

Etude de faisabilité sur l'optimisation de la gestion hydraulique de l'écluse des Fontinettes et la gestion de la ligne d'eau du bief aval

Phase 2 – Etude de faisabilité



VNF – DT Nord-Pas-De-Calais
FRANCE

RESTREINT

29 juillet 2022

RAPPORT
P017101_RP02

TRACTEBEL ENGINEERING S.A.

Agence de Nice
Porte de l'Arénas - Bât. C - 455, Promenade des Anglais - 06200 Nice - FRANCE
tel. +33 4 93 18 85 17 - fax. +33 4 93 18 84 87
engineering-fr@tractebel.engie.com
tractebel-engie.fr

RAPPORT

Nos ref. : P017101_RP02
Entité : EFE
Imputation : P.017101

RESTREINT

Client : VNF – DT Nord-Pas-De-Calais
Projet : Ecluse des Fontinettes
Pays/Ville : France

Titre : Etude de faisabilité sur l'optimisation de la gestion hydraulique de l'écluse des Fontinettes et la gestion de la ligne d'eau du bief aval
Sous-titre : Phase 2 – Etude de faisabilité
Auteur(s) : S. DELMAS (SDL)
Date : 29 juillet 2022

Résumé : -

Commentaires : -

Mots-clés : -

Nbr pages : 95 (hors annexes)

P.O.
S. Delmas

03	29/07/2022	Intégration remarques VNF du 07/07/2022 et 25/07/2022	Final	S. Delmas	D. Mazel	D. Mazel
02	05/07/2022	Intégration remarques VNF du 01/07/2022	Final	S. Delmas	D. Mazel	D. Mazel
01	20/05/2022	Première émission	Final	S. Delmas	D. Mazel	D. Mazel

REV.	JJ/MM/AA	OBJET DE LA REVISION	STAT.	REDACTION	VERIFICATION	APPROBATION
------	----------	----------------------	-------	-----------	--------------	-------------

TRACTEBEL ENGINEERING S.A. - siège social : 5, rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers CEDEX - FRANCE
au capital de 8 921 250 Euros - R.C.S. Nanterre B 309 103 877 - SIREN 309 103 877 - TVA intra : FR 82 309 103 877 - APE 7112B

ECLUSE DES FONTINETTES

**Etude de faisabilité sur l'optimisation de la gestion hydraulique de
l'écluse des Fontinettes et la gestion de la ligne d'eau du bief aval****SOMMAIRE**

1.	PRESENTATION	9
2.	RAPPEL DES CONCLUSIONS DE LA PHASE 1.....	10
3.	GESTION DE LA LIGNE D'EAU DU BIEF AVAL.....	11
3.1.	Modélisation des vagues d'intumescence sur le bief aval.....	11
3.1.1.	Méthodologie	11
3.1.1.1.	Présentation de l'outil de modélisation.....	11
3.1.1.2.	Présentation du modèle.....	11
3.1.2.	Résultats du calage - Journée de navigation du 11 juin 2021.....	13
3.1.3.	Gestion des intumescences	17
3.1.3.1.	Situation actuelle	17
3.1.3.2.	Solutions envisageables.....	26
3.1.3.2.1.	Optimisation des séquences de réglage des vannes	26
3.1.3.2.2.	Abaissment de la cote d'exploitation du bief aval.....	28
3.1.3.2.3.	Abaissment de la cote d'exploitation couplé à une optimisation des séquences de réglage des vannes.....	30
3.1.3.2.4.	Ouvrages de déversement supplémentaires.....	32
3.1.3.3.	Conclusions	35
3.1.4.	Régulation du niveau d'eau moyen dans le bief.....	36
3.1.4.1.	Situation actuelle	36
3.1.4.2.	Ouvrage de deversement supplementaire	38
3.1.4.3.	By-pass de l'écluse des Flandres	40
3.2.	Conclusion sur les actions de gestion du bief aval	49
3.3.	Faisabilité des solutions retenues.....	50
3.3.1.	Faisabilité de la modification des séquences d'ouverture des vannes.....	50
3.3.1.1.	Faisabilité technique.....	50
3.3.1.2.	Estimation financière	50
3.3.2.	Faisabilité d'un by-pass à l'écluse de Flandres	50
3.3.2.1.	Faisabilité technique du By-pass.....	50
3.3.2.2.	Estimation financière du By-pass	53

4.	SOLUTIONS POUR L'AMELIORATION DU FONCTIONNEMENT DE L'ETANG DE BATAVIA.....	55
4.1.	Mise en place d'une station de pompage	55
4.1.1.	Principes d'aménagement d'une station de pompage.....	55
4.1.1.1.	Etudes antérieures	55
4.1.1.2.	Proposition Tractebel.....	58
4.1.2.	Efficacité pour la gestion hydraulique	65
4.1.3.	Faisabilité technique de la station de pompage	66
4.1.3.1.	Station de pompage	66
4.1.3.1.1.	Configuration pompage en permanence $Q = 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$	67
4.1.3.1.2.	Configuration pompage la nuit $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	69
4.1.3.2.	Conduite de refoulement	69
4.1.4.	Evaluation financière	70
4.1.4.1.	Investissement initial	70
4.1.4.2.	Cout d'exploitation.....	73
4.2.	Aménagement d'un déchargeur gravitaire supplémentaire de l'étang vers la Basse Meldyck.....	74
4.2.1.	Principes d'aménagement d'un déchargeur supplémentaire.....	74
4.2.2.	Efficacité pour la gestion hydraulique	77
4.2.3.	Faisabilité technique du déchargeur gravitaire.....	80
4.2.3.1.	Pose de conduite sans tranchée	80
4.2.3.2.	Pose de conduite en tranchée.....	82
4.2.4.	Evaluation financière	83
5.	SYNTHESE DES ACTIONS, HYPOTHESES ET OBJECTIFS	86
5.1.	Synthèse des actions envisageables	86
5.2.	Hypothèses et objectifs de fonctionnement	88
6.	SCENARIOS D'AMENAGEMENT ET COMPARAISON MULTI-CRITERES	89
6.1.	Etablissement des scénarios	89
6.2.	Critères de comparaison et pondération.....	89
6.3.	Classement et scénario proposé	91
7.	CONCLUSION.....	95

ECLUSE DES FONTINETTES

**Etude de faisabilité sur l'optimisation de la gestion hydraulique de
l'écluse des Fontinettes et la gestion de la ligne d'eau du bief aval****LISTE DES FIGURES**

Figure 3-1 : Extrait du modèle numérique	12
Figure 3-2 : Conditions limites du modèle numérique 2D	14
Figure 3-3 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de mesures - comparaison entre les résultats du modèle numérique et les mesures réelles.....	15
Figure 3-4 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021.....	16
Figure 3-5 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type B-GS.....	20
Figure 3-6 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type B-MS.....	21
Figure 3-7 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-GS.....	22
Figure 3-8 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-PS	23
Figure 3-9 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-MS(1)	24
Figure 3-10 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-MS(2)	25
Figure 3-11 : Hydrogrammes T-MS (2) initial (en bleu) et modifié (en rouge)	27
Figure 3-12 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre les deux hydrogrammes T-MS(2)	28
Figure 3-13 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée avec NNN-15cm (en vert).....	29
Figure 3-14 : Hydrogrammes T-MS (2) initial (en bleu) et modifié (en orange)	30
Figure 3-15 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée avec NNN-10 et modification hydrogramme (en orange).....	31
Figure 3-16 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée (en gris)	34
Figure 3-17 : Comparaison des débits, ligne d'eau au droit du seuil.....	35
Figure 3-18 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (bleu – chronique réelle / rouge – simulation) et la solution projetée (vert – déversoir supplémentaire de 47 ml)	39
Figure 3-19 : By-pass, Débitance en fonction du diamètre de la conduite.....	41
Figure 3-20 : Conditions limites imposées dans le modèle numérique (by-pass 3m ³ /s) – journée du 11/06/2021.....	43

Figure 3-21 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (rouge – simulation) et la solution projetée (gris – by-pass à Flandres 3 m ³ /s)	44
Figure 3-22 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021 (avec mise en œuvre du by-pass à Flandres – 3m ³ /s)	44
Figure 3-23 : Conditions limites imposées dans le modèle numérique (by-pass 6m ³ /s)	45
Figure 3-24 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (rouge – simulation) et la solution projetée (en gris :by-pass à Flandres 3 m ³ /s / en bleu :by-pass 6 m ³ /s)	47
Figure 3-25 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021 (avec mise en œuvre du by-pass à Flandres – 6m ³ /s)	48
Figure 3-26 : Profil en long du by-pass.....	50
Figure 3-27 : Implantations possibles pour le by-pass	51
Figure 3-28 : Contraintes du tracé rouge.....	51
Figure 3-29 : Comparaison tracés vert et jaune – Courbes de niveaux	52
Figure 3-30 : Comparaison tracés vert et jaune – tronçon aval.....	52
Figure 3-31 : Conduite DN1300 en tranchée.....	53
Figure 4-1 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Source : DIAG ARTELIA.....	56
Figure 4-2 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Gestion des croisements réseaux – Source : AVP ARTELIA	57
Figure 4-3 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Variante microtunnelier en jaune – Source : AVP ARTELIA.....	58
Figure 4-4 : Cheminement de la conduite de refoulement envisagée.....	59
Figure 4-5 : Encombrement d'une conduite Ø1400 mm dans la galerie de l'évacuateur 6 m x 3.85 m	60
Figure 4-6 : Parcelles cadastrales au droit du cheminement envisagé, en jaune aqueduc existant, en vert, conduite de refoulement projetée, en pointillés verts – passage en tranchée.....	61
Figure 4-7 : Extrait rapport ISL, interprétation Tractebel (en jaune et violet) du nombre de bassinée par plage de 6h	64
Figure 4-8 : Plan de principe d'une pompe	68
Figure 4-9 : Vue en plan de principe des 3 pompes (+1 secours)	68
Figure 4-10 : Profil en long conduite de refoulement	70
Figure 4-11 : Faisceaux d'implantation envisagés pour la conduite (proposé en jaune, non retenus en rouge)	74
Figure 4-12 : Tracé de principe proposé pour la conduite	75
Figure 4-13 : Profil en long du terrain naturel et de la conduite, pour le tracé envisagé.....	75
Figure 4-14 : Loi de débitance DN1200	77
Figure 4-15 : Evolution du niveau d'eau à Batavia pour 10 journées de navigation à 15 bassinées complètes par jour	78
Figure 4-16 : Evolution du niveau d'eau à Batavia pour 10 journées de navigation à 16 bassinées complètes par jour	79
Figure 4-17 : Passage sous la voie ferrée et sous la rue de l'Europe – Solution avec un unique tronçon sans tranchée	80

Figure 4-18 : Passage sous la voie ferrée et sous la rue de l'Europe – Solution avec deux tronçons sans tranchée.....	81
Figure 4-19 : Profils en long TN et conduite – profondeur tranchée et couverture au droit des tronçons sans tranchée.....	83
Figure 5-1 : Inventaire des actions et conclusions associées	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres	37
Tableau 2 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres, avec la solution by-pass 3 m ³ /s – Journée du 11/06/2021.....	42
Tableau 3 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres, avec la solution by-pass 6 m ³ /s – journée du 11/06/2021	46
Tableau 4 : Bilan des actions à retenir et synthèse.....	87
Tableau 5 : Combinaisons d'actions possibles (scénario 1 à 5)	89
Tableau 6 : Comparaison multicritère des scénarii d'aménagement.....	92

1. PRESENTATION

L'étude de faisabilité sur l'optimisation de la gestion hydraulique de l'écluse des Fontinettes et la gestion de la ligne d'eau du bief aval s'inscrit dans une démarche d'actions engagées depuis une dizaine d'années, qui visent notamment à contrôler la ligne d'eau de référence soumise à des dépassements temporaires de la cote de restriction de la navigation (au-delà du $NNN \pm 20$ cm).

L'origine des problèmes rencontrés est bien identifiée et correspond aux effets de propagation des intumescences d'ondes de bassinées en aval de l'écluse dans le bief Flandres-Fontinettes de faible longueur, en particulier lors des situations de trafic dense qui induisent une saturation de la décharge par l'étang de Batavia et un déséquilibre du transfert des volumes évacués à l'écluse de Flandres et en provenance de l'écluse des Fontinettes.

Les améliorations apportées aux modalités de gestion de certains ouvrages hydrauliques ont permis de réduire les situations de dépassement de niveau, mais les enregistrements récents font apparaître occasionnellement un contrôle insuffisant et des risques de perturbation de la navigation. Pour pallier ces problèmes et dans la perspective d'accroissement du trafic fluvial, VNF souhaite s'engager vers des solutions pérennes à mettre en œuvre sur ses ouvrages, solutions les mieux adaptées du point de vue financier, technique, d'exploitation et d'insertion dans l'environnement urbain et péri-urbain.

Par ailleurs, dans les situations de basses eaux et face aux effets attendus du changement climatique, VNF privilégie les dispositions qui contribuent à une gestion économe de la ressource en eau.

Dans le prolongement des études réalisées et des actions qui ont déjà été mises en œuvre, l'étude en cours a pour principal objectif, d'identifier les solutions d'aménagement et/ou de gestion des eaux réalistes et adaptées au contexte pour traiter les problèmes rencontrés, de proposer et de justifier en concertation avec VNF le programme des interventions à engager à court terme sur les ouvrages de la voie d'eau.

L'étude est décomposée en plusieurs phases, qui sont :

- Phase 1 : Analyse de l'existant, modélisation de l'état initial et projeté, identification des besoins et investigations complémentaires.
- Phase 2 : Réalisation de l'étude de faisabilité.
- Phase 3 : Evaluation du potentiel hydroélectrique de l'évacuateur de Batavia.

Le présent rapport correspond à la phase 2 – étude de faisabilité et présente une première analyse macroscopique des solutions envisageables. Les solutions sont étudiées à un niveau faisabilité et comparées selon une grille d'analyse permettant d'objectiver chacun des scénarios.

Par ailleurs, le rapport présente la modélisation des vagues d'intumescence initiée en phase 1.

2. RAPPEL DES CONCLUSIONS DE LA PHASE 1

La présente étude vise à répondre aux deux objectifs suivants :

- objectif 1 : fiabiliser et améliorer l'exploitation de l'écluse et du bief Fontinettes-Flandres afin de garantir des conditions de navigation optimales vis-à-vis du maintien de la ligne d'eau et du franchissement des écluses,
- objectif 2 : gérer les volumes d'eau générés à chaque sassée afin qu'ils puissent être absorbés dans le réseau en visant l'économie de la consommation en eau de l'écluse des Fontinettes.

L'analyse menée en phase 1 a montré qu'il existe peu de pistes qui conduiraient à satisfaire les objectifs précités en impliquant un aménagement ou une action unique. Il est vraisemblable que la solution à retenir combinera différentes actions.

Les résultats des études de phase 1 conduisent à identifier **une stratégie majeure** d'amélioration de gestion des bassinées et d'aménagement pour le contrôle des volumes en transit, qui consisterait en 5 étapes :

1. **L'optimisation des séquences de restitution des bassinées au bief aval** pour chacune des 5 situations de gestion identifiées en gérant les séquences d'ouverture des vannes ;
2. **La mise en place d'une station de pompage de l'étang de Batavia vers le bief amont, par une conduite de refoulement qui serait implantée dans la galerie de l'évacuateur puis le long de l'écluse** jusqu'au bief amont. Le dimensionnement du pompage est à optimiser selon les périodes de fonctionnement souhaitées. Cette solution répondrait aux objectifs d'économie d'eau, sans impact supplémentaire sur l'environnement ;
3. **La gestion coordonnée de l'écluse de Flandres avec les bassinées à l'écluse des Fontinettes**, pour équilibrer les volumes du bief dans certaines situations tendues et régler le NNN pratiqué, par mise en place d'une conduite vannée en by-pass de l'écluse de Flandres.
4. **La mise en place d'un complément de déchargeur gravitaire de l'étang vers la basse Meldyck**, qui serait positionné dans le corridor en bordure de la RD942. Si sa faisabilité technique et réglementaire est vérifiée, cet aménagement viendrait en complément de la station de pompage, avec un dimensionnement raisonnable (conduite $\approx \varnothing 1000$ mm).
5. **Eventuellement** s'ils sont justifiés et efficaces, **des aménagements structurels d'ouvrages sur le bief aval permettant de mieux réguler statiquement (déversoirs) le contrôle de la ligne d'eau** par rejet des excédents en amont de l'écluse de Flandres. Les problématiques techniques et réglementaires seront à examiner pour chaque action en raison des impacts prévisibles sur milieu récepteur.

3. GESTION DE LA LIGNE D'EAU DU BIEF AVAL

L'étude s'appuie sur la modélisation numérique 2D des vagues d'intumescence sur le bief aval réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS (version 6.0), développé par l'US Army Corps of Engineers (USACE) pour les rivières et les canaux notamment.

Le modèle de l'existant, une fois calé, permet d'évaluer l'efficacité des solutions envisagées pour réduire l'amplitude de l'onde créée lors des sassées à l'écluse des Fontinettes.

3.1. Modélisation des vagues d'intumescence sur le bief aval

3.1.1. Méthodologie

3.1.1.1. PRÉSENTATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION

Une modélisation numérique 2D du bief Fontinettes-Flandres a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS, dans le but de simuler le plus fidèlement possible les vagues d'intumescence provoquées par les ondes de bassinées.

Les versions récentes d'HEC-RAS permettent de modéliser les écoulements selon un schéma numérique 2D, tout en intégrant des modules dédiés aux ouvrages singuliers de types seuil, pertuis vannés,...

