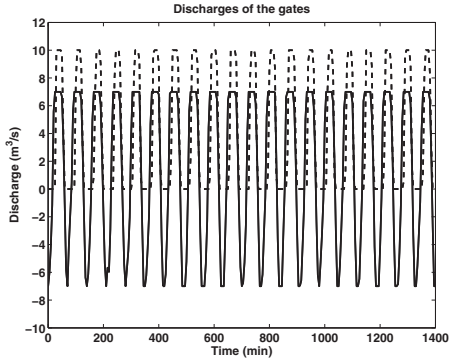


Fig. 5. The control flows with MPC, black line: gate of Aire, dashed line: gate of Cuinchy

where g is the same as define in (13), the gain L is as in (15), the matrices A, B, C are from (11).

g) Evaluation of the performance: In order to evaluate the performance of the controller, a numerical model of the CFR was built using the SIC (Simulation of Irrigation Canals) [32] software. This software solves numerically the Saint-Venant equations using the Preissmann scheme. The controller (with partial observations) was tested by connecting it with the nonlinear model of SIC and carrying out extensive simulations. Note that SIC uses a much smaller sampling time than the controller. Following the classical setup, so $y(k)$ was set to be the output of the simulation at the kth sampling time, and during the simulation the control input was assumed to be constant between the sampling times.

V. Results and discussion

The controller was tested using the described simulation model is Section IV(g). A scenario considers 20 lock operations per day in the lock Cuinchy and Fontinettes (Fig. 2). This scenario is more tough than the actual one, since now during the night there are no lock operations. They are planned to be introduced in the future. The MPC was applied to the described case. The controlled inputs are shown in Fig. 5 and the controlled water levels in Fig. 4.

It can be seen the MPC is able to keep the navigation condition (Fig. 4). All the three levels are kept within the limit, the goal of the controller is achieved. The control actions are shown in Fig. 5. At first glance, they might look extensive. However, if we check the time scale, then we can see that the controller opens the gate within 25 minutes. This is not that an unrealistic control action. However, doing it several times a day it can lead to wear and tear. We leave it as future work to investigate the possibility of improving this aspect of the control action.

There are several ways which might be taken to improve the performance of the presented controller . One option is to include a resonance model to the controller as in [33]. In this way it will be possible to act directly on the resonance waves. Another possibility is to view the lock operation as a known disturbance (since it can be observed) and integrate it into the controller.

VI. CONCLUSIONS

The aim of this study was to investigate the possibility to ensure navigation on the CFR by controlling the inputs with an MPC controller. The discharge of the reach is determined by the operation of the upstream and downstream locks, and these operations create waves that can travel back and forth several times. This phenomenon causes the measured water levels at the gate of Cuinchy (upstream) and the gate of Aire (in the middle) outside the bounds of navigability. An MPC was developed to control these inputs. It was shown that it is possible to maintain navigability by controlling these inputs in real time.

REFERENCES

[1] S. Mihic, M. Golusin, and M. Mihajlovic, "Policy and promotion of sustainable inland waterway transport in europe danube river," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1801 – 1809, 2011.

[2] I. Mallidis, R. Dekker, and D. Vlachos, "The impact of greening on supply chain design and cost: a case for a developing region," *Journal of Transport Geography*, vol. 22, no. 0, pp. 118 – 128, 2012.

[3] European Parliament and Council of the European Union, "Directive 2005/44/EC," Brussels, pp. 1–12, 2005.

[4] R. Dekker, J. Bloemhof, and I. Mallidis, "Operations research for green logistics an overview of aspects, issues, contributions and challenges," *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 3, pp. 671 – 679, 2012.

[5] O. A. Almaz and T. Altiok, "Simulation modeling of the vessel traffic in delaware river: Impact of deepening on port performance," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 22, no. 0, pp. 146 – 165, 2012.

[6] P.-O. Malaterre, "Classification of canal control algorithms," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, no. 1, pp. 3–10, 1998.

[7] I. Mareels, E. Weyer, S. Ooi, M. Cantoni, Y. Li, and G. Nair, "Systems engineering for irrigation systems: Successes and challenges," *Annual reviews in control*, vol. 29, no. 2, pp. 191–204, 2005.

[8] S. Sawadogo, R. Faye, P. Malaterre, and F. Mora-Camino, "Decentralized predictive controller for delivery canals," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, pp. 3880–3884.

[9] K. Akouz, P.-O. Malaterre, B. Dahhou, and G. Roux, "Predictive control applied to ASCE canal 2," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, pp. 3920–3924.

[10] V. Puig, J. Romera, J. Quevedo, C. M. Cardona, A. Salterain, E. Ayesa, I. Irizar, A. Castro, M. Lujan, P. Charbonnaud, P. Chiron, and J.-L. Trouvat, "Optimal predictive control of water transport systems: Arret-Darre/Arros case study," *Water science and technology*, vol. 60, no. 8, pp. 2125–2133, 2009.

[11] B. T. Wahlin, "Performance of model predictive control on asce test canal 1," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 227–238, 2004.

[12] J. Rodellar, M. Gómez, and J. P. Martín Vide, "Stable predictive control of open-channel flow," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 115, no. 4, pp. 701–713, 1989.

[13] M. Xu, P.-J. van Overloop, N. van de Giesen, and G. Stelling, "Real-time control of combined surface water quantity and quality: polder flushing," *Water science and technology*, vol. 61, no. 4, pp. 869–878, 2010.

[14] A. Zafra-Cabeza, J. Maestre, M. Ridao, E. Camacho, and L. Sánchez, "Hierarchical distributed model predictive control for risk mitigation: An irrigation canal case study," in *American Control Conference (ACC), 2011*, 29 2011-july 1 2011, pp. 3172 –3177.

[15] C. Setz, A. Heinrich, P. Rostalski, G. Papafotiou, and M. Morari, "Application of model predictive control to a cascade of river power plants," in *IFAC World Congress*, July 2008.

[16] P.-J. van Overloop, S. Weijs, and S. Dijkstra, "Multiple model predictive control on a drainage canal system," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 5, pp. 531–540, 2008.

[17] P.-J. van Overloop, "Drainage control in water management of polders in the Netherlands," in *9th International Drainage Workshop*, September 10-13. 2003.

[18] P.-J. van Overloop, A. Clemmens, R. Strand, R. Wagemaker, and E. Bautista, "Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM canal," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 136, no. 11, pp. 747–756, 2010.

[19] E. Duviella, J. Blesa, L. Bako, Y. Bolea, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig, and K. Chuquet, "Inland navigation channel model: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach," in *IEEE ICNSC*.

[20] J. Blesa, E. Duviella, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig, and K. Chuquet, "Automatic control to improve the seaworthiness conditions in inland navigation networks: application to a channel in the north of France," in *International conference on Maritime Transport*, Barcelona, Spain, June 2012.

[21] E. Duviella, L. Rajaoarisoa, J. Blesa, and K. Chuquet, "Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the Cuinchy-Fontinettes reach," in *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, Saint Petersburg, Russia, June 19-21. 2013.

[22] P.-J. van Overloop, I. J. Miltenburg, X. Bombois, A. J. Clemmens, R. Strand, and N. van de Giesen, "Identification of resonance waves in open water channels," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 8, pp. 863–872, 2010.

[23] X. Litrico and V. Fromion, "Simplified modeling of irrigation canals for controller design," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 373–383, 2004.

[24] J. Schuurmans, "Open-channel flow model approximation for controller design," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 19, no. 9, pp. 525–530, 1995.

[25] S. Wright, *Primal-Dual Interior-Point Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.

[26] MATLAB, *version 7.10.0 (R2010a)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.

[27] E. F. Camacho and C. Bordons Alba, *Model predictive control*. London: Springer, 1998.

[28] P.-J. van Overloop, "Model predictive control on open water systems," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.

[29] F. L. Chernousko, *State Estimation for Dynamic Systems*. Boca Raton, FL: CRC, 1994.

[30] A. J. Krener, "Kalman-bucy and minimax filtering," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 2, pp. 291–292, 1980.

[31] M. Green and L. D.J.N, *Linear robust control*. Pearson Education Inc.

[32] SIC, *Simulaion of Irrigation Canals, version 5.26*. Montpellier, France: Irstea, 2012.

[33] K. Horváth, "Model predictive control of resonance sensitive irrigation canals," Ph.D. dissertation, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, 2013.

11th International Conference on Hydroinformatics
HIC 2014, New York City, USA

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF WATER LEVELS IN A NAVIGATION CANAL AFFECTED BY RESONANCE WAVES

KLAUDIA HORVÁTH (1), ERIC DUVIELLA (1), MIHÁLY PETRECZKY (1), LALA RAJAOARISOA (1), KARINE CHUQUET (2), …
(1): Unité de Recherche Informatique et Automatique, Ecole des Mines de Douai, 59500 Douai, France
(2): Voies Navigables de France, Lille, France, Address, City, State ZIP/Zone, Country

In order to operate navigation canals several requirements need to be met: keeping minimum ecological flow, flood protection, but the most important is to keep the water level within a certain range around the normal navigation level. The water level is disturbed by several factors: known (measured tributaries) and unknown (unknown tributaries, rain) inputs. However, the most important one is the operation of the locks. If the navigation reach is bounded by locks that overcome large elevation differences, their operation can create big disturbances. These locks should be operated fast enough to allow the crossing of several boats, however the faster they operated the bigger wave they create. These waves can violate the condition for navigation. Moreover, they can travel several times back and forth before they attenuate, especially in cases of low base flow, high water level, and smooth surface – these are typical characteristics of a lot of navigation canals. Therefore, when the water level is controlled actively (e.g. by the gates located next to the locks) the effect of these waves should be taken into account. In this work through the Cuinchy-Fontinettes case study and active control of water level is presented considering the decrease the effect of the resonance in order to keep the water level in the navigation range.

INTRODUCTION

Navigation requires the water level stay in a certain range. Some navigation canals are interconnected by locks that sometimes overcome over large differences of water levels. The lock operations can cause a disturbance in the water level. They generate a wave that in some cases can travel back and forth in the canal before it attenuates. This phenomenon is especially strong in the case of flat canals, and therefore the navigation canals as they are often flat. The above described phenomenon is called resonance and is described in [6] and [7], and later studied in depth in [10] and [9].

The goal of this work to maintain the water level of a canal within the range allowed for navigation affected by the resonance waves generated by the lock operations. The choice of control action is model predictive control (MPC). It is commonly used for different type of water systems [4], [5], [11], [12], [8]. MPC is suitable to control the navigation reach due to its

ability of using internal model, treating known and unknown disturbances tackling constraints in the input.

This work is structured as follows: first the resonance model is described and its adaptation to a system having a water source in the middle. Then the case study is described, with the application of the model and the control development. Finally the results of the controller for known and unknown disturbances are shown and the work is concluded.

MODELING

The Integrator Resonance model

The navigation reach is modeled by the Integrator Resonance (IR) model, developed especially for canals affected by resonance by van Overloop [10]. The model was deduced from the simplifications of the Saint-Venant equations. It describes the relation between the upstream discharge and the downstream water level in the Laplace domain. As its name suggests the model is composed of two parts: a first order function (the integrator) and a second order function (description of a resonance wave). The final model is a third order function without delay (Eq. 1). The integrator part has a gain that is inversely proportional to the backwater area (A_s). The second order function is a damped oscillator with natural frequency ω_0 and resonance peak Mr:

$$G_{IR}(s) = \overbrace{\frac{1}{A_s s}}^{Integrator} \overbrace{\frac{1}{s^2 + 2\omega_0 \zeta s + \omega_0^2}}^{Resonance} \tag{1}$$

where A_s is the backwater area, ω_0 is the natural frequency of the system and ς is the damping ratio. The natural frequency ω_0 is approximated by the resonance frequency. The downstream water level *(h(s))* can be expressed as in [10]:

$$g(s) = \frac{\omega_0^2}{A_s s^3 + \frac{s^2}{Mr} + A_s \omega_0^2 s} q_{in}(s) - \frac{2s^2 + \frac{2}{A_s Mr} s + \omega_0^2}{A_s s^3 + \frac{s^2}{Mr} + A_s \omega_0^2 s} q_{out}(s) \tag{2}$$

where q_{in} is the upstream discharge and q_{out} is the downstream discharge.

Extension of the IR model to a source of the middle of the reach

The transfer functions of the IR model are given for the effect of the upstream and the downstream discharge on the downstream water level in [10]. In some cases, there can be an additional source of discharge or offtake between the upstream and the downstream end of the reach. In case of irrigation canals, this offtake is often located at the downstream end and can be modeled as the same effect as the downstream discharge. However, when this additional discharge source is located far from the downstream (and the upstream) end of the canal its modeling is not so straightforward.

The transfer function between the upstream discharge and the downstream water level and the downstream discharge and the downstream water level has the same denominator, they are the same wave, but with a phase difference of π. The discharge entering in the middle of the

canal can be expressed also as a wave and an integrator. The gain of the integrator should be the same: the discharge feeding the canal that acts at low frequencies as tank and the gain of the integrator is the surface of the reach. The frequency and the peak of the resonance wave should also be the same, since it is the same wave travelling through the whole canal reach, and the frequency is determined by its travel time. Hence the only difference between the transfer function of the upstream, downstream and middle discharge and the downstream water level is the phase of the wave. The general formula for a transfer function between the downstream water level and a discharge source located at any place in the reach is written as:

$$g(s) = \frac{p_1 s^2 + p_2 s + p_3}{A_s s^3 + \frac{s^2}{Mr} + A_s {\omega_0}^2 s} \tag{3}$$

$$p_1 = \frac{1 - \frac{\omega_0 \zeta \sin(p)}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0} - \cos(p)}{A_s} \tag{4}$$

$$p_2 = 2\omega_0 \zeta \frac{1 - \frac{\omega_0 \zeta \sin(p)}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0} - \cos(p)}{A_s} + \frac{{\omega_0}^2}{A_s} \frac{\sin(p)}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0} \tag{5}$$

$$p_3 = {\omega_0}^2 \frac{1 - \frac{\omega_0 \zeta \sin(p)}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0} - \cos(p)}{A_s} + \frac{{\omega_0}^2}{A_s} \left(\frac{\omega_0 \zeta \sin(p)}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0} + \cos(p) \right) \tag{6}$$

where $p \in [0\ \pi]$ is determined by the location of the discharge source and it is the phase of the wave expressed in radians. For upstream discharge source $p=\pi$ and for downstream $p=0$. For a discharge source L_s distance from upstream $p=L_s/L$ where L is the total length of the reach. In these cases Eq. (3) becomes the same equations as presented in [10]. For an intermediate discharge source p is proportional to the distance between the downstream end and the source.

Possible achievable control using the IR model

The wave of the IR model captures the behavior very well around the resonance frequency, and the integrator part models the behavior at low frequencies. If the frequencies are higher than the resonance frequency the approximation is less accurate. Therefore the sampling time should be similar order of magnitude as the resonance frequency. With other words: this model approximates the long term behavior (the time the wave arrives downstream) but between, it is not so accurate to choose many discretization points. Hence and MPC based on IR with for a resonant canal can work with a sampling time more or less not smaller than 1/10 of the period of the wave. If for some reason faster control is needed, it is better to choose another model that represents better the instantaneous behavior of the canal (e.g. IDZ). However, in a lot of cases it

is desirable to control these slow waves, and avoid too many gate movements. Too many gate movements can lead to wear and tear.

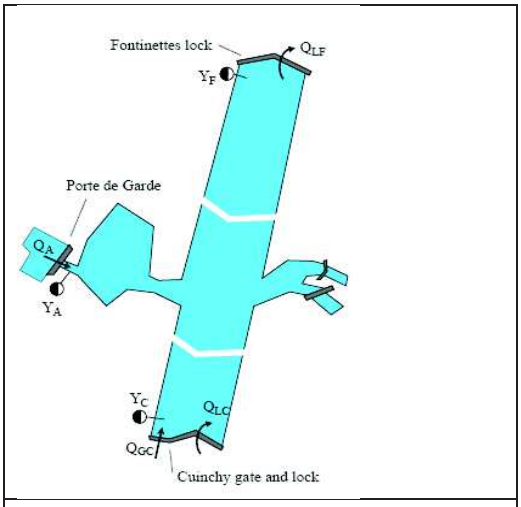


Figure 1. The schematics of the CFR

CASE STUDY: THE CUINCHY-FONTINETTES REACH

Description of the Cuinchy-Fontinettes Reach

The Cuinchy-Fontinettes Reach (CFR) is bounded by upstream the lock of Cuinchy (with discharge Q_{LC}) and downstream by the lock of Fontinettes (with discharge Q_{LF}) (Figure 1). The water level is measured (and to be maintained at *19.52m*) at three locations: (1) upstream, at Cuinchy (Y_C), (2) in the middle of the reach, at Aire (Y_A) and (3) in the downstream and at Fontinettes (Y_F). There are two control action variables (control flows) to achieve this: (1) upstream, the gate of Cuinchy (Q_{GC}) and (2) in the middle of the reach the gate of Aire (Q_A). These control actions are limited:

$$0 \le Q_{GC}(t) \le 10\left[m^3/s\right] \tag{7}$$

$$-7 \le Q_A(t) \le 7\left[m^3/s\right]. \tag{8}$$

The transfer functions between the inputs and the outputs are the following:

$$\begin{pmatrix} Y_C \\ Y_A \\ Y_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{CC} & G_{AC} \\ G_{CA} & G_{AA} \\ G_{CF} & G_{AF} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_{GC} \\ Q_A \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Obtaining the resonance characteristics of the reach and calculating the IR model

In order to apply the IR model to a canal reach the following characteristics are needed: the backwater area, the resonance frequency and the resonance peak. The backwater area can be approximated as the surface area of the canal reach. Resonant canals are usually affected

completely by backwater. The backwater surface can be approximated with the whole canal surface:

$$A_s = LB \tag{10}$$

where A_s is the backwater surface and L is the length and B is the average width of the canal.

The resonance frequency and peak are more complicated to obtain. It can be obtained from field studies, for example from Auto Tune Variation experiments as described in [1]. If there is no experimental data the frequency plot of the canal can be approximated numerically and the value of the resonance peak and frequency can be read from the Bode plots.

The Bode plot of the CF reach was obtained by using a distributed numerical model [3]. From the Bode plot (Figure 2) the characteristics of the reach can be read: the magnitude plot has a straight line in low frequencies: the canal reach behaves as an integrator. The inverse of the slope of this line is the A_s, the backwater area. In high frequencies resonance peaks can be seen. For controller development the first peak is the most important [7], and this is the parameter of the IR model: its frequency and its magnitude. This data is read from the plot and included to the model. The Bode plot of the resulting IR transfer function (G_{CF}) is shown in Figure 2 with dashed line. The transfer functions G_{CA} and G_{CF} are obtained in similar manner. The transfer functions where the discharge influences the water level directly next to the offtake are modeled as integrator (G_{AA} and G_{CC}) and the transfer function between Aire and Cuinchy (G_{AC}), the effect of the discharge in the middle of the reach to the upstream water level is expressed using the second term of Eq. 6.

Figure 3 shows the step response of the three transfer functions with the discharge at different locations. It can be seen that they have the same frequency but different phase.

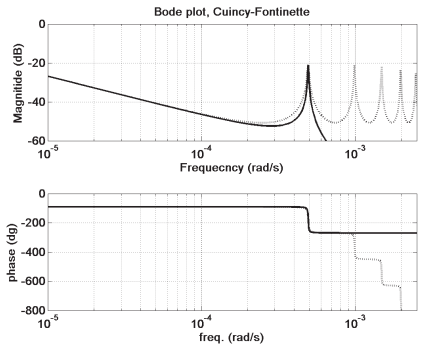


Figure 2: The IR model ($G_{CF}(s)$) of the Cuinchy-Fonitnettes reach compared to the Bode plot

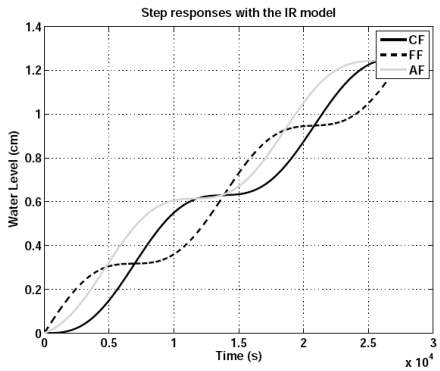


Figure 3: Step response of the IR model, CF is from Cuinchy to Fontinettes, FF is Fontinettes to Fontinettes and AF is Aire to Fontinettes

Controller development

The controller development was carried out in the same way as detailed in [2]. The difference was the choice of the sampling time: for the resonance model a higher sampling (3600s) time is chosen.

