

4/6/08

CANAL SEINE NORD EUROPE - CONCEPTION HYDRAULIQUE DES ECLUSES

Auteurs :

GRAILLE Philippe, responsable du pôle Ouvrages Génie Civil
Souterrains et Portuaires, ARCADIS, 18 rue Troyon - 92310 SEVRES ☎
01.46.23.77.77 FAX 01.46.01.35.80,

✉ : pgraille@arcadis-fr.com

Olivier CAZAILLET, Directeur de Projets - Division Bassins Versants et
Développement Rural, SOGREAH, 6 rue de Lorraine - 38130 Echirolles /
BP172 - 38042 Grenoble Cedex 9, ☎ 04.76.33.43.57 - fax: 33 (0)4 76 33
43 36,
✉ olivier.cazaillet@sogreah.fr

MAILLET Jean-Noël, ingénieur ouvrages hydrauliques, EDF-CIH 37 rue
Diderot BP 176 - 38042 GRENOBLE CEDEX 9, ☎ 04.76.20.92.76,

✉ jean-noel.mallet@edf.fr

RIGO Philippe, Ingénieur Civil, ANAST ULG, 1 Chemin des chevreuils,
Bât. B52/3 - B4000 LIEGE, ☎ 32 4 366 96 29,
FAX 32 4 366 91 33 ✉ ph.rigo@ulg.ac.be

1. Généralités sur le fonctionnement hydraulique de l'écluse

Le canal Seine Nord Europe fonctionnera par recyclage des éclusées. Ces recyclages sont prévus sur toutes les écluses : l'écluse de la vallée de l'Oise et les six écluses entre Noyon et le canal Dunkerque-Escaut.

Pour limiter les débits et donc les coûts de pompage aux écluses, celles-ci sont munies de « bassins d'épargne ». Ces bassins, situés sur les côtés du sas de l'écluse (en structures intégrées aux bajoyers ou en structures séparées) ont pour intérêt de récupérer une partie du volume d'eau d'une éclusée d'un bateau avalant (c'est-à-dire descendant du bief amont vers le bief aval) et de le restituer à l'éclusée suivante du bateau montant (du bief aval vers le bief amont).

Pour une conception donnée avec un nombre N_{BE} de bassin d'éparges, la hauteur de chute est subdivisée en $N_{BE}+2$ tranches d'eau (une tranche d'eau a donc la surface du sas et une hauteur égale à la hauteur de chute divisé par $N_{BE}+2$). Dans le cas où un bateau avalant se présente à l'écluse par le bief amont, le sas est rempli d'eau, les portes amont s'ouvrent et le bateau entre dans le sas. Après la fermeture des portes amont, les N_{BE} premières tranches d'eau vont se vider gravitairement dans les bassins d'épargne les unes après les autres. Puis les deux tranches d'eau restantes se videront dans le

bief aval. Les portes aval pourront s'ouvrir et le bateau sortira. Le schéma ci-dessous montre le fonctionnement théorique de l'écluse pour une vidange du sas.

INSERER FIGURE N° 1 - PRINCIPE DE VIDANGE DU SAS POUR UN BATEAU AVALANT

2. Les objectifs et les contraintes du projet

Les objectifs de sécurité, de fiabilité et de capacité du canal Seine Nord Europe imposent un certain nombre de contraintes pour le fonctionnement des écluses :

• Durée de sasement :

- La conception du système hydraulique doit garantir une durée de remplissage et de vidange inférieure ou égale à 15 minutes pour une écluse de 30 mètres. Pour les autres écluses, une durée de remplissage ou de vidange inférieure à 15 min sera recherchée. Compte tenu des durées d'entrée-sortie des bateaux, des durées de manœuvre des portes et des durées de vidange/remplissage du sas fixées à 15 min, la durée complète du cycle d'éclusée est de 1 heure.

• Tranquillité du sas :

- L'alimentation en eau du sas est prévue en principe par le radier, sauf à démontrer sur modèle physique la faisabilité technique et l'intérêt économique d'une alimentation par larrons longitudinaux débouchant dans les bajoyers.
- Le nombre de bassins d'épargne à adopter doit être déterminé pour limiter la hauteur de chute d'une vidange (ou d'un remplissage) sas/bassin d'épargne à 10 mètres.

• Pérennité des ouvrages hydrauliques :

- Afin de limiter les phénomènes d'érosion et les surpression/dépression en régimes transitoires, la vitesse de l'eau dans les conduites ne devra pas dépasser 4 m/s dans la mesure du possible, mais pourra atteindre si nécessaire 6 m/s en régime de pointe.

• Exigences en terme de navigabilité dans les biefs adjacents :

- L'amplitude de l'onde provoquée par le sasement dans le bief adjacent ne doit pas dépasser 30 cm (crête d'onde positive inférieure à +30 cm, creux d'onde négative inférieure à -30 cm). Au-delà de cette valeur, compte tenu des caractéristiques géométriques définies par ailleurs pour le canal, des problèmes de talonnage ou des risques de collision pourraient apparaître lors du passage sous les ponts.

- Le débit de prise d'eau et de rejet d'eau des écluses ne doit pas induire un courant d'eau longitudinal moyen supérieur à 0,35 m/s dans les biefs amont et aval de l'écluse. En considérant une section mouillée normale minimale de 200 m², le débit maximal admissible est égal à 70 m³/s.
- De manière à garantir la stabilité des bateaux amarrés au droit des postes d'attente, la pente maximale du front de l'onde est 1/1000.

3. Le recyclage des éclusées

Le tableau ci-dessous présente les débits de recyclage calculés compte tenu des bassins d'épargne envisagés au présent stade du projet. Les écluses sont numérotées du Sud vers le Nord de 0 (écluse dans la vallée de l'Oise) à 6 (dernière écluse avant le bief de la Sensée, canal Dunkerque-Escaut).

INSERER TABLEAU N° 1 – Débit de recyclage des éclusées

On remarque que le débit maximal, en recyclage continu du volume éclusé, atteint 6,3 m³/s.

Le recyclage est réalisé au moyen de stations de pompage directement accolées à chacune des écluses. Pour ces stations de pompage, trois modes de fonctionnements ont été comparés sur une base économique qui intégrait les investissements, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien associés à chacun de ces modes.

- Un recyclage en continu sur 24 h ;
- Un recyclage sur 20 h pour économiser des pompages en heures de pointe : ce mode est très proche du précédent, les variations de niveau étant absorbées par marnage dans les biefs lors des arrêts de pompage
- Un recyclage sur 8h de nuit seulement pour bénéficier du tarif électrique de nuit

4. L'architecture de base du système hydraulique

4.1. Nombre de bassins d'épargne

Deux critères principaux ont prévalu quant au choix du nombre de bassins d'épargne dont les écluses devaient être équipées :

- La nécessité de limiter à 10 m la hauteur de chute maximale entre chacun des bassins et le sas (critère de tranquillité du sas) ;
- La recherche d'un optimum économique entre le coût immédiat de construction d'un bassin d'épargne supplémentaire et les pertes d'efficacité du système d'écluse tout au long de l'exploitation de l'écluse (pertes d'efficacité qui se traduisent par des coûts électriques plus importants de fonctionnement des pompes de recyclage). Un bassin d'épargne supplémentaire représente un surcoût d'investissement, mais économise de l'énergie.

Le tableau suivant présente les nombres de bassins d'épargne qui résultent de l'optimisation effectuée pour chacune des écluses du canal Seine Nord Europe.

INSERER TABLEAU N° 2 - NOMBRE DE BASSINS D'EPARGNE

Le nombre de bassins d'épargne ainsi optimisé reste le paramètre de base utilisé ensuite pour le dimensionnement des écluses.

4.2 Rapport entre la surface du sas et la surface des bassins (m)

L'efficacité des bassins d'épargne est fonction du nombre de bassins et du rapport de l'aire des bassins d'épargne à l'aire du sas.

A nombre de bassins d'épargne équivalents, une surface de bassin plus grande favorise le taux d'épargne mais augmente les coûts de construction.

INSERER FIGURE N°2 - EFFICACITE DES BASSINS D'EPARGNE

Pour le canal Seine-Nord Europe, la surface des bassins d'épargne a été choisie égale à la surface du sas (m=1). Ce choix se fait en accord avec l'expérience Allemande et semble un bon compromis entre le coût de construction et l'efficacité.

Les dimensions en plan choisies pour les bassins d'épargne sont donc de 184,40 m pour la longueur et 14,60 m pour la largeur. Le calage de la hauteur d'eau utile dans le sas correspond ainsi exactement à celui des tranches d'eau du sas.

Il est à noter que la valeur du rapport m influe légèrement sur la durée de sassement. Par exemple, une augmentation de m de 1 à 1,5 apporterait un gain d'environ 3 s pour chaque bassin.