Ce code de calcul assure la résolution des équations de Barré de Saint Venant, issues de l'intégration sur la verticale des équations de Navier Stokes. Les équations de Barré de Saint Venant permettent de modéliser les phénomènes hydrauliques à surface libre aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent.

3.1.1.2. PRÉSENTATION DU MODÈLE

L'emprise du modèle est délimitée à l'amont par la sortie de l'écluse des Fontinettes et à l'aval par l'entrée de l'écluse des Flandres sur le canal à grand gabarit et par l'écluse de Saint-Bertin sur le bras de l'ancien canal de Neuffossé.

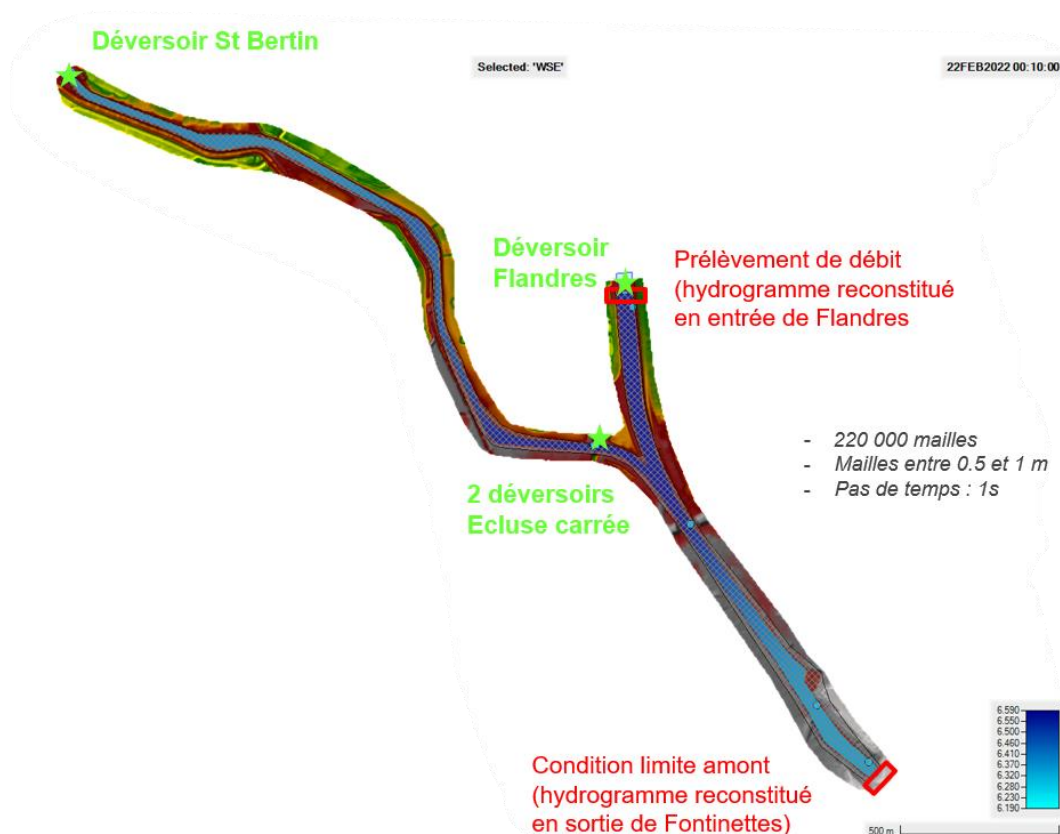


Figure 3-1 : Extrait du modèle numérique

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- Données topographiques :

Un modèle numérique de terrain a été construit sur la base des données topographiques et bathymétriques transmises par VNF :

- Profils en travers du canal (fichier 20518-Arques-PRO-01.dwg) ;
- Données topographiques ponctuelles au droit des zones déversantes pour l'écluse de Saint Bertin (6,40 m NGF), l'écluse carrée d'Arques (6,365 m NGF).
- Conditions aux limites :
 - A l'amont du modèle, on introduit les hydrogrammes issus de l'écluse des Fontinettes, reconstitués à partir des mesures de niveaux dans les sas de l'écluse pour la journée de navigation considérée.
 - A l'aval (amont immédiat de l'écluse de Flandres), les sassées de l'écluse de Flandres sont représentées par les hydrogrammes reconstitués à partir des mesures de niveaux dans le sas de l'écluse (phase de remplissage) pour la journée de navigation considérée.
 - Partout ailleurs, on impose des conditions de bords solides sur les extrémités du canal.
- Ouvrages singuliers : 4 déversoirs sont modélisés à l'aide du module « seuil » d'HEC-RAS :
 - Ecluse carrée d'Arques (déversoir 1) - cote de seuil : 6.365 m NGF – linéaire déversant : 5.17 m

- Ecluse carrée d'Arques (déversoir 2) - cote de seuil : 6.365 m NGF – linéaire déversant : 5.17 m
- Ecluse de Saint Bertin - cote de seuil : 6.40 m NGF – linéaire déversant : 5.10 m
- Ecluse de Flandres - cote de seuil : 6.39 m NGF – linéaire déversant : 9.5 m

Un coefficient de débit (m) égal à 0.37 est retenu dans l'étude.

A l'aval des ouvrages de déversement, des surfaces de stockage fictives permettent aux volumes déversés de quitter le modèle sans influencer la ligne d'eau amont.

- Maillage :

La taille des mailles joue un rôle primordial dans la modélisation. Un des enjeux principaux est de parvenir à optimiser le maillage de façon à avoir une finesse de mailles qui conduit à assurer une précision satisfaisante des résultats sans générer des temps de calcul trop longs.

L'ordre de grandeur de la taille des mailles est néanmoins donné par la précision des données topographiques. En effet, avec une donnée tous les 50 cm, il n'est pas nécessaire d'avoir un espacement entre nœuds plus petit mais il ne faut pas qu'il soit beaucoup plus grand au risque de perdre de l'information. La taille des mailles varie entre 50 cm et 1 m dans le modèle, pour un nombre total de mailles de l'ordre de 220 000.

Ce premier ordre de grandeur est ensuite affiné afin de respecter la condition sur le nombre de Courant $c = v \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$: où Δx est le pas d'espace, Δt le pas de temps et v la vitesse d'écoulement. Le nombre de Courant correspond aux nombres de mailles traversées par une particule d'eau en un pas de temps.

Le pas de temps retenu dans la modélisation est d'une seconde. La durée de calcul est comprise entre 30 minutes (hydrogramme type) et 4h environ (journée complète de navigation).

3.1.2. Résultats du calage - Journée de navigation du 11 juin 2021

On utilise les mesures de niveaux réalisées sur le bief aval, au droit des sondes « Ecluse Fontinettes », « Pont SNCF », « Pont Flandres », « Ecluse des Flandres » pour caler le modèle.

Le calage s'effectue sur la journée de navigation du 11 juin 2021 analysée en phase 1.

Les hydrogrammes entrant et sortant du bief ont été reconstitués lors de la phase 1 de l'étude, sur la base des mesures de niveaux dans les sas de l'écluse (respectivement vidange à Fontinettes et remplissage à Flandres). Ces hydrogrammes sont imposés dans le modèle sous forme de conditions limites.

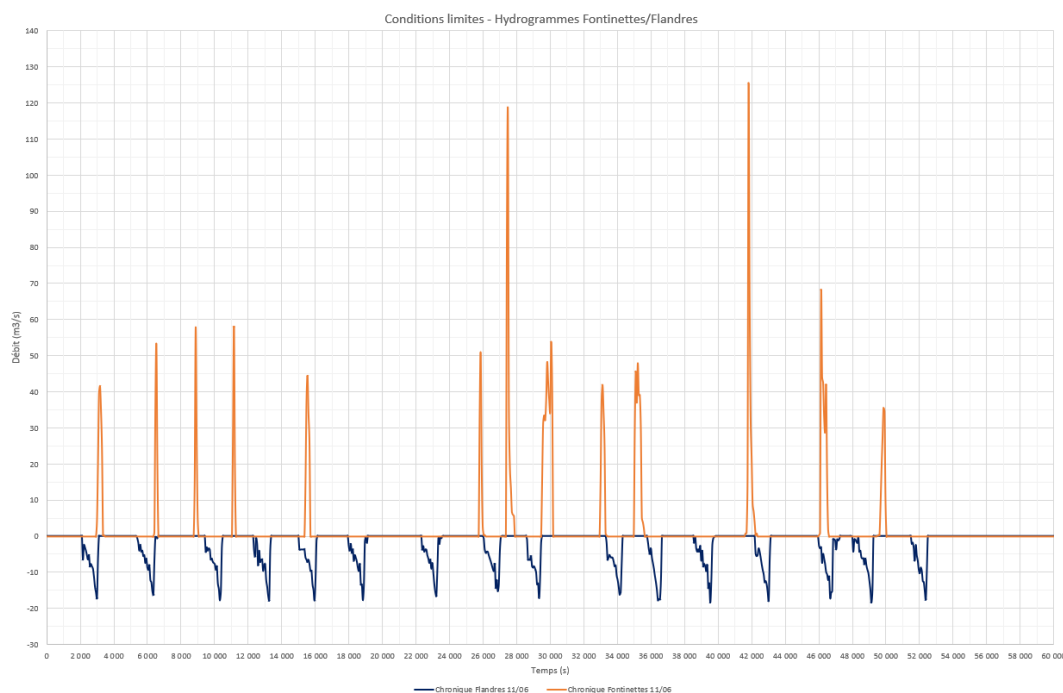


Figure 3-2 : Conditions limites du modèle numérique 2D

On extrait des résultats du modèle l'évolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau existantes sur le bief (courbe rouge) et on la compare aux chroniques disponibles sur la journée du 11 juin 2021 (courbe bleue).

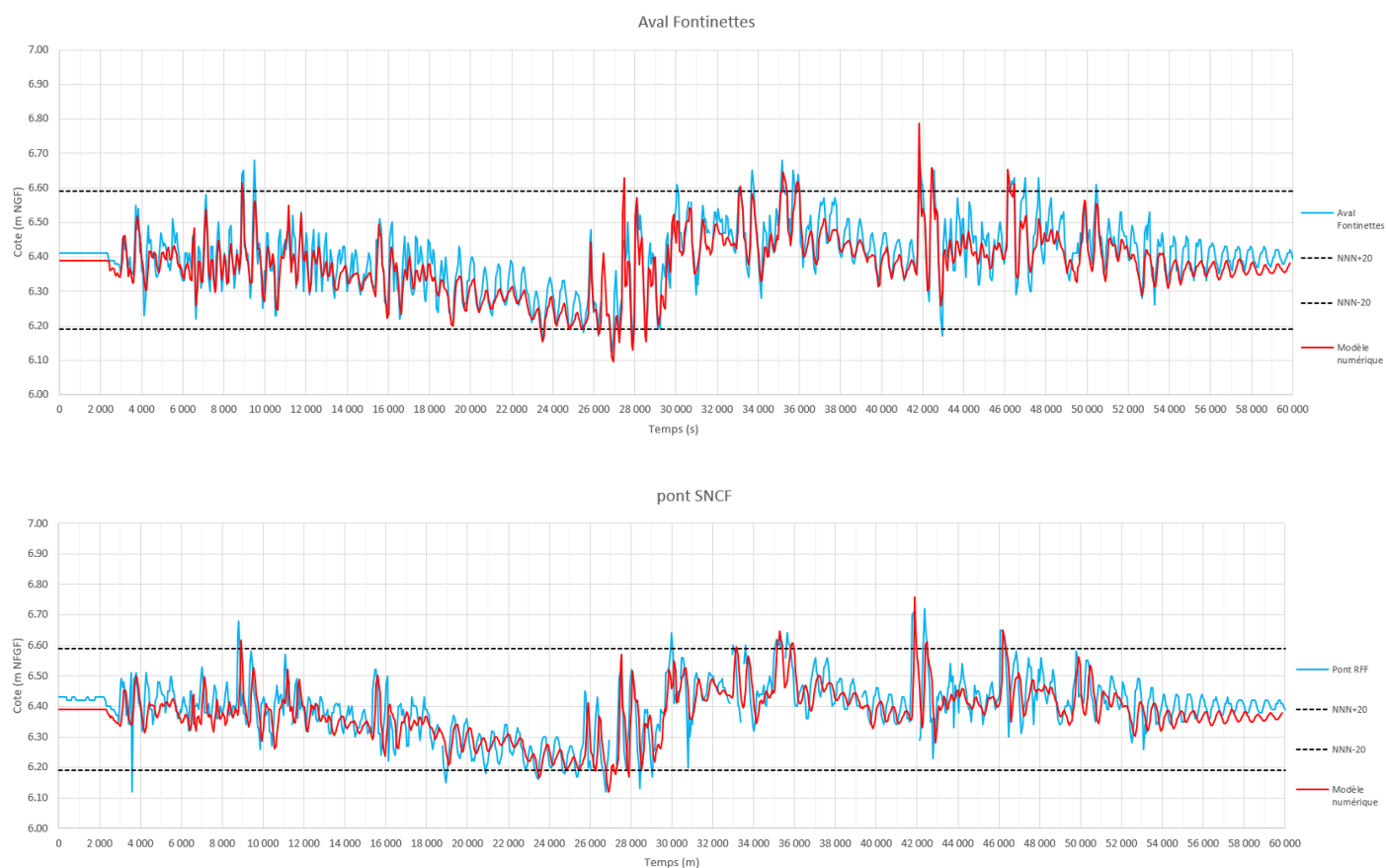




Figure 3-3 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de mesures - comparaison entre les résultats du modèle numérique et les mesures réelles

Les figures précédentes montrent que le modèle numérique construit permet de reproduire assez fidèlement les phénomènes observés sur le bief :

- Intumescences : le modèle reproduit correctement les oscillations générées sur le bief. L'amplitude et la période des ondes sont plutôt bien reproduites, tout comme l'amortissement du train d'onde.

Les résultats qui intéressent le plus l'étude, à savoir le dépassement de la cote NNN+20 cm et le passage sous la cote NNN-20cm sont très bien reproduits ce qui est jugé satisfaisant.

- Difficulté de régulation du niveau moyen : le modèle permet également de représenter fidèlement les périodes de la journée où le bilan de volume n'est pas à l'équilibre. On observe en effet une augmentation du niveau moyen du bief lorsque le volume total entrant est supérieur aux volumes sortants à Flandres et évacués par surverse aux déversoirs (entre $t = 26\,000$ et $30\,000$ s sur la modélisation). A contrario, le niveau moyen baisse lorsque le bilan de volume est négatif (entre $t = 18\,000$ et $26\,000$ s sur la modélisation). Le phénomène est très bien reproduit dans la modélisation.

Il est à noter que la simulation considère un niveau initial dans le bief à la cote 6.39 m NGF. Les mesures disponibles montrent qu'en réalité le niveau d'eau dans le bief en début de journée du 11 juin était compris entre 6.41 NGF (sonde 'aval fontinettes') et 6.44 NGF (sonde 'pont flandres'). Un décalage constant, de 2 à 5 cm suivant les sondes de niveau, est ainsi observé entre la courbe rouge simulée et la courbe bleue réelle sur toute la durée de simulation.

On donne ci-après l'ordre de grandeur des volumes mis en jeu lors de la journée du 11 juin 2021, déduits de la modélisation :

- Volume entrant dans le bief (vidange de l'écluse des Fontinettes) : 154 498 m³
- Volume sortant du bief : au total 156 094 m³ décomposé comme suit
 - Remplissage de l'écluse de Flandres (fausses bassinées comprises) : 128 244 m³
 - Déversement à l'écluse carrée : 13 168 m³
 - Déversement à l'écluse de St Bertin : 4 252 m³
 - Déversement à l'écluse des Flandres : 10 430 m³

et leur évolution au fil du temps.

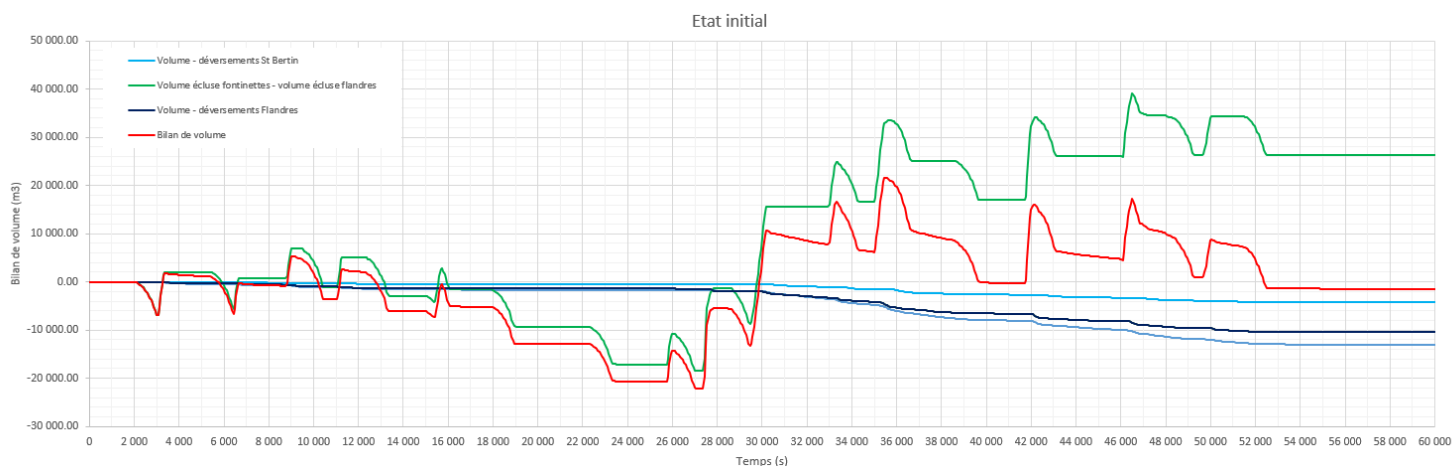


Figure 3-4 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021

En fin de journée, le bilan de volume est plutôt bien équilibré (courbe rouge - déficit de 1 596 m³) ce qui explique que le niveau d'eau dans le bief retrouve quasiment son niveau initial. Ce résultat s'explique par une contribution non négligeable des déversoirs (27 851 m³ soit environ 18% du volume sortant), qui permet de corriger le déficit de volume prélevable en faisant fonctionner l'écluse des Flandres, fausses bassinées comprises (83% du volume entrant dans le bief). VNF devra clarifier si sa gestion du bief tient compte des volumes évacués par les déversoirs. Cela paraît difficilement réalisable compte tenu des difficultés à prévoir sur la journée l'évolution du niveau moyen dans le bief aval.

