

CONCEPTION HYDRAULIQUE DES ECLUSES DE HAUTE CHUTE ET DES SYSTEMES DE GESTION HYDRAULIQUE DU CANAL SEINE NORD EUROPE

Canal Seine-Nord Europe : Hydraulic design of high navigation locks and hydraulic supervision

Olivier QUESTE SCSNE , place d'Armes, Compiègne, olivier.queste@scsne.fr
Rémy CROIX, Bernard BRACHET, Egis, 15 avenue du Centre 78286 Guyancourt cedex
remy.croix@egis-group.com ; bernard.brachet@egis-group.com
Joris MEERSSCHAERT, SB, Sint Niklaas, Belgique.Joris.Meersschaert@sbe.be

MOTS CLEFS

Ecluses, hydraulique, Canal Seine-Nord Europe, systèmes

KEY WORDS

Navigation locks, hydraulic, Canal Seine-Nord Europe, systemes

RÉSUMÉ

Le Canal Seine-Nord Europe de 107 kilomètres de long est un maillon essentiel de la liaison fluviale Seine-Escaut qui connectera le réseau français aux 20 000 km de voies européennes. Sa construction comprend 5 hautes écluses neuves de 13 à 25.7 m de hauteur de chute. Les exigences assignées à ces ouvrages hors normes sont autant de défis pour le concepteur : écluse économe en eau à bassins d'épargne, très rapides, très sûres pour les navigants et pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, très fiables malgré les multiples organes mobiles et inscrites dans un fonctionnement hydraulique global très fin.

Le groupement d'ingénierie ONE (Egis mandataire, SBE, ISL, INGEROP) est en charge de la conception de ces écluses et de leurs systèmes. La méthodologie d'étude hybride avec recours systématique aux modèles numériques 3D complété par une utilisation ciblée des maquettes physiques a permis d'aboutir à une conception permettant de vérifier l'ensemble de ces exigences avec des écluses à radier perforé et une séquence de fonctionnement complexe pour les plus hautes écluses et des écluses plus économiques et tout aussi performantes à aqueducs longitudinaux pour les 2 moins hautes. Le système expert de gestion hydraulique piloté depuis un Poste centralisé de commande permettra à l'exploitant une supervision de l'ensemble du fonctionnement hydraulique du canal en lien direct avec la téléconduite des écluses et la surveillance des ouvrages.

ABSTRACT

"The 107-kilometer-long Seine-North Europe Canal is a crucial link in the Seine-Scheldt waterway connection, which will connect the French network to 20,000 km of European waterways. Its construction includes 5 new high locks ranging from 13 to 25.7 meters in fall height. The requirements set for these extraordinary structures present multiple challenges for the designer: locks with low water consumption using water saving basins, very fast, very safe for navigators and for the security against flooding of the hydraulic structures, and very reliable despite the numerous moving parts, all while operating within a finely tuned overall hydraulic system.

The engineering consortium ONE (Egis as the lead firm, SBE, ISL, INGEROP) is responsible for the design of these locks and their operating systems. A hybrid study methodology, systematically using 3D numerical models complemented by targeted use of physical models, has led to a design that meets all these requirements with perforated sill locks and a complex operating sequence for the tallest locks, as well as more economical but equally efficient locks with longitudinal aqueducts for the two shorter ones. The expert hydraulic management system, controlled from a centralized command post, will allow the operator to supervise the entire hydraulic operation of the canal, directly linked to the remote control of the locks and the monitoring of the structures.

1. INTRODUCTION

Le Canal Seine-Nord Europe, grand projet d'aménagement du territoire, va relier Compiègne, dans l'Oise, à Aubencheul-au-Bac, dans le Nord, d'ici 2030. Ce canal à grand gabarit de 107 kilomètres de long et de 54 mètres de large est un maillon essentiel de la liaison fluviale Seine-Escaut (figure 1), qui connectera le réseau français aux 20 000 km de voies européennes. Il permettra ainsi le développement du fluvial, solution écologique de transport de marchandises, et facteur de compétitivité des productions et d'attractivité des territoires. Ce grand chantier est un investissement de plus de 5 milliards d'euros financé par l'Union européenne, la France et les Collectivités territoriales qui pilotent la Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE), établissement public qui en assure la maîtrise d'ouvrage.