4.3 Nombre et section des aqueducs

Le rejet ou la prise d'eau dans le bief se font par le biais de deux aqueducs. Dans chaque aqueduc, la vitesse moyenne maximale admissible est de 4 m/s. Pour un débit maximal dans le bief de 70 m³/s, la section des aqueducs doit donc être de l'ordre de 9 m². Soit une section carrée de 3 m de large et 3 m de hauteur.

La standardisation des équipements a été recherchée notamment pour optimiser la maintenance. Ainsi, les aqueducs transversaux ont la même section que les aqueducs de contournement des têtes. Etant donné que le débit entre les aqueducs et le sas doit être beaucoup plus élevé que 70 m³/s pour respecter l'objectif de 15 minutes de durée de vidange ou de remplissage, et que la vitesse dans les aqueducs est la même, le nombre d'aqueducs entre le sas et chacun des différents bassins d'épargne est de quatre.

La possibilité de majoration des sections des conduits pour optimiser la durée de sassement est limitée non seulement par les coûts de génie civil mais aussi par les inconvénients de vannes de trop grandes dimensions.

4.4 Règles de conception favorisant les écoulements

Les pertes de charge dans un système hydraulique se répartissent en deux catégories : les pertes de charge linéaires et les pertes de charge singulières. Les écluses envisagées sont relativement courtes (moins de 250 m) par rapport à la section des aqueducs de plusieurs m². Les pertes de charge linéaires ne sont donc pas prépondérantes. Par contre les pertes de charge singulières peuvent être importantes étant donné la complexité du système et ont donc été évaluées spécifiquement pour chacun des différents composants hydrauliques qui constituent le système d'écluse (coudes, convergent, divergent, vannes, prises d'eau, larrons, arrivée dans une grande chambre... etc.) Par exemple, les règles suivantes ont été prises en compte pour la conception : l'emplacement de l'arrivée d'eau doit être, de préférence, en dehors de la voie de navigation et la vitesse maximale dans une prise d'eau ne doit pas dépasser 2 m/s, l'écoulement en amont de l'ouverture doit être symétrique de préférence, les vannes doivent être calées au niveau le plus bas pour éviter les problèmes de cavitation.

4.5 Les différents éléments constitutifs du circuit hydraulique entre le sas et les

bassins d'épargne

Les tranches d'eau non épargnées sont échangées avec les biefs amont et aval par des aqueducs de contournement des têtes de l'écluse (2 aqueducs par tête).

4.5.1 Chambre de répartition longitudinale et larrons

La chambre de répartition se décompose en plusieurs éléments. Il y a une zone d'échanges avec le sas, une zone d'échanges avec les bassins d'épargne et deux zones d'échanges avec les têtes aval et amont. Cette chambre a pour but principal de répartir de façon homogène les écoulements arrivant ou repartant vers les têtes ou les aqueducs. La partie centrale est la partie où il y a communication avec les bassins d'épargne : c'est là où il y a les débits les plus importants. Il a donc été nécessaire d'aménager une chambre de dissipation pour assurer une répartition satisfaisante des vitesses avant que l'écoulement n'arrive dans la zone avec les larrons verticaux.

Le radier sous la chambre de dissipation est abaissé de 1 m pour créer un volume suffisant dans la chambre de dissipation. La chambre de dissipation a donc une hauteur de 4 m (3 m pour la chambre longitudinale). Pour réduire la vitesse aux exutoires des aqueducs transversaux, la hauteur des aqueducs augmente de 3 à 4 m sur les derniers mètres. Ceci diminue la vitesse d'écoulement de 33 % au niveau des exutoires et contribue à tranquilliser l'écoulement dans la chambre longitudinale

Larrons : on dénomme « larrons » les orifices du plancher perforé. Ils sont répartis sur deux zones de 50 m de long chacune, de part et d'autre d'une zone centrale non perforée de ce plancher, de 50 m de longueur, qui délimite la chambre de dissipation. A chaque extrémité du sas, 25 m de longueur de plancher sont dépourvus de perforation pour tranquilliser les écoulements en provenance ou en direction des aqueducs de contournement des têtes.

Le débit au travers des larrons est de 144 m³/s et 216 m³/s en pointe. La surface des larrons est égale à 1/60^{ème} de la surface du sas, d'où des vitesses dans les larrons de l'ordre de 3,5 à 5 m/s.

La dimension des larrons doit être suffisamment petite pour permettre un mélange des jets d'eau avec l'eau du sas. Il faut environ 10 diamètres pour qu'un jet se mélange avec l'eau environnante. Avec un mouillage de 5,00 m dans l'écluse et des bateaux de 3,00 m de tirant d'eau maximal, la distance entre le fond du bateau et le radier du sas est d'environ 2 m. En appliquant le facteur 10 précédent, la dimension des larrons ne doit pas être supérieure à 0,2 m.

Les larrons sont espacés d'un entraxe de 0,2 m * $\sqrt{(60 * 50\%)} = 1,10$ m ; Leur répartition s'effectue ainsi sur 50 % de la surface du sas en deux sections de 50 m de long de 528 larrons chacune : 11 larrons par lignes et 48 larrons par colonnes, ce qui fait un total de 1 056 larrons. Pour minimiser les pertes de charge, les angles des larrons sont arrondis.

4.5.2 Chambre des vannes

Le voile au milieu de la chambre des vannes guide l'écoulement et divise la chambre des vannes en deux parties symétriques. La liaison avec les aqueducs transversaux est conçue de sorte que l'eau s'écoule facilement, avec la plus faible résistance hydraulique, de la partie centrale vers les aqueducs transversaux. Dans les deux parties centrales, un minimum de 18 m² a été maintenu sur toute la longueur, alors que les zones d'ombres ont été minimisées. Les règles générales habituelles ont été utilisées pour minimiser les pertes hydrauliques.

5. Modélisations du fonctionnement hydraulique de l'écluse

Un sassement est une opération complexe dans laquelle de nombreux paramètres interviennent. La mise en œuvre d'une simulation numérique a permis de vérifier la faisabilité du système et de l'optimiser. Une modélisation physique a ensuite permis de vérifier les résultats des calculs numériques, et de trouver des voies d'amélioration pour la suite des études. Le modèle physique doit permettre, en couplage avec l'étude numérique, d'explorer les possibilités d'optimisation du fonctionnement (qui ont fait l'objet d'essais complémentaires).

5.1 Modélisation numérique

5.1.1 Présentation du logiciel

Le logiciel utilisé est InfoWorks de Wallingford qui modélise de manière unidimensionnelle les écoulements dans le système d'alimentation en eau. Le logiciel calcule les niveaux d'eau et débits en utilisant une méthode dérivée des équations pour les ondes en eau peu profonde, équations de Saint-Venant en régime transitoire. Un processus itératif est utilisé pour prendre en compte la non linéarité.

5.1.2 Construction et paramétrage du modèle numérique

La modélisation concerne tous les éléments constitutifs du système d'alimentation en eau qui influent sur le dimensionnement du système hydraulique, à savoir :

- Inertie du volume d'eau dans les conduits : Le volume d'eau dans les aqueducs doit être accéléré et décéléré pendant le sassement. Des aqueducs plus longs contiennent de plus grands volumes d'eau, ce qui entraîne un système de plus forte inertie et donc plus lent. Il convient donc de réduire autant que possible la longueur des aqueducs pour obtenir une durée de sassement plus courte et minimiser les pics de surpression et dépression régnant en régime transitoire au niveau des vannes lors de leur manœuvre d'ouverture ou de fermeture.

- Pertes de charge dans le système : Elles viennent essentiellement des zones d'ombres, des zones de turbulences et de plus fortes résistances hydrauliques.

Une des parties les plus importantes du système d'alimentation en eau sont les bassins d'épargne et la chambre des vannes qui distribue les échanges d'eau entre ces bassins et le sas. La conception de cette chambre, avec deux lignes de vannes perpendiculaires à l'axe du canal, est apparue comme la plus efficace d'un point de vue hydraulique.

INSERER FIGURE N° 3 - ELEMENTS DU SYSTEME HYDRAULIQUE (ECLUSES 1 A 6).

La figure ci-dessus décompose le système d'alimentation en eau par élément :

- Prise d'eau dans le bief amont (1) ;
- Prise d'eau et rejet dans les bassins d'épargne (2) ;
- Puits et vannes de la chambre des vannes (3) ;
- Chambre de dissipation dans la chambre de répartition longitudinale (4) ;
- Larrons (5) ;
- Bassin de dissipation dans la tête aval (6).
- Bassin de dissipation dans la tête amont (spécifique à l'écluse 0 qui est dépourvue de double chambre sous le radier).

Chacun des éléments ci-dessus a été entré dans le modèle numérique suivant le schéma de modélisation présenté en figure suivante.