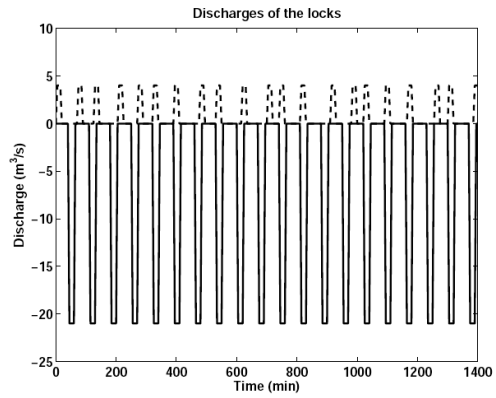


Figure 4: Discharge of the locks, straight line is Fontinettes and dashed line is Cuinchy

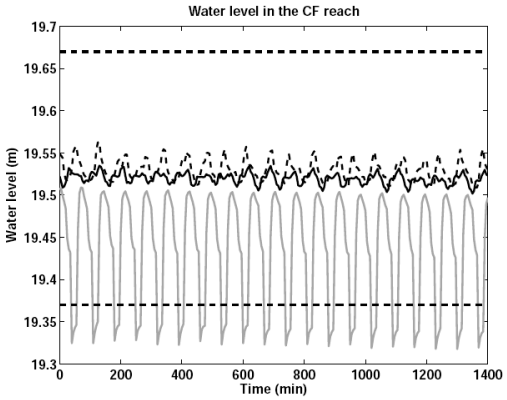


Figure 5: Water levels without control actions: with dashed line Cuinchy, straight line Aire and gray line Fontinettes

RESULTS AND DISCUSSION

The system was tested using MPC based on the IR model for two different scenarios. In the first case the lock operations are unknown, they act as unknown disturbance. This corresponds to the actual operation of the CFR. The second scenario contemplates a future case, when the lock operations are possible to be predicted. In this case, the lock operations are known beforehand for the MPC controller and the controller can start acting before the lock operations occur.

The scenario includes 20 consecutive lock operations during one day. The discharges caused by these lock operations are shown in Figure 4. It can be seen that the magnitude of the maximum discharge is $4m^3/s$ for the lock of Cuinchy and $21m^3/s$ for the lock of Fontinettes. Without applying any control action these lock operations cause the water levels to be out of the navigation range: $\pm 15cm$ (Figure 5). The water level at the lock of Fontinettes drops under the minimum affordable water level ($19.37m$).

Using the implemented controller with unknown disturbances the water levels are kept within the range of navigation. Figure 6 shows all the three water levels. They still fluctuate by the lock operation but they are kept within the range. Sometimes the level at Fontinettes is reaching the minimum allowed water level (with dashed straight line) but it stays within the range. The control actions are shown in Figure 7. The discharge at Cuinchy is kept at the possible maximum value while the discharge at Aire fluctuates. Note that the sampling time is one hour, and hence very few gate movements are required by the controller.

In case the lock operations are known the controller can treat them as known disturbances. The resulting water levels are shown in Figure 8. The water levels stay within the navigation range as expected before. The water level at Cuinchy is slightly higher than before, approaching more the upper limit. While the water levels at Fontinettes are further from the minimal limit compared to the case when the disturbances were unknown. The control actions are shown in Figure 9. Just as in the previous case the controller keeps the discharge at Cuinchy in the maximum and changes the discharge at Aire. The reason for this can be that the biggest changes occur at the downstream end, at Fontintettes. A change from Aire arrives earlier than from

Cuinchy (upstream), therefore the controller manipulates more this intermediate discharge source.

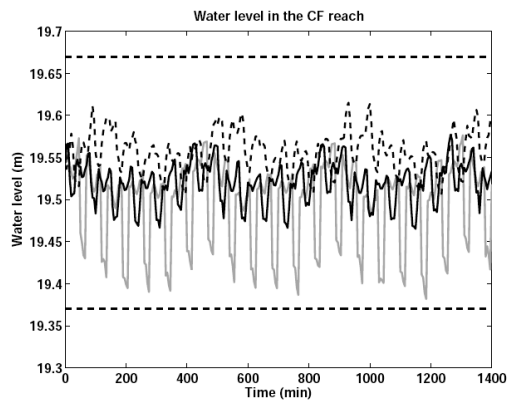


Figure 6: Controlled water levels: with dashed line Cuinchy, straight line Aire and gray line Fontinettes

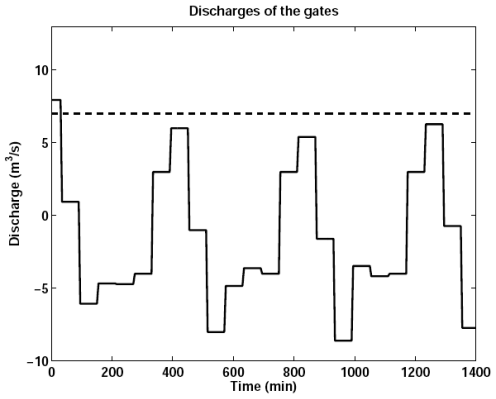


Figure 7: Discharge of the gates, straight line is Aire and dashed line is Cuinchy

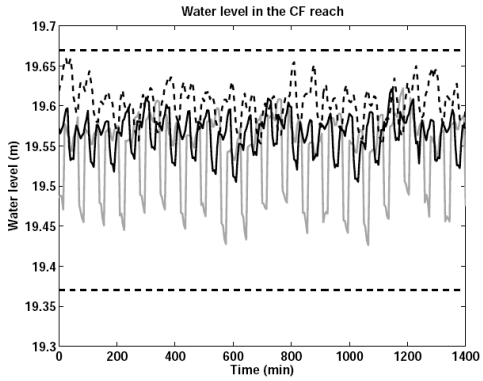


Figure 8: Controlled water levels: with dashed line Cuinchy, straight line Aire and gray line Fontinettes

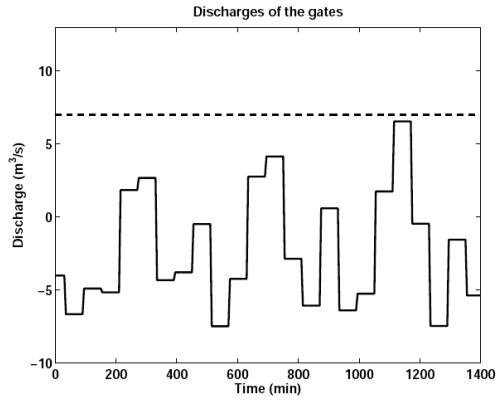


Figure 9: Discharge of the locks, straight line is Aire and dashed line is Cuinchy

CONCLUSION

MPC controller based on a model including resonance was implemented to control the water level in a navigation reach. The water level is disturbed by the lock operations that generate big amplitude waves that are traveling several times back and forth in the reach. The goal to keep the water level within the range of navigation was achieved by the controller. This work belongs to the GEPET-Eau project that aims to the adaptive predictive management of navigation networks in the context of global change. This work contributes to the small scale

modeling of a navigation reach. Further work can be to improve the modeling work, to study the influence of the resonance characteristics and the different operation conditions to the control. Finally the modeling and control work can be extended to the network of navigation reaches.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is a contribution to the GEPET'Eau project which is granted by the French ministry MEDDE - GICC, the French institution ORNERC and the DGITM. More information about the GEPETEau project can be found at: http://gepeteau.wordpress.com/enversion/.

REFERENCES

[1] A. Clemmens, X. Litrico, P.-J. van Overloop, and R. Strand. Estimating canal pool resonance with auto tune variation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(1):9-15, 2012.

[2] K. Horváth, M. Petreczky, L. Rajaoarisoa, E. Duviella, and K. Chuquet. MPC control of water level in a navigation canal: the Cuinchy-Fontinettes case study. In 13th European Control Conference (ECC), Submitted, 2014.

[3] X. Litrico and V. Fromion. Frequency modeling of open-channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, 130(8):806-815, 2004.

[4] R. Negenborn, P.-J. van Overloop, T. Keviczky, and B. De Schutter. Distributed model predictive control of irrigation canals. Networks and Heterogeneous Media, 4(2):359-380, 2009.

[5] V. Puig, J. Romera, J. Quevedo, C. M. Cardona, A. Salterain, E. Ayesa, I. Irizar, A. Castro, M. Lujan, P. Charbonnaud, P. Chiron, and J.-L. Trouvat. Optimal predictive control of water transport systems: Arrêt-Darré/Arros case study. Water Science and Technology, 60(8):2125-2133, 2009.

[6] J. Schuurmans. Control of water levels in open channels. PhD thesis, Delft Univer- sity of Technology, Delft, The Netherlands, 1997.

[7] P.-J. van Overloop. Model predictive control on open water systems. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.

[8] P.-J. van Overloop. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM canal. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(11):747-756, 2010.

[9] P.-J. van Overloop and X. Bombois. Identification of properties of open water chan-nels for controller design. In IFAC Symposium on System Identification, volume 16, pages 1019-1024, 2012.

[10] P.-J. van Overloop, I. J. Miltenburg, X. Bombois, A. J. Clemmens, R. Strand, and N. van de Giesen. Identification of resonance waves in open water channels. Control Engineering Practice, 18(8):863-872, 2010.

[11] P.-J. van Overloop, R.R. Negenborn, B. De Schutter, and N.C. van de Giesen. Pre- dictive control for national water flow optimization in The Netherlands. In R.R. Negenborn, Z. Lukszo, and H. Hellendoorn, editors, Intelligent Infrastructures, volume 42 of Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, chapter 17, pages 439-461. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2010.

[12] P.-J. van Overloop, S. Weijs, and S. Dijkstra. Multiple model predictive control on a drainage canal system. Control Engineering Practice, 16(5):531-540, 2008.

Preprints of the 19th World Congress
The International Federation of Automatic Control
Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014

Large-scale system control based on decentralized design. Application to Cuinchy Fontinette Reach ⋆

L. Rajaoarisoa * **K. Horváth** * **E. Duviella** * **K. Chuquet** **

* *Mines-Telecom Institute. Mines Douai, Departement of Computer Sciences and Automatic Control, 59 500 Douai, France, (e-mail: {lala.rajaoarisoa, klaudia.horvath, eric.duviella}@mine-douai.fr).*
** *VNF - Service de la navigation du Nord Pas-de-Calais, 59 034 Lille Cedex, France, (e-mail:karine.chuquet@vnf.fr)*

Abstract: Large scale engineering systems are typically composed by several subsystems that interact with each other as a result of material, energy and information flows. A high performance control technology such as decentralized control can be employed for control this class of systems.
An optimal decentralized control architecture is presented in this paper in order to ensure the efficient management of an inland navigation network in a global change context. For further logic, we show that if the subsystems present a connectivity from one to another, suitable local feedback action provided by these subsystem (decentralized controllers) may be sufficient if the subsystems are connected. Stabilizability (resp. stability) conditions are given for perfectly decoupled and interconnected coupled (by connectivity parameters) subsystems.

Keywords: Large-scale system; Inland navigation; Decentralized optimal controller; Controller design.

1. INTRODUCTION

Inland navigation networks are large scale systems composed of interconnected rivers and channels (*see* Figure 1). These networks are equipped with locks which are dedicated to the navigation task. To accommodate the navigation, the main objective is to ensure the seaworthiness condition, *i.e.* to maintain the levels close to setpoint designated by Normal Navigation Level (NNL). Achieving this objective is still a challenge due to the complexity of the networks, their dimensions, the impacts of the environment, the effect of extreme events like flood and drought, etc. One of solutions is the design of decentralized controllers [Sawadogo et al., 1998, 2000, Gómez et al., 2002]. It has been long recognized that to control an interconnected system, it is beneficial to decompose it into subsystems, and design control of each subsystem independently on the basis of local subsytem dynamics and the nature of their interconnections [Doan et al., 2009]. Three main reasons due for those [Siljak, 1991]:

- dimension of the system,
- information structure constraints,
- delays for the accuracy of the transmitted information,
- uncertainty.

For the last point, the essential uncertainty arises in the interconnections between different parts of the subsystems, since the local characteristics of each individual subsystem, should be modeled in most practical situations. Decentralized controller design addresses this issue and in other hand can significantly reduce the controller complexity [Jamshidi, 1997], [Rotkowitz and Lall, 2002], [Bakule, 2008]. Two main approaches are proposed to deal with the problem of interconnections [Lunze, 1992]. The first one is the passive approach. A decentralized control is designed for each isolated subsystem for certain desirable performance. The design is independent of the knowledge of interconnections. The control is then applied to the overall system [Siljak, 1991]. The second one is the synthetic approach. In this case, interconnections are explicitly taken into account when designing the controls [Gavel and D.D., 1989]. There is a large number of survey papers [Sandell et al., 1978], [Chae and Bien, 1991], and books [Leondes, 1985], [Gajié and Shen, 1993] which can provide to the reader further information on decentralized control theory and practice.

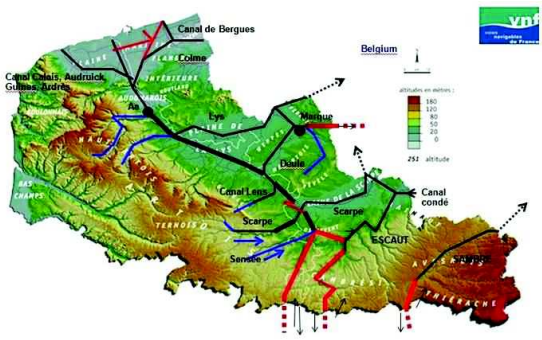


Fig. 1. Inland navigation network

In the field of water systems, Malaterre and Baume [Malaterre and Baume, 1999] also study the coupling and the possible decouplers when analyzing the coupling of the subsystems. Decentralized control using decouplers are implemented *e.g.* by [Montazar et al., 2005], [Aguilar et al., 2011]. Lemos [Lemos et al., 2007] describes the combination of multiple individual predictive controllers. Begovich [Begovich et al., 2007] used Relative Gain Array technique to check the feasibility of decentralized control of a laboratory irrigation canal. Cantoni [Can-

⋆ This work work is a contribution to the GEPET'Eau project which granted by the French Ministery MEDDE - GICC, the French institution ORNERC and the DGITM.

Copyright © 2014 IFAC

toni et al., 2007] analyses numerically and then gives a theoretical background to the disturbance propagation and explores the possible feedforward combination (decoupler). His results are supported with field experiments. The coupling is further analyzed mathematically, in case of n identical pools in [Li and De Schutter, 2010]. They give guidelines to design decentralized feedback controllers, by having a trade-off between local and global performance, with other words setpoint tracking and disturbance rejection. Another issue concerns the stability of decentralized control. Several researchers have analyzed the stability and the decoupling of decentralized controllers. For example, the possible destabilization of decentralized controllers of water systems is addressed in [Schuurmans, 1997].

1.1 Paper contribution

In this paper, we discuss on the existence of an optimal state (resp. output) feedback decentralized control of the system under investigation. A complete architecture is studied with two constraitns. The first one is the time-delay for information transmission between two subsystems and the second one is the influence of one controlled subsystem to antoher one. This architecture aims to ensure an efficient management of inland navigation networks by dealing with the interconnections of each subsystems taking into account their interactions with each other (smooth or not). Thus, a local feedback action, provided by these subsystems (decentralized controllers), is tuned to get arround effictively the effect of their interactions. Stability conditions are given to guarantee the feasability and the convergence of decentralized controllers. On the other hand, we show that a perfectly decoupled decentralized control can be deduced via coupled and interconnected subsystems. The above mentioned decouplers can be seen as particular cases of the general design given in this paper.

1.2 Paper outline

This paper is organized as follows. In Section 2 we formulate the problem to describe a suitable design for a decentralized controller by mathematical relationship. In Section 3, we present our main result about stabilizability conditions of decentralized controller form for a large-scale systems. In Section 4, we use the Cuinchy-Fontinette Reach as a demonstrating example to verify the feasability of the approach and at the end, in Section 5, we shall give the conclusion of this work.

2. DECENTRALIZED CONTROLLER DESIGN

2.1 Large scale system modelling

As motivating case study we consider a large-scale system (*LSS*), described by the following equations :

$$LSS: \begin{cases} x(t+1) = f(x,u,t), \;\; x(t_0) = x_0, \;\; x \in \mathbb{R}^n, \\ y(t) = g(x,t), \qquad\quad t \in \mathbb{N}. \end{cases} \tag{1}$$

where u, x and y are respectively the set of input, state and output terms of the system. t defines the continuous time.

In linear and stationary cases, the large-scale system (*LSS*) can be writting with the following state-space equations:

$$LSS: \begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0 \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases} \tag{2}$$

where $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^p$, $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p\times n}$, composed of s linear time-delay subsystems LSS_i, described by:

$$LSS_i: \begin{cases} x_i(t+1) = A_{i,i}x_i(t) + B_{i,i}u_i(t) + \sum_{j=1}^{s} \\ \qquad\qquad [A_{i,j}x_j(t-\tau_{i,j}) + B_{i,j}u_j(t-\tau_{i,j})] \\ \qquad\qquad \text{for } i = 1,2,...,s \text{ and } j \neq i, \\ \\ y_i(t) = C_{i,i}x_i(t) + D_{i,i}u_i(t), \end{cases} \tag{3}$$

$\tau \in \mathbb{N}^{n_i}$ is the time delay matrix between the measurement points y_i and y_j. $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$, $u_i \in \mathbb{R}^{m_i}$, are the state and input of subsystem SS_i. $A_{i,i}$, $B_{i,i}$, $A_{i,j}$ and $B_{i,j}$ are coefficients of constant matrices with proper dimensions. The term $\sum_{j=1}^{s}(A_{i,j}x_j(t-\tau_{i,j}) + B_{i,j}u_j(t-\tau_{i,j}))$ is due to the effect of the time-delay input measurement value from one subsystem to each other.

Thus, the objective in this paper is to design a set of optimal output feedback controller whose action would be sufficient to overcome the effect of interactions, and allows efficiently the control of the global system (3) such that:

$$u_i = -K_{i,i}C_{i,i}x_i. \tag{4}$$

In order to do that, stabilizability (resp. stability) conditions are given in the next section for interconnected coupled subsystems using easily the connectivity parameter values.

2.2 Controller tuning

As large engineering systems are typically composed by a number of subsystems, it is quite natural to use a high performance control technology such as decentralized design for control these systems.

In this paper, we discuss about the completly coupled subsystems architecture with an ideal controller feature like is shown in Fig. 2. Herein the block *LSS* illustres each subsystem, the block τ defines the time delay matrix between two measurement points, the block Γ represents the interconnection matrix between each subsystem and K_i for $i = 1,...,s$ represents each optimal control gain.

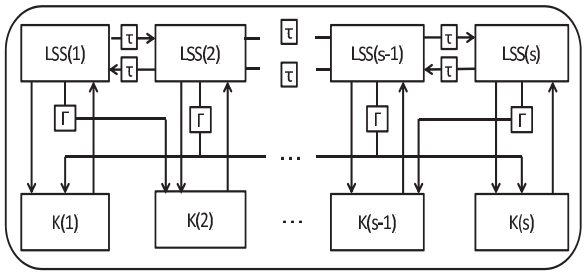


Fig. 2. Interconnected decentralized control

According to this architecture, let us define that:

Definition 1. The global system have a connectivity from and to another subsystem if there exists a matrix Γ definite positive weighting the interconnection of a subsystem i to another

subsystem j. In other terms, Γ is the positive weighting interconnection values which are used to model the strength of interconnection. This interconnection matrix can be described by the term:

$$\Gamma_{i,j} = K_{i,j} x_j. \tag{5}$$

While considering that the gains of controllers have strong interaction, the mathematical relationship of input/output pair, describing the control problem is the following:

$$u_i = -(K_{i,i} C_{i,i} x_i + \sum_{j=1}^{s} \Gamma_{i,j}) \text{ with } j \neq i \text{ and for } i = 1, ..., s \tag{6}$$

where u_i depends on the locally available state x_i of the i^{th} subsystem

$$LSS_i : x_i(t+1) = A_{i,i} x_i(t) + B_{i,i} u_i(t) \tag{7}$$

For ease the reading, let considerate that the dynamical of the measured state $x(t)$ is given by the simplified relation:

$$LSS : \begin{cases} x(t+1) = A_0 x(t) + B_0 u(t) + A_1 x(t-\tau) \\ \qquad\qquad + B_1 u(t-\tau), \\ y(t) = C_0 x(t) \;\; x(t_0) = x_0 \end{cases} \tag{8}$$

where the matrix C_0 is the identity matrix $I \in \mathbb{R}^{n \times n}$. A_0 and B_0 are respectively the diagonal matrices composed by $A_{i,i}$ and $B_{i,i}$ terms. A_1 and B_1 are respectively the interconnectivity matrices composed by $A_{i,j}$ and $B_{i,j}$ values due to the time delay.

So, the control design problem is described in this case by:

$$u(t) = Kx(t), \tag{9}$$

to minimize the quadratic cost function

$$J(u_i) = \sum (x_i^T S x_i + u_i^T R u_i + 2 x_i^T N u_i) dt \tag{10}$$

subjects to the system defined by equation (8).

In equation (10) S, R and N are weighting matrices, or design parameters, where the state-cost matrix, S, weights the state while the performance index matrix, R, weights the control effort. If S is increased while R remains constant, the setting time will be reduced as the states approach zero at a faster rate. The controller in this case maintain the error sufficiently small to guarantee the convergence of controller.

One solution to solve the problem (10) is developed by [Boyd et al., 1994] as:

Theorem 1. For finite-dimensional systems, if there exists matrices $P = P^T > 0$, $S > 0$ and $R > 0$, $\forall i = 1, ..., s$ such as

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + P & P B_0 + N^T \\ B_0^T P + N & R \end{bmatrix} \geq 0 \tag{11}$$

satisfying the algebraic Riccati equation

$$A_0^T P + P A_0 - (P B_0 + N) R^{-1} (B_0^T P + N^T) + S = 0 \tag{12}$$

then the controller defined by equation (9) with

$$K_{i,i} = R^{-1} (B_0^T P + N^T) \tag{13}$$

stabilize the nominal closed-loop decentralized system described by the relation (8), $\forall i$ values.

Proof 1. The previous results hold, as demonstrated in [Boyd et al., 1994], if the pair (A_0, B_0) are stabilizable, $R > 0$, $S - NR^{-1}N^T \geq 0$ and $S - NR^{-1}N^T$, $A_0 - B_0 R^{-1} N^T$ has no unobservable mode.