Figure 1 : Tracé du futur Canal Seine-Nord Europe [www.hautsdefrance.fr]

Le Canal Seine Nord Europe comprend 7 biefs délimités par 6 écluses et une écluse de jonction avec le canal du Nord. Le bief de partage est alimenté par un bassin réservoir (bassin de Louette) dont le volume de 14.000.000 m³ est reconstitué par pompage. Les six écluses sur le nouveau canal avec leur hauteur de chute sont les suivantes (figure 2) : écluse de Montmacq (hauteur de chute 6.41m), écluse de Noyon (hauteur de chute 21.07m), écluse de Catigny (hauteur de chute 14.00m), écluse d'Allaines (hauteur de chute 13.10m), écluse de Marquion (hauteur de chute 25.71m) et l'écluse d'Oisy-le-Verger (hauteur de chute 25.00m). La hauteur de chute de l'écluse de jonction au Canal du Nord existant est de 11.27m.

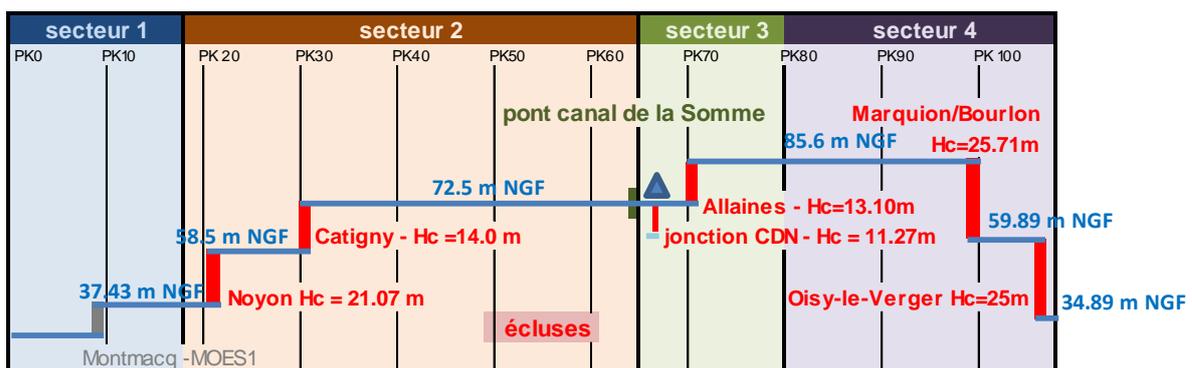


Figure 2 – Schéma du profil longitudinal du Canal Seine Nord-Europe

L'article qui suit décrit les solutions de conception hydraulique des écluses apportées par le groupement d'ingénierie ONE composé d'Egis Mandataire, SBE, ISL et Ingerop cotraitants, AEI architecte et MDP paysagiste mandaté par la SCSNE pour la maîtrise d'œuvre des écluses et systèmes du Canal Seine-Nord Europe.

2. LES DEFIS DE LA CONCEPTION DES ECLUSES

Les 5 écluses de haute chute au gabarit européen de navigation Vb constituent de grands ouvrages de génie civil. Leurs dimensions, leur nombre, leur rôle dans le fonctionnement du canal en tant que système de transport en font des ouvrages exceptionnels. La SCSNE maître d'ouvrage du Canal Seine-Nord Europe et VNF son futur exploitant ont requis un niveau de performance élevé sur l'ensemble des fonctions, des structures, des équipements et de leurs organes.