INSERER TABLEAU N° 3 - SCHEMA DE MODELISATION

A chaque élément du modèle ont été associés : les dimensions de l'élément hydraulique modélisé, les pertes de charges régulières (prises en compte avec un coefficient de Colebrook de 0,15 mm correspondant à un béton coffré), les pertes de charge singulières rentrées explicitement aux points des singularités.

Les variations des niveaux d'eau dans les biefs adjacents ont été supposées négligeables.

La modélisation numérique mise en place définit les séquences de fonctionnement suivantes et leurs critères :

Le bassin 1 est ouvert à un instant donné, pris comme origine des temps. A l'ouverture des vannes, la vitesse d'ouverture augmente progressivement. Le débit augmente jusqu'à environ 200 m³/s puis diminue. Quand le débit vers le bassin 1 est en dessous de 135 m³/s et que la différence entre le niveau d'eau du sas et celui du bassin est de moins d'un mètre, la vanne est fermée. Quand le débit est en

dessous de 80 m³/s et que le niveau d'eau est entre deux niveaux donnés, la vanne du bassin suivant est ouverte, et ainsi de suite. La vitesse de fermeture des vannes du dernier réservoir se fait avec une vitesse réduite pour éviter l'agitation dans le sas. La vanne de décharge dans le bief aval limite le débit de décharge à 70 m³/s. La vitesse maximale de cette vanne est de 0,04 m/s et sa mise en mouvement se fait avec une accélération de la vitesse d'ouverture très modérée au début. La vanne est ouverte jusqu'à ce que le débit atteigne 70 m³/s. Son ouverture est ensuite contrôlée afin de maintenir ce débit. Cette dernière phase représentée à elle seule presque la moitié de la durée du demi-cycle de vidange ou de remplissage du sas. La contrainte de débit de 70 m³/s limite donc considérablement les possibilités de réduction de la durée de vidange ou de remplissage du sas en deçà de la valeur objectif de 15min.

5.1.3 Validation du modèle numérique

La validation du modèle s'est faite à partir des données de référence tirées des résultats de sassement de l'écluse d'Eckersmühlen sur la liaison Rhin-Main-Danube en Allemagne (Mosonyi et Bakowies - 1989). Il s'agit d'une écluse à grand gabarit à 3 bassins d'épargne avec une hauteur de chute de 24,67 m.

Les résultats des simulations effectuées en vidange et en remplissage (niveaux d'eau, débits et durées de sassement) ont été comparés aux résultats de la publication qui ont été reproduits fidèlement par le modèle.

Il y a une erreur dans le schéma de modélisation. Les bassins suivants ont des gabarits différents. Les bassins suivants ont des gabarits différents. Les bassins suivants ont des gabarits différents.

5.1.4 Résultats de la modélisation numérique

La modélisation a permis dans un premier temps de mettre au point les lois d'ouverture et de fermeture des vannes. Ces lois doivent permettre :

- D'éviter un phénomène de résonance dans le sas : l'ouverture des vannes doit être très lente. Avec une vitesse initiale de 0,015 m/s (10% de la vitesse maximale d'ouverture), l'inclinaison du niveau d'eau dans le sas reste inférieure à 1/1000 ;
- D'optimiser la durée de sassemment : l'inertie de l'eau dans les aqueducs transversaux entraîne un niveau d'eau dans le bassin d'épargne d'un mètre plus haut que dans le sas au moment où le débit est nul. Fermer les vannes au moment où l'équilibre est atteint prendrait trop de temps pour réaliser un remplissage ou une vidange en 15 minutes. Les vannes doivent être fermées au moment où les niveaux dans le bassin et dans le sas sont égaux ;
- De réduire significativement la pente dans le sas par une vitesse de fermeture de 0,1 m/s pour les vannes du dernier bassin (soit 30 secondes pour fermer les vannes) ;
- D'empêcher une onde à longue période dans le sas, générée par la fermeture des vannes dans les aqueducs de contournement des têtes. Garder les vannes ouvertes jusqu'à ce que les portes de l'écluse soient largement ouvertes a un effet atténuateur sur les ondes dans le sas ;
- Une accélération du processus de sassemment par une ouverture anticipée des vannes du bassin suivant par rapport à la fermeture des vannes du bassin précédent.

Les principaux résultats de la modélisation sont présentés ci-dessous, avec dans l'ordre, la durée de sassemment, les pressions induites au droit des vannes et enfin, l'agitation dans le sas.

Durée de sassemment

Le cycle de remplissage ou de vidange du sas est achevé lorsque les portes de l'écluse peuvent être ouvertes. Nous présentons ci-dessous un résultat type commenté.

INSERER FIGURE N° 4 – NIVEAU D'EAU ET DUREE DE SASSEMENT

La durée de sassemment, pour chacune des sept écluses, est présentée dans le tableau suivant.

INSERER TABLEAU N° 4 – DUREE DE REMPLISSAGE OU DE VIDANGE DU SAS

Du tableau ci-dessus, on vérifie bien que la durée de vidange ou remplissage du sas pour toutes les écluses, même pour celle avec une chute de 30 m, est inférieure à la valeur d'objectif de 15 minutes. Le

remplissage des sas est légèrement plus rapide que la vidange. La vitesse d'écluse dans le sas, pour les phases d'échange avec les bassins d'épargne, est de l'ordre de 2 m/min

Le système d'alimentation ainsi conçu et dimensionné permet donc d'atteindre l'objectif de performance, avec une certaine marge pour tenir compte des imprécisions liées à la modélisation numérique.

Surpressions au droit des vannes

La fermeture d'une vanne génère au niveau de la vanne une surpression due à l'inertie de la masse d'eau en mouvement qui est stoppée brutalement. Les calculs de la simulation donnent et la surpression au droit des vannes. La figure ci-dessous en est un exemple commenté.

INSERER FIGURE N° 5 - CHARGE HYDRAULIQUE ET SURPRESSION AU DROIT DE LA VANNE

Les courbes de variation de pression et de débit en fonction du temps montrent que la différence de pression au droit des vannes en opération normale décroît de 9m de CE à 0 pendant l'ouverture des vannes, et que la fermeture des vannes engendre un pic compris entre 2 et 2,5 m de CE.

On notera l'influence de l'ouverture anticipée des vannes supérieures qui tend à minimiser le pic de surpression. Ainsi, la pression dimensionnante pour les vannes reste la pression hydrostatique. Ceci confirme l'intérêt de vitesses d'écoulement relativement faibles dans les aqueducs.

Agitation dans le sas

L'agitation dans le sas se traduit par une inclinaison entre deux points du sas. Les trois types d'inclinaison suivants ont été examinés en particulier lors des simulations numériques :

- L'inclinaison entre les deux extrémités du sas (ce qui correspond à la longueur du bateau de projet – 185 m) ;
- L'inclinaison entre l'extrémité aval et la partie centrale du sas (ce qui correspond à la longueur d'un convoi de type canal du Nord par exemple ou deux fois la longueur d'une péniche de type Freycinet) ;
- L'inclinaison entre l'extrémité amont et la partie centrale du sas.

Un exemple de graphe d'agitation correspondant à la vidange du sas est commenté ci-dessous.

INSERER FIGURE N° 6 - AGITATION DANS LE SAS

Pour le bateau de projet de 185 m de longueur, l'inclinaison est représentée par la ligne noire (inclinaison sur la longueur totale du sas). Pour des bateaux de 90 m – 100 m de longueur, on a l'inclinaison partielle dans la partie droite en rouge ou la partie gauche en bleu.

Les lignes bleues et rouges du graphique montrent que l'inclinaison est toujours en dessous de la valeur objectif de 1 pour 1000. Le maximum de la ligne noire est de l'ordre de 0,5 pour mille seulement, ce qui traduirait la tendance à engendrer une plus grande agitation pour les petits bateaux (et donc des valeurs d'efforts plus élevés dans les amarres) tout en restant dans les limites prescrites pour ces derniers également.

D'une manière générale, les différentes simulations effectuées montrent que l'agitation dans le sas présente une forte sensibilité aux lois d'ouverture des vannes.

5.1.5 Etude de sensibilité

La robustesse du système d'alimentation en eau du sas conditionne le bon fonctionnement hydraulique de l'écluse. Il convient donc d'évaluer l'incidence de la variation des paramètres qui ont une influence majeure et irréversible sur l'alimentation du sas. A ce titre, il a été réalisé une étude de sensibilité du système d'alimentation en eau du sas par rapport au calage des deux paramètres hydrauliques principaux que sont les pertes de charge et la longueur des aqueducs.

Sensibilité aux pertes de charge

Les calculs effectués montrent qu'une augmentation des coefficients de pertes de charge de 20 % engendre une majoration de moins de 1% seulement de la durée de vidange ou de remplissage du sas (de 15 min). En considérant une augmentation de 100 % des pertes de charge du circuit hydraulique d'alimentation du sas, on obtient une augmentation de la durée de vidange ou de remplissage du sas de l'ordre de 30 s (4% de la durée de vidange ou remplissage du sas).