One can see easily here that this feature stands up if the following conditions holds:

- The closed-loop system should be stable if each subsystem LSS_i is stable.
- The controller should maintain the error sufficiently small to guarantee its convergence.

The stabilizability proof of this feature is given in Section 3, both to ensure the convergence of the controller and the stability of the overall system.

3. STABILIZATION

In order to state on the stabilizability of the plant using decentralized approach, we focus our study once again on an optimal feedback controller, in interconnected coupled case.

Moreover, we also desire to guarantee the stability of the global closed-loop system under all operation conditions of whole subsystems LSS_i. To do this, set the following expressions which are necessary for the stabilizability criterion:

Definition 2. The equilibrium point $x^* = x_0$ of (8) is stable (in the sense of Lyapunov) at initial time $t = t_0$ if for any $\varepsilon > 0$ there exists a $\delta(t_0, \varepsilon) > 0$ such that

$$\|x(t_0)\| < \delta \implies \|x(t)\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0 \tag{14}$$

On the other hand, we know that systems (8) may be infinite dimensions, but the state $x(t)$ evolves on the interval $t \in [0, +\infty)$. Thus,

Definition 3. A large scale system mapping x and u is causal if and only if, for any pair of input signals $u_i(t)$ and $u_j(t)$ such that $u_i(t) = u_j(t)$, $\forall t \leq t_0$, the corresponding states satisfy $x_i(t) = x_j(t)$, $\forall t \leq t_0$.

Theorem 2. The interconnected coupled subsystem (8) is locally stabilizable (resp. stable) by a linear state (output) feedback control law

$$u_i(t) = -K_i x_i(t)$$

such that controller K exits and its diagonal blocks are s separate controllers defined by

$$K = diag\,(K_i), \;\; \forall i = 1 \, to \, s$$

if

- the large scale system is causal, and
- there exists a symmetric definite positive matrix $P = P^T > 0$ where

$$\mathfrak{L}(P) = \tilde{A_0}^T P \tilde{A_0} - P < 0 \tag{15}$$

for any equilibrium initial state function $x(t_0)$ and with $\tilde{A_0} = (A_0 - B_0 K)$.

The following statement is equivalent with the result above. In fact,

Corrolary 1. If controller K exits and its diagonal blocks are s separate controllers, then a perfectly decoupled decentralized control design is identified. So, the decoupled controlled subsystem is stabilizable with independant local feedback action defined by the linear state (output) feedback control law:

$$u_i(t) = -K_i x_i(t)$$

if there exists a symmetric definite positive matrix $P = P^T > 0$ where

$$\mathfrak{L}(P) = \tilde{A_0}^T P \tilde{A_0} - P < 0$$

for any equilibrium initial state function $x(t_0)$ and with $\tilde{A_0} = (A_0 - B_0 K)$.

Proof 2. These statements are straightforward to demonstrate. Indeed, if a perfectly decoupled decentralized control design is identified, the stability property falls within the previous theorem since this is a special case of the previous result.

Theorem 3. The interconnected coupled subsystem (8) is globally stabilizable (resp. stable) by a linear state (output) feedback control law

$$u_i(t) = -(K_{i,i} x_i(t) + \sum_{j=1}^{s} \Gamma_{i,j}) \text{ with } j \neq i \text{ and for } i = 1, ..., s$$

if

- locally the system is stable,
- and there exists a symmetric definite positive matrices $Q = Q^T > 0$ and $P = P^T > 0$ which satisfy the following conditions

$$\tilde{A_0}^T Q \tilde{A_0} < 0 \tag{16}$$

$$\tilde{A_i}^{T^n} \mathfrak{L}(P) \tilde{A_i}^n < 0 \quad \text{with } n \in \mathbb{N} \tag{17}$$

for any equilibrium initial state function $x(t_0)$

Proof 3. A classical way to prove the stability of one system is to use the Lyapunov function concept. Thus, set $V(x)$ the common quadratic Lyapunov-like function defined by the relation

$$V(x) = x(t)^T P x(t) \tag{18}$$

and satisfies the stability condition

$$\Delta V(x) = V(x(t+1)) - V(x(t)) \ < 0, \tag{19}$$

for the system described by (8).

In closed-loop point of view, the dynamical of the measured state $x(t)$ is given by the relation:

$$x(t+1) = (A_0 - B_0 K) x(t) - (A_1 - B_1 K) x(t - \tau)$$

therefore this last expression is equivalent to the previous one below

$$x(t+1) = \tilde{A_0} x(t) - \tilde{A_1} x(t - \tau)$$

with $\tilde{A_0} = (A_0 - B_0 K)$ and $\tilde{A_1} = (A_1 - B_1 K)$.

Two cases can be considerate to verify theorems 2 and 3. The first one is to check stability when the system evolves in the interval $t \in [t_0, \tau\,[$ and the second one when it evolves in the interval $t \in [\tau, \infty\,)$ for any pair of input signals $u_i(t)$ and $u_j(t)$ such that $u_i(t) = u_j(t) = 0$, with the corresponding states $x_i(t) = x_j(t) = 0, \forall t \leq t_0$.

- Case 1: the system evolves in the interval $t \in [t_0, \tau\,[$. Thus,

$$\begin{aligned}\Delta V(x) &= V(x(t+1)) - V(x(t)) \ < 0 \\ &= x(t+1)^T P x(t+1) - x(t)^T P x(t) \ < 0 \\ &= x(t)^T \tilde{A_0}^T P \tilde{A_0} x(t) - x(t)^T P x(t) \ < 0 \\ &= x(t)^T (\tilde{A_0}^T P \tilde{A_0} - P) x(t) \ < 0\end{aligned}$$

  therefore, if $\mathfrak{L}(P) = \tilde{A_0}^T P \tilde{A_0} - P < 0$, the inteconnected subsystem (8) is locally stabilizable (resp. stable) by a linear output feedback control law

$$u_i(t) = -K_i x_i(t).$$

- Case 2: the system evolves in the interval $t \in [\tau, \infty\,)$. Thus, the dynamical of the measured state $x(t)$ is in fact:

$$\begin{aligned}x(1) &= \tilde{A_0} x(0) \\ x(2) &= \tilde{A_0} x(1) = \tilde{A_0}^2 x(0) \\ \vdots &= \vdots \\ x(\tau - 1) &= \tilde{A_0} x(\tau - 2) = \tilde{A_0}^{\tau - 1} x(0) \\ x(\tau) &= \tilde{A_0} x(\tau - 1) + \tilde{A_1} x(0) \\ &= (\tilde{A_0}^{\tau} + \tilde{A_1}) x(0) \\ x(\tau + 1) &= \tilde{A_0} x(\tau) + \tilde{A_1} x(1) \\ &= (\tilde{A_0}^{\tau+1} + \tilde{A_0}\tilde{A_1} + \tilde{A_1}\tilde{A_0}) x(0)\end{aligned}$$

  therefore, the derivative of the Lyapunov function has the following schema:

$$\begin{aligned}\Delta V(x) &= V(x(\tau+1)) - V(x(\tau)) \ < 0, \\ &= x(\tau+1)^T P x(\tau+1) - x(\tau)^T P x(\tau) \ < 0 \\ &= x(0)^T (\tilde{A_0}^{\tau+1} + \tilde{A_0}\tilde{A_1} + \tilde{A_1}\tilde{A_0})^T P \Big(\tilde{A_0}^{\tau+1} + \\ &\tilde{A_0}\tilde{A_1} + \tilde{A_1}\tilde{A_0}\Big) x(0) - x(0)^T (\tilde{A_0}^{\tau} + \tilde{A_1})^T P + \\ &(\tilde{A_0}^{\tau} + \tilde{A_1}) x(0) < 0 \\ &= x(0)^T \Big[\tilde{A_1}^T \mathfrak{L}(P) \tilde{A_1} + A_0^{T^{\tau}} \mathfrak{L}(P) \tilde{A_0}^{\tau} + \\ &\tilde{A_0}^T Q \tilde{A_0}\Big] x(0) < 0\end{aligned}$$

  with $Q = \tilde{A_1}^T P \tilde{A_1}$.

  Assume that the initial condition $x(0)$ is a stable equilibrium point for the system (8) and this last is locally stable, therefore the coupled subsystem is globally stabilizable (resp. stable) by a linear state (output) feedback control law

$$u_i(t) = -(K_{i,i} x_i(t) + \sum_{j=1}^{s} \Gamma_{i,j})$$

with $j \neq i$ and $i = 1, ..., s$, if there exist a Lyapunov function $V(x)$ defined by (18) and a quadratic function $V(x(t))$ such that $V_(x(t_0)) = 0$ and $V_(x(t)) > 0, \forall x > 0$ and $\Delta V(x) < 0, \forall x \neq 0$, then the origin of the state space of the system (8) is globally stable under all operation conditions of overall subsystems LSS_i.

4. ILLUSTRATIVE EXAMPLE

As demonstrating example, we consider a part of the inland navigation network in the north of the France (Fig. 3), the Cuinchy-Fontinette Reach (CFR). Note that the management of this system is ensured by VNF (Voies Navigables de France), and the goal is to maintain the water level of the channel at $NNL = 19.52m$.

Fig. 3. The real system in exploitation

The CFR has a major importance for the management of this inland navigation network because it is located in the center of

the network, between the upstream lock of Cuinchy at the East of the town Bethune and the downstream lock of Fontinettes at the Southwest of the town Saint-Omer. So, the head part of the

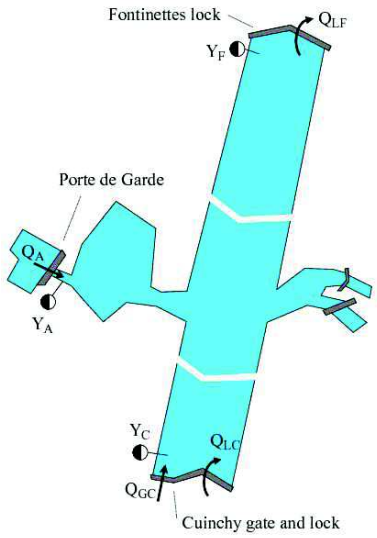


Fig. 4. Scheme of the Cuinchy-Fontinettes navigation reach

CFR system has 28.7Km (Fig. 4) from Cuinchy sluice gate to Aire-sur-la-Lys. While, the bottom part has 13.6Km from Aire-sur-la-Lys sluice gate to Saint-Omer.

By computing the system's model for control purposes, we consider the *NNL* operating points. However, in this section we don't discuss about the identification technique of the model, we just use the model whose architecture has been proposed and validated in [Duviella et al., 2013]. Herein, it shown that the CFR system can be modelled with a state-space linear model with fixed delays described by the relation (3). For the CFR system, the state variable $x(t)$ at the instant t represents the water levels $L_i(t)$, with $i = 1,2,3$ representing three subsystems, which are measured in the reach. The variables $u(t)$ are the input/output discharges $Q_l(t)$ of the reach. The variables $y(t)$ are the water levels in the reach. Each vairable is expressed according to the delay matrix τ whose the element is gotten by data-based procedure or by physical knowledge of the system. Theoretically, the time-delay matrix is given by the following relation [Litrico and Fromion, 2004], while considering two points along the canal separated by a distance D:

$$\tau = \int_0^D \frac{dl}{c(l)+v(l)} \tag{20}$$

where $c(l)$ and $v(l)$ represent respectively the celerity and the velocity. This relation gives the following result for the CFR system:

$$\tau = \begin{pmatrix} 0 & 75 & 110 \\ 75 & 0 & 36 \\ 110 & 36 & 0 \end{pmatrix}.$$

As said above, we use for designing the controller a suitable state-space model for the system. The nominal system matrices are:

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0.873 & 0 & 0 \\ 0 & 0.943 & 0 \\ 0 & 0 & 0.781 \end{pmatrix}; B_0 = \begin{pmatrix} 0.00114 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00023 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00175 \end{pmatrix};$$

$$C_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

and the interconnectivity due to the incertainty is given by the following matrices:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.116 & 0.011 \\ 0.044 & 0 & 0.014 \\ 0.092 & 0.126 & 0 \end{pmatrix};$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.00078 & -0.0009 \\ -0.00008 & 0 & 0.00005 \\ -0.00014 & 0.00348 & 0 \end{pmatrix};$$

- Case 1: Existence of a stabilizable decoupled architecture
  Using the relation (13), let verify and compute if controller K exists, and if its diagonal blocks are s separate controllers. The result is:
  $$K = \begin{pmatrix} 1.5316 & 0 & 0 \\ 0 & 8.2000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8926 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+3};$$
  If K exists we can compute the associate P matrix which necessary for proving the stabilizability (resp. stability) of the structure. P's value is the following:
  $$P = \begin{pmatrix} 0.1343 & 0 & 0 \\ 0 & 3.5652 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0510 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+3};$$
  To check if the system is stabilizable with independant local feedback action, we test if the Lyapunov operator is negative for all instant $t > 0$ ($\mathfrak{L}(P) < 0 \ \forall t > 0$) according to the theorem 2. The numerical value of this operator is:
  $$\mathfrak{L}(P) = \begin{pmatrix} -0.3196 & 0 & 0 \\ 0 & -3.9485 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1989 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+6} < 0;$$
  The derivative of the common Lyapunov quadratic function $V(x) = x(t)^T P x(t)$ is negative and therefore the decoupled subsystem is locally stabilizable (resp. stable) by a linear state (output) feedback control law.
- Case 2: Existence of a stabilizable interconnected architecture
  After the computation, the two parts of the controller gain are:
  $$K_0 = \begin{pmatrix} 0.9052 & 0.7149 & -0.1532 \\ 0.1442 & 7.1339 & -0.0291 \\ -0.2352 & -0.2214 & 0.2198 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+3};$$
  $$K_1 = \begin{pmatrix} 0 & -2.4637 & -0.0075 \\ 0.1517 & 0 & 0.3322 \\ -0.6833 & 0.9864 & 0 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+3};$$
  and with these values, P and Q matrices are:
  $$Q = \begin{pmatrix} 0.4911 & -0.9816 & 0.1056 \\ -0.9816 & 2.4247 & -0.1085 \\ 0.1056 & -0.1085 & 0.1451 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+6};$$
  $$P = \begin{pmatrix} 0.0794 & 0.0627 & -0.0134 \\ 0.0627 & 3.1017 & -0.0127 \\ -0.0134 & -0.0127 & 0.0126 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+7};$$
  The first criterion of the theorem 3 gives the following result:
  $$\tilde{A_0}^T Q \tilde{A_0} = \begin{pmatrix} 0.1847 & -0.0186 & 0.1831 \\ -0.0186 & 4.0419 & 0.6883 \\ 0.1831 & 0.6883 & 0.4965 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+5},$$
  where all eigenvalues have a negative real parts, $\Rightarrow \tilde{A_0}^T Q \tilde{A_0} < 0$.

For the second criterion, we just illustrate the stability test for $n = 2$. Furthermore, for all values of n the condition is always satisfied.

$$\tilde{A_0^T}^2 \mathfrak{L}(P) \tilde{A_0}^2 = \begin{pmatrix} -0.0205 & -0.2636 & 0.0016 \\ -0.2636 & -4.0118 & 0.0591 \\ 0.0016 & 0.0591 & -0.0048 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+6},$$

All eigenvalues of this matrix have negative real parts, $\Rightarrow \tilde{A_0^T}^2 \mathfrak{L}(P) \tilde{A_0}^2 < 0$;

$$\tilde{A_1^T}^2 \mathfrak{L}(P) \tilde{A_1}^2 = \begin{pmatrix} -4.1281 & 5.8909 & -2.3450 \\ 5.8909 & -9.3258 & 2.4743 \\ -2.3450 & 2.4743 & -2.1758 \end{pmatrix} \times 1.0e^{+5},$$

This computation gives also a negative real parts for all eigenvalues, $\Rightarrow \tilde{A_1^T}^2 \mathfrak{L}(P) \tilde{A_1}^2 < 0$.

Once again, the derivative of the common Lyapunov quadratic function $V(x) = x(t)^T P x(t)$ is negative and therefore the interconnected architecture is globally stabilizable (resp. stable) by a linear state (output) feedback control law.

5. CONCLUSION

Typically, large engineering systems are composed by a several subsystems that interact with each other. The interconnections between different parts of the systems (subsystems) since the local characteristics of each individual subsystem required in practical situations a performed control technology such as decentralized control. This last is particularly intertesting because it reduces the controller complexity and ease the practical implementation.

We have presented an optimal decentralized control architecture in this paper in order to ensure the efficient management of an inland navigation network whose main objective is to ensure the seaworthiness condition, *i.e.* to maintain the levels close to setpoint designated by Normal Navigation Level (NNL). We have shown that if the subsystems present a connectivity from one to another, suitable local feedback action provided by these subsystem (decentralized controllers) may be sufficient for control purposes. Stabilizability (resp. stability) conditions are given both for perfectly decoupled and interconnected coupled (by connectivity parameters) subsystems controlled by an optimal linear state (output) feedback regulator.

REFERENCES

J. Aguilar, P. Langarita, L. Linares, E. Galvis, K. Horváth, J. Rodellar, and M. Gómez. Control automatico de niveles en un canal experimental dividido en tres tramos. *JIA 2011. II Jornadas del Ingenierá del agua, Modelos numéricos en dinámica fuvial*, 2011.

L. Bakule. Decentralized control : an overview. *Annual reviews in control*, 32:87–98, 2008.

O. Begovich, J.C. Felipe, and V.M. Ruiz. Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype. *in Asian Journal of Control*, 9, 2007.

S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, Philadelphia, PA, 1994.

M. Cantoni, E. Weyer, Y. Li, S.K. Ooi, I. Mareels, and M. Ryan. Control of large-scale irrigation networks. *IEEE Special Issue on Technology of Networked Control Systems*, 95:75–91, 2007.

S. Chae and Z. Bien. Techniques for decentralized control for interconnected systems. *in Control and Dynamic Systems*, 41:273–315, 1991.

D. Doan, T. Keviczky, I. Necoara, M. Diehl, and B. De Schutter. A distributed version of han's method for dmpc of dynamically coupled systems with coupled constraints. *in: Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems*, pages 240–245, 2009.

E. Duviella, L. Rajaoarisoa, J. Blesa, and K. Chuquet. Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the cuinchy-fontinettes reach. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, 2013.

Z. Gajié and X. Shen. Parallel algorithms for optimal control of large-scale linear systems. *in Springer-Verlag*, 1993.

D.T. Gavel and Siljak D.D. Decentralized adaptive control : Structural conditions for stability. *in IEEE Transactions on Automatic Control*, 34:413–426, 1989.

M. Gómez, J. Rodellar, and J. Mantecón. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. *in Applied Mathematical Modelling*, 26:1039–1056, 2002.

M. Jamshidi. Large-scale systems : Modeling, control and fuzzy logic. *in Prentice-Hall*, 1997.

J.M. Lemos, L.M. Rato, F. Machado, N. Nogueira, P. Salgueiro, and R. Neves-Silva. Predictive adaptive control of water level in canal pools. *in: Proceedings of the 16th International Conference on Systems Science*, 2007.

C.T. Leondes. Control and dynamic systems. *Academic Press, Orlando, Fl*, pages 22–24, 1985.

Y. Li and B. De Schutter. Control of a string of identical pools using non-identical feedback controllers. *in: Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*, 2010.

X. Litrico and V. Fromion. Simplified modeling of irrigation canals for controller design. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(5):373–383, 2004.

J. Lunze. Feedback control of large-scale systems. *in Prentice-Hall*, 1992.

P.O. Malaterre and J-P. Baume. Optimal choice of control action variables and linked algorithms: Comparaison of different alternatives. *in Proceedings of USCID Workshop on modernization of irrigation water delivery systems*, pages 387–405, 1999.

A. Montazar, P.J. van Overloop, and R. Brouwer. Centralized controller for the narmada main canal. *in Irrigation and drainage*, 54:79–89, 2005.

M. Rotkowitz and S. Lall. Decentralized control information structures preserved under feedback. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pages 569–575, 2002.

N.R. Sandell, P. Varaiya, M. Athans, and Safonov M.G. Survey of decentralized control methods for large-scale systems. *in IEEE Transactions on Automatic Cotnrol*, 23:108–128, 1978.

S. Sawadogo, R.M. Faye, P.O. Malaterre, and F. Mora-Camino. Decentralized predictive cotnroller for delivery canals. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 3880–3884, 1998.

S. Sawadogo, R. Faye, A. Benhammou, and K. Akouz. Decentralized adaptive control of multi-reach irrigation canal. *in Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1-5:3437–3442, 2000.

J. Schuurmans. Control of water levels in open channels. *PhD Thesis*, 1997.

D.D. Siljak. Decentralized control of complex systems. *in Control and Dynamic Systems*, 1991.

Fault Detection and Isolation of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach

E. Duviella, L. Rajaoarisoa, J. Blesa and K. Chuquet

Abstract— **Inland navigation networks are mainly used for transport with economic and environmental benefits. In a climate change context which leads to the scarcity of the water resource, the control of navigation levels and the supervision of these networks become crucial. Thus, this paper is focused on the sensors Fault Detection and Isolation of inland navigation reaches. A modeling method based on the identification technique is proposed. Then, based on residuals, the dynamic classification algorithm *AUDyC* leads to the detection and diagnosis of sensors faults. Setting errors and slow drifts are considered. The proposed methods are applied on the Cuinchy-Fontinettes reach benchmark.**

I. INTRODUCTION

Most of the inland navigation networks in the north of Europe have been built and arranged by human to improve the navigation. They are composed of reaches or channels separated by locks, and can be supplied by water volumes stocked in dams. The control of the navigation channels consists in maintening the seaworthiness requirements, in particular, the water levels of the navigation channels [4]. This aim is more important in a climate change context where the use of water has to be the most efficient as possible. Automatic control provides accuracy and reliability if no sensor or actuator fault occurs. Otherwise, sensor or actuator faults lead to serious dysfunctions. In particular, sensors are subjected to setting errors, transmission faults, or drifts of operation. Their occurence can impact navigation, infrastructures, and available water resources. Thus, Fault Detection and Isolation (FDI) techniques have to be developped.