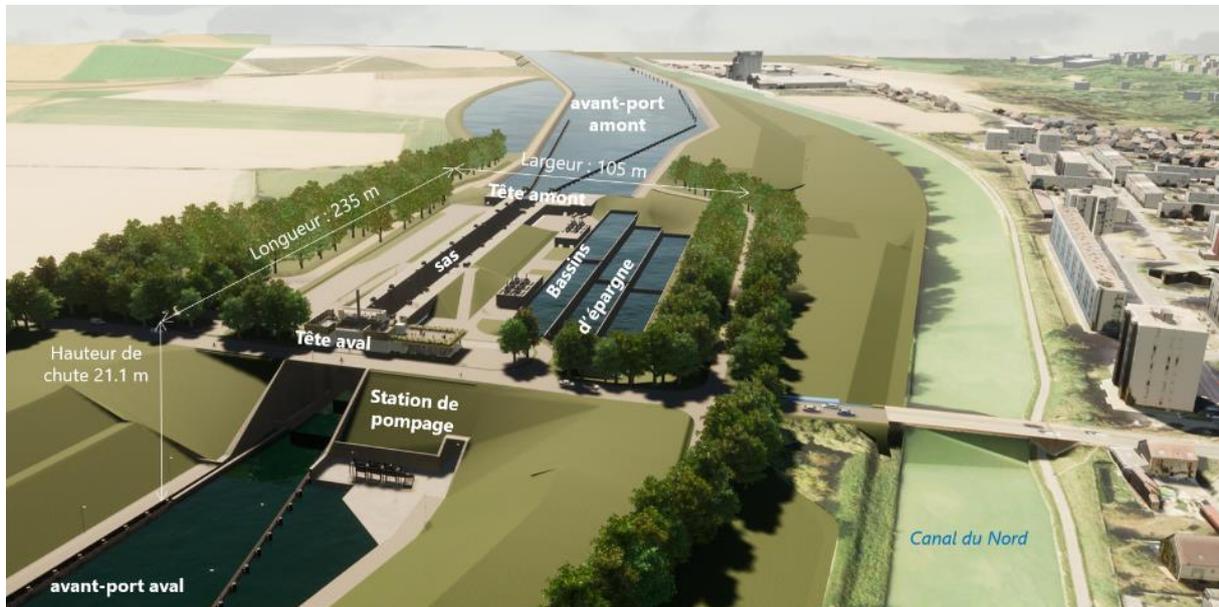


Figure 3 : Vue générale d'une écluse- maquette BIM – groupement ONE

2.1 Un très haut niveau de performance de transport exigé

Le temps de trajet pour parcourir les 107 km du canal est un enjeu clé pour disposer d'un système de transport performant et compétitif. Le canal disposera dans ses premières années de vie d'une seule file d'écluse empruntée dans les 2 sens. Il est ainsi crucial d'aller vite pour franchir l'écluse aussi bien pour une embarcation montante qu'avalante.

Le temps de passage doit se limiter à 30 minutes maximum. Ces 30 minutes incluent les temps pour entrer dans l'écluse, s'amarrer, fermer la porte, puis ouvrir la porte, se désamarrer et sortir du sas.

Ces manœuvres consomment plus de la moitié du temps disponible. Aussi, il reste **10 à 13 minutes pour opérer la translation hydraulique dans le sas**. Dans le cas de l'écluse de Marquion, il s'agit de déplacer 70 000 m³ d'eau en environ 13 minutes c'est-à-dire remplir ou vider une piscine olympique toutes les 30 à 40 secondes.

Ces mouvements d'eau doivent être maîtrisés de façon à ne pas générer d'efforts inconsidérés dans les amarres. Lors de la sassage, les pentes d'eau dans le sas doivent ainsi être limitées à 0.7 pour mille en long et 0.35 pour mille en travers pour assurer sécurité et confort des navigants.

2.2 Une conception participant à la gestion économe de la ressource en eau

En dehors de son extrémité sud dans la vallée de l'Oise, les biefs du canal sont déconnectés de tout grand fleuve ou rivière. Les bassins versants au niveau des territoires traversés et notamment le long du bief de partage sont peu étendus et la ressource mobilisable est très inférieure aux besoins du canal. L'eau pour le remplissage et le maintien en eau du canal est puisée au pied sud de l'escalier d'eau dans la rivière Oise.

Dans ce contexte, plusieurs mesures sont inscrites au programme de l'opération :

- Une forte limitation des pertes par infiltration est requise avec une étanchéité de haute performance (équivalent à 40 cm d'épaisseur de matériaux $K = 10^{-8}$ m/s) sur l'ensemble du plafond et des berges.
- Des écluses à bassins d'épargne ont été retenues dès les études préliminaires de CSNE. Ce concept a déjà été employé sur les canaux à grand gabarit allemands ou encore les écluses de Panama et il demeure complexe. Il présuppose la succession de phases de remplissage ou vidange de différents compartiments parfaitement enchainées.
- Deux bassins d'épargne pour les 2 écluses les moins hautes et jusqu'à 5 bassins d'épargne pour l'écluse d'Oisy le Verger situés le long du sas permettent une réduction de la consommation en eau de 50 % à 66%. Les transferts hydrauliques s'appuient alors sur de multiples jeux de vannes de sassement : amont/sas, sas/bassins d'épargne et sas /aval. Des stations de pompage permettent de remonter l'eau « consommée » à chaque cycle de sassage et l'eau nécessaire à la compensation des pertes par infiltration ou évaporation depuis la rivière Oise.
- Enfin, le réservoir de Louette de 14 millions de m³ d'eau constitue une ressource d'appoint en cas d'étiage de l'Oise. La réserve est reconstituée après chaque utilisation en prélevant l'eau dans l'Oise et en la remontant via les stations de pompage des écluses.