L'influence que peuvent avoir les pertes de charge dans le système d'alimentation du sas sur la durée totale d'un demi-cycle de franchissement d'un bateau vers l'aval ou vers l'amont (30 min) est deux fois plus faible en valeur relative, et reste donc limitée.

Sensibilité à la longueur des aqueducs

La masse d'eau à mettre en mouvement, à accélérer et ensuite à freiner est proportionnelle à la longueur des aqueducs. L'inertie de cette masse d'eau, et notamment celle correspondant aux aqueducs transversaux, influe sur la durée de sasement.

Le sasement pour l'écluse de plus grande hauteur de chute (écluse de Moislains ou écluse n°3, de 30 m de hauteur de chute) a été simulé avec une longueur doublée des aqueducs (156 m au lieu de 78 m), mais en gardant identiques les séquences de manœuvre des vannes. La durée de sasement s'en trouve majorée de 28 s et 29 s pour la vidange et le remplissage du sas respectivement.

5.2 L'étude sur modèle réduit physique à l'échelle du 1/25

5.2.1 Objectif et description du modèle physique

Un modèle réduit physique à l'échelle 1/25^{ème} a été construit dans le laboratoire de Sogreah à proximité de Grenoble afin d'étudier les principaux aspects du fonctionnement de l'écluse de Moislains d'une hauteur de chute de 30 m, à savoir :

- La durée totale de remplissage et de vidange
- L'évolution du niveau d'eau et de la pente longitudinale du plan d'eau dans le sas lors du remplissage et de la vidange
- Les modalités de remplissage et de vidange des bassins d'épargne
- L'onde d'écluse dans le bief aval
- Les efforts sur les amarres de bateaux durant les manœuvres de remplissage et de vidange, pour différents types de bateaux : bateaux de 110 m de longueur et 3 m de tirant d'eau, bateaux de 85 m de longueur et 2,5 m de tirant d'eau, bateaux de 10 m de longueur (bateau de plaisance).

Le modèle représente l'ensemble des composants du système hydraulique de remplissage et vidange du sas, à savoir :

- les deux prises des conduits d'alimentation amont, et les deux pertuis de vidange,
- les deux conduits de contournement des têtes amont avec les deux vannes plates levantes d'alimentation, les deux conduits de contournement des têtes aval avec les deux vannes plates levantes de vidange,
- les 5 bassins d'épargne avec pour chacun leurs quatre liaisons vers la chambre de distribution vers le sas et les vannages associés (vannes plates levantes), soit un total de 20 conduits de section carrée de 3 m par 3 m avec vannes de 3 m par 3 m, ainsi que les sorties des puits des batardeaux dans les bassins d'épargne,
- la chambre de distribution des débits d'échange entre le sas et les bassins d'épargne,
- la chambre d'alimentation du sas avec son radier perforé,
- le système d'amarrage par bollards flottants avec mesure d'efforts en continu sur les lignes d'amarrage,
- le système d'ouverture à vitesse réglable des vannages d'alimentation.

Le modèle fonctionne en similitude de Froude avec une échelle des temps et des vitesses 1/5 et une échelle des débits 1/3125. *(λ^{3/2})*

Les mesures de niveau sont effectuées en continu à une fréquence élevée en 6 points dans le sas et dans les biefs amont et aval ainsi que dans un bassin d'épargne. Les mesures d'efforts dans les amarres des bateaux étudiés sont effectuées simultanément sur les deux amarres d'un bateau.

INSERER FIGURE N° 7 - Vue générale du modèle

INSERER FIGURE N° 8 - Vannes d'aqueduc sous les bassins d'épargne

INSERER FIGURE N° 9 - Pertuis de vidange et vanne d'aqueduc de contournement de la tête aval

5.2.2 Résultats obtenus en fonctionnement normal

Le sas peut effectivement être rempli et vidé en moins de 15 min (13,75 min précisément) selon la loi définie lors de l'étude hydraulique numérique.

La pente longitudinale dans le sas reste inférieure ou égale à 1‰ durant le remplissage et la vidange du sas. Sur une demi longueur de sas, cette pente atteint ponctuellement des valeurs de l'ordre de 0,8‰ au remplissage et 3‰ à la vidange.

Une onde d'amplitude maximale 1,15 m est observée dans les bassins d'épargne au remplissage. Cette onde s'amortit lentement dans le bassin. Sa période est de l'ordre de 26 s.

Malgré le carénage proposé des angles des puits des batardeaux, nécessaire, un vortex de courte durée est quelquefois observé en fin de vidange des bassins d'épargne (la présence dans les bassins de ces puits prévus pour les batardeaux des vannes d'aqueducs, et non représentés lors des premiers essais, a réduit fortement l'apparition et le développement de ce phénomène de vortex.) Ce vortex est potentiellement susceptible d'entraîner de l'air dans la chambre de distribution dans le cas du bassin le plus bas. Le design des bassins et des prises d'eau dans les bassins devra donc être affiné dans la suite des études afin d'éliminer complètement le risque d'entraînement d'air.

L'onde d'éclusee aval reste inférieure à 0,27 m.

Les efforts maximaux sur les amarres des bateaux chargés de façon à obtenir leur enfoncement maximal sont indiqués dans le tableau suivant pour le bateau de 110 m. Il n'a pas été observé de variation significative des efforts dans les amarres lorsque deux bateaux sont simultanément dans l'écluse, quelle que soit la taille et la position amont ou aval.

INSERER TABLEAU N° 5 – Efforts maximums sur les amarres

5.2.3 Résultats obtenus en fonctionnement dégradé

Deux fonctionnements dégradés ont été étudiés à durée totale de vidange ou remplissage du sas identique :

- non fonctionnement du bassin d'épargne du niveau inférieur lors du remplissage ou de la vidange du sas (arrêt pour maintenance, non ouverture des vannes par exemple), ce qui

double la charge à la vidange de chaque bassin d'épargne et en phase finale de remplissage par les têtes amont ;

- ouverture d'une seule des deux vannes des têtes aval lors de la vidange du sas.

Ces essais dégradés ne font pas apparaître de modification des pentes longitudinales observées par rapport au fonctionnement normal.

Lorsque le bassin d'épargne le plus bas n'est pas en service, l'onde d'éclusee aval atteint 0,35 m. Il n'y a pas d'aggravation de l'onde d'éclusee lorsqu'une seule vanne aval fonctionne.

Les efforts maximaux sur les amarres sont observés en fin de vidange du sas du fait d'une plus grande agitation alors (bassin hors service ou une vanne aval condamnée), mais pour autant les valeurs maximales de l'état de fonctionnement normal ne sont pas dépassées.

Les fonctionnements dégradés étudiés n'aggravent donc pas les conditions dans le sas. Seule l'onde de vidange du sas en cas de bassin d'épargne mis hors service est augmentée du fait d'un débit de pointe plus important. Cette dégradation pour les conditions de navigation dans le bief, ou pour la sécurité des bateaux stationnés dans les avant-ports, peut être évitée par un allongement de la durée de fin de vidange par les vannes aval.

6. Recommandations pour la suite des études

Au vu des résultats obtenus sur le modèle physique, il apparaît nécessaire :

- ⇒ de relever légèrement les murs des bassins d'épargne et/ou de tester des dispositifs amortisseurs complémentaires car la revanche de 1 m prévue initialement est insuffisante. Il convient aussi d'apprécier l'impact de la fréquence de l'onde observée lors du remplissage d'un bassin sur sa structure

- ⇒ d'apprécier les conséquences de formation de vortex selon les types de vannages retenus et d'assurer une limitation de ces vortex au moins sur le (les) bassins le (les) plus bas.

Toute modification de la conception du circuit hydraulique de l'écluse devra faire l'objet de vérifications sur modèles numérique et physique.

Avec le concept hydraulique étudié, il existe un potentiel assez important d'optimisation des durées de sasement, qui par ailleurs a été exploré avec les bureaux d'études Arcadis et Sogreah.

Une réduction des durées de sasement permettrait, pour des ouvrages de hauteur identiques d'améliorer la capacité d'écoulement du trafic du système, ou, à capacité d'écoulement du trafic identique (c'est-à-dire en restant dans la limite d'une durée maxima de vidange ou de remplissage du sas de 15 minutes), d'augmenter la hauteur de chute maximum des écluses et d'ouvrir ainsi des

possibilités d'optimiser les terrassements du canal en réduisant les déblais excédentaires par un relèvement altimétrique du bief de partage.

Les principales possibilités d'optimisation sont de deux ordres :

⇒ **L'optimisation des lois de manœuvre des vannes des bassins d'épargne :**

- Optimisation de la phase d'ouverture de la vanne en augmentant sa vitesse d'ouverture (tout en gardant la phase initiale relativement progressive nécessaire pour limiter l'agitation dans le sas);
- Optimisation de la phase de fermeture (fermeture légèrement plus tardive mais plus rapide);
- Majoration de la superposition partielle des phases de fermeture et d'ouverture.