FDI techniques require accurate models of the system dynamic. Based to these models, the operating modes of the systems can be characterized, and the faults can be detected and diagnosed. In the litterature, a large number of FDI techniques are proposed. Model-based approaches were proposed [8], based on parameters identification technique [23], parity equations method [9], diagnosis observers [1], or Kalman filters [24]. In the field of hydraulic systems, fault detection methods based on residual generation, extended Kalman filter and finite memory observer are proposed in [3]. The objective was to detect and localize leak in an irrigation network. In [11], a FDI technique based on the dynamical classification algorithm *AUDyC* [10], is proposed for the detection of faults of a navigation channel. In this paper, FDI based on classification approaches appears adapted to the fault detection of large scale hydraulic systems without model. However, the proposed approach considers only data from sensors. The controled inputs of the system, *i.e.* controlled gates and locks, are not taken into account. In [12], the proposed sensor fault detection techniques are focused on a real undershot/overshot gate. They are based on physical and nonlinear black-box models. Very recently in [2], an online strategy for sensor and/or actuator FDI is applied to a dam-gallery. This strategy consists in a recursive subspace identification algorithm to estimate the dam-gallery model parameters. Then, a fault estimation procedure is proposed to detect potential faults. The proposed method is suitable for open channel systems with the assumption of constant faults on a minimim time window.

This paper aims at proposing a FDI strategy for sensors of inland navigation reaches, with an application on the Cuinchy-Fontinettes Reach (CFR) which is located in the north of France. The FDI strategy is based on a gray-box modeling approach for multi-inputs-multi-ouputs (MIMO) and time-delay open-channel systems [7]. Gray box modeling is a popular approach for modeling real systems, combining both black box and white box methodologies [21]. Herein, the use of gray-box model is justified by the characteristics of inland navigation reaches; long length (several kilometers), no slope, wave phenomena, etc. Indeed, the well-known Saint Venant equations [6] can not be applied without requiring numeric models. Moreover, the modeling techniques based on the simplification and linearization of the Saint-Venant equations [14], are not dedicated for no-slope channels characterized by wave phenomenas. Finally, the modeling approach proposed in [18] is not dedicated for very long channels.

Then, based on the measures of the real system and on the outputs of the gray-box model, residuals are generated. They are used for the detection and the diagnosis of setting errors and slow drifts on sensors. To achieve this aim, the proposed FDI technique is based on classification methods. An overview of the classification methods for the diagnosis of dynamical systems is proposed in [19]. Among these classification techniques, the dynamical classification algorithm *AUDyC* is selected. This algorithm is particularly well adapted for the FDI of dynamical evolving systems as it is shown in [5], [11], [22].

The paper is organized as following: Section II is ded-

This work is a contribution to the GEPET-Eau project which is granted in the framework of the GICC program of the French Ministry MEDDE, with the participation of the CGDD, the DGEC and the DGTIM.

E. Duviella and L. Rajaoarisoa are with Univ Lille Nord de France - MinesDouai, IA, France {eric.duviella, lala.rajaoarisoa}@mines-douai.fr

J. Blesa is with the Automatic Control Department, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain joaquim.blesa@upc.ed

K. Chuquet is with VNF - Service de la navigation du Nord Pas-de-Calais, Lille, France karine.chuquet@developpement-durable.gouv.fr

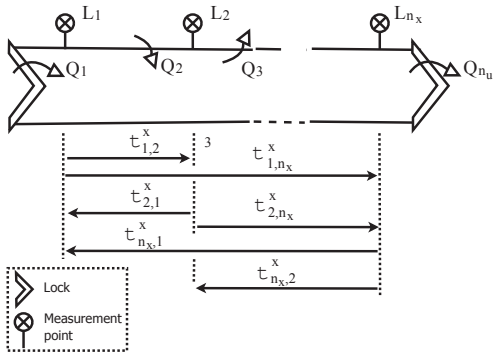


Fig. 1. Time delays $\tau^x_{i,j}$ between each measurement points.

icated to the description of the gray box modeling approach for inland navigation reaches. In Section III, the FDI technique based on the *AUDyC* algorithm is presented. The modelling of the CFR is described in Section IV. The effectiveness of the proposed FDI approach is highlighted in Section V by considering two scenarios of faults.

II. Modeling of inland navigation reach

Inland navigation networks are composed of interconnected reaches generally with no significant slope and MIMO. A navigation reach is an open-channel system characterized by large dimensions, and nonlinear dynamics with varying delays. The navigation being assured by the control of the water level with the objective to be close to the Normal Navigation Level (NNL), an assumption of linearity can be realized. The proposed model is a gray-box linear state-space model (*see* [7]).

The state variables are chosen as the n_x measured levels on the system, *i.e.* $L_i(k)$. The input variables correspond to the n_u input/output discharges $Q_l(k)$ (*see* Figure 1). The output variables correspond directly to the state variables. Finally, time delay matrices τ^x and τ^u are considered for each state and input variables to take into account the transfer delays between two points of the reach.

$$\left\{ \begin{array}{lcl} x_{k+1} & = & A\overline{x}_{k|\tau^x} + B\overline{u}_{k|\tau^u} \\ y_k & = & Cx_k \end{array} \right. \tag{1}$$

where matrices $A \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x.n_x}$, $B \in \mathbb{R}^{n_x \times n_u.n_x}$ and $C \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$ are the state, input and output matrices, respectively. At each time k, the vector $\overline{u}_{k|\tau^u_i} \in \mathbb{R}^{n_u.n_x}$ representing the input variable is defined according to the delay matrix τ^u, the vector $\overline{x}_{k|\tau^x} \in \mathbb{R}^{n_x.n_x}$ representing the state variable according to the delay matrix τ^x. The matrices $\tau^x \in \mathbb{N}^{n_x \times n_x}$ and $\tau^u \in \mathbb{N}^{n_u \times n_x}$ gather the time delays between each measurement point (*see* Figure 1), and between each measurement point and each input and output of the system, respectively. For example, the value of $\tau^x_{i,j} \in \mathbb{N}$ is the time delay between the measurement points L_i and L_j.

$$\tau^x = \begin{bmatrix} \tau^x_{1,1} & \tau^x_{1,2} & \cdots & \tau^x_{1,n_x} \\ \tau^x_{2,1} & \tau^x_{2,2} & \cdots & \tau^x_{2,n_x} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau^x_{n_x,1} & \tau^x_{n_x,2} & \cdots & \tau^x_{n_x,n_x} \end{bmatrix} \tag{2}$$

The time delays $\tau^x_{i,j}$ are equal to 1 for $i = j$. The time delay matrices τ^x and τ^u are supposed to be known and constant. The vector $y_k \in \mathbb{R}^{n_x}$ represents the output variable of the system.

The elements of the matrices τ^x and τ^u are obtained by a correlation method (data-based procedure) or by the physical knowledge of the system. Consider two points along the canal, separated by a distance D: upstream and downstream points. According to [13], the theoretical value of the upstream time delay between these two points is evaluated by computing the integral:

$$\tau_{up} = \int_0^D \frac{dl}{c(l) + v(l)} \tag{3}$$

with $c(l)$ and $v(l)$ representing the celerity and the velocity respectively.

This corresponds to the minimum time required for a perturbation to travel from the upstream point to the downstream point. Analogously, the downstream time delay τ_{dw} can be evaluated by:

$$\tau_{dw} = \int_0^D \frac{dl}{c(l) - v(l)} \tag{4}$$

and corresponds to the maximum time required for a perturbation to travel from the upstream point to the downstream point. In both cases, we recover the classical value in the uniform case when v and c are constant: $\tau_{up} = \frac{D}{c+v}$ and $\tau_{dw} = \frac{D}{c-v}$, with $c = \sqrt{g\frac{S}{b}}$ and $v = \frac{Q}{S}$. The wet aeras S and the cross section b are chosen constant as the mean values, g is the gravity and Q is the average flow of the canal.

The vector x_k in (1) is:

$$x_k = [L_1(k)\ L_2(k)\ \cdots\ L_{n_x}(k)]^T \tag{5}$$

Thus, the vector $\overline{x}_{k|\tau^x}$ is built according to the matrix τ^x such as:

$$\begin{array}{l} \overline{x}_{k|\tau^x} = [L_1(k-\tau^x_{1,1})\ L_2(k-\tau^x_{1,2})\ \cdots\ L_{n_x}(k-\tau^x_{1,n_x}) \\ \qquad\quad L_1(k-\tau^x_{2,1})\ L_2(k-\tau^x_{2,2})\ \cdots\ L_{n_x}(k-\tau^x_{2,n_x}) \\ \qquad\quad \cdots\ L_{n_x}(k-\tau^x_{n_x,n_x})]^T \end{array} \tag{6}$$

The vector $\overline{u}_{k|\tau^u}$ is built according to the matrix τ^u similarly as relation (6):

$$\begin{array}{l} \overline{u}_{k|\tau^u} = [Q_1(k-\tau^u_{1,1})\ Q_2(k-\tau^u_{1,2})\ \cdots\ Q_{n_u}(k-\tau^u_{1,n_u}) \\ \qquad\quad Q_1(k-\tau^u_{2,1})\ Q_2(k-\tau^u_{2,2})\ \cdots\ Q_{n_u}(k-\tau^u_{2,n_u}) \\ \qquad\quad \cdots\ Q_{n_u}(k-\tau^u_{n_x,n_u})]^T \end{array} \tag{7}$$

The state, input and ouput matrices are defined as:

$$A = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \cdots & a_{n_x}^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_1^2 & a_2^2 & \cdots & a_{n_x}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & a_{n_x}^{n_x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & \cdots & b_{n_u}^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1^2 & b_2^2 & \cdots & b_{n_u}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & b_{n_u}^{n_x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

The matrix C is equal to the identity matrix of order n_x.

After the structure of the state-space model has been defined, the objective is to identify the matrices A and B. Model (1) can be rewritten as:

$$x_{k+1} = M\ \Phi_k \quad (10)$$

with $M = [A\ B]$ and $\Phi_k = [\overline{x}_{k|\tau^x}\ \overline{u}_{k|\tau^u}]^T$.

Then, the matrix M has to be determined according to an identification approach using available measured data. The data correspond to N samples of the discharges Q_i and levels L_i measured on a time interval. Based on relation (10), the matrix M is expressed in the following way:

$$M = X\ \overline{\Phi}^T\ (\overline{\Phi}\ \overline{\Phi}^T)^{-1} \quad (11)$$

Considering the characteristics of the matrices A and B, and the size of X and $\overline{\Phi}$, it is easier to identify separatly each line of M, before rebuilding the global matrices A and B. The zeros of matrices A and B are not considered during the identification step. It is based on the principle that each state variable can be expressed such as the first state variable:

$$\begin{aligned} L_1(k+1) = {} & a_1^1\ L_1(k-\tau_{1,1}^x) + a_2^1\ L_2(k-\tau_{1,2}^x) + \cdots \\ & + a_{n_x}^1\ L_{n_x}(k-\tau_{1,n_x}^x) + b_1^1\ Q_1(k-\tau_{1,1}^u) \\ & + b_2^1\ Q_2(k-\tau_{1,2}^u) + \cdots + b_{n_u}^1\ Q_{n_u}(k-\tau_{1,n_u}^u) \end{aligned} \quad (12)$$

Using this particular structure of the state space model, the dynamics of a real navigation reach can be identified. Then, this gray-box model is used to detect and isolate sensor faults thanks to the *AUDyC* algorithm.

III. FDI BASED ON *AUDYC*

The proposed FDI method is based on the classification algorithm *AUDyC*. This classification algorithm consists in characterizing on-line the operating mode of the system by a Gaussian model which constitute a class. A class is determined according to pertinent indicators, *i.e.* the features. According to the features, a *Representation Space* can be built, and the class can be represented in this space. Thus, the class of the normal operating mode, denoted C_n, can be determined (*see* Figure 2). A new class is create when a sufficient number of points is present in an area of the *Representation Space*. The new class, which is updated or created, is denoted evolutionary class C_k. It corresponds to a new operating mode. When an aberrant measurement occurs, a new point appears in the *Representation Space* far from the current class C_k. This point is detected and rejected.

Based on these functionalities, sudden changes (jump in the *Representation Space*) or progressive changes of the current operating mode can be detected. When several observations are not affected to the current class, a new class C_k is built and a sudden change is detected (*see* Figure 2.a). The on-line updating of the characteristics of the current class allows the detection of drift (*see* Figure 2.b).

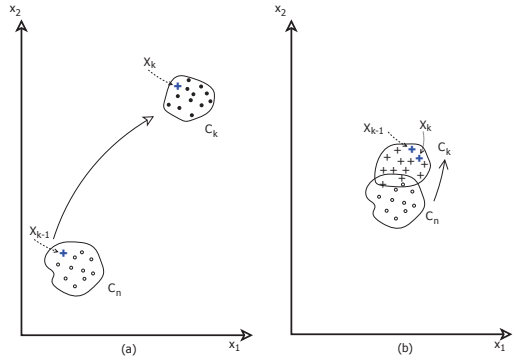


Fig. 2. Different types of faults in a *Representation Space*; (a) jump and (b) drift.

Operating modes are Gaussian classes. Each class C^j is characterized by a center and a covariance matrix. These parameters are adapted on- line using rules of recursive update. The updated parameters of the classes is performed recursively on a sliding window size N_{fen} for each new observation $X_k = (x_1,\ x_2,\ ...\ x_n)$, with n the number of features. The principle of the procedure for adjusting the class is given by:

- If $Card(C^j) = n_c < N_{fen}$: add information

$$\begin{cases} M_{Cj}(k) = M_{Cj}(k-1) + \dfrac{1}{n_c+1}(X_k - M_{Cj}(k-1)), \\ \Omega_{Pj}(k) = \dfrac{n_c-1}{n_c}\Omega_{Cj}(k-1) + \\ \qquad \dfrac{1}{n_c+1}(X_k - M_{Cj}(k-1))^\top (X_k - M_{Cj}(k-1)). \end{cases} \quad (13)$$

- If $n_c \geq N_{fen}$: add and Removing information

$$\begin{cases} M_{Cj}(k) = M_{Cj}(k-1) + \dfrac{1}{N_{fen}}(\delta X^+ - \delta X^-), \\ \Omega_{Cj}(k) = \Omega_{Cj}(k-1) + \\ \qquad \Delta X \begin{bmatrix} \frac{1}{N_{fen}} & \frac{1}{N_{fen}(N_{fen}-1)} \\ \frac{1}{N_{fen}(N_{fen}-1)} & -\frac{(N_{fen}+1)}{N_{fen}(N_{fen}-1)} \end{bmatrix} \Delta X^\top, \end{cases} \quad (14)$$

where

$$\begin{cases} \delta X^+ = X^{new} - M_{Cj}(k-1), \\ \delta X^- = X^{old} - M_{Cj}(k-1), \\ \Delta X = [\delta X^+ \quad \delta X^-], \end{cases} \quad (15)$$

with $M_{Cj}(k)$ and $\Omega_{Cj}(k)$ respectively the center and the covariance matrix of the class C^j at instant k, X^{new} and X^{old} new and old observation vectors, respectively.

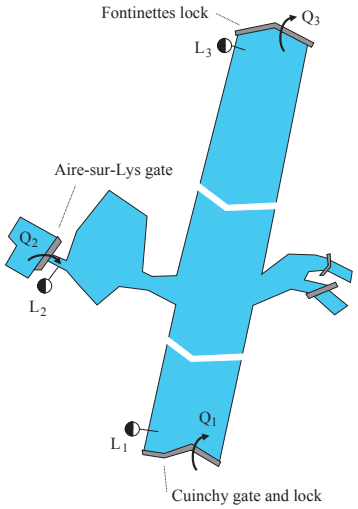


Fig. 3. Scheme of the Cuinchy-Fontinettes navigation reach.

Fault indicator is calculated for the detection of faults. It consists in computing the distance between the evolutive class C_k and the normal class C_n. The normal class is taken as reference. A fault occurence can lead to the drift of the evolutive class C_k from the normal class C_n. Amongst the several existing metrics, the Euclidian distance, denoted $d(M_k, M_n)$, is considered:

$$d(M_k, M_n) = \sqrt{(M_k - M_n)(M_k - M_n)^\top}, \qquad (16)$$

with M_k is the center of the class C_k and M_n the center of the normal class C_n. The center of the normal class M_n is fixed.

Finally, a fault will be detected when a prefixed threshold th is crossed. This threshold is tuned according to expert knowledge on the system.

IV. Cuincy-Fontinettes reach gray-box model

A. Presentation

The Cuinchy-Fontinettes navigation reach (CFR) is part of the broad gauge river network of North of France. It is located between the upstream lock of Cuinchy at the East of the town Bethune and the downstream lock of Fontinettes at the Southwest of the town Saint-Omer (*see* Figure 3). The first part of the channel from Cuinchy to Aire-sur-la-Lys, is 28.7 km long. The second part of the channel from Aire-sur-la-Lys to Saint-Omer is 13.6 km long. The channel is entirely artificial with a bottom equal to 52 m in average and no significant slope. Considering the navigation flow, the water runs off from Cuinchy to Fontinettes.

The CFR is managed by VNF (Voies Navigables de France) whose role is to maintain the level of the channel at $NNL = 4.26$ m. To reach this aim, three points of the CFR must be controlled: the first is the Cuinchy lock and gate, the second is the Fontinettes lock and the third is the gate called "Porte de Garde" at Aire-sur-la-Lys. The control of Cuinchy and Fontinettes locks is constrained by the navigation demand. The size of the lock at Fontinettes is 13 m high whereas the lock at Cuinchy is only 2 m high. The operation of the Fontinettes lock causes a wave phenomena which impact the CFR during more than 2 hours with a maximum amplitude which exceeds 13 cm. The sensors of the CFR are, as every electronic device, subject to faults. These sensors can break down or be impacted over time. Several types of errors on sensors can occur. A bad setting of the sensors can lead to constant errors. To detect and isolate these sensor faults, the gray-box model of the CFR is achieved.

B. Gray-box modeling

The CFR has three inputs, Q_1 for Cuinchy, Q_2 for Aire-sur-la-Lys, and Q_3 for Fontinettes, *i.e.* $n_u = 3$. The levels of the CFR are measured on three points; L_1 at Cuinchy, L_2 at Aire-sur-la-lys and L_3 at Fontinettes, *i.e.* $n_x = 3$. The time-delays are determined according to relations (3) and (4), with the wet aeras $S = 52 \times 4.26$ m^2 (bottom $\times$ level of the water), and the maximum discharge $Q = 7.6$ m^3/s which is evaluated according to the Fontinettes lock operation. The matrices $\tau^x = \tau^u$ are given in minutes:

$$\tau^x = \begin{bmatrix} 1 & 74 & 109 \\ 75 & 1 & 35 \\ 110 & 36 & 1 \end{bmatrix} \qquad (17)$$

The vector x_k is $x_k = [L_1(k)\ L_2(k)\ L_3(k)]^T$. The output matrix is equal to $C = I_3$.

The modeling approach consists in identifying the coefficients of the state and input matrices defined as:

$$A = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & a_3^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 \end{bmatrix} \qquad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & b_3^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_1^2 & b_2^2 & b_3^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1^3 & b_2^3 & b_3^3 \end{bmatrix} \qquad (19)$$

C. Identification of the CFR model

The identification task consists in estimating the coefficients of the matrices A and B according to equations (11). The step is twofold: (i) estimation of the parameters on a first scenario, (ii) evaluation of the model on other several scenarios. This step has been achieved in [7]. Thus the identification step is summarized herein.

The CFR is modeled using the Saint-Venant equations via the software SIC [17]. A mean rectangular profile is considered with a bottom equal to $S = 52$ m, a length equal to $L = 42300$ m and a quasi-nul slope equal to $2.4e^{-5}$ %. Then, the actuators of the CFR are modeled using the software Matlab/Simulink. A simulation architecture coupling SIC and Matlab/Simulink allows the resolution of the Saint-Venant equations according to scenarios defined on Matlab/Simulink. These scenarios consist in the simulation of the operation of the locks and gates of the CFR. The

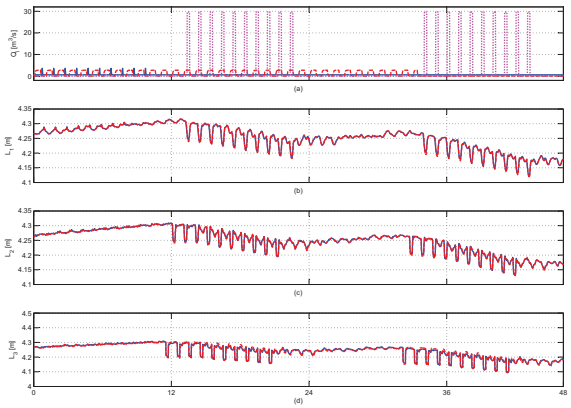


Fig. 4. (a) Discharges at Cuinchy Q_1 (blue continuous line), at Aire-sur-la-Lys Q_2 (red dotted line) and at Fontinettes Q_3 (magenta dashed line), levels, estimated (red dashed line) and measured (blue continuous line) at (b) Cuinchy L_1, (c) Aire-sur-la-Lys L_2 and (d) Fontinettes L_3.