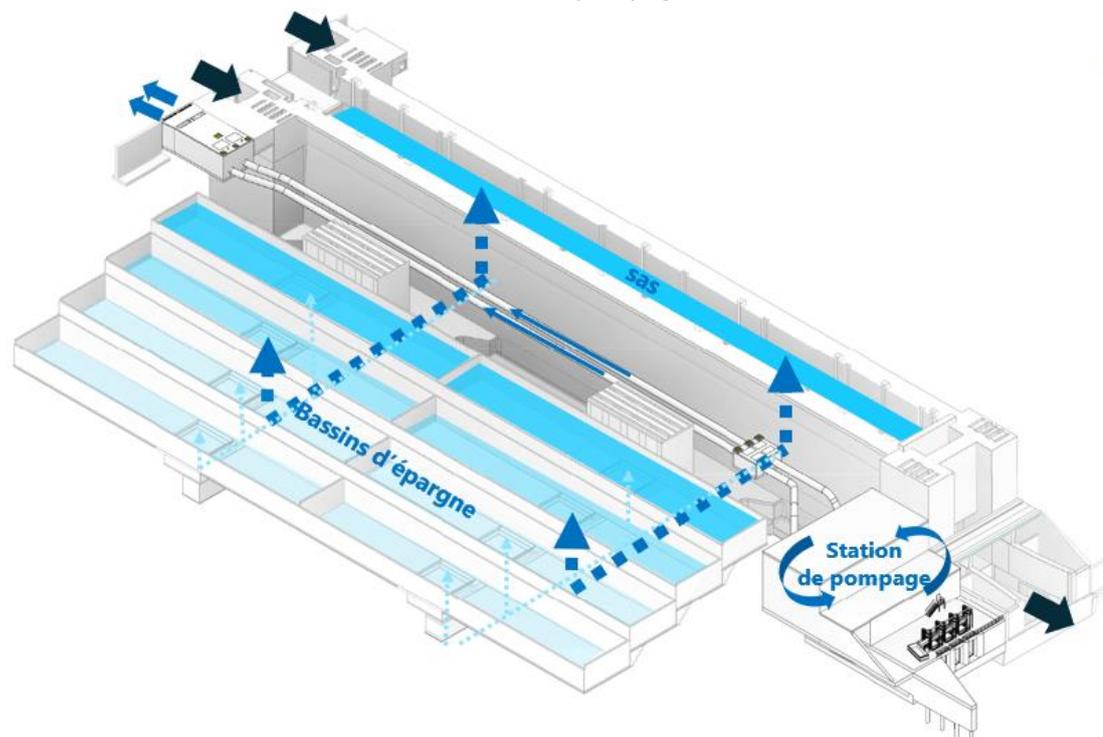


Figure 4 : fonctionnement hydraulique – écluse et pompage – illustration ONE

2.3 Une gestion courante fine des niveaux d'eau compatible avec la gestion singulière des crues et étiages

Les biefs du canal sont déconnectés de tout grand fleuve ou rivière. Le niveau d'eau demeure constant. La navigation se fait dans une plage de variation réduite entre le niveau normal de navigation NNN et NNN+ 20 cm. Ce marnage limité doit permettre de tamponner les flux hydrauliques liés aux éclusées qui peuvent intervenir 24h sur 24 et au pompage opéré 20 heures sur 24 maximum et de préférence aux heures où l'énergie est la moins onéreuse.

Seuls de petits bassins versant sont intersectés par le canal. Pour autant, le bief de partage reçoit leurs crues exceptionnelles. La gestion hydraulique doit considérer ces flux.

Également en cas de crue de la rivière Oise, les stations de pompage doivent permettre de remonter et stocker l'eau tout au long du canal pour contribuer à la compensation volumétrique exigée par la réglementation.

Enfin le canal n'est pas un système fermé mais il est connecté au canal du Nord et au canal latéral à l'Aisne qui génèrent également des entrées ou sorties d'eau.

2.4 Un niveau maximal de disponibilité et fiabilité exigé

Le fonctionnement hydraulique économe complexe ne doit pas pour autant restreindre la disponibilité et la fiabilité des ouvrages. La disponibilité exigée pour chaque écluse est de 99.9% soit moins de 9 h d'arrêt par an. Cette exigence très élevée se traduit naturellement par des redondances dans les équipements.

2.5 Les écluses sont des parties de barrages de classe A ou B

Un découpage administratif du CSNE a été opéré au titre de l'article R. 214-112 du code de l'Environnement : le CSNE se décompose ainsi en 14 barrages.