⇒ **L'assouplissement du critère de débit maximal rejeté ou prélevé dans les biefs adjacents :**

La limitation du débit pour le rejet ou la prise d'eau dans les biefs constitue une contrainte très importante sur la durée de sasement. En effet, sur l'écluse de 30m de chute à 5 bassins d'épargne, cette limitation impose actuellement une durée d'environ la moitié de la durée totale de vidange ou de remplissage du sas pour vider ou remplir la fraction non épargnée du volume du sas qui ne représente pourtant que 2/7 seulement de ce volume. Une étude plus détaillée sur les effets de l'intumescence, de sa dissipation et sur l'impact des courants sur la navigabilité pourrait éventuellement permettre d'augmenter les débits de rejet ou de prise autorisés dans les biefs et donc de réduire significativement la durée de sasement.

Les calculs exploratoires réalisés montrent le gain potentiel pour une augmentation du débit de 72 m³/s à 108 m³/s (vitesse maximale en section courante des biefs passant de 0,35 /s à 0,55 m/s). Les durées de vidange de la dernière tranche d'eau du sas passeraient ainsi de 370 secondes à 310 s. Les vitesses maximales dans les aqueducs passeraient également de 4 m/s à 6 m/s. *(pas de problème car 10 biefs en 500m)*

Il serait envisageable de réduire encore plus voire de lever la contrainte de débit pour le remplissage ou la vidange des premières ou dernières tranches d'eau en créant des bassins supplémentaires qui contiendraient temporairement tout ou partie de ces volumes actuellement non épargnés (2/7ème du sas pour l'écluse de 30m de chute) et dont la mise en communication avec les biefs adjacents serait conçue de façon à démoduler le débit prélevé ou rejeté dans le canal (en étalant et réduisant le pic de débit).

7 Intumescences dans les biefs

7.1 Enjeux et objectifs

Durant les phases de remplissage ou de vidange du sas des écluses, des volumes d'eau importants sont prélevés ou rejetés respectivement dans le bief amont et aval. Pour les écluses à bassins d'épargne, ces volumes sont ceux des deux dernières tranches d'eau (voir § 1), équivalant en moyenne à un tiers du volume du sas, tandis que pour l'écluse n°0 sans bassin d'épargne, ces volumes correspondent à la totalité du volume du sas.

Ces volumes échangés avec les biefs adjacents perturbent la tranquillité du plan d'eau des biefs et entraînent de faibles courants et des variations de niveau. Ceci se matérialise sous la forme d'une onde d'intumescence qui se propage dans le canal ; l'onde est négative dans le cas d'un prélèvement d'eau dans le bief amont et positive dans le cas d'un rejet d'eau dans le bief aval de l'écluse (figure ci-dessous).

INSERER FIGURE N° 10 – onde d'intumescence dans les biefs aval et amont

Or des intumescences trop fortes pourraient provoquer le talonnage des bateaux sur le fond du canal ou des collisions lors du passage sous les ponts.

Ainsi, l'amplitude de l'onde provoquée par la sassée dans le bief adjacent ne doit pas dépasser 30 cm (crête d'onde positive inférieure à +30 cm, creux d'onde négative inférieure à -30 cm), en tenant compte des phénomènes de réflexion et de superposition des ondes. La pente du front de l'onde ne doit pas dépasser 1/1000. La configuration des zones d'approche doit réduire la réflexion des ondes afin de limiter les effets de superposition de ces ondes.

La propagation des ondes intumescences dans le canal a donc été étudiée, ainsi que les moyens envisageables pour les rendre compatibles avec la navigation, en évaluant et quantifiant les phénomènes d'amortissement. Ce phénomène d'onde d'intumescence, spécifique aux canaux artificiels avec écluses de forte hauteur de chute, ne connaissait pas de réel précédent sur le réseau fluvial français.

7.2 Evaluation de l'intumescence

Les caractéristiques géométriques des ondes d'intumescence dépendent des débits d'échange maximum des écluses, de la durée des sasements, et du profil du canal.

Sur les biefs entre les extrémités du canal Seine Nord Europe, les débits et la section du canal sont similaires (mis à part les resserrements des ponts-canaux et les élargissements des bassins de virement,

ports et garages à bateaux), de sorte que la vitesse et l'amplitude des ondes y sont très proches. Ces caractéristiques varient avec les volumes rejetés et prélevés, dans les fourchettes suivantes :

INSERER TABLEAU N° 6 - CARACTERISTIQUES PRINCIPALES MOYENNES DES INTUMESCENTES

Il apparaît donc que le débit de rejet ou de prélèvement maximal de 70 m³/s génère une intumescence qui respecte le critère d'amplitude fixé. Cependant, les phénomènes de réflexion associés au cumul de plusieurs ondes conduiraient à dépasser ce critère.

7.2.1 Réflexion et superposition des intumescences

Après avoir parcouru un bief sans amortissement notable par frottement, comme nous le verrons au paragraphe suivant, l'intumescence se réfléchit au voisinage de l'écluse située à l'extrémité du bief, que les portes d'écluses soient ouvertes ou non. Son amplitude double, à partir des têtes d'écluse, sur environ une moitié de longueur d'onde de l'intumescence. Pour la première réflexion d'une intumescence moyenne de 0,2 m, l'amplitude résultante est de l'ordre de 0,4 m et règne sur 1 000 à 2 000 m, ce qui représente deux ou trois longueurs d'avant-port.

Par ailleurs, plusieurs intumescences se propageront généralement en même temps dans un bief, du fait des sassements successifs ayant lieu au cours du temps où le canal est ouvert à la navigation. Lorsque les ondes générées se rencontrent, la hauteur de l'onde superposée qui en résulte peut être plus grande que celle des ondes qui la composent.

Les phénomènes de réflexions et de superpositions multiples conduisent ainsi, en l'absence d'amortissement suffisant le long du canal artificiel, à des hauteurs d'onde d'intumescence supérieures à la valeur prescrite de 0,30 m.

7.2.2 Amortissement naturel des intumescences

L'amortissement de l'intumescence qui se propageront le long du canal Seine Nord Europe sera faible. Cet amortissement intervient par frottement le long du fond et des berges, phénomène qui tend à « écraser » l'intumescence en augmentant sa longueur pour en diminuer progressivement sa hauteur, dont il résulte corrélativement une augmentation du niveau moyen du bief.

La figure 11 est issue d'une simulation de propagation pour un bief court (6,4 km) et d'une simulation pour le bief le plus long du canal Seine Nord Europe (40 km).

INSERER FIGURE N° 11 – Amortissement des intumescences

Cette figure met en évidence que les fluctuations du plan d'eau ne deviennent centimétriques qu'au bout d'une dizaine d'heures. Ainsi il n'est guère possible de compter sur le seul amortissement naturel

par frottement le long des berges du canal pour respecter le critère d'une intumescence inférieure à 0,30 m. Des dispositifs d'amortissement spécifiques sont donc absolument nécessaires.

7.3 Dispositifs de réduction de l'onde d'intumescence

7.3.1 Mesures d'exploitation évitant des superpositions d'ondes préjudiciables

Il s'agit dans ce cas de gérer les différents sassements en fonction de la présence ou non d'une intumescence au voisinage de l'écluse qui risquerait de se rajouter à celle créée par le sassement de cette écluse. Les contraintes d'exploitation qui en résultent sont évidemment susceptibles de réduire la capacité globale d'écoulement du trafic sur le canal. De plus, il faudrait qu'une onde d'intumescence isolée satisfasse déjà au critère d'amplitude fixé, ce qui n'est pas le cas ici après réflexion simple à l'extrémité du bief. De telles mesures d'exploitation ne peuvent donc être retenues pour le canal Seine Nord Europe.

7.3.2 Réduction des débits de rejet et de prélèvement dans les biefs

Cette mesure vise à limiter l'amplitude des ondes d'intumescences à leur origine en réduisant les débits rejetés dans le bief aval ou prélevés dans le bief amont.

Les réductions des débits échangés avec les biefs adjacents peuvent s'envisager :

- par augmentation de la durée de vidange ou de prélèvement d'eau dans le bief adjacent à l'écluse,
- par conservation temporaire d'un certain volume d'eau du sas

Augmentation de la durée de vidange ou de prélèvement dans le bief adjacent à l'écluse

Dans ce cas, il s'agit d'augmenter la durée de la dernière phase de sassement consistant à rejeter (respectivement prélever) les deux dernières « tranches d'eau » du sas dans le bief aval (respectivement dans le bief amont).