TABLE I

COEFFICIENTS OF THE MATRICES A $(\times e^{-1})$ AND B $(\times e^{-3})$.

a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_1^2	a_2^2	a_3^2	a_1^3	a_2^3	a_3^3
6.77	2.61	0.61	2.73	3.9	3.34	4.08	3.88	2.04
b_1^1	b_2^1	b_3^1	b_1^2	b_2^2	b_3^2	b_1^3	b_2^3	b_3^3
0.4	1.2	0.2	0.3	1	0.3	0.6	1.3	2.8

scenario which is used for the identification of the matrices A and B corresponds to two days of navigation, with a positive discharge at Cuinchy equal to 0.6 m^3/s and a discharge at Fontinettes equal to zero. The discharge at Aire-sur-la-Lys is considered such as a pulse signal with a frequency of $2.7e^{-4}$ Hz and a maximum amplitude of 2.6 m^3/s from time 0 to 34 $hours$ and equal to zero thereafter (*see* Figure 4.a). It allows the water supply of the CFR to keep the level close to the NNL. During these two days, the increase of the CFR volume is due to 10 ships which have crossed the Cuinchy lock the first 10 hours and to the supplying flow of Aire-sur-la-Lys. The decrease of the CFR volume is due to the 20 ships crossing the Fontinettes lock. The simulation of the operating of the Cuinchy lock corresponds to a volume of 3700 m^3 during 6 minutes with a trapezoidal profile, and a maximum discharge equal to 10.8 m^3/s. The simulation of the operating of the Fontinettes lock corresponds to a volume of 25000 m^3 during 15 minutes with a trapezoidal profile, and a maximum discharge equal to 29 m^3/s.

These signals obtained according to the SIC/MATLAB/Simulink architecture are used to identify the model of the CFR. Due to the properties of the signals, the matrix $(\overline{\Phi}\ \overline{\Phi}^T)$ of the equation (11) can be singular. Thus it is often necessary to use the Moore-Penrose pseudoinverse of this matrix. Finally, the coefficients of the matrices A and B are given in Table I.

The outputs of the model $\hat{y}(k)$ and the measured levels $y(k)$ are compared as depicted in Figure 4. The estimated ouputs in red dashed line are very close to the measured levels in blue continuous line. To estimate the effectiveness of the model, a fitting indicator (FIT) is defined as $FIT = (1-\frac{||\hat{y}-y||_2}{||y-y_m||_2})\times 100$, where y_m is a column vector composed of the mean value of y. For this scenario, the FIT are given for each level in Table II. Then, the effectiveness of the CFR model has been evaluated and validated using sevral scenarios [7].

TABLE II

FIT INDICATORS (%).

FIT_{L_1}	FIT_{L_2}	FIT_{L_3}
93	93	87

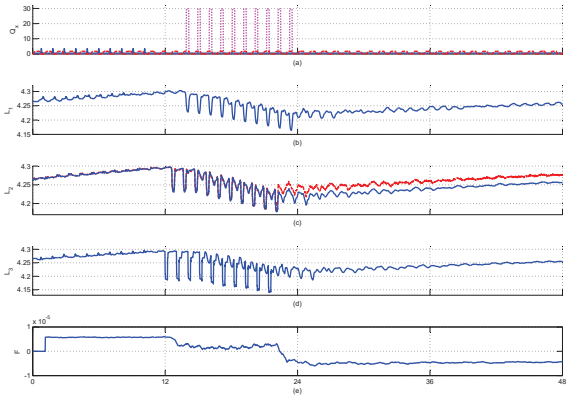


Fig. 5. Scenario 1 - (a) Discharges in Cuinchy (blue continuous line), in Aire-sur-la-Lys (red dashed line) and in Fontinettes (magenta dotted line), levels at (b) Cuinchy L_1, (c) Aire-sur-la-Lys L_2 and (d) Fontinettes L_3, and distance $d(M_k, M_n)$ between classes.

V. FDI OF THE CFR

The evaluation of the proposed FDI technique for the CFR consists in considering two scenarios. The first one, "Scenario 1", is the simulation of the crossing of ten ships in Fontinettes. The second one, "Scenario 2", is the crossing of ten ships in Cuinchy the first ten hours and ten ships in Fontinettes the last ten hours of the first day simulating the navigation of ten ships on the CFR. In Scenario 1, a setting error of 0.02 m occurs on the level sensor L_2 at time 24 hours (*see* red dashed line in Figure 5.c). In Scenario 2, a drift occurs on the level sensor L_1 starting from time 10 hours to the end of the simulation (*see* red dashed line in Figure 5.b).

A *Representation Space* is built by considering the residuals r_c, r_a and r_f between the outputs of the model $\hat{L}_i(k)$ and the measured levels $L_i(k)$. The normal class is depicted in yellow in Figure 7. The residuals from Scenario 1 are shown in blue $+$, those of Scenario 2 in black dots. The faulty class for Scenario 1 and Scenario 2 are in black line and green line respectively. The detection threshold th on the distance $d(M_k, M_n)$ between the current and normal classes is tuned to zero. When this threshold is crossed, a fault is detected. Thus, fault on L_2 (Scenario 1) is detected 6 minutes after its occurence. It is isolated by considering the direction of the new class, along the r_a axe. The same step is considered for Scenario 2. The drift on sensor L_1 is detected 6 hours after its occurence, by considering the direction of the new class

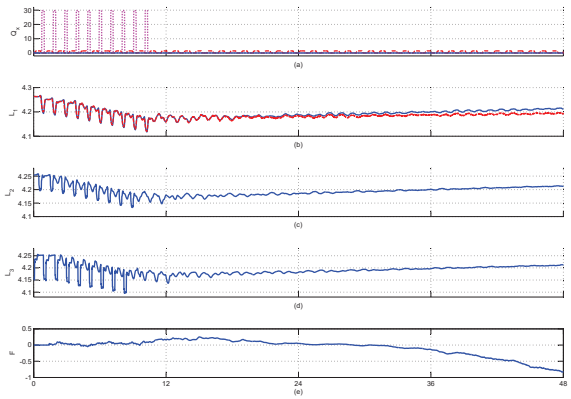


Fig. 6. Scenario 2 - (a) Discharges in Cuinchy (blue continuous line), in Aire-sur-la-Lys (red dashed line) and in Fontinettes (magenta dotted line), levels at (b) Cuinchy L_1, (c) Aire-sur-la-Lys L_2 and (d) Fontinettes L_3, and distance $d(M_k, M_n)$ between classes.

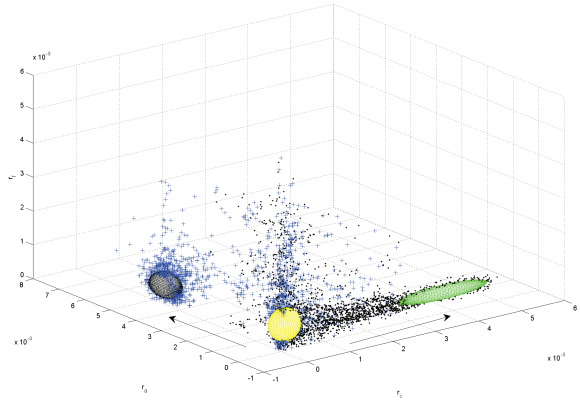


Fig. 7. Representation space according the residuals r_c, r_a and r_f; normal class in yellow; for Scenario 1, residuals in blue $+$ and faulty class in black, and for Scenario 2, residual in black dots and faulty class in green.

along the r_c axe. In this case, the detection time appears important, but when the fault is detected, the error on the sensor is less than $10\ cm$.

VI. Conclusion

FDI of inland navigation channel based on a gray-box state-space model is presented in this paper. This approach is used for the Cuinchy-Fontinettes reach located in the North of France. The sensors of this reach can be impacted by sensor faults. The identification approach is performed according to data from a simulation architecture. Then, the effectiveness of the FDI technique is evaluated by considering two scenarios of fault. The future purposes consist in considering real data of the CFR.

References

[1] Akhenak A., M. Chadli, J. Ragot and D. Maquin (2004). *State estimation of uncertain multiple model with unknown inputs*, 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Bahamas.

[2] Akhenak A., E. Duviella, L. Bako and S. Lecoeuche (2013). *On-line Fault Diagnosis using Recursive Subspace Identification Algorithm of a Dam-Gallery Open Channel System*, Control Engineering Practice, In press.

[3] Bedjaoui N. and E. Weyer (2010). *Algorithms for leak detection, estimation, isolation and localization in open water channels*. Control Engineering Practice.

[4] J. Blesa, E. Duviella, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig and K. Chuquet, *Automatic control to improve the seaworthiness conditions in inland navigation networks: application to a channel in the north of France*, International conference on Maritime Transport, Barcelona, Spain.

[5] Chammas A., M. Traore, E. Duviella, M. Sayed-Mouchaweh and S. Lecoeuche (2012). *Condition monitoring architecture for maintenance of dynamical systems with unknown failure modes*, 2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology, Seville, Espagne.

[6] V. T. Chow, (1959). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill. New York.

[7] Duviella E., J. Blesa, L. Bako, Y. Bolea, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig and K. Chuquet (2013). *Inland navigation channel model for fault detection and control: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach*, International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC, Paris-Evry University, France.

[8] Frank P. M., S. X. Ding and B. KCipper-Seligcr (2000). *Current developments in the theory of FDI*. In SAFEPROCESS'00, Budapest, Hungary.

[9] Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Publisher: Dekker.

[10] Lecoeuche S., C. Lurette and S. Lalot (2004). *New supervision architecture based on on-line modeling of non-stationary data*. Neural Computing and Applications Journal, Volume 13, Pages 323-338.

[11] Le Pocher O., E. Duviella, L. Bako and K. Chuquet (2011). *Sensor fault detection in a real hydraulic system using a classification approach*, ICINCO'11, Noordwijkerhout, Netherlands.

[12] Le Pocher O., E. Duviella, L. Bako and K. Chuquet (2012). *Sensor fault detection of a real undershot/overshot gate based on physical and nonlinear black-box models*, Safeprocess'12, Mexico, Mexique.

[13] Litrico X. and V. Fromion(2004). *Simplified modeling of irrigation canals for controller design*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 130, No. 5, pp. 373-383.

[14] Litrico X. and V. Fromion (2009). *Modeling and Control of Hydrosystems*, Springer.

[15] Ljung L. (1987). *System identification: Theory for the user*, Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N.J.

[16] Maciejowski J.M. (2002). *Predictive Control: With Constraints*. Prentice Hall, 2002.

[17] Malaterre P. O. (2006). *SIC 5.20, Simulation of irrigation canals*, http://www.cemagref.net/sic/sicgb.htm, 2006.

[18] van Overloop P.J., I.J. Miltenburg, X. Bombois, A.J. Clemmens, R.J. Strand, N.C. van de Giesen and R. Hut (2010). *Identification of resonance waves in open water channels*. Control Engineering Practice, Volume 18, Issue 8, Pages 863-872.

[19] Sayed Mouchaweh M. (2010). *Semi-supervised classification method for dynamic applications*. Fuzzy Sets and Systems, Volume 161, Issue 4, Pages 544-563.

[20] M.-C. Su and Y.-C. Liu (2005). *A new approach to clustering data with arbitrary shapes*. Pattern Recognition journal, Volume 38, Pages 1887-1901.

[21] Tan K., Y. Li, P. Gawthrop and A. Glidle (1997). *Evolutionary Grey-Box modelling for Practical Systems*. Technical Report CSC-96019, Centre for Systems and Control, University of Glasgow.

[22] Traore M., E. Duviella and S. Lecoeuche (2009). *Dynamical classification method to provide pertinent indicators for predictive maintenance strategies*, ICINCO'09, Milan, Italia.

[23] Weihua L., R. Harigopal and S. Sirish (2003). *Subspace identification of continuous time models for process fault detection and isolation*. Journal of Process Control, Volume 13, Issue 5, Pages 407-421.

[24] Xie L., Y. C. Soh and C. E. de Souzi (1994). *Robust kalman filtering for uncertain discrete-time systems*. IEEE Transaction on Automatic Control, Volume 93, Pages 1310-1314.

Preprints of the 19th World Congress
The International Federation of Automatic Control
Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014

Sensor fault diagnosis of inland navigation system using physical model and pattern recognition approach

K. Horváth * **J. Blesa** *** **E. Duviella** * **L. Rajaoarisoa** * **V. Puig** ***
K. Chuquet **

* *Mines-Telecom Institute, Mines Douai, France (e-mail: {eric.duviella,klaudia.horvath,lala.rajaoarisoa}@mines-douai.fr).*
** *VNF - Service de la navigation du Nord Pas-de-Calais, France (e-mail: karine.chuquet@vnf.fr)*
*** *Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC. Barcelona, Spain (e-mail:{joaquim.blesa,vicenc.puig}@upc.edu)*

Abstract: In recent years, inland navigation networks benefit from the innovation of the instrumentation and SCADA systems. These data acquisition and control systems lead to a reactive asset-management of inland navigation networks. However, sensors and actuators are subject to faults due to the strong effects of the environment, aging, etc. In this paper, a sensor Fault Detection and Isolation (FDI) approach is proposed using an Integrator-Delay-Zero (IDZ) model, interval observers and the dynamic classification algorithm *AUDyC*. The combined use of these approaches allows the improvement of the sensor fault diagnosis. The proposed approach is introduced through the case study of the Cuinchy-Fontinettes reach in the north of France.

Keywords: Fault diagnosis, Model-based, Pattern recognition, Large scale system, Inland navigation.

1. INTRODUCTION

To improve the management of the inland navigation networks, national companies are still modernizing the data acquisition and remote control systems. They benefit from the progress in new technologies for sensors and actuators (Fastenbauer et al., 2007) and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems (Malaterre and Chateau, 2007). The data that is taken into account to supervise the networks and to control the actuators have to be safe in order to avoid serious failures of the navigation and the infrastructure. Thus, Fault Detection and Isolation (FDI) methods have to be designed and implemented. The FDI techniques are generally divided into two families: model-based and data-driven approaches.

Model-based approaches require accurate models of the system dynamics. A survey of model-based techniques is proposed in Frank et al. (2000). Model-based Fault diagnosis techniques have recently addressed the supervision of open flow channels. Parity equations method in Blesa et al. (2010), the cumulative sum (CUSUM) algorithm applied to model-based residuals in Bedjaoui and Weyer (2011), physical and nonlinear black-box models of a real undershot/overshot gate in Pocher et al. (2012), the evaluation of model-based residuals Nabais et al. (2013) and subspace identification in Akhenak et al. (2013).

The second family gathers the data-driven approaches that have been recently surveyed in Qin (2012). These methods perform the fault diagnosis by directly processing the signals collected from the sensors (Hartert et al., 2010). Amongst these methods, pattern recognition techniques consist in representing the operating modes of the system, *i.e.* normal and faulty, by classes. Some dynamical classification algorithms are proposed in the literature such as the CDL algorithm (Cluster Detection and Labeling), algorithms based on adaptive resonance theory (ART) networks (Eltoft and de Figueiredo, 1998), or AUDyC (Auto-Adaptive Dynamical Clustering) algorithm (Lecoeuche et al., 2004). The characteristics of the classes are followed online and faults can be detected using metrics between classes. A FDI technique based on the algorithm *AUDyC* is proposed in Pocher et al. (2012) to detect sensor faults of a navigation reach only from real data.

A FDI strategy for sensors of inland navigation reaches, that combines model-based and data-driven approaches, is proposed in Duviella et al. (2013b). The model is a gray-box model dedicated to multi-input/multi-output (MIMO) and time-delay open-flow channel systems (Duviella et al., 2013a). It is applied to the navigation reach of the north of France. However in this paper, the residuals from gray-box model are ideal because they are affected only by faults. In real applications, the presence of disturbances, noise and modelling errors causes the residuals to become nonzero even in the absence of faults. Therefore, the fault detection procedure must be robust against these undesired effects (Chen and Patton, 1999). When parametric uncertainties are taken into account, the healthy system model should include a vector of uncertain parameters bounded by a set that contains all possible parameter values of normal operation. In the robust fault detection literature, so far, parameters have been bounded using intervals and the resulting model is known as an interval model (Puig et al., 2008). When a dynamic system is modelled using an interval model, the predicted output is also usually bounded by an interval. Then, fault detection test is based on checking if zero is contained or not in the residual interval after propagating the parameter uncertainty. In this paper, the FDI approach proposed in Duviella et al. (2013b) is improved by using an interval method based on a white-box model of

Copyright © 2014 IFAC

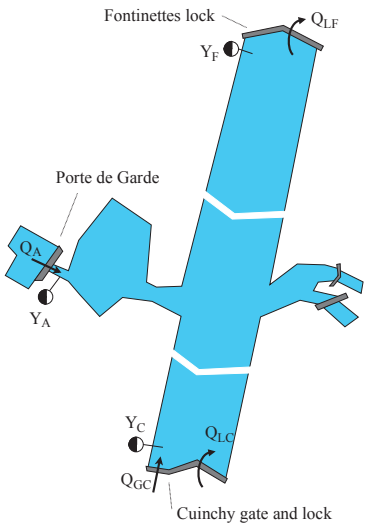


Fig. 1. Schematics of the CFR

navigation reach: the Integrator-Delay-Zero (IDZ) model. The nominal model and the interval outputs provided by the interval model are used as features for the classification algorithm *AUDyC* that permits the detection and isolation of sensor faults. The proposed approach is applied to a navigation reach in the north of France.

The structure of the paper is the following: Section 2 is dedicated to the description of the IDZ model. The interval model is proposed in Section 3. In Section 4, the algorithm *AUDyC* and the fault detection module are presented. The proposed approach is applied to the real network in Section 5.

2. CUINCHY-FONTINTETTES CASE STUDY

2.1 Description

The Cuinchy-Fontintettes reach (CFR) belongs to the navigation network of the north of France. The system has to ensure the waterway between Paris and the major ports of the North Sea. The CFR reach is 42 km long being bounded by the lock of Cuinchy at the upstream and by the lock of Fontinettes at the downstream end (*see* Figure 1). There are two additional inflows to the reach: (1) at the upstream end on the side of the lock of Cuinchy there is a gate (Q_{GC}), (2) in the middle of the reach the river Aire is connected to the CFR by a gate (Q_A). The water level is mainly influenced by the operations of the two locks: when lock Cuinchy is operated it releases its water volume (3600 m^3) to the CFR, when lock Fontinettes is operated it takes water (25000 m^3) from the CFR. As the volume of the lock of Fontinettes is considerably bigger than the volume of Cuinchy, it produces a negative wave of amplitude about 15 cm that is able to travel up and down in the reach.

In order to model the reach, the discharge of the lock of Cuinchy (Q_{LC}) and the gate at the side (Q_{GC}) is considered together, and denoted as Q_C. The other two inputs to the model are the discharge in the middle of the canal, at Aire (Q_A) and the discharge at the downstream end from the operation of lock Fontinettes (Q_F). The three measured variables are the water levels at the three locations of the canal: at the upstream end, at Cuinchy (Y_C), in the middle of the reach at Aire (Y_A) and at the downstream end of the reach at lock Fontinettes (Y_F).

2.2 The IDZ model

The dynamics of the open-flow channel can be described by the Saint-Venant (SV) equations that are hyperbolic partial differential equations, (Chow, 1959). These equations are highly non-linear and they have no analytical solution in the general case. It is common to use their numerical solution for simulation purposes, however for other goals (as real-time control or fault detection) these solutions are too complex.

For this reason there are several simplified models that have been deduced from the SV equations with different simplifications, for example Hayami (Hayami, 1951), ID (Schuurmans, 1995), IR (van Overloop et al., 2010) and IDZ (Litrico and Fromion, 2004). The IDZ model is based on the linearisation of the SV equations around a set-point, using three points of a spatial discretization the canal reach is divided into two parts: an upstream (uniform flow) part and a downstream (backwater) part. Then, the approximation is based on three points: the upstream and the downstream ends and one intermediate point.

The model contains four transfer functions

$$\begin{bmatrix} Y_{up} \\ Y_{down} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}(s) & p_{12}(s) \\ p_{21}(s) & p_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{up} \\ Q_{down} \end{bmatrix} \tag{1}$$

where $p_{11}(s)$ relates the upstream discharge (Q_{up}) and the downstream water level (Y_{down}), $p_{12}(s)$ relates the downstream discharge (Q_{down}) and the upstream water level (Y_{up}), $p_{21}(s)$ relates the upstream discharge and the upstream water level and $p_{22}(s)$ relates the downstream discharge and the downstream water level. The structure of each transfer function is the same. They contain an integrator, a delay and a zero as the name of the model indicates (*see* Eq. (2)).

The integrator is responsible for the modelling at low frequencies, where the canal pool acts as an integrator, that is the water level increases with the integral value of the discharge, like a tank, multiplied by the inverse of the surface of the canal reach, known as the backwater area, A_s. This area is close to the product of the width and the length of the canal.

The delay is the time it takes for a wave to travel from the point of disturbance to the point of measurement. It is slightly different in the upstream (τ_u) and in the downstream (τ_d) directions. Their approximation is detailed in Litrico and Fromion (2004).

The IDZ model contains a zero, that accounts for the first fast increase in water level after a disturbance occurs. The general form of the transfer functions can be written as:

$$G(s) = \frac{p_1 s + 1}{A_s s} e^{-\tau s}, \tag{2}$$

where the parameter p_1 accounts for the zero and τ can be τ_u or τ_d depending of the direction of the disturbance.