Chaque écluse de haute chute fait partie d'un barrage de classe A ou B et constitue un ouvrage de ce barrage. Les équipements et circuits hydrauliques des 5 écluses participent à la gestion des crues de ces 5 barrages et à la sécurité hydraulique. En plus des portes et vannes de sassement, les écluses sont munies de by pass capables d'évacuer vers l'Oise (au pied sud du canal) ou la Sensée (au pied Nord) les flux hydrauliques en jeu. De fausses bassinées peuvent également être opérées en cas de situation l'exigeant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques.

2.6 La maîtrise des coûts d'investissement et de fonctionnement du canal

Enfin, la conception doit répondre à de hautes exigences en matière d'optimisation des coûts d'investissement et de fonctionnement : personnel d'exploitation, coût de la maintenance, maîtrise de la facture énergétique notamment.



Figure 5 : Maquette BIM -ONE: Vue sur la « tulipe » d'un bassin d'épargne et son toit et émergences des organes de manœuvre.

3. LA CONCEPTION HYDRAULIQUE RETENUE

La conception hydraulique – circuits, organes de vantellerie, système et son contrôle commande- doit répondre à l'ensemble des défis listés au chapitre précédent.

La conception technique des organes de vantellerie fait l'objet d'une publication spécifique centrée sur le sujet des innovations sur la porte amont. Le chapitre qui suit présente, outre la complexité du système, les apports des études hydrauliques conduites pour l'optimisation des formes et la définition des loi d'ouverture/fermeture des vannes

Pour remplir le sas, les bassins d'épargne sont vidangés en commençant par le bassin inférieur jusqu'au bassin supérieur. Chaque bassin est muni de 2 orifices : « tulipes » d'entonnement. Chacun de ces orifices rejoint un aqueduc horizontal carré de 4 mètres d'ouverture. Une chambre de vannes rassemble l'ensemble de ces aqueducs. Ces aqueducs se rejoignent pour connecter ensuite la chambre située sous le radier perforé.

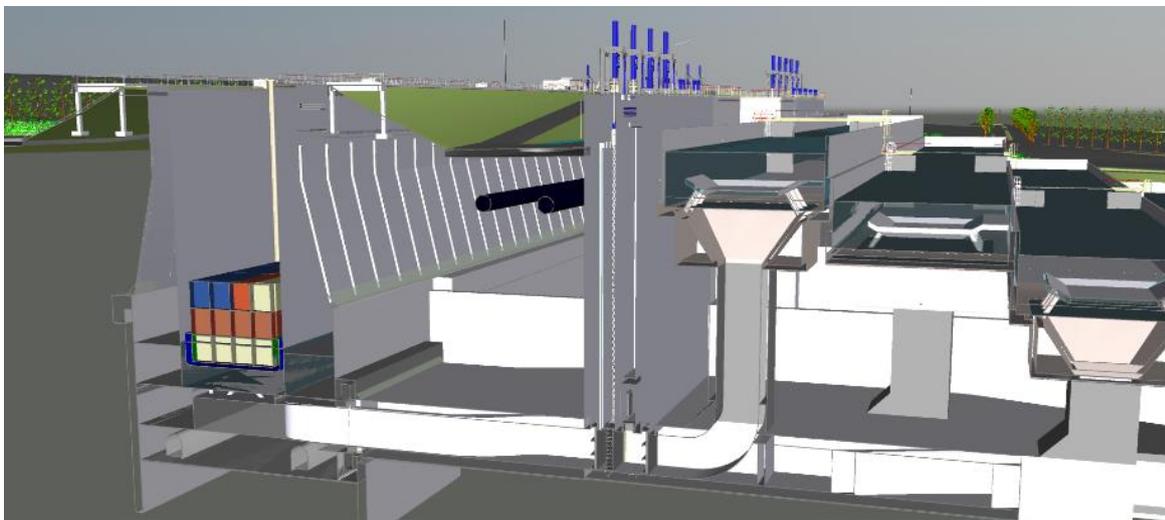


Figure 6 : aperçu des circuits hydrauliques et vannes.

Le jeu d'ouverture/fermeture des vannes permet ainsi de séquencer le remplissage depuis le bon bassin. Une fois le bassin supérieur vidangé, les vannes des aqueducs de contournement des têtes sont actionnées et la tranche supérieure du sas est remplie par l'eau du bief amont.

Lors de la vidange du sas, les premières tranches d'eau du sas sont envoyées vers les bassins d'épargne et des aqueducs de contournement de la tête aval permettent la vidange de la tranche basse du sas.