Le tableau suivant présente, sur la base des durées de sassement établies, la réduction maximale des débits de rejet encore compatible avec une durée de 15 min pour le remplissage ou la vidange d'un sas, valeur objectif pour des raisons de capacité d'écoulement du trafic et de durée de transit sur le canal Sein Nord Europe. Dans ce cas, toutes les écluses auraient une durée de demi-cycle de sassement identique de 30 min. Le débit maximal est traduit en terme de hauteur d'intumescence générée.

INSERER TABLEAU N° 7 - REDUCTION DES HAUTEURS D'INTUMESCEANCE AVEC DUREE DE REMPLISSAGE OU DE VIDANGE DU SAS DE 15 MIN

La réduction de débit admissible est bien sûr la plus faible pour l'écluse n°3 de plus forte hauteur de chute (de 70 à 58 m³/s), et la plus élevée pour l'écluse n°0 de plus faible chute (de 70 à 20 m³/s) qui offre naturellement une plus grande marge de manœuvre.

Ainsi, en exploitant au maximum cette possibilité d'uniformisation à 15 min des durées de vidange ou de remplissage du sas pour toutes les écluses, les hauteurs d'intumescence resteraient encore supérieures à une dizaine de centimètres, excepté pour l'écluse n°0. Ces valeurs restent encore trop élevées pour pouvoir envisager un amortissement naturel sans dépasser le critère des 30 cm après réflexions multiples et superposition avec d'autres ondes d'intumescence.

De plus, si toutes les écluses sont calées sur une durée de vidange ou remplissage du sas minima de 15 min, cela ne laisse guère de marge de manœuvre pour l'exploitation. (la capacité théorique d'écoulement du trafic sur le canal Seine Nord Europe est établie sur la base d'un cycle complet d'éclusage par heure).

La possibilité d'augmenter sensiblement les durées de sassemment pour limiter l'amplitude des ondes d'intumescence ne permet donc pas de résoudre seule la problématique des intumescences (ne serait-ce que pour l'écluse n°3 de plus forte chute), mais elle reste une possibilité intéressante à conserver comme mesure d'ajustement en complément d'autres dispositifs d'atténuation.

Rétention temporaire d'une partie du volume d'eau échangé entre le sas et les biefs

Les échanges d'eau avec les biefs adjacents concernent les deux dernières « tranches d'eau » du sas. Le principe consisterait à diminuer les débits d'échange avec les biefs adjacents pour la seule dernière tranche et à augmenter ceux de l'avant-dernière tranche non pas dans les biefs mais dans des bassins tampons additionnels. Tout en maintenant la durée de sassemment à sa valeur initiale optimale, les débits de rejet (ou de prélèvement) dans les biefs seraient alors suffisamment faibles pour que l'amortissement naturel permette de tenir l'objectif de 30 cm d'amplitude maxima sans autre disposition particulière.

On aurait alors le scénario suivant pour une vidange de sas lors du sassemment d'un bateau avalant (le cas d'un remplissage est analogue, mais il utilise le bassin tampon supérieur) :

- vidanges gravitaires successives des tranches supérieures du sas dans les bassins d'épargne avec des débits de pointe de l'ordre de 200 m³/s ;
- vidange, également gravitaire, de l'avant-dernière tranche du sas dans le bassin tampon inférieur avec des débits de pointe également de l'ordre de 200 m³/s ;
- rejet gravitaire de la dernière tranche de sas dans le bief aval avec le débit le plus faible compatible avec la durée de sassemment admissible ;

- une fois passée l'intumescence positive liée au dernier rejet, avant son retour après réflexion et avant le sassemment suivant intervenant au mieux une heure après, la vidange gravitaire du bassin tampon inférieur s'effectue dans le bief aval, de manière différée et à petit débit.

Ainsi, les deux bassins tampons additionnels doivent être capables de recevoir du sas, ou de rejeter dans celui-ci, les plus importants débits possibles. Ces débits peuvent être de l'ordre de 200 m³/s et correspondent à ceux échangés avec les bassins d'épargne. Dans ce cas, les aqueducs de liaison doivent être identiques à ceux mis en place pour les bassins d'épargne. Il apparaît alors judicieux d'envisager ces deux bassins tampons sous la forme de bassins d'épargne supplémentaires de géométrie identique et eux aussi reliés directement à la chambre des vannes.

Le bassin tampon supérieur serait calé au niveau de la « tranche » d'eau supérieure du sas et le bassin inférieur au niveau de la tranche d'eau inférieure du sas.

Un tel système suppose des structures de génie civil complémentaires : deux bassins d'épargne additionnels, soit pas moins de 7 bassins au total pour l'écluse de plus grande hauteur de chute, un allongement de la chambre des vannes pour accueillir les 2 x 4 puits de chute et vannes supplémentaires, deux conduites reliant le bassin tampon inférieur au bief aval et le bassin tampon supérieur au bief amont, toutes deux équipées d'une vanne. Ces installations additionnelles représentent un surcoût de construction assez élevé, et nécessitent l'exploitation et la maintenances d'ouvrages encore plus complexes.

Pour autant, l'utilisation de deux bassins tampons supplémentaires, afin de démoduler les débits échangés entre l'écluse et les deux biefs adjacents, apparaît comme une solution insuffisante à elle seule pour garantir un non dépassement du critère et d'autant moins intéressante que son coût est élevé.

Mais l'efficacité de cette solution pourrait être rendue totale en ajoutant deux autres bassins tampons, ou en agrandissant ceux déjà envisagés, afin de pouvoir stocker la dernière tranche de volume du sas encore non démodulée. Les bassins tampons ainsi créés ou agrandis auraient alors un fonctionnement mixte :

- ⇒ fonctionnement gravitaire pour les échanges d'eau avec le sas,
- ⇒ fonctionnement par pompage pour les échanges d'eau avec le canal.

La démodulation du débit de vidange ou de remplissage du sas concernerait alors la totalité du volume du sas non épargné ; les seules contraintes sur la durée de vidange ou de remplissage du sas seraient celles inhérentes au fonctionnement du système fermé « bassins d'épargne - aqueducs - chambre des vannes et vannages - chambre d'alimentation du sas - sas », c'est-à-dire : les vitesses d'écoulement et les pressions (en valeurs moyennes et en valeur de pic), la tranquillité dans le sas. L'onde d'intumescence dans les biefs pourrait être totalement maîtrisée en contrôlant le débit de pompage avec

lequel les bassins tampons seraient remplis à partir du canal, ou vidés dans celui-ci. Toutefois, cette solution serait encore plus coûteuse et complexe à réaliser, à exploiter et à maintenir. Notamment, le fonctionnement des pompes de recyclage deviendrait critique pour assurer le fonctionnement normal de l'écluse, ce qui n'est pas le cas de la solution classique avec bassins d'épargne totalement gravitaires qui tolère une durée d'arrêt des pompes de plusieurs heures dans le cas du canal Seine Nord Europe, voire beaucoup plus en utilisant les volumes d'eau stockés dans les bassins réservoirs. Avec une solution de démodulation de la totalité du volume du sas non épargné, les taux d'indisponibilité des pompes et de leur alimentation électrique conditionneraient directement la fiabilité du système de sassement.

7.3.3 Atténuation de l'onde d'intumescence dans des bassins d'amortissement

Cette solution consiste à amortir les ondes d'intumescence une fois qu'elles se sont développées dans le canal. Il s'agit d'aménager des bassins d'amortissement le long des biefs, qui permettent :

- de prélever une partie du volume d'une intumescence positive lors de son passage, pour la restituer ensuite au canal une fois cette dernière passée,
- d'alimenter une partie du volume d'eau déficitaire d'une intumescence négative lors de son passage, pour récupérer ensuite ce volume une fois l'intumescence passée.

Les échanges d'eau entre ces bassins d'amortissement et les biefs s'effectuent de manière uniquement gravitaire, sans aucun élément mobile de contrôle, au moyen d'un simple ajutage en fond de bief. La section réduite de ce dernier permet, par la perte de charge créée, de conférer au système l'inertie hydraulique nécessaire pour pouvoir différer les échanges d'eau dans le temps.

Les endroits les plus efficaces pour l'implantation de ces bassins d'amortissement sont les extrémités des biefs, où l'amplitude de l'intumescence est la plus importante (l'amplitude est doublée sur une distance d'environ 1 100 m à partir des têtes des écluses).

Par ailleurs, pour être efficaces, ces bassins d'amortissement doivent avoir une capacité de stockage suffisante entre le niveau courant de l'eau et le niveau maximum autorisé. Une première approche consiste à envisager une capacité de stockage correspondant à environ 20% du volume de l'intumescence (soit 20% du volume des deux dernières tranches d'eau du sassement, égal à 22 500 m³ en moyenne) pour une variation de niveau d'eau de 0,30 m, ceci aux deux extrémités du bief, au voisinage des écluses. De tels bassins d'amortissement auraient une surface moyenne de 1,5 ha.