2.3 Application to the Cuinchy-Fontinettes case study

The IDZ modelling approach is applied to the Cuinchy-Fontinettes case study considering that it can be decomposed in three reaches that are described by the parameters presented in Table 1. The Manning's coefficient was chosen to be 0.035 based on Chow (1959). As the bed slope is very small (almost zero), the reach is affected by backwater and therefore the whole reach was modelled just one part as backwater part. The CFR system has three inputs (Q_C, Q_A, Q_F) and three outputs

Name	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Discharge (m^3/s)	Bottom slope (-)
CF	42300	52	3.8	3	2.5×10^{-7}
CA	28700	52	3.8	0	2.5×10^{-7}
AF	13600	52	3.8	0	2.5×10^{-7}

Table 1. Physical data of the CFR

Name	Backwater surface (m^2)	τ (s)	p_1 (-)	TF	Reach
G_{CC}	2200 $\times 10^3$	0	13990	p_{11}	CF
G_{AC}	2200 $\times 10^3$	4711	4885	p_{12}	CA
G_{FC}	-2200 $\times 10^3$	6943	3969	p_{12}	CF
G_{CA}	2197 $\times 10^3$	4688	4892	p_{21}	CA
G_{AA}	2197$\times 10^3$	0	10380	p_{22}	CA
G_{FA}	-2200 $\times 10^3$	2233	5975	p_{12}	AF
G_{CF}	2197 $\times 10^3$	6909	3969	p_{21}	CF
G_{AF}	2197 $\times 10^3$	2222	5979	p_{21}	AF
G_{FF}	-2197 $\times 10^3$	0	9196	p_{22}	CF

Table 2. Properties of the three reaches

(Y_C, Y_A, Y_F). Each output can be modelled by using three transfer functions with the structure of (2):

$$\begin{cases} Y_C(s) = G_{CC}(s)Q_C(s) + G_{AC}(s)Q_A(s) + G_{FC}(s)Q_F(s) \\ Y_A(s) = G_{CA}(s)Q_C(s) + G_{AA}(s)Q_A(s) + G_{FA}(s)Q_F(s) \\ Y_F(s) = G_{CF}(s)Q_C(s) + G_{AF}(s)Q_A(s) + G_{FF}(s)Q_F(s) \end{cases} \quad (3)$$

The transfer functions show the effect of the discharges to the water levels, *e.g.* G_{CF} is the transfer function between the discharge at Fontintettes and the level at Cuinchy.

The modelling of the intermediate discharge in the middle of the reach was not that straightforward. In order to model the transfer functions between Cuinchy and Aire and Aire and Fontinettes, all the IDZ parameters (the time delay, the zero and the backwater surface) were calculated following Litrico and Fromion (2004). Finally, the backwater surface was substituted with the one calculated for the whole canal: the discharge that enters in the middle of the reach contributes to the water level of the whole reach. The calculated parameters are summarized in Table 2. The following remarks should be considered:

(1) Note that the all the backwater areas are very similar, but there is a slight difference between them in the upstream and downstream directions. However, they are similar between the reaches.
(2) The sign of the backwater area is negative belonging to the effect of the discharge at Fontinettes, that is the downstream end. The reason is that this discharge leaves the canal, therefore its effect is decreasing the water level.
(3) The obtained time delays are similar, but not equal in the upstream and downstream directions: *e.g.* in the downstream direction from Cuinchy to Aire is $4688s$ (line 4), while in the upstream direction form Aire to Cuinchy is $4711s$ (line 2). The reason is that the wave travelling with the direction of the celerity in the downstream direction the velocity of the bulk of the water is added to the wave celerity, while when travelling upstream this velocity slows the wave down. However, as it can be seen that the two values are very close to each other, the velocity of the bulk of the water is negligible compared to the wave celerity.

3. RESIDUAL GENERATION USING INTERVAL OBSERVERS

3.1 Interval observers

As discussed in the introduction, the FDI approach proposed in this paper for CFR system aims at combining model-based and data-based approaches.

The model-based approach will be used to generate residuals and their thresholds by means of interval observer methodology (Puig et al., 2008). With this objective, the CFR model (3) is expressed in discrete-time state space form as follows:

$$x(k+1) = A(\tilde{\theta})x(k) + B(\tilde{\theta})u(k) \quad (4)$$
$$y(k) = C(\tilde{\theta})x(k) + F_y(\tilde{\theta})f_y(k) + \tilde{v}(k) \quad (5)$$

where $u(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$ is the system input, $y(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the system output, $x(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ is the state-space vector, $\tilde{v}(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the output noise that is assumed to be bounded $|\tilde{v}_i(k)| < \sigma_i$ with $i = 1, \ldots, n_y$, $f_y(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ represents faults in the output sensors. $A(\tilde{\theta})$, $B(\tilde{\theta})$, $C(\tilde{\theta})$ and $F_y(\tilde{\theta})$ are matrices of appropriate dimensions where $\tilde{\theta} \in \mathbb{R}^{n_\theta}$ is the vector of real parameters.

Then, the system (4)-(5) can be monitored using a linear observer with Luenberger structure that uses an *interval model* of the system, *i.e.* a model with parameters θ bounded by intervals:

$$\theta \in \Theta = \left\{\theta \in \mathbb{R}^{n_\theta} \mid \underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i, i = 1, \ldots, n_\theta\right\} \quad (6)$$

that represent the uncertainty about the exact knowledge of the real parameters $\tilde{\theta}$. This observer, known as an *interval observer*, is expressed as follows (Meseguer et al., 2010):

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1,\theta) &= (A(\theta) - LC(\theta))\,\hat{x}(k,\theta) + B(\theta)u(k) + Ly(k) \\ &= A_0(\theta)\hat{x}(k,\theta) + B(\theta)u(k) + Ly(k) \quad (7) \\ \hat{y}(k,\theta) &= C(\theta)\hat{x}(k,\theta) \end{aligned}$$

where $\hat{x}(k,\theta)$ is the estimated system state vector, $\hat{y}(k,\theta)$ is the estimated system output vector and $A_0(\theta) = A(\theta) - LC(\theta)$ is the observer matrix.

The observer gain matrix $L \in \mathbb{R}^{n_x \times n_y}$ is designed to stabilize the matrix $A_0(\theta)$ and to guarantee a desired performance regarding fault detection for all $\theta \in \Theta$ using the LMI pole placement approach (Chilali and Gahinet, 1996).

The input/output form of the system (4)-(5) using the shift operator q^{-1} and assuming zero initial conditions is given by:

$$y(k) = y_0(k,\tilde{\theta}) + G_{f_y}(\tilde{\theta})f_y(k) + \tilde{v}(k) \quad (8)$$

where $y_0(k,\tilde{\theta})$ is the system output when the system is not affected by faults, disturbances and noises:

$$y_0(k,\tilde{\theta}) = G_u(q^{-1},\tilde{\theta})u(k) \quad (9)$$
$$G_u(q^{-1},\tilde{\theta}) = C(\tilde{\theta})(qI - A(\tilde{\theta}))^{-1}B(\tilde{\theta}) \quad (10)$$
$$G_{f_y}(\tilde{\theta}) = F_y(\tilde{\theta}) \quad (11)$$

The input/output form of the observer (7) is expressed as follows:

$$\hat{y}(k,\theta) = G(q^{-1},\theta)u(k) + H(q^{-1},\theta)y(k) \quad (12)$$

with:

$$G(q^{-1},\theta) = C(\theta)(qI - A_0(\theta))^{-1}B(\theta) \quad (13)$$
$$H(q^{-1},\theta) = C(\theta)(qI - A_0(\theta))^{-1}L \quad (14)$$

The effect of the uncertain parameters θ on the observer temporal response $\hat{y}(k,\theta)$ will be bounded using an interval satisfying:

$$\hat{y}(k,\theta) \in \left[\underline{\hat{y}}(k), \overline{\hat{y}}(k)\right] \quad (15)$$

Such interval can be computed independently for each output $i = 1,\ldots,n_y$, neglecting couplings among outputs, as follows:

$$\underline{\hat{y}_i}(k) = \min_{\theta\in\Theta} \hat{y}_i(k,\theta) \quad \text{and} \quad \overline{\hat{y}}_i(k) = \max_{\theta\in\Theta} \hat{y}_i(k,\theta) \quad (16)$$

subject to the observer equations given by (7). The optimization problems (16) could be solved using numerical methods as in Puig et al. (2003).

Finally, taking into account that the additive noise in the system (5) is bounded, the following condition should be satisfied in a non-faulty scenario:

$$y_i(k) \in \left[\underline{\hat{y}_i}(k) - \sigma_i, \overline{\hat{y}_i}(k) + \sigma_i\right] i = 1,\ldots,n_y \quad (17)$$

3.2 Parameter uncertainty estimation

One of the key points in passive robust model-based fault detection is how models and their uncertainty bounds are obtained. Recently, some methodologies that provide a model with its uncertainty have been developed, but always thinking of its application to control (Reinelt et al., 2002). One of the methodologies assumes the bounded and unknown description of the noise and parametric uncertainty. This methodology is known as *bounded-error* or *set-membership estimation* (Milanese et al., 1996), which produces a set of parameters consistent with the selected model structure and the pre-specified noise bounds. This approach is used for estimating parametric uncertainty of the interval observers in (7).

Regarding the uncertain variables that appear in (7), it is assumed that a priori theoretical or practical considerations allow to obtain useful intervals associated to measurement noises, leading to an estimation of the noise bound σ. The goal of the parameter estimation algorithm is to characterize the parameter set Θ (here a box) consistent with the data collected in a fault-free scenario. Given N measurements of system inputs $u(k)$ and outputs $y(k)$ from a scenario free of faults and rich enough from the identifiability point of view, and a nominal model described by a vector θ_n that can be obtained by the physical knowledge of the system or using a standard least-square parameter estimation algorithm Ljung (1987), the uncertain parameter estimation algorithm proceeds by solving the following optimization problem that can be solved by bi-level optimization (Bard, 1988):

$$\begin{aligned}
&\min\ \alpha \\
&\text{subject to :} \\
&\quad y_i(k) \in \left[\underline{\hat{y}}_i(k) - \sigma_i, \overline{\hat{y}}_i(k) + \sigma_i\right] \quad i = 1,...,n_y \quad k = 1,...,N \\
&\quad \underline{\hat{y}}_i(k) = \min_{\theta\in\Theta} \hat{y}_i(k,\theta) \quad i = 1,...,n_y \quad k = 1,...,N \\
&\quad \overline{\hat{y}}_i(k) = \max_{\theta\in\Theta} \hat{y}_i(k,\theta) \quad i = 1,...,n_y \quad k = 1,...,N \\
&\quad \hat{y}(k,\theta) = G(q^{-1},\theta)u(k) + H(q^{-1},\theta)y(k) \quad k = 1,...,N \\
&\quad \Theta = [\theta_n(1-\alpha), \theta_n(1+\alpha)]
\end{aligned} \quad (18)$$

3.3 Residual generation

Fault detection is based on generating a nominal residual comparing the measurements of physical system variables $y(k)$ with their estimation $\hat{y}(k)$ provided by the observer (7):

$$r^o(k) = y(k) - \hat{y}(k,\theta_n) \quad (19)$$

where $r^0(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the nominal residual. According to Gertler (1998), the computational form of the nominal residual generator, obtained using (7), is:

$$r^o(k) = \left(I - H(q^{-1},\theta_n)\right) y(k) - G(q^{-1},\theta_n)u(k) \quad (20)$$

that has been derived taking into account the input/output form of the observer (12).

When considering model uncertainty located in parameters, the residual generated by (19) will not be zero, even in a non-faulty scenario. To cope with the parameter uncertainty effect, a passive robust approach based on adaptive thresholding can be used (Puig et al., 2006). Thus, using this passive approach, the effect of parameter uncertainty in the components $r_i(k)$ of residual $r(k)$ (associated to each system output $y_i(k)$) is bounded by the interval (Puig et al., 2003):

$$r_i^o(k) \in [\underline{r}_i(k) - \sigma_i, \overline{r}_i(k) + \sigma_i] \quad i = 1,...,n_y \quad (21)$$

where:

$$\underline{r}_i(k) = \underline{\hat{y}}_i(k) - \hat{y}_i(k,\theta_n) \text{ and } \overline{r}_i(k) = \overline{\hat{y}_i}(k) - \hat{y}_i(k,\theta_n) \quad (22)$$

where $\underline{\hat{y}}_i(k)$ and $\overline{\hat{y}}_i(k)$ are the bounds of the system output estimation computed component-wise using the interval observer (7) and obtained according to (16).

4. FAULT DIAGNOSIS USING DYNAMICAL CLASSIFIER *AUDYC* AND RESIDUALS

4.1 Overview

The fault diagnosis approach proposed in this paper is based on using residuals and their uncertainty intervals presented in previous section combined with a dynamical classifier. The idea is that this classifier is in charge of tracking the evolution of the system residuals in the residual space. This allows a more sensitive, faster detection than using just thresholds. An additional motivation is the specific characteristic of this water system: the measurement can change fast within short time. Therefore with only using the residuals and threshold it would be either not sensitive enough or would lead to false alarm. The use of classifiers can compensate for this fast movement, and acts as a filter by finding the change of the class.

When the residuals leaves the region of normal behaviour established by the uncertainty bounds a fault is detected. Fault isolation is achieved when residuals enter in a region of the residual space corresponding to a given fault signature. The regions are created by training the classifier using faulty and non-faulty scenarios created in simulation.

4.2 AUDyC classifier

The classifier *AUDyC* aims at characterizing on line the free-fault and faulty modes of the system by Gaussian classes according to pertinent indicators, *i.e.* the features. A *Representation Space* is built according to the features, where the classes are represented. The class of the free-fault mode, denoted C_n, is determined with fault-free data. Then, the characteristics of the class, *i.e.* its center and its covariance matrix, are updated with each new data. This evolutionary class is denoted C_k.

The update of the classes parameters is performed recursively on a sliding window of size N_{fen} for each new observation

$X_k = (x_1,\ x_2,\ \ldots\ x_n)$, with n the number of features. The principle of the procedure is detailed in Lecoeuche et al. (2004). To detect a modification of the characteristics of the evolutionary class, the Kullback-Leiber distance between C_n and C_k is computed at each sample time. It is denoted $d_{Kl}(M_k, M_n)$ and expressed as:

$$\begin{cases} d_{Kl}(M_k, M_n) = & 1/2(M_k - M_n)^T(\Sigma_k^{-1} + \Sigma_n^{-1})(M_k - M_n) + \\ & 1/2 trace(\Sigma_k^{-1}\Sigma_n^{-1} + \Sigma_k + \Sigma_n^{-1}) - D, \end{cases} \tag{23}$$

where M_k is the center of the class C_k and M_n the center of the normal class C_n, Σ_k and Σ_n the covariance matrices of the classes C_k and C_n respectively, D the dimension of the *Representation Space*, and $trace$ computes the sum of diagonal elements of the matrix.

When a fault occurs, the characteristics of the evolutionary class C_k changes. The class C_k moves in the *Representation Space* from the normal class C_n and its shape (i.e. Σ_k) can be modified. These modifications have an impact on the Kullback-Leiber distance $d_{Kl}(M_k, M_n)$. Then, a sensor fault is detected when the $d_{Kl}(M_k, M_n)$ crosses a prefixed threshold th. This threshold is tuned according to data or expert knowledge on the system.

4.3 Application to the Cuinchy-Fontinettes case study

Considering the CFR system, there are three sensors that can be subject to faults. Using the IDZ models associated to the interval models, three features are defined for each sensor by means of the residuals and their intervals generated using the corresponding interval observers presented in previous section: *i.e.* $r_C(k)$, $\underline{r}_C(k)$ and $\overline{r}_C(k)$ for the sensor in Cuinchy Y_C, $r_A(k)$, $\underline{r}_A(k)$ and $\overline{r}_A(k)$ for the sensor in Aire Y_A, finally, $r_F(k)$, $\underline{r}_F(k)$ and $\overline{r}_F(k)$ for the sensor in Fontinettes Y_F. The residuals $r_i(k)$ are directly issued from the nominal IDZ model and the measurements. Thus, three *Representation Spaces* are defined for the CFR.

5. RESULTS

A numerical model of the CFR was built using the SIC (Simulation of Irrigation Canals) (Malaterre, 2006) software. SIC uses a finite difference method to solve the SV equations implicitly. The cross sections were placed at about each $100\ m$, using surveyed data. The discretization time was chosen in order the Courant-Friedrichs-Levy condition to be kept. After this validation, the numerical simulator is used to reproduce the scenarios presented in the following.

The transfer functions were discretized by using zero order hold, with a sampling time of $300s$. The models of the three water levels were compared to the results of the distributed solution of the SV equations (by the SIC software) and the bed slope of the IDZ model was adjusted to represent better the real data.

According to the IDZ model described in Section 2, the real behaviour of the CFR system in presence of sensor faults and additive error noise can be expressed in state space as (4)-(5) with $y = (Y_C(k), Y_A(k), Y_F(k))$ and $u = (Q_C(k), Q_A(k), Q_F(k))$.

Nominal parameters θ_n where obtained as explained in Section 2.3 using a fault free scenario rich enough under the identification point of view. The interval observer is calibrated as it was described in Section 3. The scenario used for calibration corresponds to normal operation of the canal reach: about 10 lock operations per day both upstream and downstream and changing flow input in the middle of the reach.

As can be deduced from the IDZ equations (3), every sensor level fault affects only the residuals associated to its level. Then, the isolation is trivial: when an inconsistency is detected in one residual, a fault in the level associated to the residual is concluded.

Once the interval model has been calibrated, different faults have been simulated in order to verify the effectiveness in fault detection using directly (21) and using the AUDYC classifier with the nominal, maximum and minimum residuals.

Figure 2 shows the measured level in Cuinchy and interval bounds in a fault scenario of -2cm offset level applied at time $t = 5000$ minutes. It shows the evolution of the Cuinchy level (calculated by the SIC simulator) for six days long. The interval bounds computed by (16). It can be seen when the fault occurs the "measurement" leaves the interval.

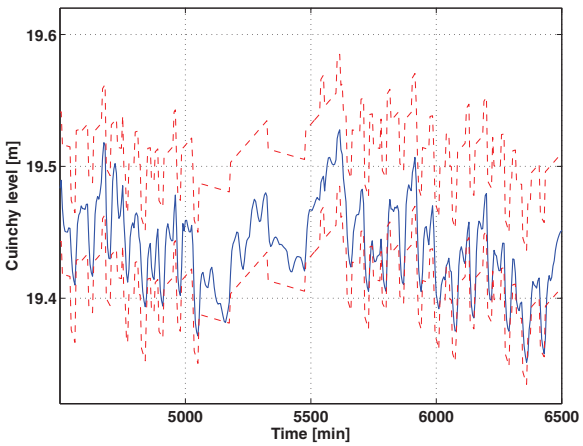


Fig. 2. Cuinchy level (blue line) and bounds (red dashed line) and Fault detection test in Fault scenario.

The Kullback-Leiber distance $d_{Kl}(M_k, M_n)$ between these two classes are determined on line and shown in Figure 3, in continuous blue line for a free-fault scenario and in dashed red line for fault scenario. The threshold is tuned as 0.08. With this threshold, a fault of $2cm$ (0.5%) is detected within 23 samples (2 hours). Afther the detection there are two intervals of no detection, while the fault is present.

6. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

A sensor fault diagnosis method is proposed based on the combination of model-based approach and dynamic classification. A white box model of the system is used in combination with an interval observer to generate residuals for the classifier. The method is successfully applied to a case study of an inland navigation reach. This result shows that it is a promising line of research to combine the model-based and the data-driven FDI methods.

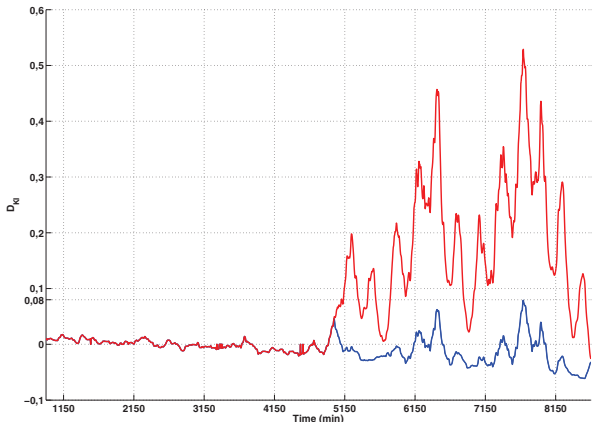


Fig. 3. Kullback-Leiber distance $d_{KI}(M_k, M_n)$ between these two classes - free-fault in blue, fault in red.

ACKNOWLEDGMENT

This work is a contribution to the GEPET'Eau project which is granted by the French ministery MEDDE - GICC, the French institution ORNERC and the DGITM.

REFERENCES

A. Akhenak, E. Duviella, L. Bako, and S. Lecoeuche. Online fault diagnosis using recursive subspace identification algorithm of a dam-gallery open channel system. *Control Engineering Practice*, In press, 2013.

J.F. Bard. *Practical Bilevel Optimization: Algorithms and Applications*. The Netherlands: Kluwer, 1988.

N. Bedjaoui and E. Weyer. Algorithms for leak detection, estimation, isolation and localization in open water channels. *Control Engineering Practice*, 19(6):564–573, 2011.

J. Blesa, V. Puig, and Y. Bolea. Fault detection using interval LPV models in an open-flow canal. *Control Engineering Practice*, 18(5):460 – 470, 2010.