Toutefois, ce bilan de volume n'est pas équilibré tout au long de la journée et par moment le niveau moyen augmente nettement, ce qui pénalise encore plus la gestion du bief au regard des problématiques d'intumescences et de l'objectif de non dépassement de la cote NNN+20 cm (moins de marge disponible).

La réalisation des fausses bassinées (entre 18 000 et 26 000 s) a permis d'abaisser le niveau d'eau moyen du bief en prévision de nouveaux passages de bateaux. Cette action a été très bénéfique et a permis de limiter le nombre de dépassement de la cote NNN+20 cm plus tard dans la journée. VNF devra clarifier si cette action préventive a été déclenchée sur la base d'informations déduites du trafic en amont du canal et de l'anticipation des passages à venir aux Fontinettes.

Conclusion sur le calage du modèle :

Le modèle numérique permet de reproduire assez fidèlement les phénomènes d'intumescences (amplitude, période, amortissement, délai de propagation) et les variations de niveau moyen observés sur le bief. Le modèle est ainsi validé et offre une bonne confiance pour son exploitation en situations de projet.

Il est utilisé dans la suite de l'étude pour estimer l'efficacité des solutions envisagées vis-à-vis des deux phénomènes suivants :

- Intumescences ;
- Régulation du niveau moyen du bief .

3.1.3. Gestion des intumescences

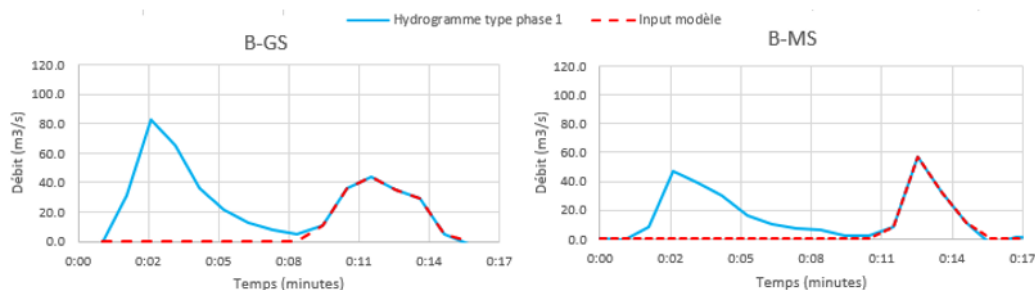
3.1.3.1. SITUATION ACTUELLE

L'analyse de phase 1 a mis en évidence la très bonne corrélation entre les lâchers de débit à Fontinettes et les oscillations du plan d'eau. Les variations les plus importantes apparaissent au passage du premier train d'onde.

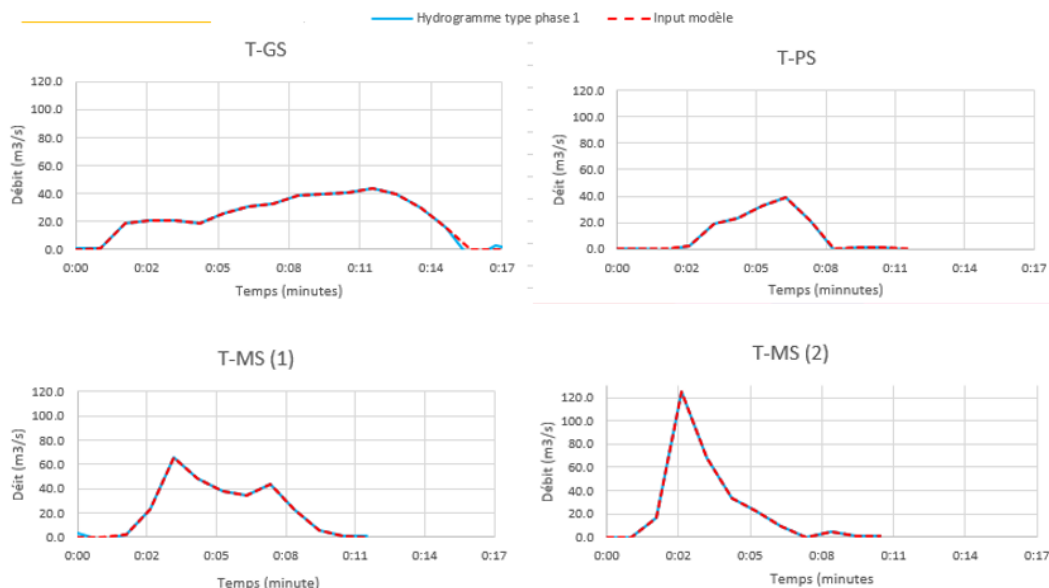
Il a donc été décidé de raisonner dans la suite de l'étude non plus sur une journée complète de navigation mais sur la base des hydrogrammes-types reconstitués en phase 1.

Chaque hydrogramme correspond à un lâcher type de débit occasionné lors des vidanges de l'écluse des Fontinettes. Six configurations ont été identifiées en phase 1, elles sont rappelées ci-après :

- 2 hydrogrammes avec transfert partiel des volumes vers Batavia (2/3 du volume environ) puis vers le bief aval (1/3 environ), nommés dans l'étude B-GS (grand sas) et B-MS (moyen sas)



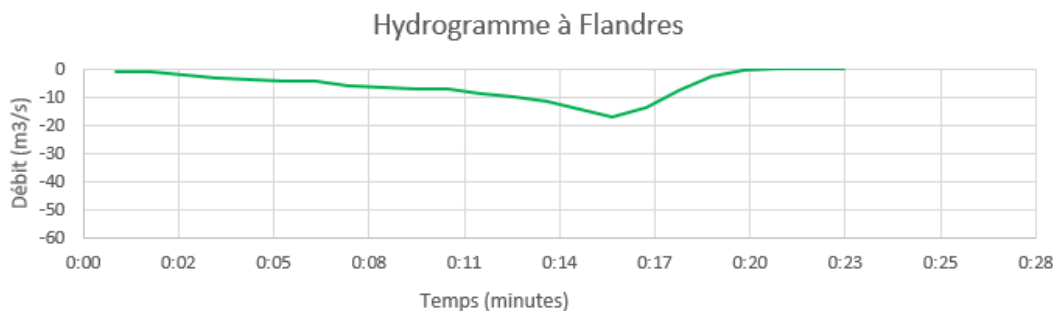
- 4 hydrogrammes avec transfert total du volume vers le bief aval, nommés T-GS (grand sas), T-MS(1) et T-MS(2) (moyen sas, deux hydrogrammes-types identifiés) et T-PS (petit sas).



Le modèle numérique est relancé en appliquant en sortie de l'écluse de Fontinettes un des hydrogrammes-types précédents.

Nota : Les hydrogrammes introduits correspondent à la phase de vidange du sas vers le bief aval. Pour les hydrogrammes types B-GS et B-MS, seul le second pic de débit est pris en compte (courbe en pointillés rouges), le premier pic (en bleu) correspondant à la vidange du sas vers l'étang de Batavia.

En parallèle, une fausse bassinée est modélisée à Flandres. L'hydrogramme de débit, sortant du bief, correspond cette fois au remplissage de l'écluse.



Les résultats obtenus au droit des 4 sondes sont donnés en pages suivantes. Ils permettent de confirmer l'analyse menée en phase 1, que l'on rappelle ci-après :

- Tous les lâchers de débit dans le bief aval sont accompagnés de variations brusques de niveau d'eau ;
- La sonde 'Amont Flandres' présente les amplitudes de variations les plus grandes ;
- L'amplitude des ondes est plus grande lors des transferts totaux que lors des transferts partiels (partage du volume entre Batavia et le bief aval) ;
- L'hydrogramme T-MS (2), qui présente une forme très pointue avec un débit maximal de 120 m³/s environ, est le plus pénalisant vis-à-vis des problématiques d'intumescences ;
- On peut définir la hiérarchie suivante entre hydrogramme-type, du plus pénalisant au moins pénalisant : T-MS (2) / T-MS (1) / T-GS / B-MS / T-PS / B-GS.

- On constate qu'à volume relâché équivalent (exemples de T-MS(2) et T-MS(1)), la forme de l'hydrogramme joue un rôle prépondérant sur l'amplitude des ondes générées. C'est donc plus sur l'onde de débit que sur le volume relâché que l'on doit travailler si l'on souhaite améliorer la situation vis-à-vis de la problématique d'intumescences.

On observe également que le premier train d'onde est le plus pénalisant et conduit souvent au dépassement de la cote NNN+20 cm. En revanche, les suivants sont rapidement amortis et n'induisent plus de dépassement de la cote autorisée.

➤ Hydrogramme type B-GS :

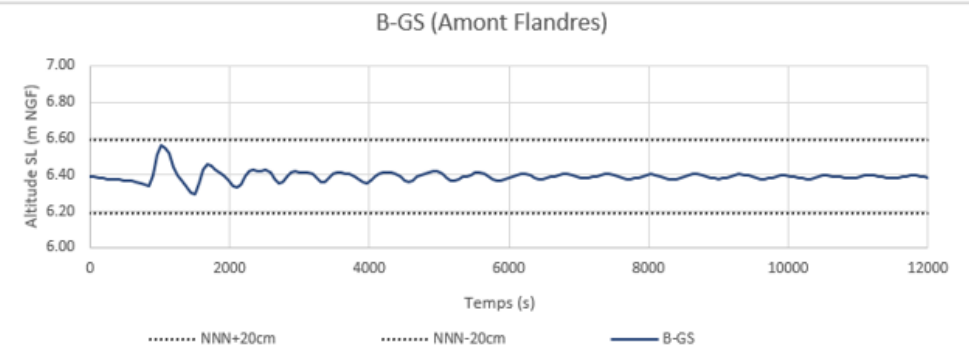
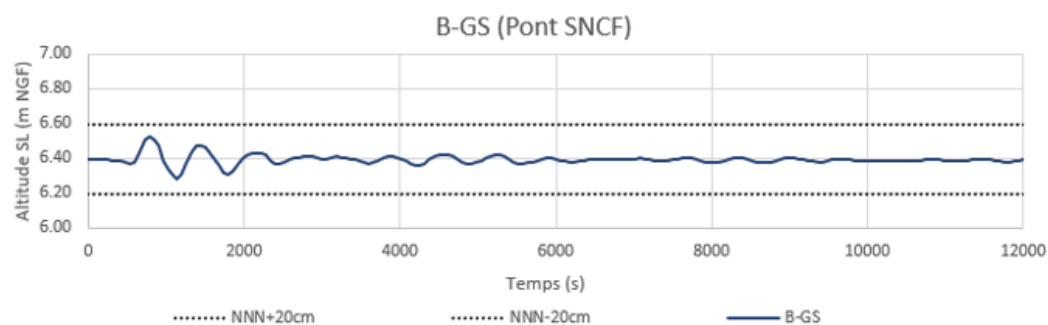
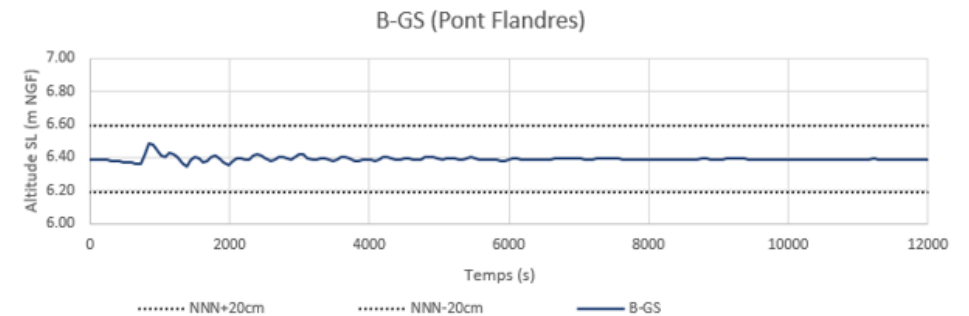
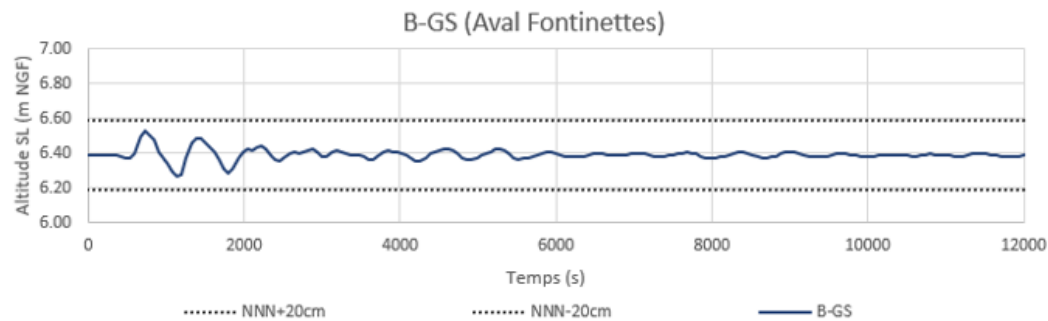
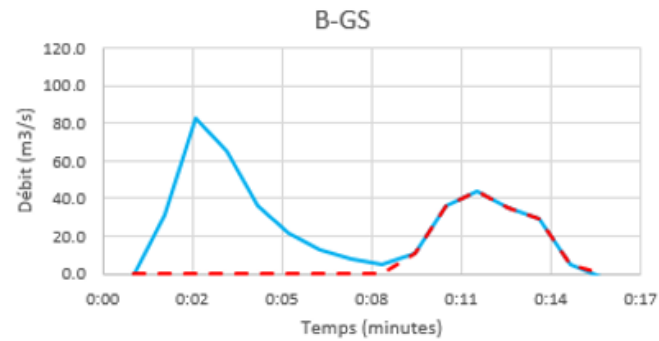


Figure 3-5 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type B-GS

➤ Hydrogramme type B-MS :

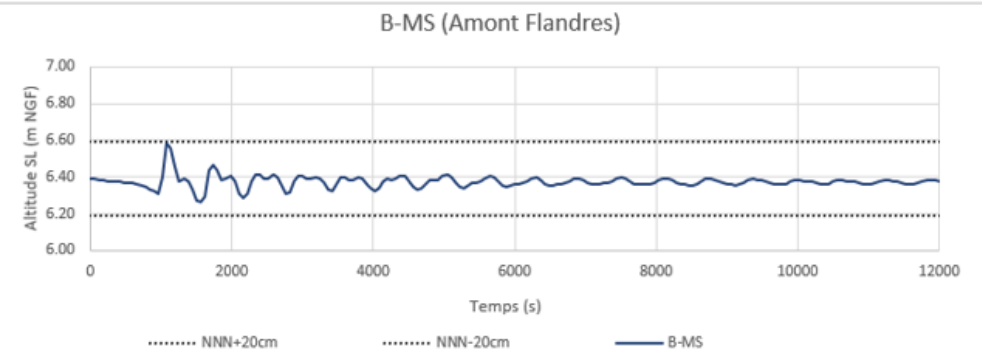
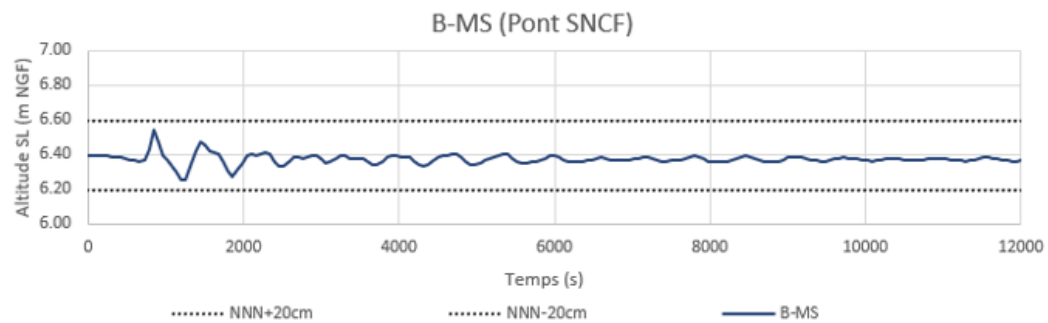
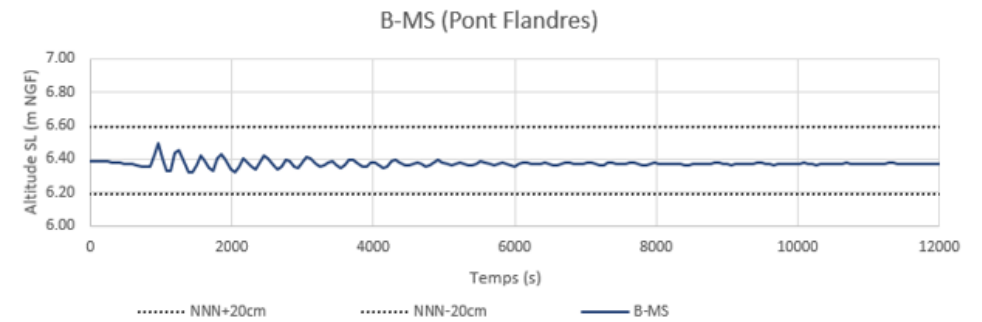
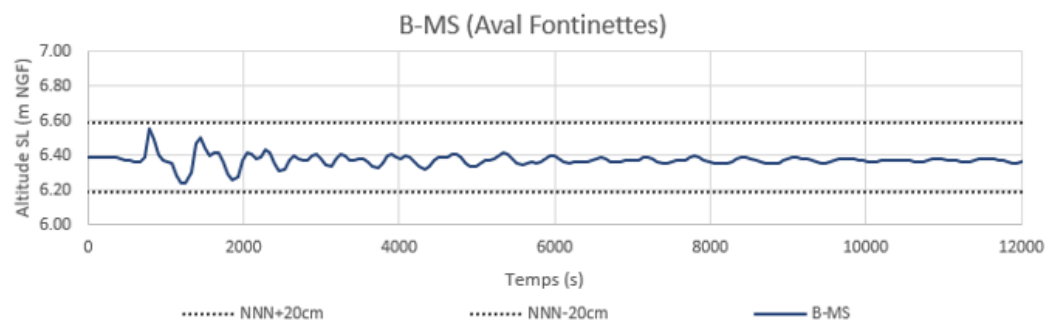
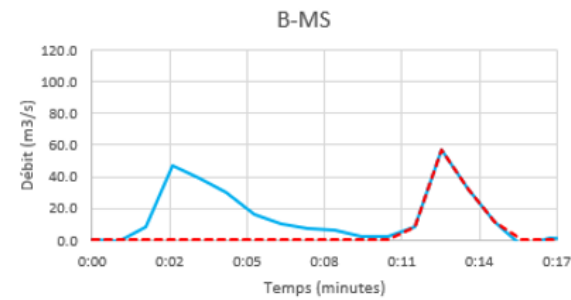