On aurait ainsi la séquence schématique suivante donnée à titre d'illustration :

- L'onde initiale de 0,22 m s'amortit au départ de 10% pour former une onde de 0,19 m dans le bief (l'efficacité de l'amortissement de départ est deux fois moindre car l'onde d'intumescence ne passe qu'une fois devant le bassin d'amortissement).

- Lors de chacune des réflexions à l'extrémité du bief, l'amplitude de l'onde d'intumescence double par superposition et subit un amortissement de 20 %. Maximale à 0,30 m lors de la première réflexion (contre 0,42 m sans bassins d'amortissement), elle se réduit à 0,1 m après trois allers-retours (c'est-à-dire après 1,5 h pour un bief de 6 km de long).

Cependant, en pratique, il y a toujours plusieurs ondes d'intumescence dans les biefs et l'amplitude réelle de l'onde résultante pourra être plus grande que l'amplitude calculée pour une seule onde. Aussi, avec un processus de sassement en continu (un cycle d'éclusage toutes les heures), des bassins d'amortissement avec une plus grande capacité sont apparus nécessaires pour rester en deçà d'une hauteur d'onde d'intumescence de 0,30 m. Les calculs de simulations ont permis de pré-dimensionner des bassins près des écluses : une superficie de 3 ha est nécessaire pour tenir compte de multiples superpositions d'ondes d'intumescence dans les configurations les plus défavorables. La surface des bassins d'amortissement doit être sensiblement doublée lorsque ceux-ci ne peuvent être implantés à proximité des avant-ports des écluses).

Ainsi, en conclusion, l'utilisation de bassins d'amortissement, implantés au voisinage et de chaque côté des écluses, semble en première approche la solution la plus efficace pour contenir le phénomène d'onde d'intumescence dans des valeurs acceptables du point de vue de la navigation.

7.4 Points restant à étudier

Les études pour le canal Seine Nord Europe n'ont porté que sur les intumescences dans les biefs entre les extrémités du nouveau canal. Il conviendra d'étudier notamment la capacité d'atténuation des biefs de la vallée de l'Oise par dispersion dans les différentes ramifications hydrauliques connectées à ces biefs.

En canal, des bassins d'amortissement ont été systématiquement prévus aux abords des écluses pour atténuer les ondes d'intumescence et les rendre compatibles avec la navigation. Mais il conviendrait d'améliorer cette solution, notamment pour réduire la superficie de ces bassins en étudiant :

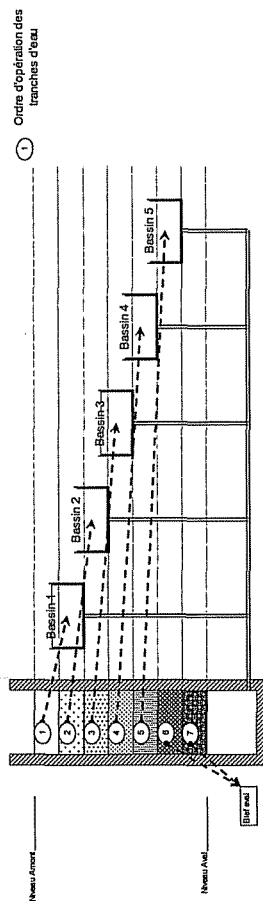
- l'accroissement de l'amortissement par frottement réparti le long des biefs (par augmentation de la rugosité des berges par exemple),
- l'optimisation du coût de la solution par bassins tampons démodulateurs : étude du dimensionnement pour recevoir au minimum les deux dernières tranches d'eau du sas, étude corrélative des gains potentiels en terme de durée de sassement,

- la compatibilité et l'optimisation des bassins d'amortissement avec l'augmentation du trafic et le doublement des écluses.

5 MOTS CLEFS :

- bassin d'épargne
- perte de charge
- durée de sassement
- pente d'eau
- intumescence

Coupe transversale au milieu du sas



Vue en Plan

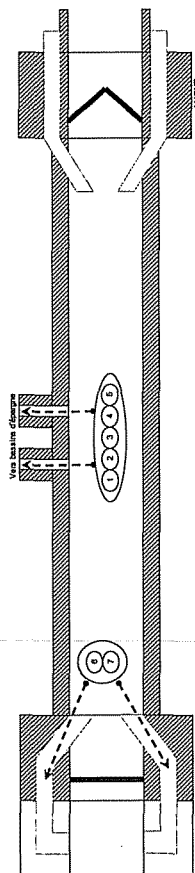


Figure n° 1 - Principe de vidange du sas pour un bateau avalant

N°Ecluse	Chute (m)	Nombre de bassins d'épargne	Efficacité (%)	Volume éclusé (m³)	Débit de recyclage sur 24 h (m³/s)
0	6,41	0	0%	17 665	4.9
1	19,57	3	60%	20 579	5.7
2	15,50	2	50%	20 374	5.7
3	30,00	5	71%	22 533	6.3
4	22,50	4	67%	19 717	5.5
5	20,11	3	60%	21 147	5.9
6	25,00	4	67%	21 908	6.1

TABLEAU N° 1 - Débit de recyclage des éclusées

Ecluse	0	1	2	3	4	5	6
Chute (m)	6,41	19,57	15,50	30,00	22,50	20,11	25,00
Nb de bassins d'épargne (Optimisé)	0	3	2	5	4	3	4

TABLEAU N° 2 - NOMBRE DE BASSINS D'EPARGNE

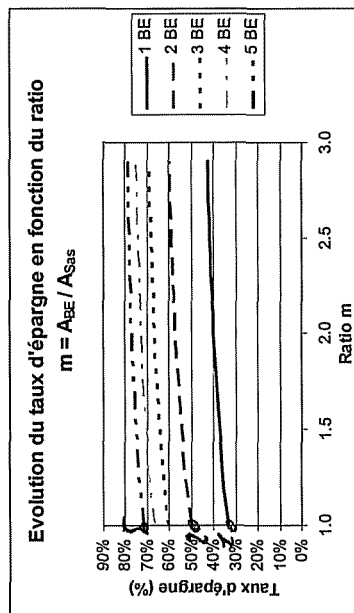


FIGURE N°2 - EFFICACITE DES BASSINS D'EPARGNE

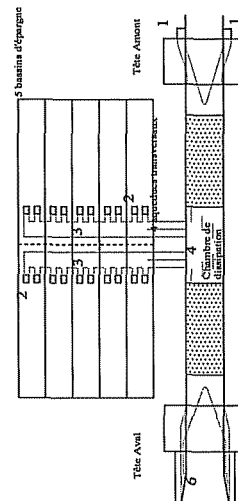
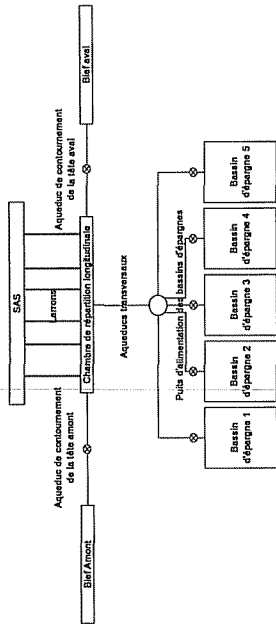


FIGURE N° 3 - ELEMENTS DU SYSTEME HYDRAULIQUE (ECLUSES 1 A 6)



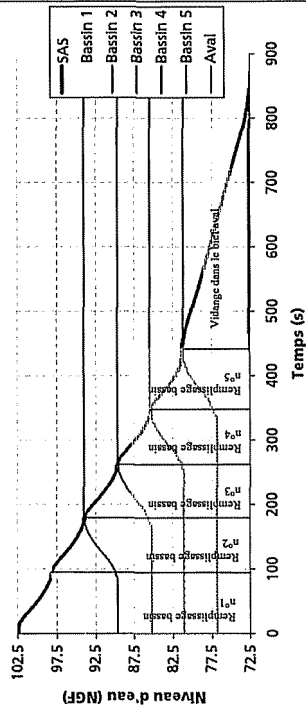
TABEAU N° 3 - SCHEMA DE MODELISATION

Ecluse	Hauteur de Chute m	Durée de vidange du sas		Durée de remplissage du sas	
		min	s	min	s
0	3.41	5.70	340	7.50	449
1	19.57	10.5	628	10.20	612
2	15.50	9.00	542	8.80	529
3	30.00	14.0	818	13.40	807
4	22.50	11.5	690	11.30	679
5	20.11	10.7	639	10.40	625
6	25.00	12.3	738	11.90	714