J. Chen and R. J. Patton. *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.

M. Chilali and P. Gahinet. H_∞ Design with pole placement constraints: an LMI approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(3):358–367, 1996.

V. T. Chow. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Co. Inc, New York, 1959.

E. Duviella, J. Blesa, L. Bako, Y. Bolea, M. Sayed-Mouchaweh, V. Puig, and K. Chuquet. Inland navigation channel model: Application to the cuinchy-fontinettes reach. In *The 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Paris, France, April 10-12. 2013a.

E. Duviella, L. Rajaoarisoa, J. Blesa, and K. Chuquet. Fault detection and isolation of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach. In *CDC 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, December 2013b.

T. Eltoft and R.I.P. de Figueiredo. A new neural network for cluster-detection-and-labeling. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 9(5):1021–1035, 1998.

M. Fastenbauer, M. Sattler, and G. Schilk. River information services for commercial users in the inland waterway sector. In *LINDI 2007. International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, pages 31–36, 2007.

P. M. Frank, S. X. Ding, and B. Köppen-Seliger. Current developments in the theory of FDI. In A. Edelmayer, editor, *SAFEPROCESS*, pages 16–17, 2000.

J. Gertler. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Taylor & Francis, 1998.

L. Hartert, M. Sayed Mouchaweh, and P. Billaudel. Monitoring of non stationary systems using dynamic pattern recognition. In *Intelligent Industrial Systems: Modelling, Automation and Adaptive Behaviour*. IGI, 2010.

S. Hayami. On the propagation of flood waves. *Bulletins-Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 1: 1–16, 1951.

S. Lecoeuche, C. Lurette, and S. Lalot. New supervision architecture based on on-line modelling of non-stationary data. *Neural Comput. Appl.*, 13(4):323–338, December 2004.

X. Litrico and V. Fromion. Simplified modeling of irrigation canals for controller design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5):373–383, 2004.

L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1987.

P.-O. Malaterre. Sic 5.20, simulation of irrigation canals, 2006. URL `http://www.cemagref.net/sic/sicgb.htm`.

P.-O. Malaterre and C. Chateau. Scada interface of the sic software for easy real time application of advanced regulation algorithms. In *Second Conference on SCADA and Related Technologies for Irrigation System Modernization*, 2007.

J. Meseguer, V. Puig, T. Escobet, and J. Saludes. Observer gain effect in linear interval observer-based fault detection. *Journal of Process Control*, 20:944–956, 2010.

M. Milanese, J. Norton, H. Piet-Lahanier, and É. Walter, editors. *Bounding Approaches to System Identification*. Springer, 1996.

J. Lemos Nabais, L. F. Mendona, and M. Ayala Botto. A multiagent architecture for diagnosing simultaneous faults along water canals. *Control Engineering Practice*, (0):–, 2013.

O. Le Pocher, E. Duviella, L. Bako, and K. Chuquet. Sensor fault detection of a real undershot/overshot gate based on physical and nonlinear black-box models. In *SAFEPROCESS*, 2012.

V. Puig, J. Saludes, and J. Quevedo. Worst-Case Simulation of Discrete Linear Time-Invariant Interval Dynamic Systems. *Reliable Computing*, 9(4):251–290, 2003.

V. Puig, A. Stancu, T. Escobet, F. Nejjari, J. Quevedo, and R. J. Patton. Passive Robust Fault Detection using Interval Observers: Application to the DAMADICS Benchmark Problem. *Control Engineering Practice*, 14(6):621–633, 2006.

V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, F. Nejjari, and S. de las Heras. Passive Robust Fault Detection of Dynamic Processes using Interval Models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16:1083–1089, 2008.

S. J. Qin. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36(2):220 – 234, 2012.

W. Reinelt, A. Garulli, and L. Ljung. Comparing different approaches to model error modeling in robust identification. *Automatica*, 38(5):787 – 803, 2002.

J. Schuurmans. Open-channel flow model approximation for controller design. *Applied Mathematical Modelling*, 19(9): 525–530, 1995.

P.-J. van Overloop, I. J. Miltenburg, X. Bombois, A. J. Clemmens, R. Strand, and N. van de Giesen. Identification of resonance waves in open water channels. *Control Engineering Practice*, 18(8):863–872, 2010.

JOURNAL OF MARITIME RESEARCH

Vol XI. No. II (2014) pp 81–88

ISSN: 1697-4040, www.jmr.unican.es

Model-Based Sensor Supervision in Inland Navigation Networks: Cuinchy-Fontinettes Case Study

J. Blesa [1,*], K. Horváth[2], E. Duviellal[3], V. Puig[4], Y. Bolea[5], L. Rajaoarisoa[6] and K. Chuquet[7]

ARTICLE INFO

Article history:
Received 27 March 2014;
in revised form 01 April 2014;
accepted 14 May 2014.

Keywords:
Inland Navigation Networks, Fault Diagnosis, Interval Models

ABSTRACT

In recent years, inland navigation networks benefit from the innovation of the instrumentation and SCADA systems. These data acquisition and control systems lead to the improvement of the management of these networks. Moreover, they allow the implementation of more accurate automatic control to guarantee the navigation requirements. However, sensors and actuators are subject to faults due to the strong effects of the environment, aging, etc. Thus, before implementing automatic control strategies that rely on the fault-free mode, it is necessary to design a fault diagnosis scheme. This fault diagnosis scheme has to detect and isolate possible faults in the system to guarantee fault-free data and the efficiency of the automatic control algorithms. Moreover, the proposed supervision scheme could predict future incipient faults that are necessary to perform predictive maintenance of the equipment. In this paper, a general architecture of sensor fault detection and isolation using model-based approaches will be proposed for inland navigation networks. The proposed approach will be particularized for the Cuinchy-Fontinettes reach located in the north of France. The preliminary results show the effectiveness of the proposed fault diagnosis methodologies using a realistic simulator and fault scenarios.

© *SEECMAR | All rights reserved*

1. Introduction

The main management objective of the inland navigation networks is to guarantee the navigation levels in each reach (Blesa et al., 2012), i.e. the Normal Navigation Levels (NNL). These levels are principally disturbed by the navigation and the lock operations. During lock operations, large volume of water is withdrawn from the upstream reach and supplied to the downstream reach causing a wave travelling in both directions; upstream to downstream, and downstream to upstream after reflection. To reduce the effect of wave and to maintain the NNL, it is necessary to control the gates which are generally located beside the locks. Another possibility is to control the discharges from natural rivers. The water levels are controlled by gates and measured by tele-operating sensors. To achieve these aims, an adaptive and predictive control architecture has been proposed in (Duviella et al., 2013) as depicted in Figure 1. This architecture is based on a SCADA system allowing the tele-control of the navigation network. A Human Machine Interface (HMI) is dedicated to the supervision of the inland navigation network by a supervisor. The management constraints and rules are gathered in the Management Objectives and Constraints Generation module (MOCG). To perform the management of the inland navigation network, a Hybrid Control Accommodation module (HCA) allows the determination of set-points (Management Strategies block) according to the current state (Supervi-

[1]Universitat Politècnica de Catalunya. E-mail address: joaquim.blesa@upc.edu.

[2]Post doctoral researcher at École des Mines de Douai, Bd. Lahure 764, Douai, 59500, France. (Current position: post doctoral researcher at Incas3, Dr. Nassaulaan 9, Assen, 9401 HJ, The Netherlands). Hungary. E-mail address: klaudia.horvath@mines-douai.fr.

[3]École des Mines de Douai, Bd. Lahure 764, Douai, 59500. France. E-mail address: eric.duviella@mines-douai.fr.

[4]E-mail address: vicenc.puig@upc.edu.

[5]E-mail address: yolanda.bolea@upc.edu

[6]École des Mines de Douai, Bd. Lahure 764, Douai, 59500. France. E-mail address: lala.rajaoarisoa@mines-douai.fr.

[7]VNF - Service de la navigation du Nord Pas-de-Calais, 37 rue du Plat, 59034 Lille Cedex, France. Country. France. E-mail address: karine.chuquet@vnf.fr.

[*]Corresponding Author. E-mail address: joaquim.blesa@upc.edu.

sion block) and the forecasting of the future state (Prognosis block) of the network. These strategies can be adapted or improved according to the Decision Support module (DS).

In this work, we will focus on the part of the supervision block that determines if a sensor fault is present in the system (detection) and identifies what sensor is affected by the fault (isolation). In particular, model-based fault diagnosis techniques will be used for the implementation of the sensor supervision block.

2. Model-Based Fault Detection and Isolation

The principle of model-based fault detection is to test whether the measured inputs and outputs from the system are consistent with the behavior described by a model of the faultless system. If the measurements are inconsistent with the model of the faultless system, the existence of a fault is proved. In general, two different types of models can be distinguished: qualitative and quantitative models. Quantitative models are used in the Systems Dynamics and Control Engineering community (Gertler, 1998; Iserman, 2006; Blanke et al., 2006; Ding, 2008) known as FDI (Fault Detection Isolation) community. Quantitative models are mathematical models that can be described in time or frequency domains and most of the fault detection techniques based on this kind of models uses a residual that describes the consistency check between the predicted, obtained by the model, and the real behaviour, $y(k)$ measured by the sensors. This fault detection approach is known as based on analytical redundancy.

2.1. Robust Fault Detection

Ideally, in quantitative model-based fault detection methods, residuals should only be affected by the faults. However, the presence of disturbances, noise and modelling errors causes residuals to become nonzero in the absence of faults and thus interferes with the detection of faults. Therefore, the fault detection procedure must be robust against these undesired effects (Chen and Patton, 1999).

In case parametric uncertainties are taken into account, the healthy system model should include a vector of uncertain parameters bounded by sets that contain all possible parameter values when the system operates normally.

One of the most developed families of robust approaches, called active, is based on generating residuals which are insensitive to uncertainty, while at the same time sensitive to faults. This approach has been extensively developed by several researchers using different techniques: unknown input observers, robust parity equations, etc. In the book of Chen and Patton (1999), there is an excellent survey of this active approach. On the other hand, there is a second family of approaches, called passive (Puig et al., 2008), which enhances the robustness of the fault detection system at the decision-making stage.

2.2. Interval model

Let us assume that the system to be monitored can be modeled using a model which is linear in the parameters and can be expressed in discrete time regressor form as a *Moving Average (MA) model*:

$$y(k) = \varphi(k,\tau)\theta + e(k) = \hat{y}(k) + e(k) \tag{1}$$

where

- $\varphi(k,\tau)$ is the regressor vector of dimension $1xn_\theta$ which can contain any function of inputs $u(k)$ and output $y(k)$.

- τ is the transport delay that is unknown but belongs to a set of natural numbers:

$\tau\epsilon\{\tau^0 - \lambda_\tau, \tau^0 - \lambda_\tau + 1, ...\tau^0 + \lambda_r\}$ with $\tau^0, \lambda_\tau\epsilon$¥ and $\tau^0 > \lambda_\tau$

- $\theta\epsilon\Theta$ is the parameter vector of dimension $n_\theta x1$

- Θ is the set that bounds parameter values. In particular, for interval models, the set of uncertain parameters is bounded by an interval box centered in the nominal parameter values:

$$\Theta@\left[\underline{\theta_1}\overline{\theta_1}\right] xLx \left[\underline{\theta_{n\theta}}\overline{\theta_{n\theta}}\right]$$

where:

- $\underline{\theta_i}@\theta_i^0 - \lambda_i$; $\overline{\theta_i}@\theta_i^0 + \lambda_i \;\; i = 1, ..., n_\theta$ being θ_i^0 the nominal parameter values;

- $e(k)$ is the additive error bounded by a constant $|e(k)| \leq \sigma$

.

The parameter set Θ and additive error bound σ are calibrated using fault-free data from the system (rich enough regarding the identification point of view) and in such a way that all measured data in a fault-free scenario will be covered by the interval predicted output produced by using model (1), that is

$$y(k)\epsilon\left[\underline{\hat{y}}(k) - \sigma, \overline{\hat{y}}(k) + \sigma\right] \tag{2}$$

where

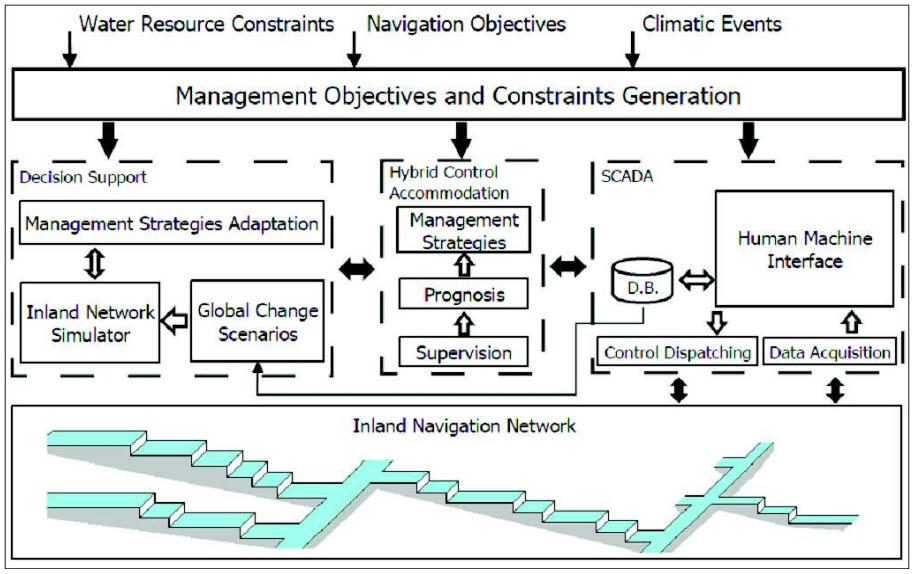
$$\begin{aligned} \overline{\hat{y}}(k) &= \max_{\theta\epsilon\Theta, \tau\epsilon\{\tau^0-\lambda_\tau, \tau^0-\lambda_\tau+1, L\tau^0+\lambda_r\}} (\varphi(k,\tau)\theta) \\ \overline{\hat{y}}(k) &= \min_{\theta\epsilon\Theta, \tau\epsilon\{\tau^0-\lambda_\tau, \tau^0-\lambda_\tau+1, L\tau^0+\lambda_r\}} (\varphi(k,\tau)\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

One of the key points in model based fault detection is how models are built and their uncertainty is estimated. The structure of the model, determined by $\varphi(k,\tau)$ and θ, nominal parameters θ^0 and nominal transport delay τ^0 can be obtained by the physical knowledge of the system or by conventional identification techniques (Ljung, 1999). The additive error bound σ can be determined by anlasying the noise statistics. The delay uncertainty λ_τ can be determined considering that the input process signal is white noise and carrying out the study of the independence between the input and output process signals using confidence intervals (usually, 99% or 95%). On the other hand, given N measurements of outputs and inputs from a scenario free of faults and rich enough from the identifiability point of view, the uncertainty in parameters ($\lambda_i i = 1, ..., n_\theta$) can by computed by solving an optimization problem (Blesa et al, 2010).

2.3. Fault detection

Once the model (1) has been calibrated in a non-faulty scenario, it can be used for fault detection checking if

Figure 1: Inland navigation network adaptive and predictive control architecture.



Source: Authors

$$y(k) \notin \Upsilon(k) \tag{4}$$

where $\Upsilon(k)$ is *the direct image* of the uncertain model defined as

$$\begin{aligned}\Upsilon(k) = \{\hat{y}(k) + e | \hat{y}(k) = \varphi(k,\tau)\theta, \theta \epsilon \Theta, |e| \leq \sigma \\ \tau \epsilon \{\tau^0 - \lambda_\tau, \tau^0 - \lambda_\tau + 1, ...\tau^0 + \lambda_\tau\}\} \\ = \left[\underline{\hat{y}}(k) - \sigma, \overline{\hat{y}}(k) + \sigma\right]\end{aligned} \tag{5}$$

In case that (4) is proved, a fault can be indicated; otherwise no fault is assumed to be present. Equivalently, the fault detection test (4) can be formulated in terms of the residual defined as

$$r(k) = y(k) - \hat{y}(k) - e(k) = y(k) - \theta(k,\tau)\Theta - e(k) \tag{6}$$

Residual (6) corresponds to a MA parity equation (Gertler, 1998). Ideally, when modeling errors and noise are neglected, residual (6) should be zero in a fault-free scenario and different from zero, otherwise. However, because of modeling errors and noise, residuals could be different from zero even in a non-faulty scenario. In order to take into account uncertainty in parameters and additive noise, the effects of these uncertainties will be propagated to the residuals defining the region of admissible residuals. A fault will be detected when zero does not belong to this set. Thus, the fault detection test is equivalent to check the following condition

$$0 \notin \Gamma(k) \tag{7}$$

where $\Gamma(k)$ is the interval of possible residuals defined as follows

$$\begin{aligned}\Gamma(k) = \{r(k) | r(k) = y(k) - \varphi(k,\tau)\theta - e, \theta \epsilon \Theta \\ |e| \leq \sigma, \tau \epsilon \{\tau^0 - \lambda_\tau, \tau^0 - \lambda_\tau + 1, L\tau^0 + \lambda_r\}\}\end{aligned} \tag{8}$$

This test based on the direct evaluation of the residual is known as the direct test (Blesa et al., 2011).

2.4. Fault isolation

Fault isolation consists in identifying the faults affecting the system once a fault has been detected. Fault isolation could be carried out, as classically proposed in FDI books (Gertler, 1998 and Isermann, 2006, among others). Given a set of nr residuals $\{r_1(k), L, r_{n_r}(k)\}$ at time k, the fault detection tests (4) or (7) applied component-wise to each single residual produces the *observed fault signature*

$$\phi(k) = (\phi_1(k), \phi_2(k), ..., \phi_{n_r}(k)) \tag{9}$$

where

$$\phi_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } r_i(k) = \text{is consistent} \\ 1 & \text{if } r_i(k) = \text{is not consistent} \end{cases} \tag{10}$$

The observed fault signature is, then, supplied to the fault isolation module that has the knowledge about the binary relation between the considered fault hypothesis set

$$f(k) = \left\{f_1(k), f_2(k), ..., f_{nf}(k)\right\} \tag{11}$$

and the fault signal set $\phi(k)$. This relation is stored in the theoretical binary fault signature matrix (FSM) of dimension $n_r x n_f$. Thereby, an element $FSM_{i,j}$ of this matrix is equal to 1 if the fault hypothesis $f_j(k)$ is expected to affect the residual $r_i(k)$ such that the related fault signal $\phi_i(k)$ is equal to 1 when

this fault is affecting the monitored system. Otherwise, the element $FSM_{i,j}$ is zero-valued.

Considering single faults, a general approach to fault isolation is based on comparing the observed fault signature $\phi_i(k)$ with the theoretical one related to every fault hypotheses that can be calculated as the distance between both vectors: $\phi_i(k)$ and the j^{th}-column of matrix FSM for the hypothesis f_j, e.g. using the Hamming distance measurement. As a result of this comparison, a distance measurement $dis_j(k)$ is obtained for every fault hypothesis f_j, being dis(k) the vector of all the computed distances at time instant k: $dis(k) = (dis_1(k), ..., dis_j(k), ..., dis_{nf}(k))$. If the Hamming distance approach is applied, then

$$dis_j(k) = \sum_{i=1}^{n_f} \left((FSN_{i,j}) \text{ XOR}(\phi_i(k)) \right) \tag{12}$$

where XOR is the XOR logic operator. Then, the fault hypotheses with the shortest distance regarding the current observed fault signature $\phi(k)$ are considered as the fault isolation result:

$$\text{DGN} = \left\{ f_j \epsilon f : \text{if } dis_j(k) = \min_{\nu \epsilon \{1,...,nf\}} dis_\nu(k) \right\} \tag{13}$$

Thus, **DGN** denotes the set of fault hypothesis fj which are consistent with the observed fault signals.

3. Inland Navigation Model

The real behaviour of every reach $\mathbf{NR}_i$ of the network, can be described by the Saint-Venant (SV) equations (Chow, 1959) that are partial-differential equations describing accurately the dynamics in a one-dimensional free surface flow. These equations express the conservation of mass and momentum principles in a one-dimensional free surface flow:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{S}\right) + gS\frac{\partial h}{\partial x} - gS(I-J) &= 0 \end{aligned} \tag{14}$$

where $Q = q(x,t)$ is the flow (in m^3/s), $S = S(x,t)$ is the cross-sectional area (in m^2), t is the time variable (in s), x is the spatial variable (in m), measured in the direction of the movement, h is the spatial variable corresponding to the water elevation (in m), g is the gravity (in m/s^2), I is the bottom slope and J is the friction slope.