Figure 3-6 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type B-MS

➤ Hydrogramme type T-GS :

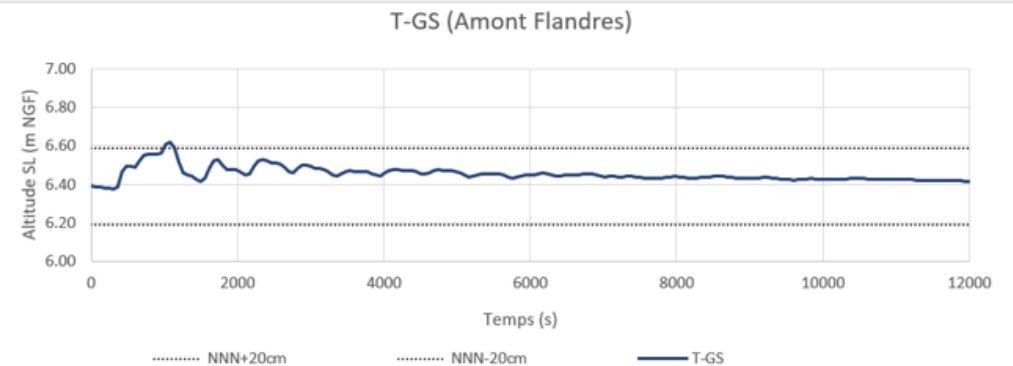
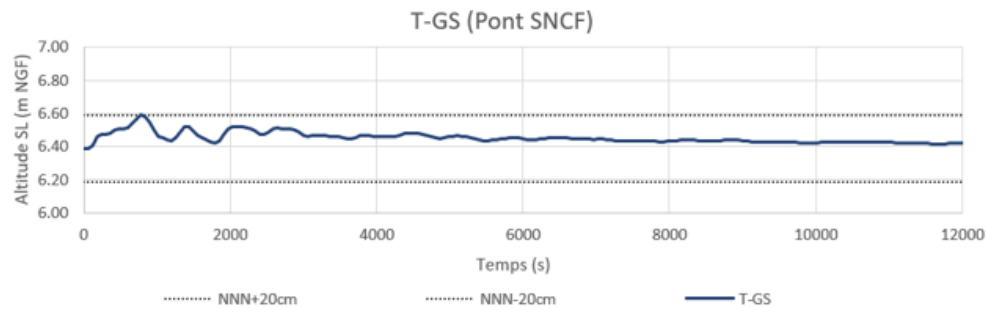
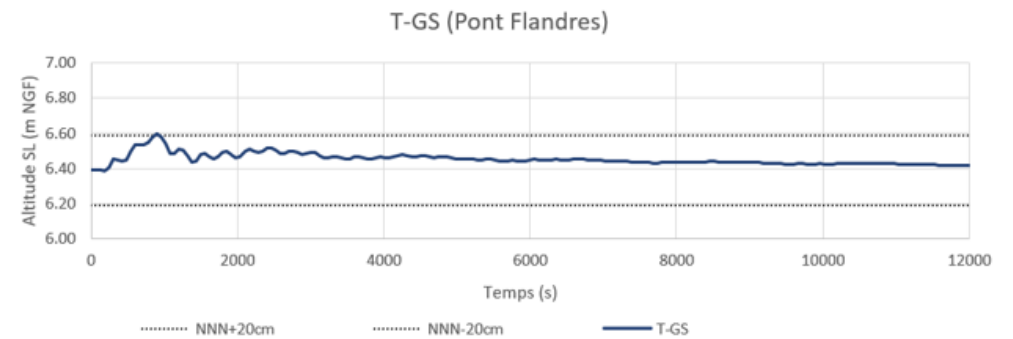
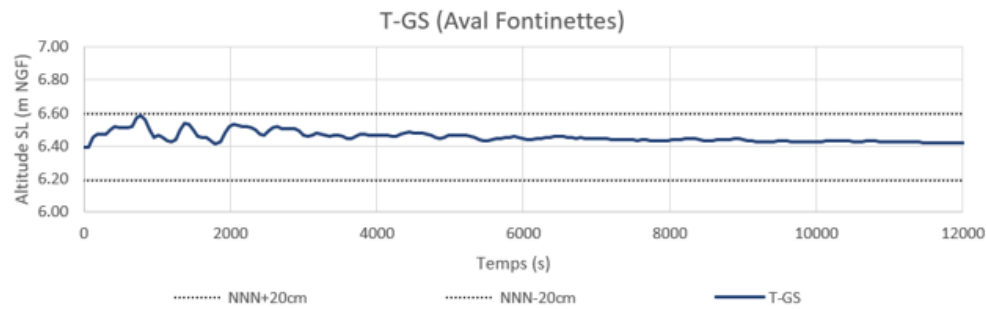
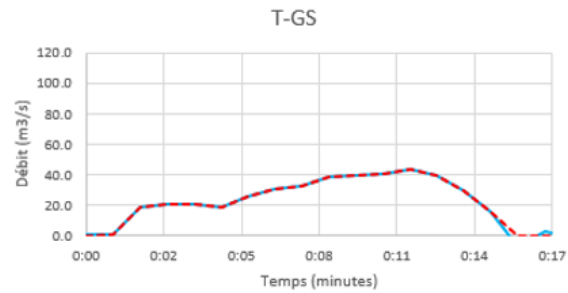


Figure 3-7 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-GS

➤ Hydrogramme type T-PS :

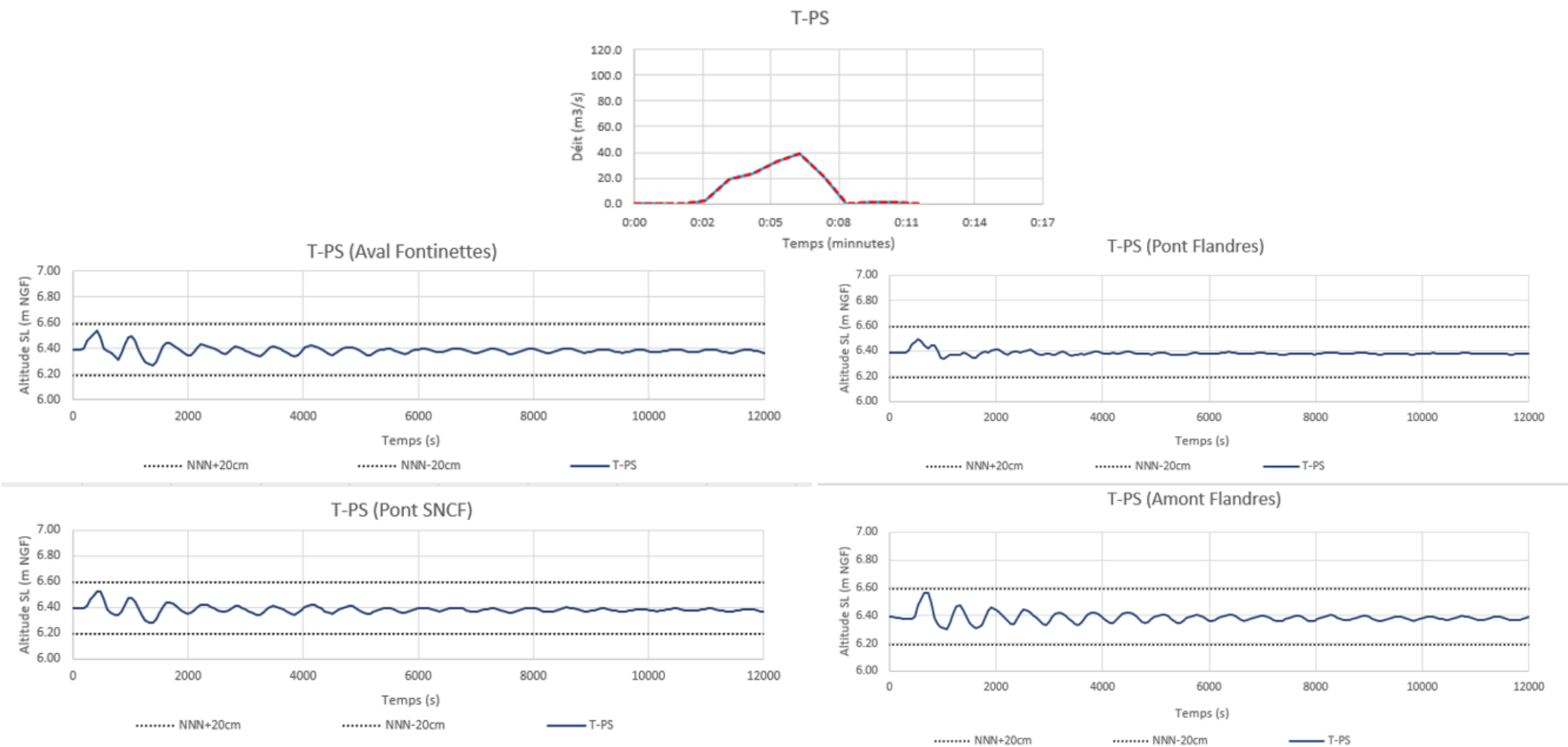


Figure 3-8 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-PS

➤ Hydrogramme type T-MS1 :

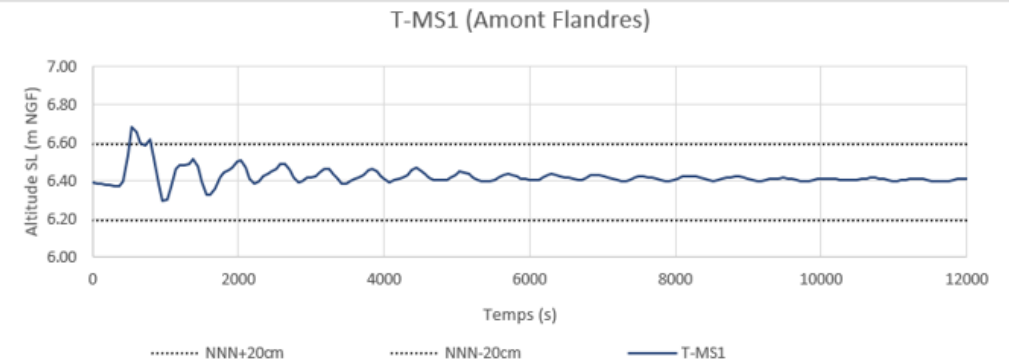
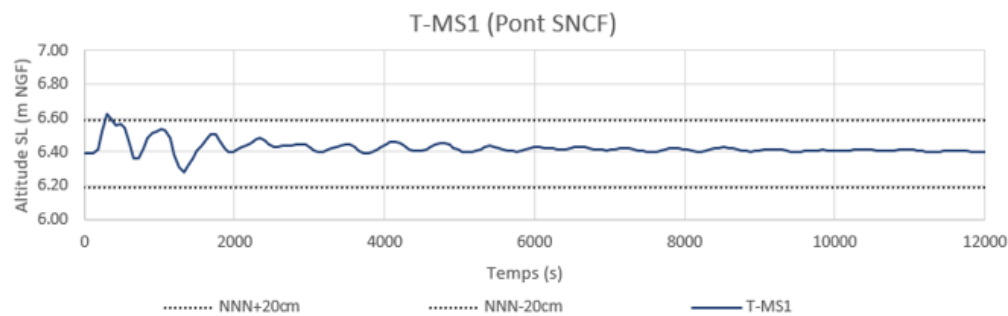
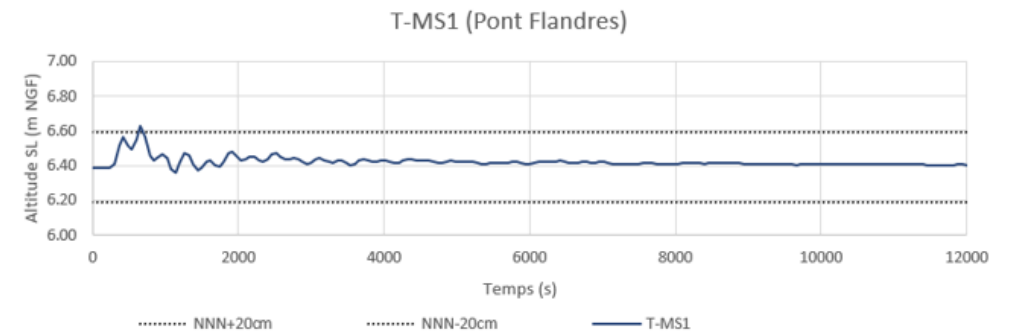
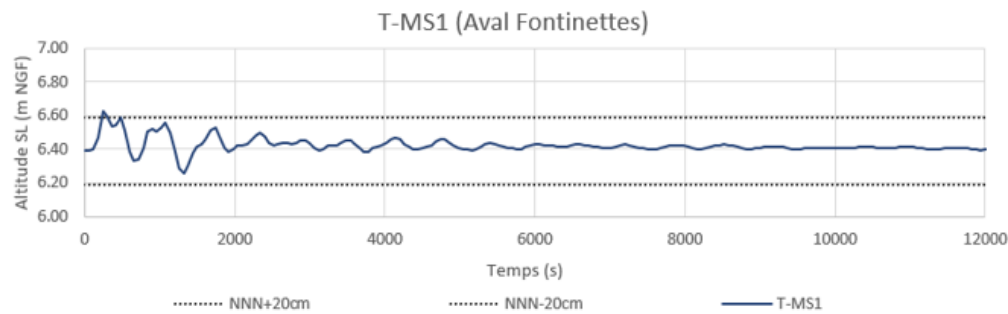
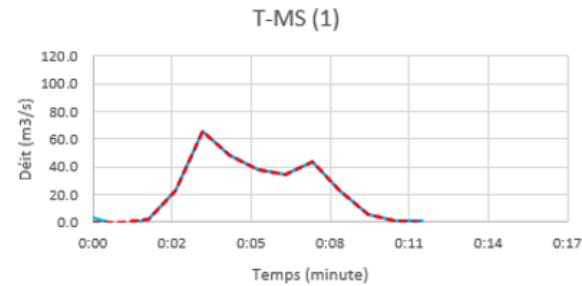


Figure 3-9 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-MS(1)

➤ Hydrogramme type T-MS2 :