Ces séquences complexes doivent s'opérer dans le temps maximum imparti tout en maîtrisant donc l'agitation dans le sas.

Des modélisations numériques 3D systématiques de l'ensemble circuits +sas additionné à l'apport de 3 maquettes physiques établies par le laboratoire de la direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie d'une part et le Flanders Hydraulic Research d'autre part, ont permis :

- la vérification de ces conditions en évaluant notamment les pentes transversales
- l'optimisation des formes géométriques de ces organes complexes
- La définition de loi d'ouverture complexe les plus ajustées pour tenir le double objectif temps court/agitation maîtrisée.

Par exemple, la modélisation 3D et un modèle réduit spécifique à l'échelle 1/13^e ont permis une analyse des turbulences au niveau des tulipes de connexion des bassins d'épargne. Ces études ont amené à ajouter et concevoir un toit pour prévenir la formation de vortex et donc l'entraînement d'air dans les circuits de remplissage et vers les organes de manœuvres en orientant le flux d'eau instantané de près de 100 m³/s. Dans l'autre sens de fonctionnement hydraulique, lors du remplissage du bassin, ce toit présente l'avantage de limiter les phénomènes d'intumescences.



Figure 7 : aperçu du toit pour limiter l'entraînement d'air sur le bassin d'épargne

Les études hydrauliques ont conduit à définir des lois de manœuvre complexes et non linéaires. Un gain de temps est opéré via un léger chevauchement d'ouverture des vannes relatives à 2 niveaux de bassin.

De plus, l'approche hybride utilisée lors de cette phase d'étude a mis en évidence la très bonne convergence des modèles numériques et des maquettes réduites. Le recalage mineur permet ainsi de disposer avec les modèles 1D d'un outil prédictif fiable des lois de manœuvre, susceptible d'être utilisé lors de la mise en service sur l'ouvrage construit, pour converger rapidement sur des lois optimisées permettant de concilier au mieux durées et agitations.

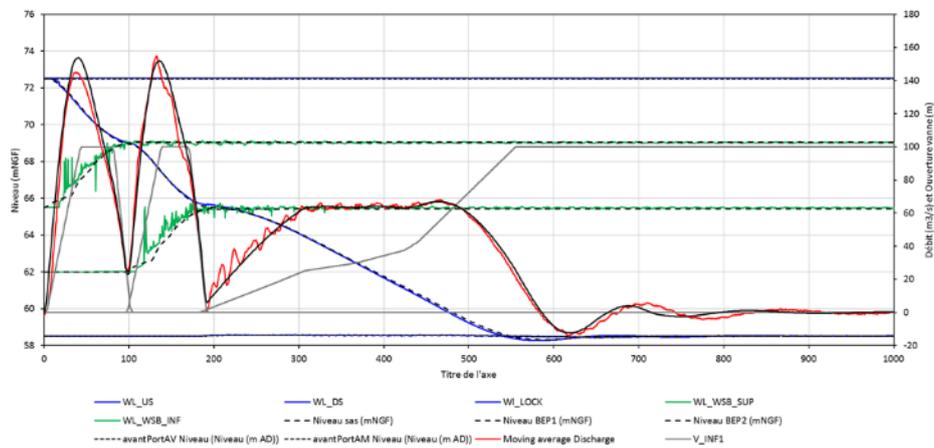


Figure 8 : Exemple de superposition des lois prédictives et des résultats sur maquette



Figure 9 : Maquette au 1/25 de l'écluse d'Oisy – laboratoire du Service Public de Wallonie

La démarche complète d'étude a ainsi abouti à une conception sur mesure pour chaque écluse avec la vérification des performances décrites au chapitre 2 et une solution de meilleur équilibre en termes de coûts.

4. LE SYSTEME EXPERT DE GESTION HYDRAULIQUE

4.1 Les systèmes sur le CSNE : téléconduite des écluses, surveillance, gestion hydraulique

Les écluses de CSNE vont s'inscrire à leur mise en service dans la téléconduite des écluses à l'échelle régionale en cours de déploiement par VNF futur exploitant de CSNE et des canaux auxquels CSNE se rattache.

La téléconduite sera opérée depuis 2 centres : un centre principal à Waziers, un centre miroir à Valenciennes. Les postes opérateurs disposeront de l'ensemble des interfaces nécessaires à la manœuvre des écluses ainsi qu'à la communication avec les usagers. Les opérateurs du PCC sont placés sous la responsabilité d'un chef opérateur. Pour toutes les écluses, la conduite sur site reste toujours possible.