Since there is no known analytical solution for equations (14) in real geometry, they have to be solved numerically. Then, the hydraulic behavior of this canal system can be simulated through numerical methods. Because of the complexity and the computational load of this complete distributed model several simplified models have been deduced from the SV equations with different simplifications (Bolea et al., 2014), as for example the IDZ model (Litrico and Fromion, 2004). The IDZ model is based on the linearisation of the SV equations around a set-point (in this case given by the NNL). The canal reach is divided into two parts: an upstream (uniform flow) part and a downstream (backwater) part. The relation between the level and the flow in these two parts is given by the following transfer function

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{21} \\ G_{12} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1(s) \\ q_2(s) \end{pmatrix} \tag{15}$$

where: y_1 and y_2 are the levels and q_1, and, q_2 are the upstream/downstream flow deviations from stationary values, $G_{11}(s) = \frac{p_{11}s+1}{A_1 s}$, $G_{21}(s) = \frac{p_{12}-e^{-\tau_{21}s}}{A_1 s}$, $G_{21}(s) = \frac{p_{12}-e^{-\tau_{12}s}}{A_2 s}$ and $G_{22}(s) = \frac{p_{22}s-1}{A_2 s}$. Discretizing (15) using a sample time Ts, the following MA models can be obtained

$$\begin{aligned} y_1(k) = y_1(k-1) + b^1_{1,1}q_1(k) + b^1_{1,2}q_1(k-1) + \\ + b^1_{2,1}q_2(k-\tau_{21}) + b^1_{2,2}q_2(k-\tau_{21}-1) + e_1(k) \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} y_2(k) = y_2(k-1) + b^2_{1,1}q_1(k-\tau_{12}) + b^2_{1,2}q_1(k-\tau_{12}-1) + \\ + b^2_{2,1}q_2 + b^2_{2,2}q_2(k-1) + e_2(k) \end{aligned}$$

In inland navigation reaches, there can exist intermediate measurement levels and intermediate points were extra flows can be injected/extracted. Then, in a general case, a reach with n_y measurement level points and with n_q input/output flow points, the following model can be obtained

$$\begin{aligned} y_i(k) = y_i(k-1) + \\ + \sum_{j=1}^{n_q} \left(b^i_{j,1}q_j(k-\tau_{j,i}) + b^i_{j,2}q_j(k-\tau_{j,i}-1) \right) + e_i(k) \\ i = 1, ..., n_y \end{aligned} \tag{17}$$

that can be rewritten as

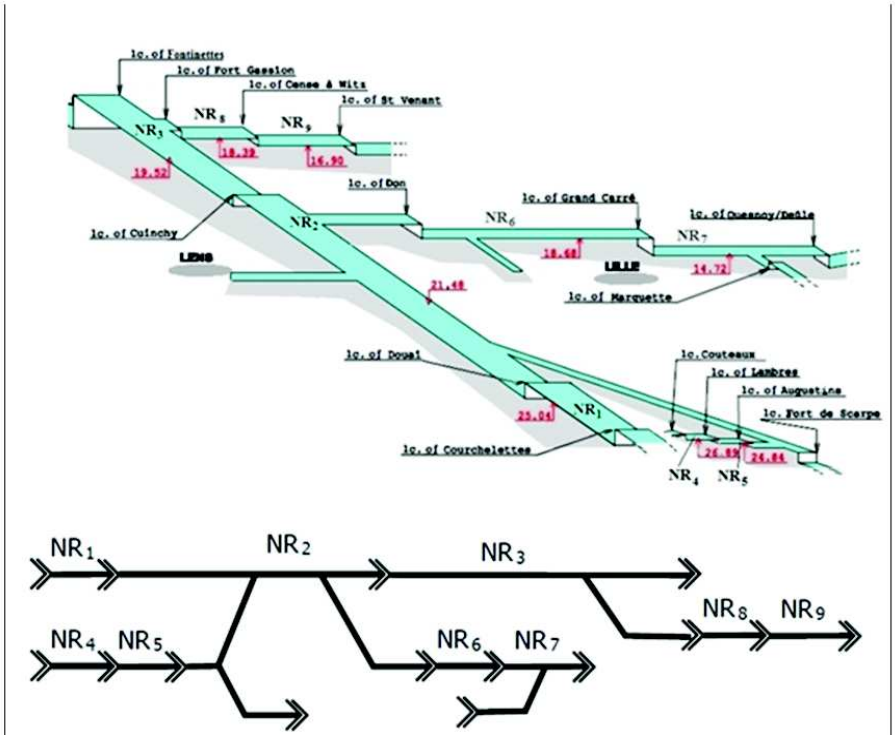
$$y_i(k) = \varphi(k,\tau_i)\Theta_i + e_i(k) \quad i = 1, ..., n_y \tag{18}$$

with

$$\begin{aligned} \varphi_i(k,\tau_i) = (y_i(k-1), q_1(k-\tau_{1,i}), q_1(k-\tau_{1,i}-1), \\ ..., q_{n_q}(k-\tau_{n_q i}-1)) \qquad \Theta_i = \left(1, b^i_{1,1}, b^i_{1,2}, ..., b^i_{n_q,2}\right)^T \end{aligned} \tag{19}$$

Since the IDZ is a physical-based model with a given structure, determined by $\varphi_i(k,\tau_i)$ and $\Theta_i = 1, ..., n_y$ in (18)-(19), nominal parameters φ^0_i and nominal delays τ^0_i are given by the physical knowledge of the system (Litrico and Fromion, 2004). Finally, given input/output data from a scenario free of faults and rich enough from the identifiability point of view, the uncertainty in parameters and time delays around their nominal values can be estimated.

Figure 2: Piece of inland navigation network of the north of France and its Scheme



Source: Authors

4. Fault Detection and Isolation Scheme

Considering a navigation reach, described by (17), with n_y measurement level points and n_q input/output flow points, n_y different sensor faults can be defined

$$y_i(k) = y_i^{nf}(k) + f_i(k) \quad i = 1, ..., ny \tag{20}$$

where $y_i^{nf}(k)$ is the real value of the level i and $f_i(k)$ the additive error fault that affects to level sensor i.

Thus, n_y primary residuals can be obtained as follows

$$r_i = y_i(k) - \varphi_i(k, \tau_i)\Theta_i - e_i(k) \;\; i = 1, ..., ny \tag{21}$$

Once the interval model has been calibrated, consistency test (7) can be applied to every residual (21).

Regarding the fault isolation, considering the residuals affected by the possible faults, the Fault Signature Matrix defined in Table 1 can be obtained.

The problem of using model (17) in (21) for generating residuals, that allow sensor fault detection, is that it behaves as a dead-beat observer which can only indicate a fault for a minimum time period given by the system order. This implies that after a number of samples (related to the order of the system) once the fault has appeared, the residual tends to be small even the fault is still present (Ding, 2008). In order to deal with this problem, when an inconsistency is detected in residual r_i at instant k_f a new residual r_{i_2} is activated for $k > k_f$

$$r_{i_2}(k) = y_i(k) - \hat{\bar{y}}_i(k) \;\; i = 1, ..., n_y \tag{22}$$

Table 1: Fault Signature Matrix of residuals system (21)

	f_1	f_2	. . .	f_{ny-1}	f_{ny}
r_1	1	0	0	0	0
r_1	0	1	0	0	0
⋮	0	0	⋱	0	0
r_{ny-1}	0	0	0	1	0
r_{ny}	0	0	0	0	1

Source : Authors

with $\hat{\bar{y}}_i(k)$ obtained by the following mass-balance average simulation model

$$\hat{\bar{y}}_i(k) = \hat{\bar{y}}_i(k-1) + \frac{1}{A}\overline{Q}_i(k) \tag{23}$$

where A is the longitudinal area of the reach and the input average flow $\overline{Q}_i(k)$ is computed as

$$\overline{Q}_i(k) = \sum_{l=1}^{n_q} \sum_{j=k_H}^{k-1} q_l(j - \tau_{l,i}) \tag{24}$$

and the initial condition of the simulation model is given by

$$\hat{\bar{y}}_i(k_f) = \sum_{j=kf-H}^{j=kf-1} y_i(j) \tag{25}$$

Then, the fault signature component $\phi_i(k)$ will be activated while the residual $r_{i_2}(k)$ will be bigger or equal a threshold $\overline{\sigma}_{1_2}$, i.e.,

$$\phi_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } |r_{1_2}(k)| \leq \overline{\sigma}_{1_2} \\ 1 & \text{if } |r_{1_2}(k)| > \overline{\sigma}_{1_2} \end{cases} \quad (26)$$

where $\overline{\sigma}_{1_2}$ $i = 1, ..., n_y$ are the detection threshold calibrated in a fault-free scenario.

5. Cuinchy Fontinettes Reach

The Cuinchy-Fontinettes Reach (CFR) has a crucial importance due to its localization between two major catchment areas and its size (more than *40 km* long). The main use of the CFR is for navigation purposes. However, it can be used to stock water volumes during wet periods in order to avoid or to limit floods in the two catchment areas, and during dry period to supply water to these two areas.

The CFR is located between the upstream lock of Cuinchy at the East of the town Bethune and, at the Southwest of the town Saint-Omer, the downstream lock of Fontinettes (*see* Figure 3). The first part of the channel corresponds to the *28.7 km* from Cuinchy to Aire-sur-la-Lys. The second part of the channel corresponds to *13.6 km* from Aire-sur-la-Lys to Fontinettes. The channel is entirely artificial and has no significant slope. Considering the navigation flow, the water runs off from Cuinchy to Fontinettes. There are three measurement points in Cuinchy, Aire-sur-la-Lys and Fontinettes. The input/output flow points are located in:

- Cuinchy where the flow can be injected by the lock operation (activated by navigation rules) and a submerged gate that can supply a controlled flow.
- Aire where the flow can be injected/extracted by a controlled gate.
- Fontinettes where the flow can be extracted by the lock operation (activated by navigation rules).

Then, considering the discrete-time IDZ model, the system can be modelled by

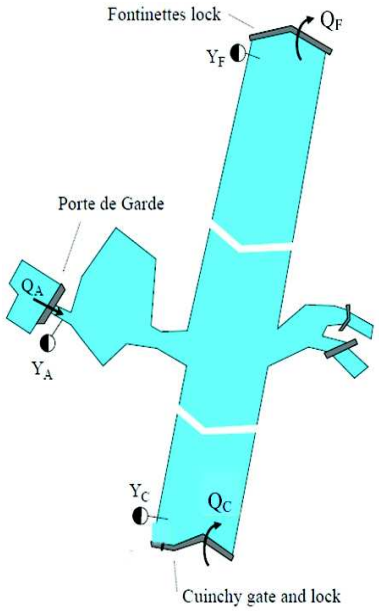
$$y_i(k) = \varphi_i(k, \tau_i)\Theta_i + e_i(k) \;\; i = 1, 2, 3 \quad (27)$$

with

$$\begin{aligned} \varphi_i(k, \tau_i) = (&y_i(k-1), q_1(k-\tau_{1,i}), q_1(k-\tau_{1,i}-1), \\ &q_2(k-\tau_{2,i}-1), q_2(k-\tau_{2,i}-1), q_3(k-\tau_{3,i}-1), \\ &, q_{n_q}(k-\tau_{3,i}-1)) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\Theta_i = \left(1, b^i_{1,1}, b^i_{1,2}, b^i_{2,1}, b^i_{2,2}, b^i_{3,1}, b^i_{3,2}\right)^T$$

Figure 3: Scheme of the Cuinchy-Fontinettes navigation reach



Source: Authors

6. Results

6.1. Identification

The nominal values of parameters in Eq. (27) have been obtained by the physical knowledge of the system and considering a sample time T_s=5 minutes. The values of these parameters are summarized in Tables 2, 3 and 4.

Once the nominal parameters have been computed, a fault-free scenario has been generated by numerical model implemented in the SIC (Simulation Irrigation Canals) software (Malaterre, 2006). SIC uses a finite difference method to solve the SV equations implicitly. The fault-free scenario defined by the input (positive) and output (negative) flow values in 6 days, based on a realistic scenario is depicted in Figure 4. Using this fault-free scenario and solving optimization problems (Blesa et al., 2010; Puig and Blesa, 2013), the uncertainty in parameters has been computed in such a way that the non-faulty data is contained in the interval bounds following Eq. (2).

The uncertain bounds in parameters obtained in the identification procedure are the following

- Delay uncertainty: $\lambda_g = 2$ for all the transport delays
- Additive errors: $\sigma_1 = 1,5cm$, $\sigma_2 = 3cm$ and $\sigma_3 = 3.5cm$
- Uncertainty in parameters: $b^1_{i,j} = (1 \pm \alpha_1)b^{1,0}_{i,j}$, $b^2_{i,j} = (1 \pm \alpha_2)b^{2,0}_{i,j}$ and $b^3_{i,j} = (1 \pm \alpha_3)b^{3,0}_{i,j}$ with $\alpha_1 = 0.066$, $\alpha_2 = 0.027$ and $\alpha_3 = 0.008$

Figure 5 shows the evolution of the Cuinchy, Aire and Fontinettes levels and the bound levels obtained using the interval model.

6.2. Fault Detection

Once the interval model has been calibrated, different fault scenarios have been simulated in order to verify the effectiveness in fault detection using Test (4) or (7). Figure 6 shows the

Table 2: Cuinchy level equation y_1 nominal parameters

$\tau^0_{1,1}$	$\tau^0_{2,1}$	$\tau^0_{3,1}$	$b^{1,0}_{1,1}$	$b^{1,0}_{1,2}$	$b^{1,0}_{2,1}$	$b^{1,0}_{2,2}$	$b^{1,0}_{3,1}$	$b^{1,0}_{3,2}$
1	16	24	0.0063	-0.0062	0.0023	-0.0021	-0.0019	0.0018

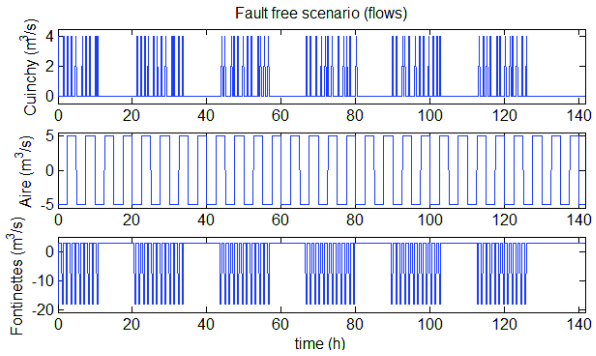
Source : Authors

Table 3: Aire level equation y_2 nominal parameters

$\tau^0_{1,1}$	$\tau^0_{2,1}$	$\tau^0_{3,1}$	$b^{1,0}_{1,1}$	$b^{1,0}_{1,2}$	$b^{1,0}_{2,1}$	$b^{1,0}_{2,2}$	$b^{1,0}_{3,1}$	$b^{1,0}_{3,2}$
16	1	8	0.0023	-0.0021	0.0047	-0.0046	-0.0028	0.0027

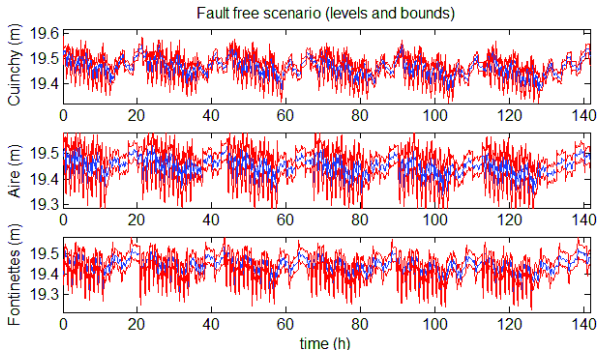
Source : Authors

Figure 4: Input(positive)/output(negative) flow values in the fault-free scenario



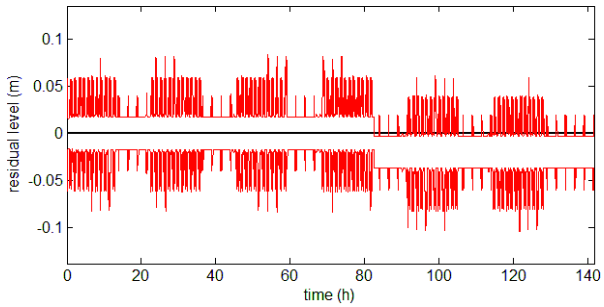
Source: Authors

Figure 5: Levels and interval bound levels in the fault-free scenario



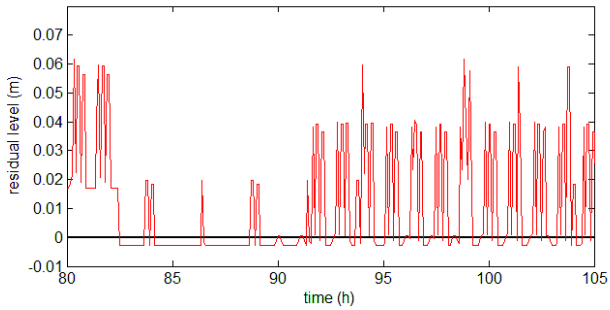
Source: Authors

Figure 6: Bounds of the interval residuals Γ_1 (Cuinchy level residual)



Source: Authors

Figure 7: Detail of bounds of the interval residuals Γ_1 (Cuinchy level residual)



Source: Authors

evolution of the bounds of the interval residuals in the Cuinchy level when an additive fault of -2cm has been introduced in this sensor level i.e $f_1 = -0.02m$ at $k_f = 990$ (i.e. at time 82h 30'). Figure 7 depicts the details of Figure 6 around the fault time occurrence.

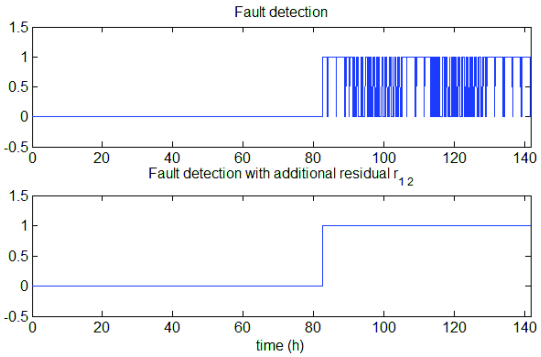
Finally, Figure 8 (upper) shows the fault detection results applying fault detection test defined in Eq. (7) to r_1 and (lower) applying this fault detection test but with the additional residual r_{1_2} defined in Eq. (22) in order to deal with the dead-beat observer effect described in Section 4. As can be seen if test (7) is directly applied to r_1 , there is not persistence in the fault indicator, whereas this problem disappear when the auxiliary

Table 4: Fontinettes level equation y_3 nominal parameters

$\tau^0_{1,1}$	$\tau^0_{2,1}$	$\tau^0_{3,1}$	$b^{1,0}_{1,1}$	$b^{1,0}_{1,2}$	$b^{1,0}_{2,1}$	$b^{1,0}_{2,2}$	$b^{1,0}_{3,1}$	$b^{1,0}_{3,2}$
24	8	1	0.0019	-0.0018	0.0028	-0.0027	-0.0042	0.0040

Source : Authors

Figure 8: Fault detection results without and with additional residual $r_{1\ 2}$



Source: Authors

residual is used and there is persistence in the fault indicator.

7. Conclusions

In recent years, inland navigation networks have benefited from the innovation of the instrumentation and SCADA systems. However, before implementing automatic control strategies that rely on the fault-free mode it is necessary to design a fault diagnosis scheme. In this paper, a model-based scheme has been proposed for the sensor level fault detection and isolation in inland navigation networks. The scheme is based on the use of analytical redundancy provided by a mathematical model. The fault detection is implemented by a passive robust approach based on interval methods that considers uncertainty in parameters of the mathematical model and additive error. Finally, the proposed scheme has been successfully validated in real scenarios using a high-fidelity simulator of a reach of the inland navigation network located in the north of France.

Acknowledgements

This work has been partially funded by Project ECOCIS DPI2013-48243-C2-1-R of Spanish Ministry of Education and by project GEPET'Eau which is granted by the French ministery MEDDE - GICC, the French institution ORNERC and the DGITM

References

Blanke M, Kinnaert M, Lunze J, Staroswiecki M, Schröder J. (2006) *Diagnosis and Fault-Tolerant Control.* Springer-Verlag: New York.

Blesa J, Puig V, Bolea Y. (2010) Fault detection using interval LPV models in an open-flow canal. *Control Engineering Practice* 18(5), 460-470.

Blesa J, Puig V, Saludes J. (2011) Identification for passive robust fault detection using zonotope-based set-membership approaches. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 25 (9), 788-812.

Blesa J, Duviella E, Sayeb-Mouchaweh M, Puig V, Chuquet K. (2012) Automatic Control To Improve The Seaworthiness Conditions In Inland Navigation Networks. *Journal of Maritime Research* 9(3), 61-66.

Bolea Y, Puig V, Blesa J. (2014) Linear parameter varying modeling and identification for real-time control of open-flow irrigation canals. *Environmental modelling & software* 53, 87-97

Chen J, Patton R.J. (1999) *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Chow V.T. (1959) *Open-channel hydraulics,* McGraw-Hill. New York.

Ding S.X. (2008) *Model-based Fault Diagnosis Techniques Design Schemes, Algorithms, and Tools.* Springer: Berlin.

Duviella E, Rajaoarisoa L, Blesa J, Chuquet K. (2013) Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the Cuinchy-Fontinettes reach, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline): 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM 2013,* Saint Petersburg, Russian Federation, 19-21 June, pp 2201-2206.

Gertler, J. (1998) *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems.* Marcel Dekker: New York.

Horváth K, Duviella E, Blesa J, Rajaoarisoa L, Bolea Y, Puig V, Chuquet K. (2014) Gray-box model of inland navigation channel: Application to the Cuinchy-Fontinettes reach. *Journal of Intelligent Systems* 23 (2) 183-199

Isermann R. (2006) *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance.* Springer: Berlin.

Litrico X, Fromion V. (2004) Simplified modeling of irrigation canals for controller design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130(5), 373-383.

Ljung L. (1999) *System identification-theory for the user (2nd ed.).* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Malaterre P.O. (2006) Sic 5.20, simulation of irrigation canals [online]. Available from: http://www.canari.free.fr/sic/sicgb.htm

Puig V, Quevedo J, Escobet T, Nejjari F, de las Heras S. (2008) Passive Robust Fault Detection of Dynamic Processes using Interval Models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16, 1083-1089.

Puig V, Blesa J. (2013) Limnimeter and rain gauge FDI in sewer networks using an interval parity equations based detection approach and an enhanced isolation scheme. *Control Engineering Practice* 21(2), 146-170