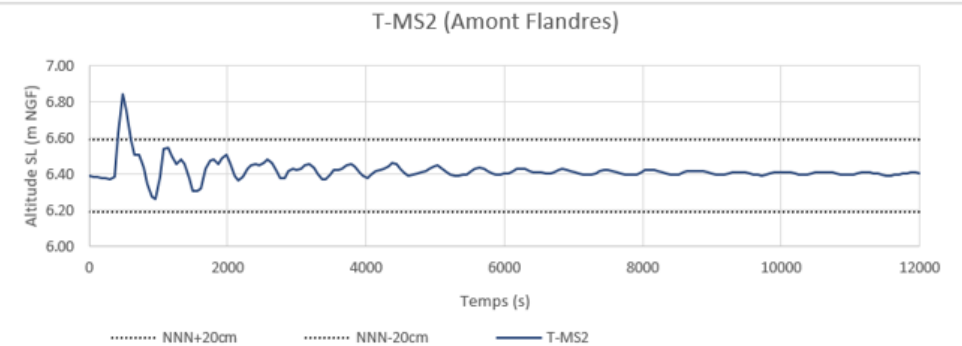
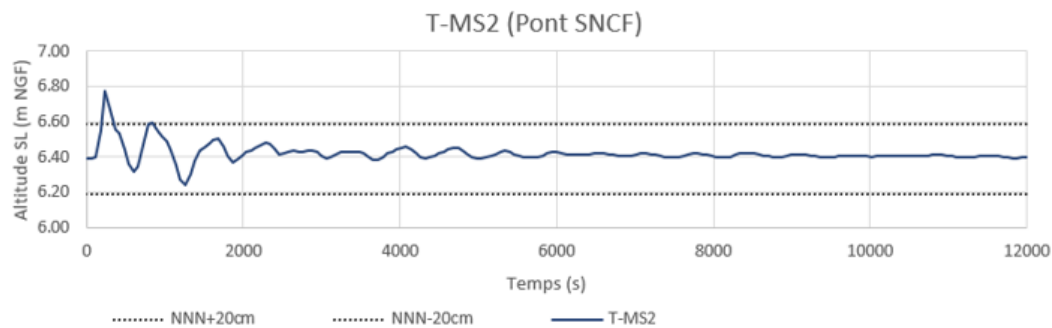
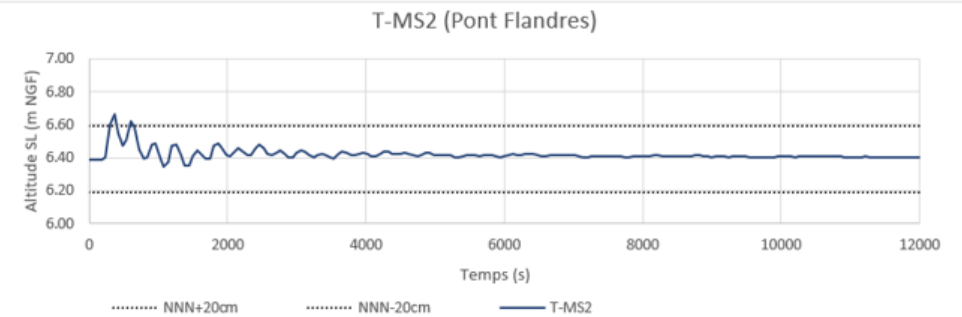
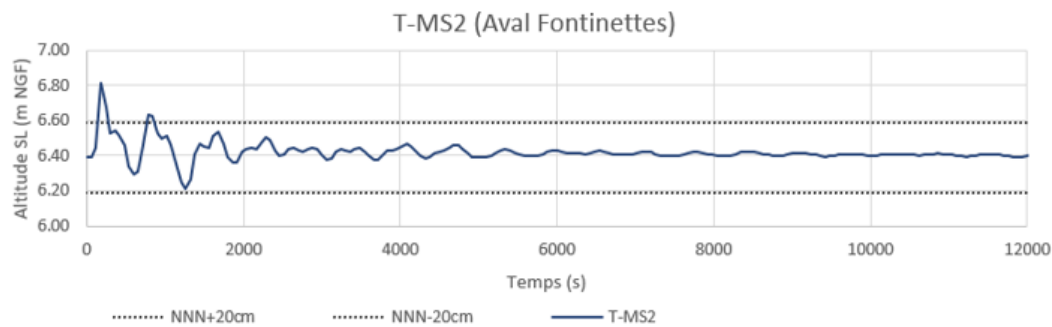
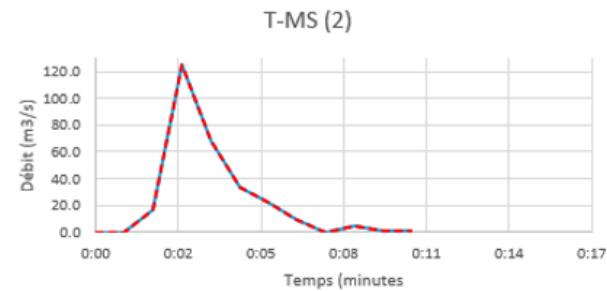


Figure 3-10 : Evolution du niveau d'eau au droit des 4 sondes de niveau, pour l'hydrogramme-type T-MS(2)

3.1.3.2. SOLUTIONS ENVISAGEABLES

Les objectifs ciblés de réduction des effets des intumescences sont :

- Non dépassement de la cote NNN+20 cm au droit des deux ponts (SNCF et Flandres)
- Respect d'une cote minimale compatible avec les contraintes de mouillage des bateaux (3,50 m) sur l'ensemble du canal et en particulier au droit des radiers des têtes d'écluses. On retient à ce stade des études NNN-20cm.

Plusieurs solutions ont été identifiées pour améliorer la gestion de la ligne d'eau dans le bief aval vis-à-vis de la problématique d'intumescences :

- Optimisation des séquences de réglage des vannes pour étaler l'onde de débit de restitution des bassinées au bief aval dans toutes les situations de gestion,
- Abaissement de la cote d'exploitation du bief aval, de manière à disposer d'une marge plus importante vis-à-vis de la cote NNN+20cm,
- Ouvrages de déversement supplémentaires dans le bief.

L'efficacité de ces solutions est évaluée ci-après.

3.1.3.2.1. Optimisation des séquences de réglage des vannes

Comme indiqué précédemment, c'est l'hydrogramme-type T-MS(2) qui apparaît comme le plus pénalisant vis-à-vis de la problématique d'intumescences. Il correspond à un lâcher très brutal de débit qui dépasse les 120 m³/s.

On propose de tester l'efficacité d'un hydrogramme modifié, dont la pointe de débit est étalée.

Le volume relâché reste équivalent à l'hydrogramme de base, mais la vidange se déroule de manière plus progressive. La pointe de débit à 120 m³/s est remplacé par un plateau à 35 m³/s. La durée de vidange, qui était très courte (6 à 7 minutes), nécessite d'être augmentée pour atteindre environ 9 minutes. Elle reste inférieure aux durées de vidange observées sur T-MS (1) par exemple (10 minutes) ou encore B-MS (15 minutes) et n'affecte pas la durée totale d'éclusee.

Plusieurs hydrogrammes modifiés ont été testés (palier à 50 et 40 m³/s) avant d'aboutir à la solution suivante qui donne satisfaction. La mise en œuvre pratique nécessitera de réviser la séquence automatique d'ouverture des vannes de vidange de l'écluse.

Lors de la réunion du 11/03/2022, VNF a indiqué qu'il semblait possible de reproduire un tel hydrogramme, une fois que les capteurs de position des vannes seront mis en service (opération programmée courant juin/juillet 2022 à l'occasion du remplacement des organes de manœuvre des vannes de l'aqueduc à moyen sas).

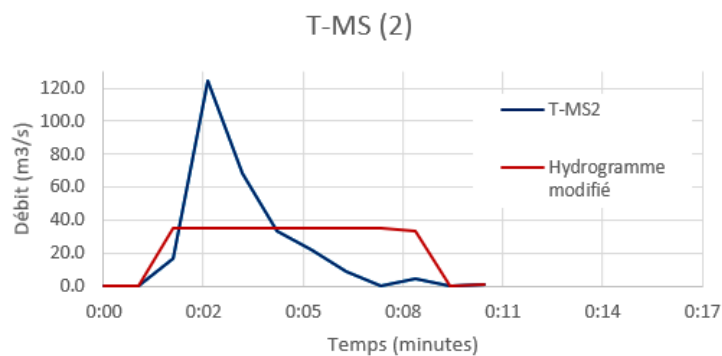
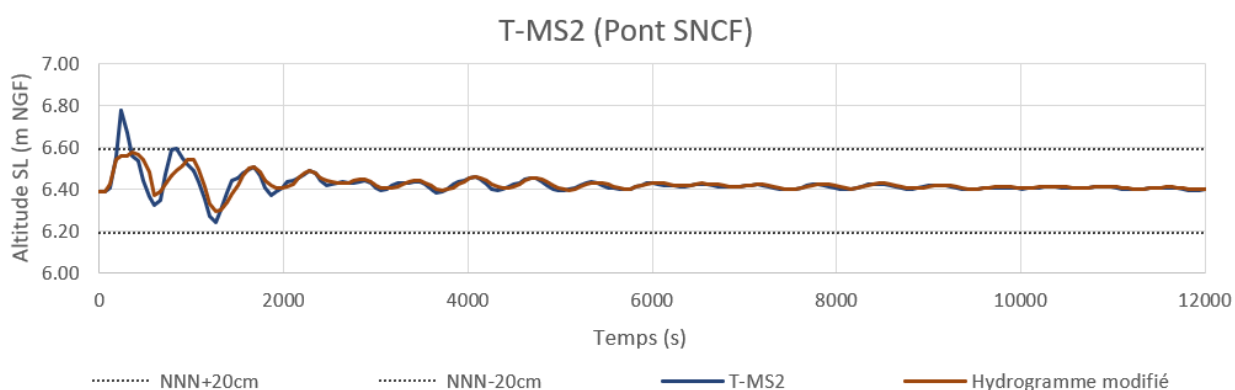
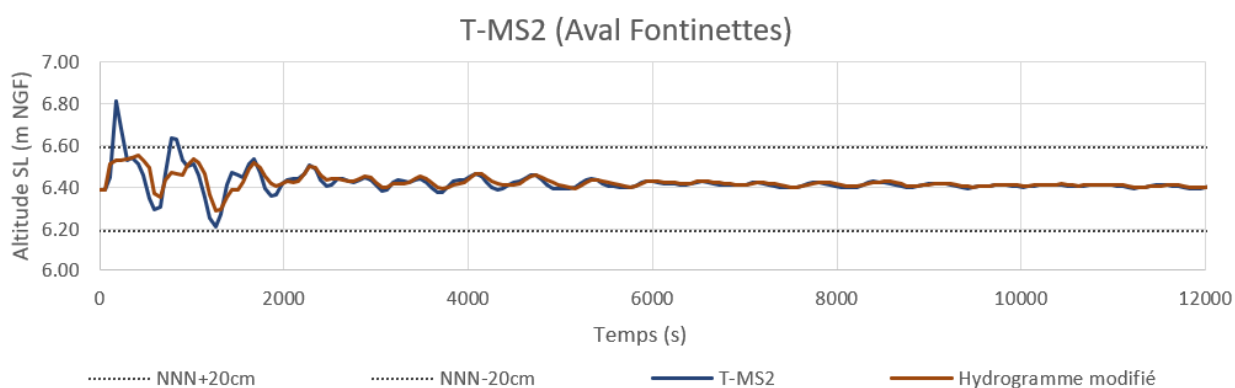
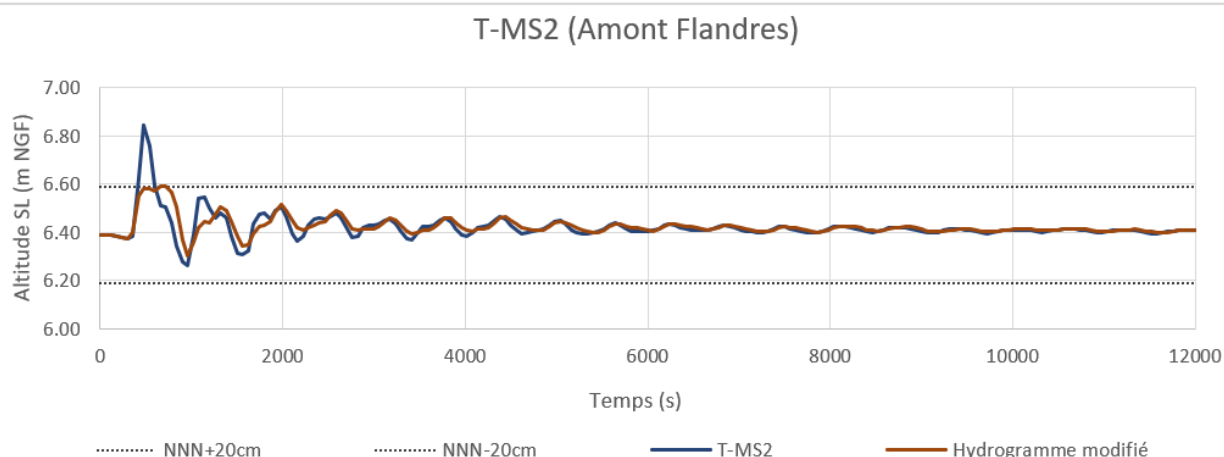
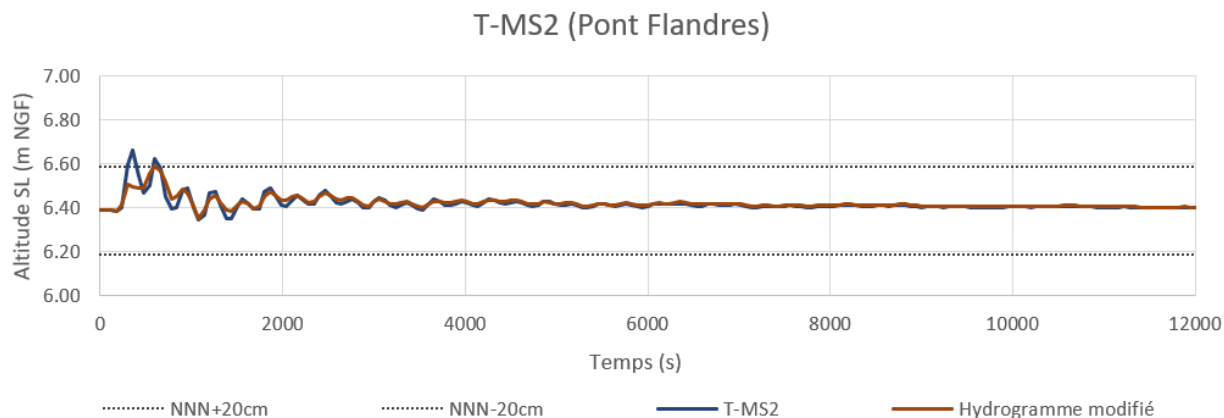


Figure 3-11 : Hydrogrammes T-MS (2) initial (en bleu) et modifié (en rouge)

Les résultats des simulations de restitution au bief aval, avec un plan d'eau initial au NNN à 6,39 NGF, sont donnés en figures suivantes.





**Figure 3-12 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau –
comparaison entre les deux hydrogrammes T-MS(2)**

L'étalement de la pointe de débit permet de réduire l'amplitude du premier train d'onde. Le niveau maximal observé correspond à NNN+20 cm.

Cette solution est ainsi jugée efficace et pourra être rapidement mise en œuvre à faible coût, par reprogrammation des séquences d'ouverture de vanne, réalisée en régie par le service d'exploitation.

3.1.3.2.2. Abaissement de la cote d'exploitation du bief aval

Comme il a été constaté sur les enregistrements analysés en phase 1 de l'étude, le niveau initial du bief Fontinettes -Flandres est généralement réglé quelques centimètres au-dessus du NNN. Ce réglage réduit la tranche disponible pour encaisser les intumescences sans dépassement du niveau de restriction de navigation.

L'utilisation du modèle nous permet de tester ici l'influence d'un abaissement du niveau d'exploitation dans le bief aval. L'hypothèse théorique testée considère une cote initiale dans le bief à NNN-15cm soit 6.24 m NGF.

Cette solution paraît intéressante car elle offre une 'revanche' plus importante par rapport au critère de non dépassement de la cote NNN+20cm (6,59 m NGF).

On considère dans le modèle numérique que les seuils de l'écluse carrée d'Arques sont abaissés à la cote 6.24 m NGF, ce qui permet en théorie de réguler la cote du bief à cette altitude. Le calcul démarre avec un niveau initial dans le bief à 6.24 m NGF.

Les résultats obtenus sont les suivants, pour l'hydrogramme T-MS(2), tel que pratiqué actuellement (pointe à 120 m³/s), qui est le plus pénalisant.

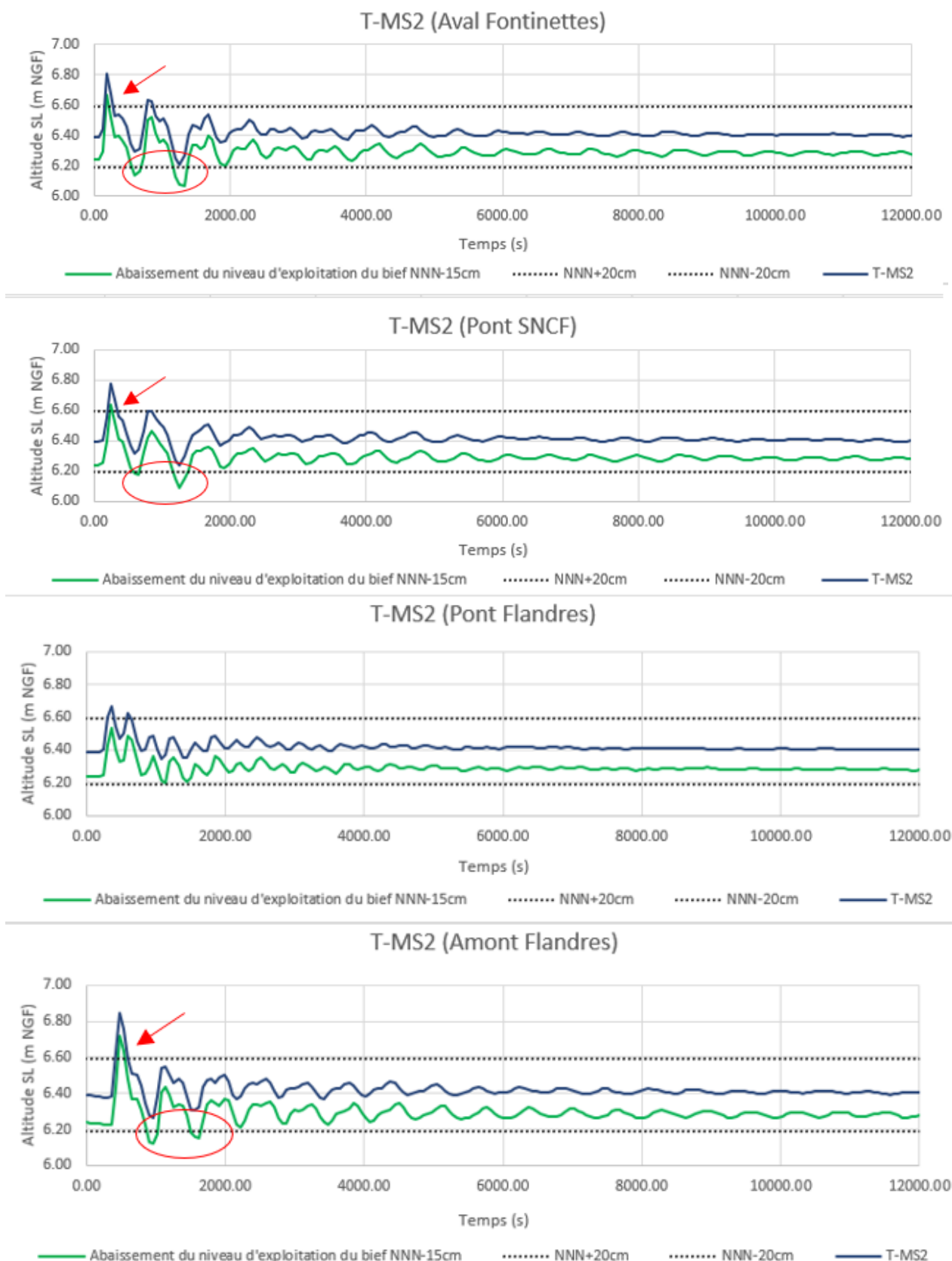


Figure 3-13 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée avec NNN-15cm (en vert)

On observe aucune influence sur la forme du train d'onde, la ligne d'eau a uniquement été translatée de 15 cm vers le bas.