A cette téléconduite s'ajoutent des fonctions de surveillance et auscultation des ouvrages et une gestion centralisée du fonctionnement hydraulique global du canal.

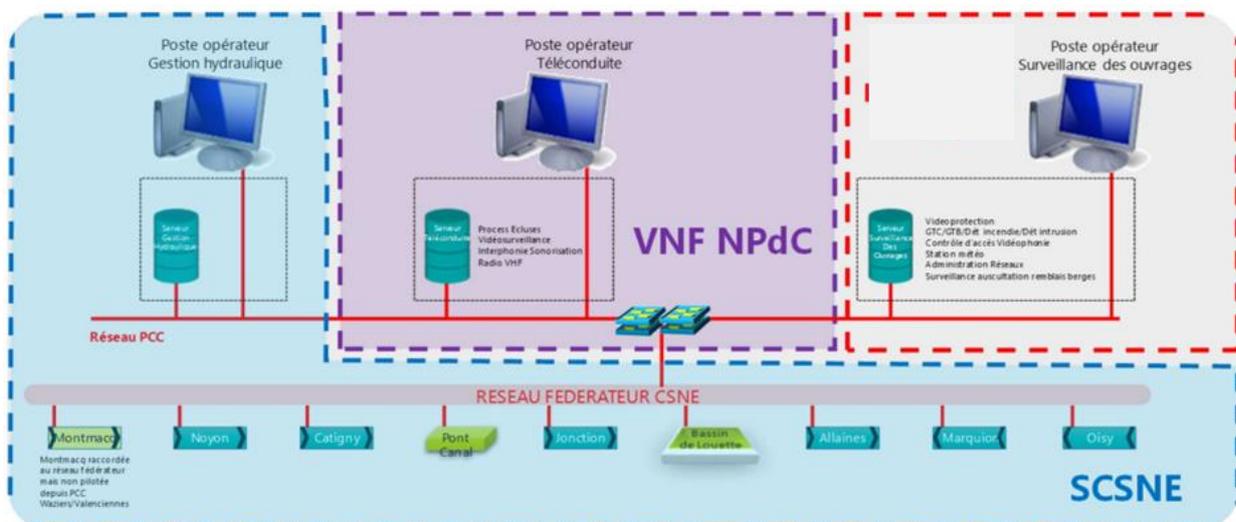


Figure 10 – illustration de l'architecture des systèmes du CSNE et ses écluses

4.2 Le système de gestion hydraulique

Les infrastructures conçues permettent une gestion à distance et en global des niveaux d'eau et des flux répondant aux enjeux pré cités au chapitre 2.

Le principe du système de gestion hydraulique consiste à gérer le niveau des biefs, en mode automatique en appliquant des consignes aux équipements concernés :

- Les stations de pompage des écluses et du réservoir de Louette
- Les by-pass des écluses
- La gestion des niveaux des biefs sera donc pilotée pour maintenir le niveau autour de NNN + 10 cm, le niveau fluctuant au rythme des sasses et des volumes pompés depuis l'amont vers l'aval d'une écluse.

Les commandes des pompes et des vannes seront opérées par le système central en mode nominal via des automates sur chaque site. Les automates in-situ collecteront les alarmes liées à des dysfonctionnements et géreront la rotation des pompes alors que les stations sont équipées de 4 pompes, dont 3 en fonctionnement nominal et une en « secours ».

En mode nominal, le système fonctionne en automatisme complet et prend en charge la régulation des niveaux permettant la navigation suivant les différents scénarios.

L'opérateur aura en charge de déclencher les scénarios particuliers liés à des modifications du mode nominal ou à la gestion de crise, notamment :

- Etiage de l'Oise
- Crue de l'Oise
- Autres scénarios de crue...