TABEAU N° 4 – DUREES DE SASSEMENT

Niveau de base
0 3 2 5 4 3 1

Niveau d'eau sas 3 pendant vidange



Décharge sas 3 pendant vidange

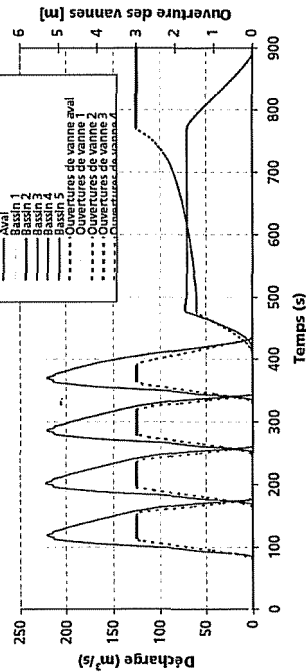


FIGURE N° 4 - Niveau d'eau et durée de sassement

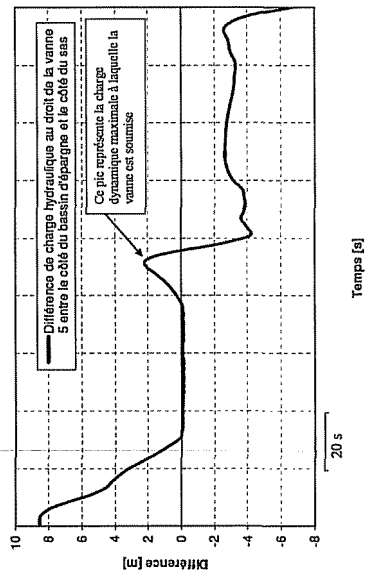
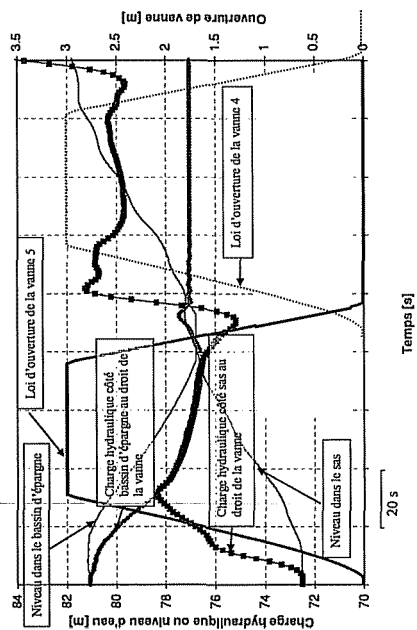


FIGURE N° 5 - CHARGE HYDRAULIQUE ET SURPRESSION AU DROIT DE LA VANNE

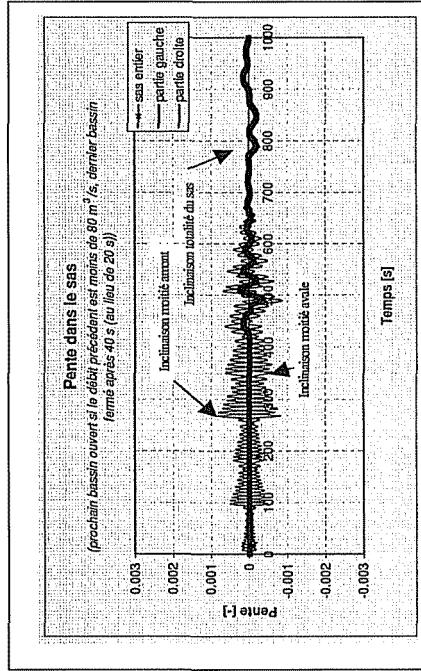


FIGURE N° 6 - Agitation dans le sas

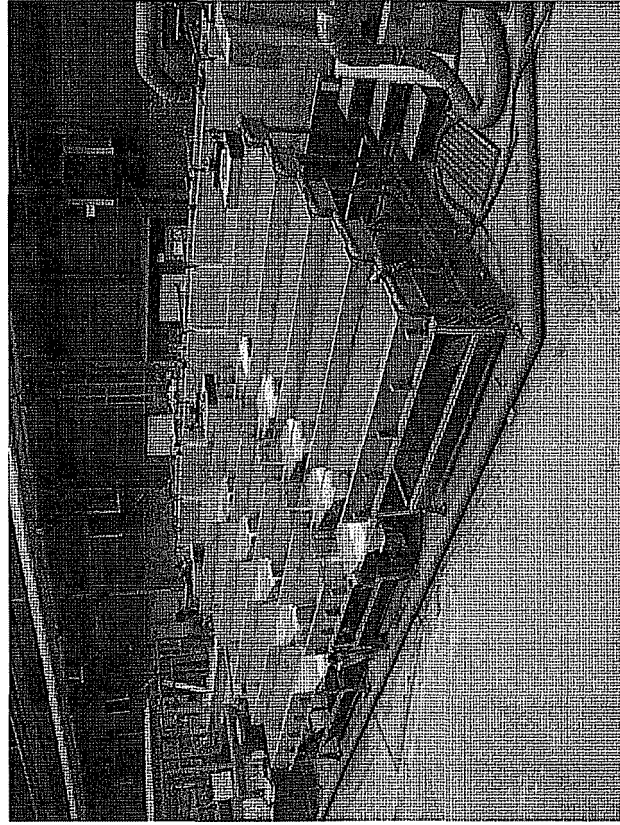


FIGURE N° 7 - Vue générale du modèle réduit de l'écluse de Moislains (30 m de chute, 5 bassins d'épargne)

Maximum d'efforts (tf)		Maximum d'efforts (tf)	
Vidange		Remplissage	
Amarre amont	Amarre aval	Amarre amont	Amarre aval
3.76	5.08	1.29	1.28

TABLEAU N° 5 – Efforts maximums sur les amarres

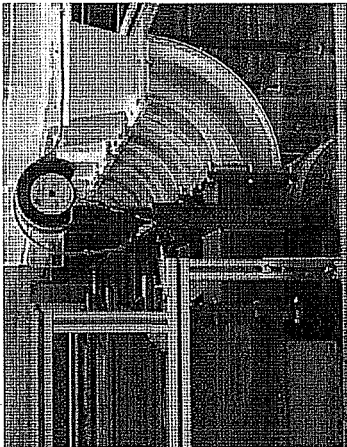


FIGURE N° 8 - Vannes d'aqueduc sous les bassins d'épargne

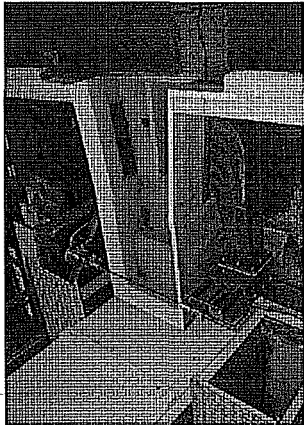


FIGURE N° 9 - Pertuis de vidange et vanne d'aqueduc de contournement de la tête aval

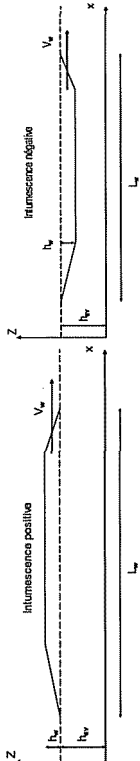


FIGURE N° 10 – onde d'intumescence dans les biefs aval et amont

Amplitude h_w	Vitesse V_w	Longueur L_w	Durée
0,22 m	6 m/s (22 km/h)	2000 à 3000 m	340 s à 480 s (6 à 8 min)

TABLEAU N° 6 - Caractéristiques principales moyennes des intumescences

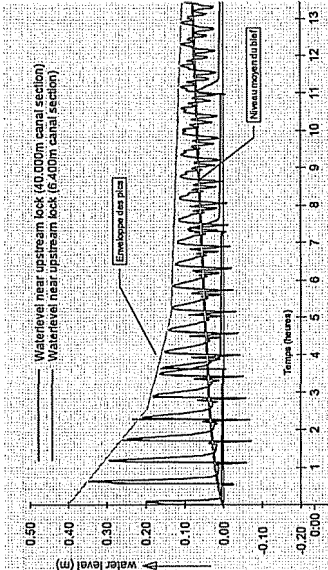


FIGURE N° 11 - Amortissement des intumescences

Ecluse	n° 0	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5	n° 6
Volume des 2 dernières "tranches" rejetées	m ³ 17 387	20 255	20 053	22 179	19 408	20 814	21 583
Temps de sassement calculé	s 340	828	542	839	880	838	738
Durée du rejet des 2 dernières "tranches" à 70 m ³ /s	s 340	342	339	389	330	350	381
Durée maximal du rejet des 2 dernières "tranches" à Q	s 900	814	897	430	540	611	523
Débit de rejet Q pour un temps de sassement total de 15 mn	m ³ /s 20	35	30	58	38	38	44
Hauteur de l'intumescence avec un débit de rejet Q	m 0,06	0,11	0,09	0,18	0,12	0,11	0,13

TABLEAU N° 7 - REDUCTION DES HAUTEURS D'INTUMESCENCE AVEC DUREE DE REMPLISSAGE OU DE VIDANGE DU SAS DE 15 MIN