Cette solution ne donne pas satisfaction :

- Des dépassements de la cote NNN+20cm sont observés au droit de 3 sondes, et en particulier au droit des deux ponts (Flandres et SNCF).
- L'abaissement du niveau d'exploitation dans le bief induit par ailleurs un passage sous la cote NNN-20 cm au droit de 3 sondes (niveau minimal de 6.10 m NGF) ce qui n'est pas compatible avec le respect d'un mouillage minimal de 3.5 m sur tout le bief.

Par ailleurs, l'abaissement du NNN induit des contraintes d'exploitation qui apparaissent rédhibitoires. En effet, cette solution se traduit par une réduction du tirant d'eau qui engendre des problèmes de navigabilité notamment pour entrer dans le sas.

3.1.3.2.3. Abaissement de la cote d'exploitation couplé à une optimisation des séquences de réglage des vannes

La solution étudiée ci-après est une combinaison des deux solutions précédentes.

On abaisse le niveau d'exploitation du bief pour augmenter la revanche disponible par rapport à NNN+20cm, ce qui permet d'aboutir à une solution d'hydrogramme moins contrainte que dans la solution du § 3.1.3.2.1.

Ici le débit est plafonné à 40 m³/s. Le volume relâché reste équivalent à l'hydrogramme de base, mais la vidange se déroule de manière plus progressive. La durée de vidange, qui était très courte (6 à 7 minutes), nécessite d'être augmentée pour atteindre moins de 8 minutes. Elle reste inférieure aux durées de vidange observées sur d'autres hydrogrammes type et n'affecte pas la durée totale d'éclusee.

L'abaissement du NNN est limité à 10 cm (au lieu de 15) pour réduire le risque de passer sous la cote NNN-20 cm.

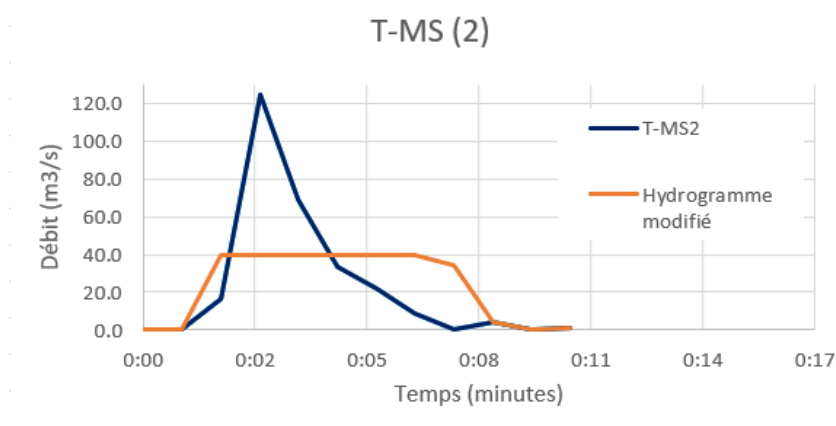


Figure 3-14 : Hydrogrammes T-MS (2) initial (en bleu) et modifié (en orange)

Cette solution donne entière satisfaction. Le critère de non dépassement de la cote NNN+20 cm est respecté, tout comme la contrainte vis-à-vis du mouillage.

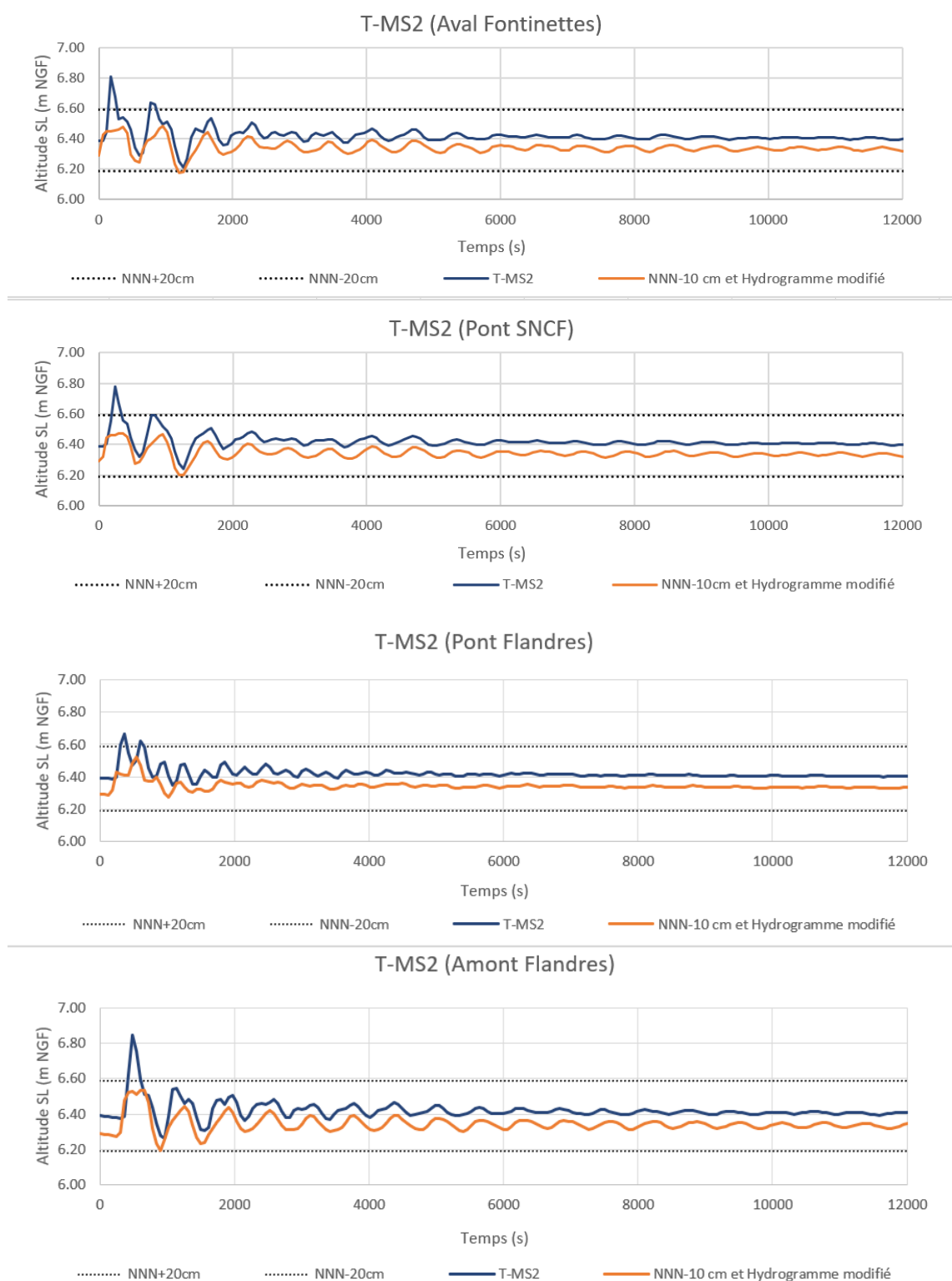


Figure 3-15 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée avec NNN-10 et modification hydrogramme (en orange)

D'autres couples de valeurs ont été testés (par exemple NNN-15 et hydrogramme plateau à 50 m³/s) mais les résultats n'étaient pas totalement satisfaisants (passage sous la cote NNN-20 cm notamment).

3.1.3.2.4. Ouvrages de déversement supplémentaires

La solution envisagée ici consiste à rajouter un déversoir latéral sur le canal. Plusieurs implantations sont envisageables :

- En rive gauche du canal principal, dans la digue en amont de l'écluse de Flandres, pour une restitution vers la Haute Meldyck ;



- Sur l'ancien canal de Neuffossé :
 - Au niveau de l'écluse carrée (entre les deux seuils existants), pour une restitution des débits vers la Basse Meldyck.



- Au niveau de l'écluse de St Bertin

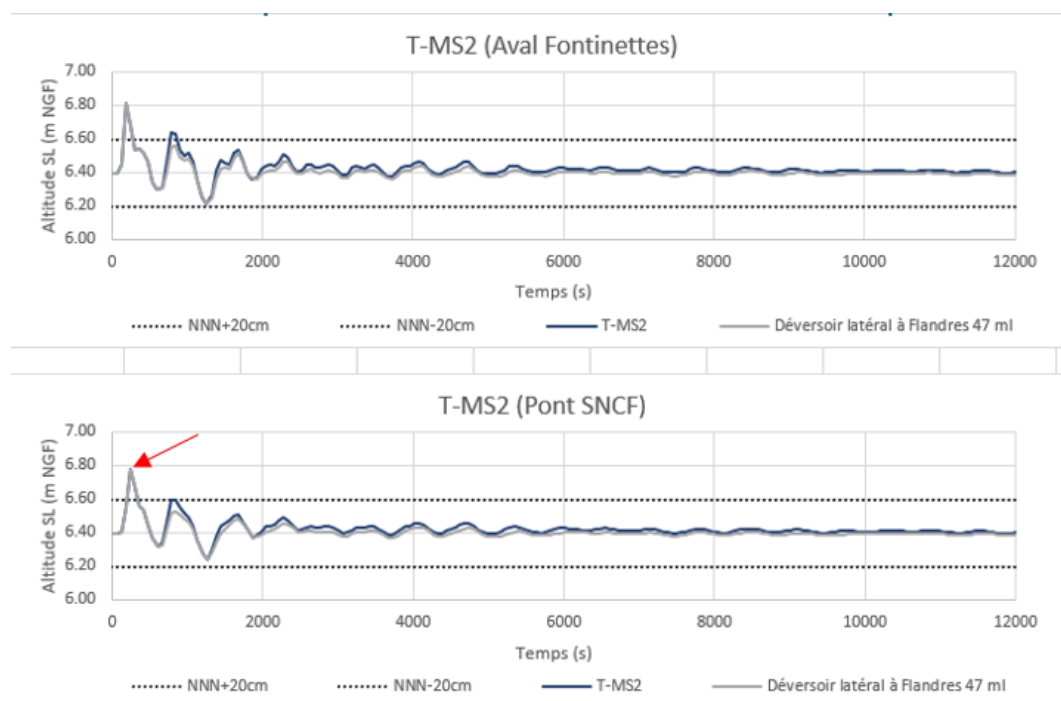


Dans un premier temps, la simulation initiale est reprise en considérant un déversoir latéral de 47 ml implanté sur la berge rive gauche du canal principal en amont de l'écluse de Flandres. Le seuil du déversoir est calé à la cote de NNN (6.39 m NGF).

Les résultats obtenus sont donnés en figures suivantes.

On constate que l'ajout du déversoir n'a aucune influence sur le premier train d'onde observé au droit de 'Aval Fontinettes', 'Pont SCNF' et 'Pont Flandres'. Cette observation est cohérente avec l'implantation de l'ouvrage, en aval des 3 sondes. Or, il a été noté précédemment que c'était ce train d'onde qui était le plus pénalisant. La solution ne semble donc pas adaptée vis-à-vis de la problématique d'intumescence.

Une très faible atténuation est observée sur les ondes suivantes.



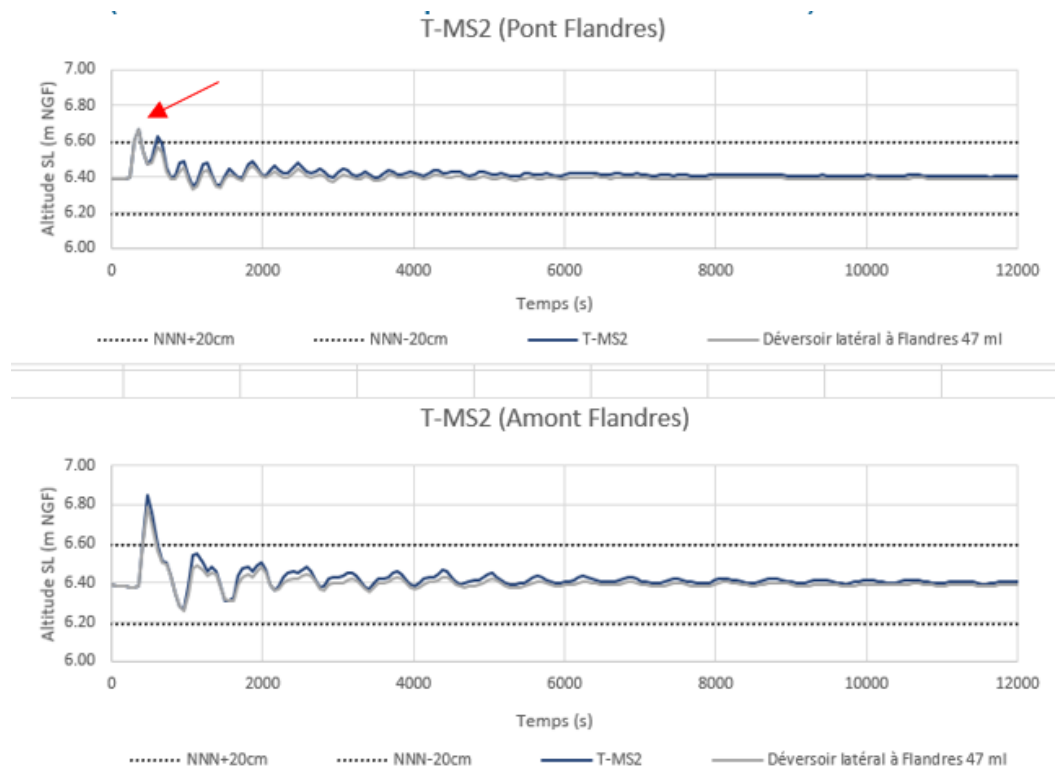
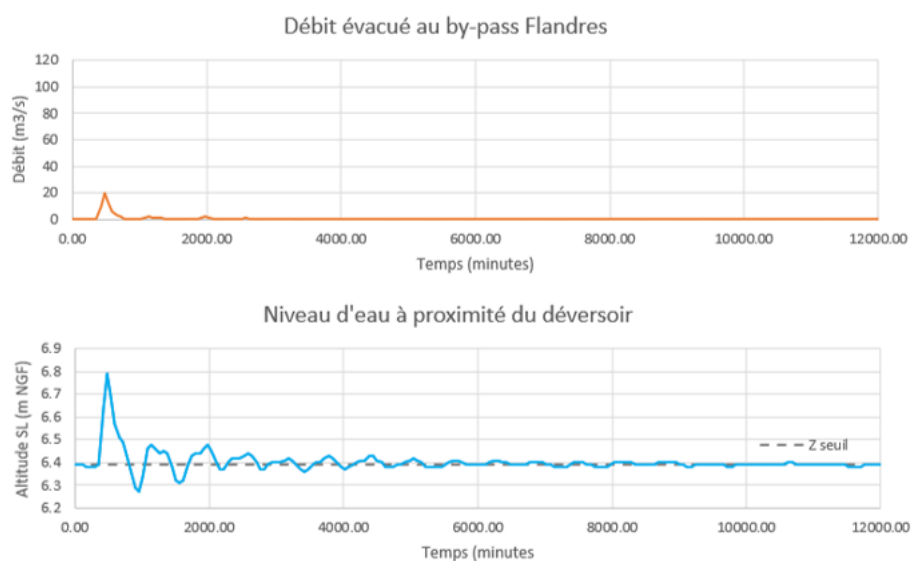


Figure 3-16 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison situation existante (en bleu) et situation projetée (en gris)

On donne ci-après l'évolution du débit et du niveau d'eau au droit du déversoir. On constate que l'ouvrage est sollicité de manière très ponctuelle, au passage de l'onde. Le reste du temps, le débit évacué est très faible voire nul.

Le débit maximal évacué, 20 m³/s, reste relativement faible au regard du débit de pointe de l'hydrogramme entrant (120 m³/s).