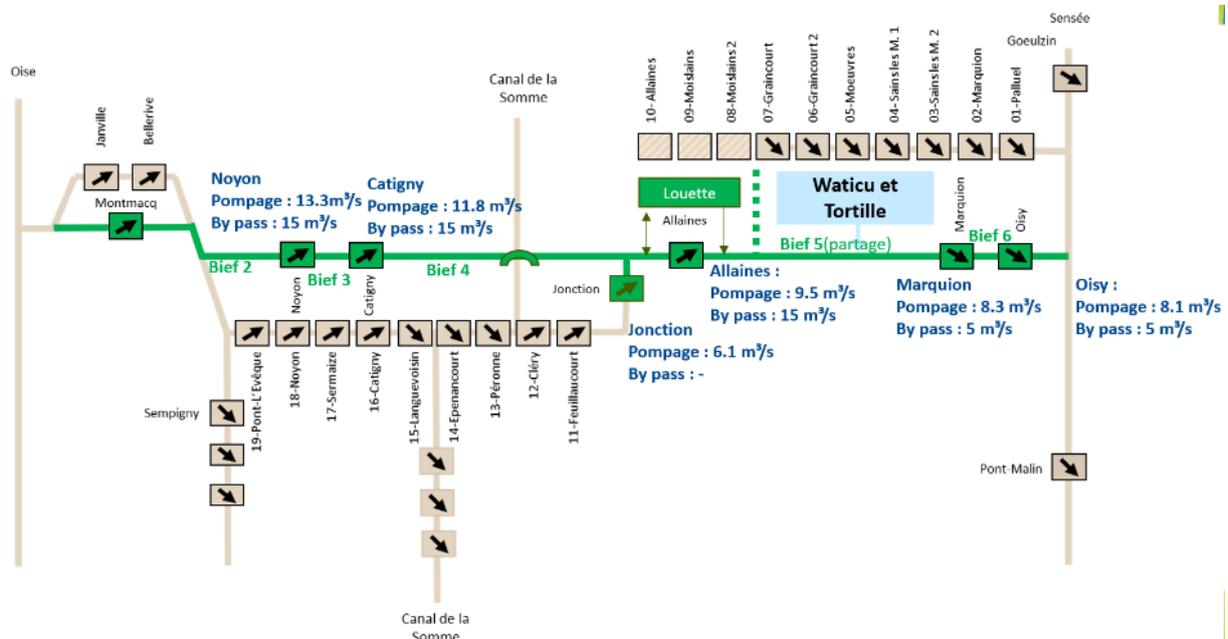


Figure 11 - Illustration les écluses au sein du fonctionnement hydraulique global

Le système de gestion hydraulique sera par ailleurs interfacé avec :

- le système de téléconduite des écluses afin d'identifier les bassinées en cours et donc les volumes d'eau relâchés ou prélevés dans les biefs,
- le système de gestion de trafic afin de pouvoir effectuer des calculs prévisionnels et proposer à l'opérateur gestion hydraulique des actions correctives ou anticipatives,
- le pilote des stations météo permettant de récupérer les données afférentes (pluviométrie, température, vent),
- le système de surveillance des ouvrages pour connaître les alarmes de dysfonctionnement sur les sites et lui communiquer les alarmes spécifiques aux organes de gestion hydraulique.

Dans son mode nominal automatique, le système fonctionne au travers de lois d'asservissement et donc sur un principe réactif ; dans ce contexte, il est concentré sur une priorité unique de gestion optimale des niveaux des biefs.

Au-delà de ce mode purement automatique, des scénarios prédictifs devront être proposés par le système à l'opérateur permettant notamment :

- d'anticiper des situations critiques de niveaux non compensables (par exemple dans les périodes d'arrêt d'alimentation des pompes : 2x2 h sur une période 24h) en indiquant la nécessité d'effectuer des bassinées à vide sur les sites concernés ;
- d'anticiper les situations critiques dues à des phénomènes météorologiques sur la base des mesures des stations météo et de données météo plus larges (phénomènes de tempêtes, d'inondation, de prévision de canicule...);
- de programmer de façon optimale les opérations de maintenance courte durée.

5. CONCLUSION

Les études conduites ont permis d'arrêter une conception des écluses répondant aux exigences hors norme assignées aux ouvrages et leurs défis associés. Les écluses ainsi définies fonctionnent avec des temps de sassage de 10 à 13 minutes tout en vérifiant les critères de limitation de l'agitation dans le sas. Les solutions techniques les plus adaptées à chaque hauteur de chute sont optimisées en terme de consommation de matière (béton, métal,...) de coût d'investissement et de fonctionnement. Les lois de manœuvre complexes sont définies et constituent une solution de référence pour le futur exploitant afin de piloter son canal. Les systèmes permettent la gestion hydraulique globale singulière du canal commandée depuis un poste centralisé de commande. La construction de ces écluses est programmée à partir de 2025 pour une mise en service en 2030.



Figure 12 - Vue générale d'une écluse

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les équipes de SCSNE, son AMO et son Conseil Scientifique et Technique, les laboratoires d'hydraulique FHR et SPW, ainsi que l'ensemble des équipes d'ingénierie de ONE chez Egis, SBE, ISL, INGEROP