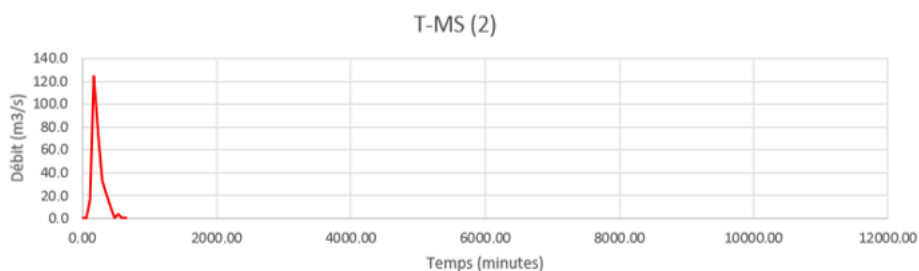


Figure 3-17 : Comparaison des débits, ligne d'eau au droit du seuil

La même démarche est réalisée avec un déversoir supplémentaire à l'écluse carrée. Le linéaire disponible est de l'ordre de 20 m. Les résultats ne sont également pas concluants. L'influence de l'ouvrage sur les intumescences est encore plus réduite que dans la solution précédente, en raison d'un part du linéaire plus faible mais aussi de l'implantation de l'ouvrage en dehors du canal principal sur l'ancien canal de Neuffossé qui n'est pas exposé directement à l'onde d'intumescence.

Le débit maximal évacué est très faible au regard du débit de pointe de l'hydrogramme T-MS (2) : 4,6 m³/s.

Compte tenu de ces résultats, il n'est pas jugé pertinent d'accroître la débitance des déversements sur l'écluse carrée d'Arques, ni au niveau de l'écluse de St Bertin (où les possibilités d'aménagement sont limitées) qui se situe trop loin de la zone d'étude pour avoir une influence sur les fluctuations rapides de niveau du bief principal.

3.1.3.3. CONCLUSIONS

Une optimisation des séquences de réglage des vannes de restitution des Fontinettes apparaît comme la solution la plus efficace pour répondre à la problématique d'intumescences.

La révision des séquences automatiques d'ouverture des vannes doit être réalisée pour l'ensemble des lâchers réalisés à Fontinettes, que ce soit des lâchers totaux ou partiels, à grand, moyen et petit sas.

L'abaissement du bief aval couplé avec une optimisation des séquences de réglage des vannes est une mesure intéressante, facile à réaliser. La marge de manœuvre disponible semble toutefois faible (moins de 10 cm d'abaissement) compte tenu des contraintes de navigation qui imposent également de ne pas passer sous la cote NNN-20 cm. A minima, il est recommandé de régler effectivement le niveau moyen du bief au NNN et pas quelques centimètres au-dessus, comme constaté sur les mesures.

L'ajout de déversoirs sur la partie aval du bief Fontinettes-Flandres ne permet pas de gérer la problématique des intumescences au droit des ponts et même en extrémité dans la zone de réflexion d'onde à l'écluse de Flandres. Ces ouvrages, à surface libre, n'ont pas un fonctionnement efficace pour écrêter les ondes de courtes durées et sont mal situés.

3.1.4. Régulation du niveau d'eau moyen dans le bief

3.1.4.1. SITUATION ACTUELLE

Au-delà de la gestion pure de la problématique des intumescences générées sur le bief, on constate que le niveau moyen du bief varie au fil de la journée en fonction de la navigation et du déséquilibre entre les volumes entrants issus de l'écluse des Fontinettes et les volumes sortants par l'écluse de Flandres et les déversoirs. Ainsi, à certains moments de la journée, le niveau moyen se situe nettement au-dessus (ou au-dessous) du NNN, ce qui pénalise encore plus la gestion du bief au regard des sur-hauteurs d'intumescences et de l'objectif de non dépassement de la cote NNN+20 cm.

Il apparaît donc nécessaire de trouver des solutions qui permettent de réguler le niveau moyen dans le bief en parallèle des actions de réduction des intumescences vues précédemment.

Pour cette analyse, on raisonne sur la base d'une journée complète de navigation plutôt que sur un hydrogramme type car c'est l'accumulation des éclusées au fil de la journée qui induit le déséquilibre de volume sur le bief.

Le tableau suivant donne le bilan des volumes théoriques entrants et sortants respectivement au niveau des écluses de Fontinettes et Flandres au cours de la journée du 11 juin 2021.

Tableau 1 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres

Bassinée n°	Vidange à Fontinettes (hydrogramme type)	Volume total (théorique) M3	Volume restitué au bief aval (théorique) M3	Volume évacué à Flandres (théorique) M3	Bilan de volume ($V_{Fontinettes} - V_{Flandres}$) M3
1	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0
2	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3
3	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3
4	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3
5	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0
<i>Fausse bassinée à Flandres</i>			0.0	-7955.0	-7 955.0
<i>Fausse bassinée à Flandres</i>			0.0	-7955.0	-7 955.0
6	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3
7	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0
8	T-GS	25 074	25 074.0	-7 955.0	17 119.0
9	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0
10	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0
11	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0
12	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0
13	T-PS	8 236	8 236.0	-7 955.0	281.0
<i>Fausse bassinée à Flandres</i>			0.0	-7955.0	-7 955.0
Bilan volume			148 186.7	-127 280.0	20 906.7

Il est à noter qu'une légère distorsion existe entre ces volumes théoriques et les volumes réellement observés le 11 juin 2021 (cf. §3.1.2), cela s'explique par des volumes de bassinées qui ne sont pas scrupuleusement égaux entre deux bassinées de même type. Toutefois, les constats restent valables quels que soient les volumes considérés (théorique ou réel) :

- Seules les bassinées de type B-GS (ou T-PS) sont équilibrées, ce qui paraît cohérent compte tenu du fait que l'écluse des Flandres a été dimensionnée sur la base d'un fonctionnement efficace de l'étang de Batavia pour absorber 2/3 du volume de la bassinée ;
- Les bassinées de type T-GS conduisent logiquement au déséquilibre de volume le plus important (+17 119 m³), suivies par les T-MS (+8 883 m³) ;

- Les bassinées de type B-MS induisent un déficit de volume dans le bief (-2 342 m³), le volume d'une bassinée à Flandres étant supérieur au volume restitué à moyen sas par Fontinettes lorsque l'étang de Batavia est utilisé ;
- Le bilan des volumes entrant et sortant du bief au droit des 2 écluses n'est pas équilibré, et ce malgré la réalisation de 3 fausses bassinées par l'exploitant ;
- Toutefois, en fin de journée de navigation, le niveau initial du bief est globalement retrouvé, et ce malgré le déséquilibre de volume. Cela s'explique par la contribution des déversoirs sur le bief. *Il serait intéressant de voir avec VNF si la gestion pratiquée du bief tient compte des volumes évacués par les déversoirs. Cela paraît difficilement réalisable compte tenu des difficultés à prévoir sur la journée l'évolution du niveau moyen dans le bief aval.*

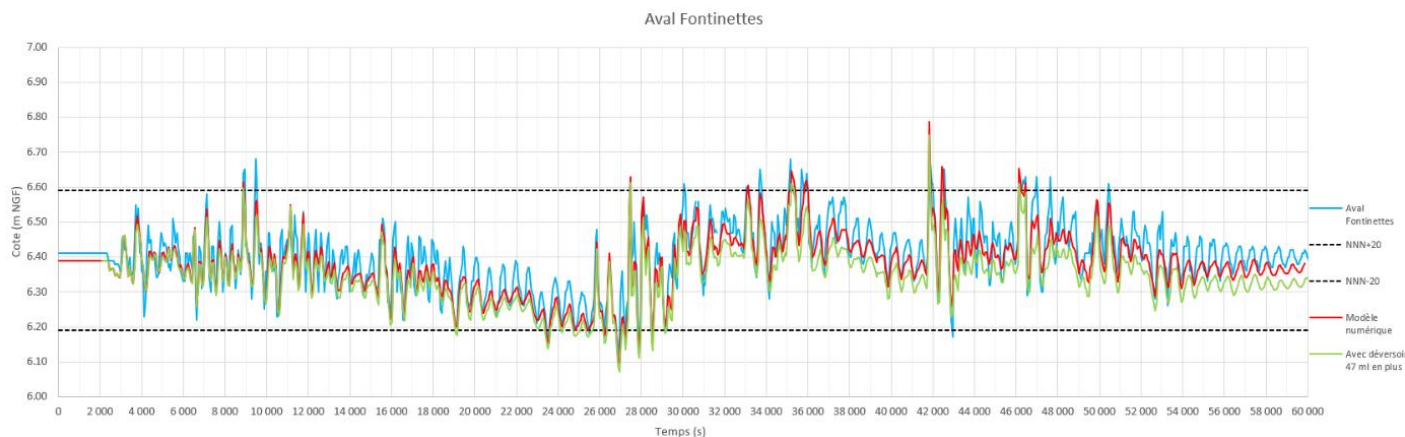
Plusieurs solutions ont été envisagées en phase 1 pour améliorer la situation :

- Déversoir supplémentaire pour améliorer la régulation du niveau moyen dans le bief aval ;
- Ouvrage de by-pass de l'écluse des Flandres, pour permettre une régulation plus fine des volumes sur le bief.

3.1.4.2. OUVRAGE DE DEVERSEMENT SUPPLEMENTAIRE

Le modèle du 11 juin 2021 est mis à jour pour tenir compte de l'ajout d'un déversoir supplémentaire en amont rive gauche de l'écluse de Flandres (même configuration qu'au § 3.1.3.2.4, déversoir de 47 ml, calé à la cote 6.39 m NGF) avec décharge vers la Basse Meldyck voisine.

Les résultats obtenus sont les suivants (courbe verte à comparer au modèle numérique en rouge et chronique réelle en bleu)



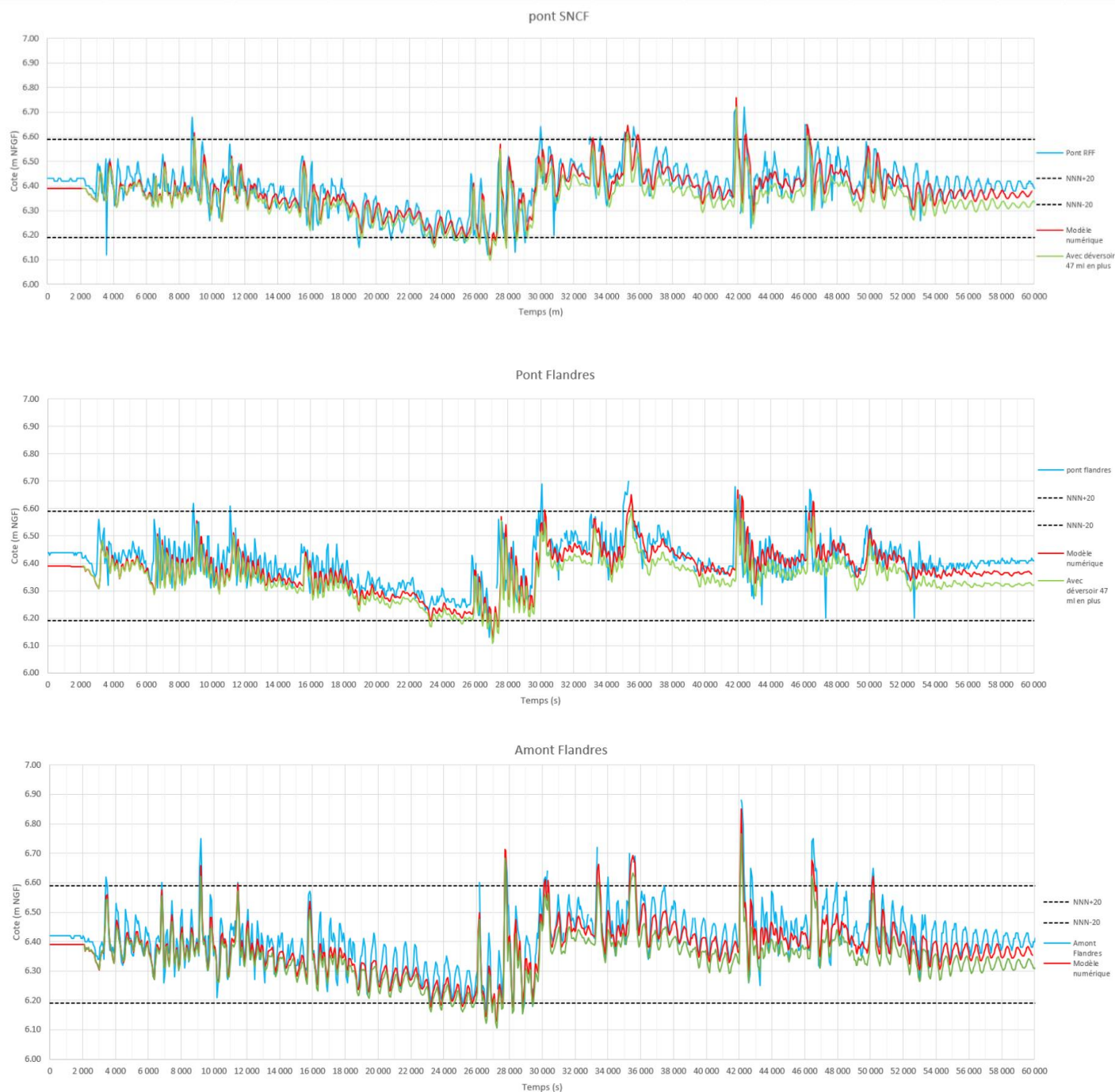


Figure 3-18 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (bleu – chronique réelle / rouge – simulation) et la solution projetée (vert – déversoir supplémentaire de 47 ml)

Cette simulation met en évidence que l'ajout d'un déversoir supplémentaire sur le bief ne permet pas de réguler efficacement le niveau d'eau dans le bief au cours de la journée. On retrouve comme dans l'état initial un déficit de volume entre 18 000 s et 26 000 s et un excédent de volume de 26 000 à 30 000 s, ce dernier étant très pénalisant vis-à-vis de la problématique des intumescences.

Le niveau d'eau en fin de journée termine un peu plus bas que dans la simulation de l'état initial (autour de 6,32 m NGF).

3.1.4.3. BY-PASS DE L'ECLUSE DES FLANDRES

On envisage dans cette solution la réalisation d'une conduite vannée en by-pass de l'écluse de Flandres, pour réguler le niveau d'eau dans le bief. Cette solution présente également l'avantage d'assurer la continuité de l'eau qui passe par le by-pass de Fontinettes quand il est en service (on s'affranchit des fausses bassinées à Flandres). Il évite de plus les impacts sur l'environnement externe à la voie d'eau (pas de rejet supplémentaire vers la Basse Meldyck).

Les solutions d'ouvrage à surface libre ne sont pas adaptées comme le montre la simulation précédente (contribution trop ponctuelle, débitance limitée à faible charge, pas de réglage possible) pour réguler l'équilibre des volumes du bief.

L'ouvrage prendra donc la forme d'un ouvrage fonctionnant en charge avec une prise d'eau dans le bief Fontinettes-Flandres en amont de l'écluse de Flandres et une restitution dans le bief Flandres-Watten en aval de l'écluse. L'ouvrage pourra soit traverser le génie civil de l'écluse, soit cheminer dans le remblai adossé contre les voiles et les massifs en béton de l'écluse, soit contourner l'écluse sous le parking et la rue des Alpes en profitant de la dénivelée. Le choix de la solution est à déterminer en fonction des contraintes technico-économiques et fonctionnelles du site.

L'ouvrage de by-pass est composé :

- D'un ouvrage d'entonnement, équipé d'une vanne
- Une conduite présentant une longueur d'environ 172 m, qui correspond à la longueur de l'écluse des Flandres. Le fil d'eau amont sera calé autour de la cote 3.5 m NGF et le fil d'eau aval autour de la cote -0.5 m NGF.
- Un ouvrage de restitution.

La courbe suivante donne, en fonction de son diamètre, la débitance d'une conduite de 172 m de long.

Les hypothèses suivantes ont été considérées dans le calcul.

- Niveau amont : 6.39 m NGF
- Niveau aval : 2.22 m NGF
- Coefficient de Strickler : compris entre 75 (conduite en béton) et 90 (conduite en acier ou PEHD)
- Coefficient de perte de charge à l'entrée : 0.6 (entonnement + vanne)
- Coefficient de perte de charge en sortie : 1

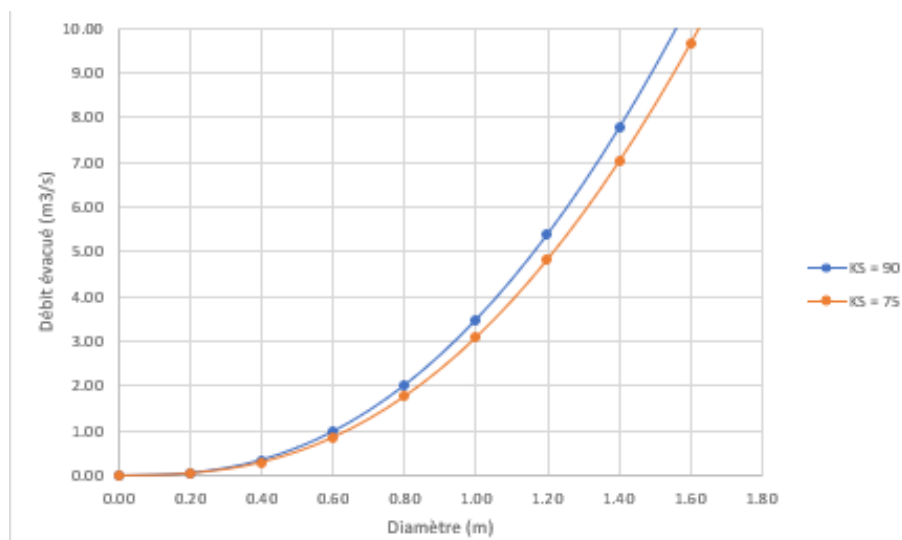


Figure 3-19 : By-pass, Débitance en fonction du diamètre de la conduite

On constate qu'une conduite de 1 m de diamètre permettrait d'évacuer au moins 3 m³/s avec les niveaux de navigation. Cette hypothèse est retenue dans la suite de la modélisation. Elle correspond d'ailleurs au by-pass de l'écluse des Fontinettes.

Une régulation du by-pass basée sur le niveau d'eau observé dans le bief n'est pas jugée pertinente en raison des oscillations constatées sur ce bief, qu'il serait très difficile de filtrer (moyenne glissante sur plusieurs pas de temps).

La régulation proposée ici reste théorique et correspond à un ré-équilibre à chaque sassée du bilan de volume entre les écluses de Fontinettes et de Flandres. Dans ces conditions, il n'apparaît plus nécessaire de réaliser de fausses bassinées à Flandres.

Ainsi, pour chaque restitution de débit à Fontinettes est associée une ouverture du by-pass. Les durées d'ouverture sont adaptées en fonction du type de sassées enclenchées (avec ou sans l'étang de Batavia, à petit, moyen ou grand sas).

Le tableau récapitule le fonctionnement proposé pour le by-pass en prenant pour exemple la journée du 11 juin 2021

Tableau 2 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres, avec la solution by-pass 3 m³/s – Journée du 11/06/2021

Eclusées	Vidange à Fontinettes (hydrogramme type)	Volume total (théorique) (m³)	Volume restitué au bief aval (théorique) (m³)	Volume évacué à Flandres (théorique) (m³)	Bilan de volume à équilibrer ($V_{Fontinettes} - V_{Flandres}$) (m³)	Durée d'ouverture du by-pass (minutes)	Volume évacué par le by-pass (m³)
1	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	2	-360
2	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
3	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
4	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
5	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	2	-360
6	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
7	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	49	-8 820
8	T-GS	25 074	25 074.0	-7 955.0	17 119.0	95	-17 100
9	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	2	-360
10	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	49	-8 820
11	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	49	-8 820
12	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	49	-8 820
13	T-PS	8 236	8 236.0	-7 955.0	281.0	1	-180
Bilan volume			148 186.7	-103 415.0	44 771.7	-	-53 640.0

Le reliquat de volume (- 8 868.3 m³) s'explique par la réalisation de 4 bassinées B-MS qui induisent un déficit de volume, le volume d'une bassinée à Flandres étant supérieur au volume restitué à moyen sas par Fontinettes lorsque l'étang de Batavia est utilisé. Le principe simple de calcul retenu en première approche ne prend pas en compte cet aspect.

Les conditions imposées au modèle sont les suivantes :

- Courbe verte : prélèvement de débit pour simuler l'ouverture du by-pass
- Courbe bleue : hydrogrammes reconstitués à Flandres, sans les fausses bassinées
- Courbe orange : hydrogrammes reconstitués à Fontinettes (inchangés)

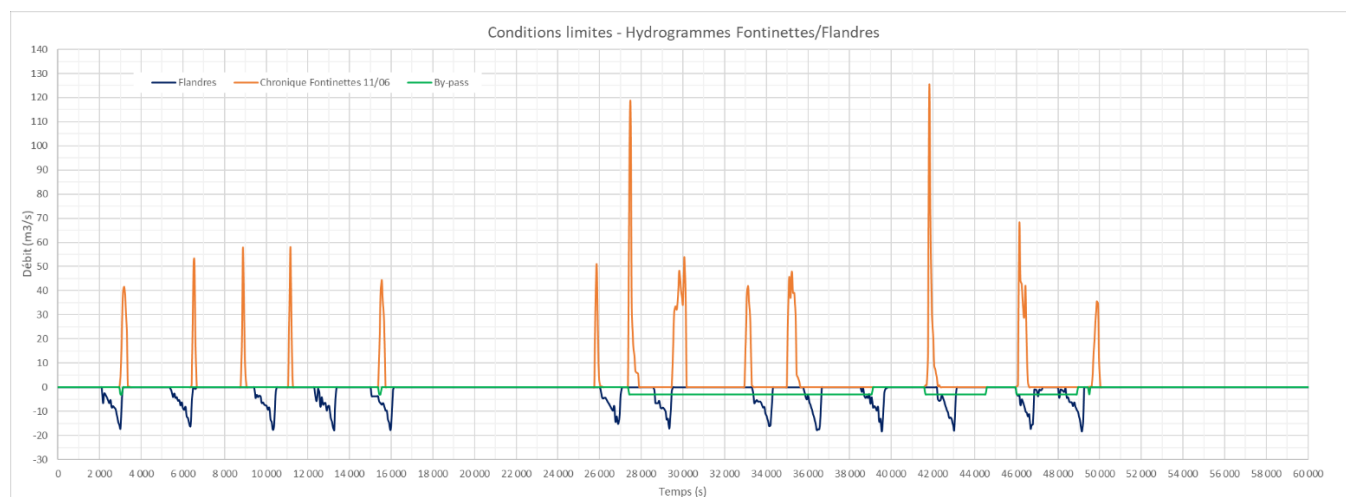


Figure 3-20 : Conditions limites imposées dans le modèle numérique (by-pass $3\text{m}^3/\text{s}$) – journée du 11/06/2021

Les résultats obtenus sont les suivants (en rouge, modèle numérique de l'état existant, en gris, modèle numérique avec by-pass).



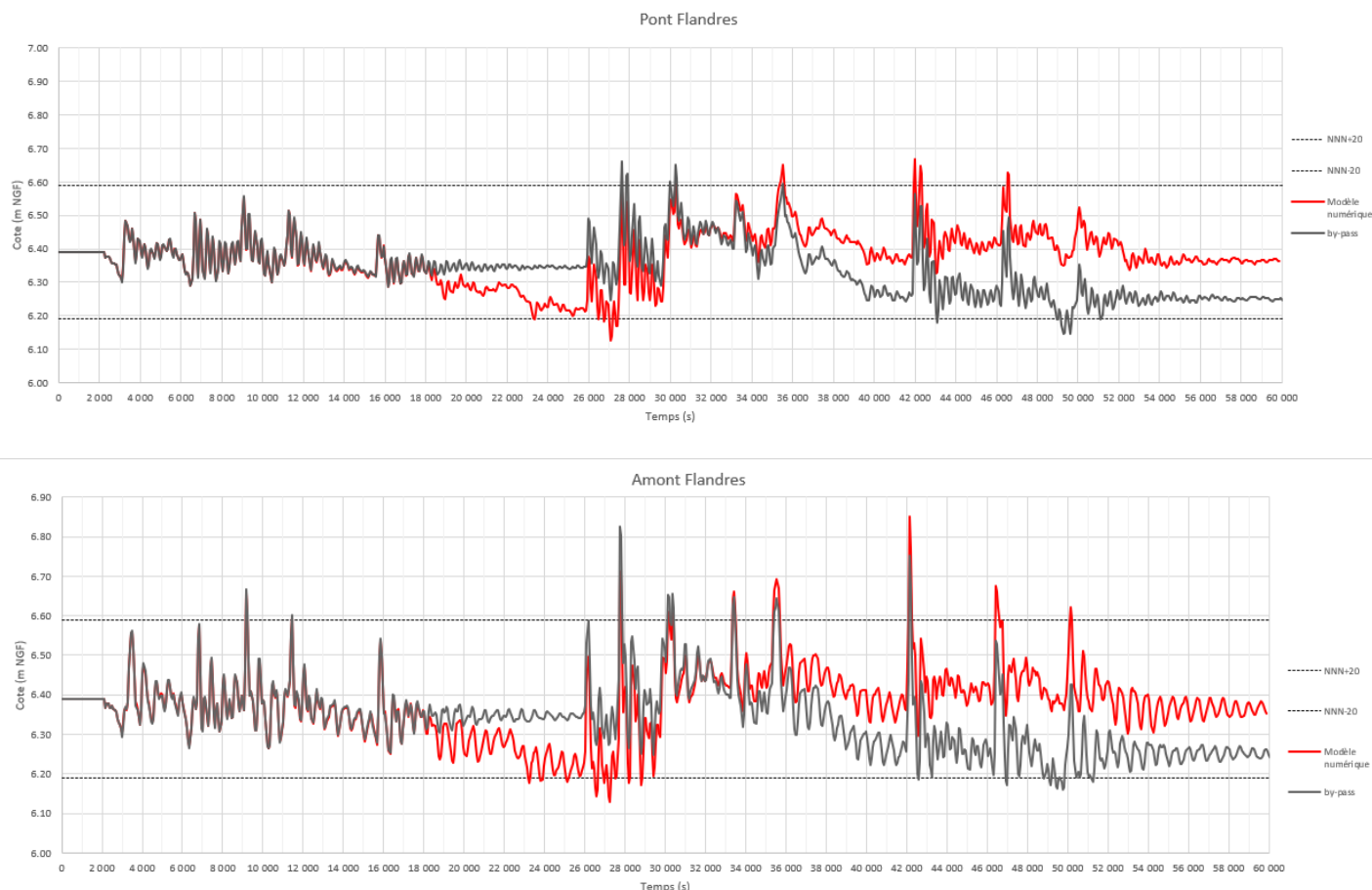


Figure 3-21 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (rouge – simulation) et la solution projetée (gris – by-pass à Flandres 3 m³/s)

La solution by-pass, telle que déployée ici, ne permet pas de retrouver en fin de journée de navigation le niveau initial du bief, même si les volumes entrants en provenance de Fontinettes et sortant à Flandres (via sasses et by-pass) ont été équilibrés. Cela s'explique par un volume déversé (17 000 m³) qui vient déséquilibrer le bilan ciblé et qui conduit à perdre de l'eau.

Le bilan de volume au cours de la journée est donné ci-après.

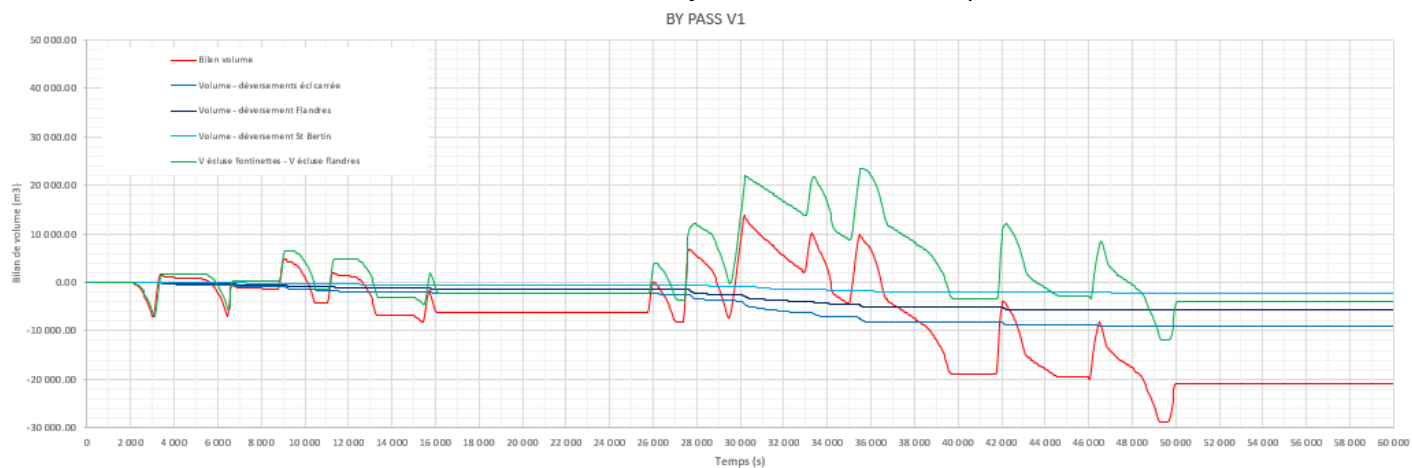


Figure 3-22 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021 (avec mise en œuvre du by-pass à Flandres – 3m³/s)

Par ailleurs, on constate que la suppression des fausses bassinées réalisées entre $t = 18\,000$ s et $26\,000$ s ne donne pas de bons résultats. La bassinée réalisée à Fontinettes autour des $26\,000$ s induit un dépassement de la cote NNN+20 alors que ce n'était pas le cas sur l'état initial. *Une solution à envisager pourrait être de déclencher l'ouverture du by-pass en avance, sur la base d'informations d'arrivée de bateaux en amont de l'écluse des Fontinettes.*

La solution de by-pass avec les premières hypothèses de dimensionnement et de fonctionnement retenues ici consiste à équilibrer le bilan de volume à chaque sassée. Or, on constate que son efficacité est remise en question lorsque le trafic est soutenu et/ou qu'il concerne des grands sas. Il faut en effet ouvrir le by-pass 95 minutes pour équilibrer une bassinée de type T-GS. Le bilan n'a pas le temps d'être équilibré entre $t = 30\,000$ et $34\,000$ s lorsque les bassinées s'enchainent. En conséquence, on ne revient pas au niveau NNN entre 2 bassinées, ce qui est pénalisant vis-à-vis de la problématique d'intumescences.

Il est donc nécessaire de revoir à la hausse le dimensionnement du by-pass pour augmenter son efficacité et réduire la durée de transit du volume. A titre d'exemple, si on double le débit de dimensionnement (conduite $\phi 1300$ mm), la durée d'ouverture du by-pass est divisée par 2.

Pour le test de ce dimensionnement, les conditions imposées au modèle sont les suivantes.

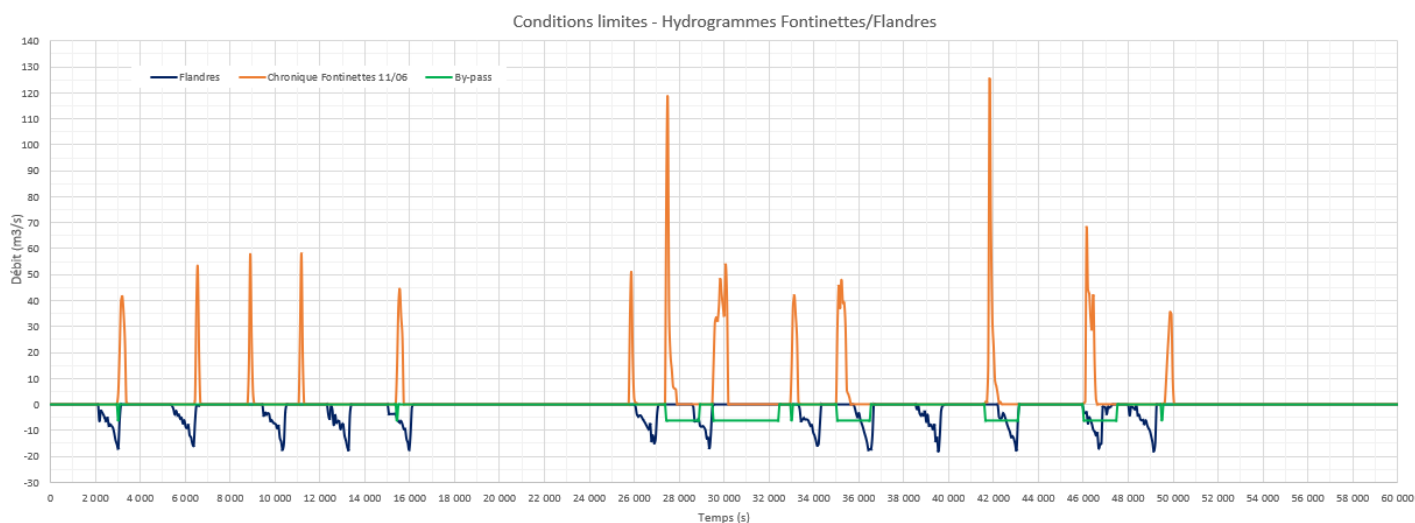


Figure 3-23 : Conditions limites imposées dans le modèle numérique (by-pass $6\text{ m}^3/\text{s}$)

Tableau 3 : Bilan des volumes entrant et sortant aux écluses de Fontinettes et Flandres, avec la solution by-pass 6 m³/s – journée du 11/06/2021

Eclusées	Vidange à Fontinettes (hydrogramme type)	Volume total (théorique) (m³)	Volume restitué au bief aval (théorique) (m³)	Volume évacué à Flandres (théorique) (m³)	Bilan de volume à équilibrer ($V_{\text{Fontinettes}} - V_{\text{Flandres}}$) (m³)	Durée d'ouverture du by-pass (minutes)	Volume évacué par le by-pass (m³)
1	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	1	-360
2	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
3	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
4	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
5	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	1	-360
6	B-MS	16 838	5 612.7	-7 955.0	-2 342.3	Non équilibrable	0
7	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	25	-9 000
8	T-GS	25 074	25 074.0	-7 955.0	17 119.0	48	-17 280
9	B-GS	25 074	8 358.0	-7 955.0	403.0	1	-360
10	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	25	-9 000
11	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	25	-9 000
12	T-MS	16 838	16 838.0	-7 955.0	8 883.0	25	-9 000
13	T-PS	8 236	8 236.0	-7 955.0	281.0	1	-360
Bilan volume			148 186.7	-103 415.0	44 771.7	-	-53 720.0

Les résultats obtenus sont illustrés ci-après (en rouge, modèle numérique de l'état existant, en gris, modèle numérique avec by-pass de 3 m³/s, en bleu, modèle avec by-pass de 6 m³/s).

Le volume total déversé passe de 17 000 m³ (dans la solution de by-pass précédente) à 10 500 m³. Cela s'explique par une diminution de la durée au cours de laquelle le niveau d'eau dans le bief est supérieur aux cotes de déversement.

Ce dimensionnement nécessiterait une conduite de diamètre de l'ordre de 1,3 m qui reste dans une gamme d'aménagement réaliste en contournement de l'écluse de Flandres.

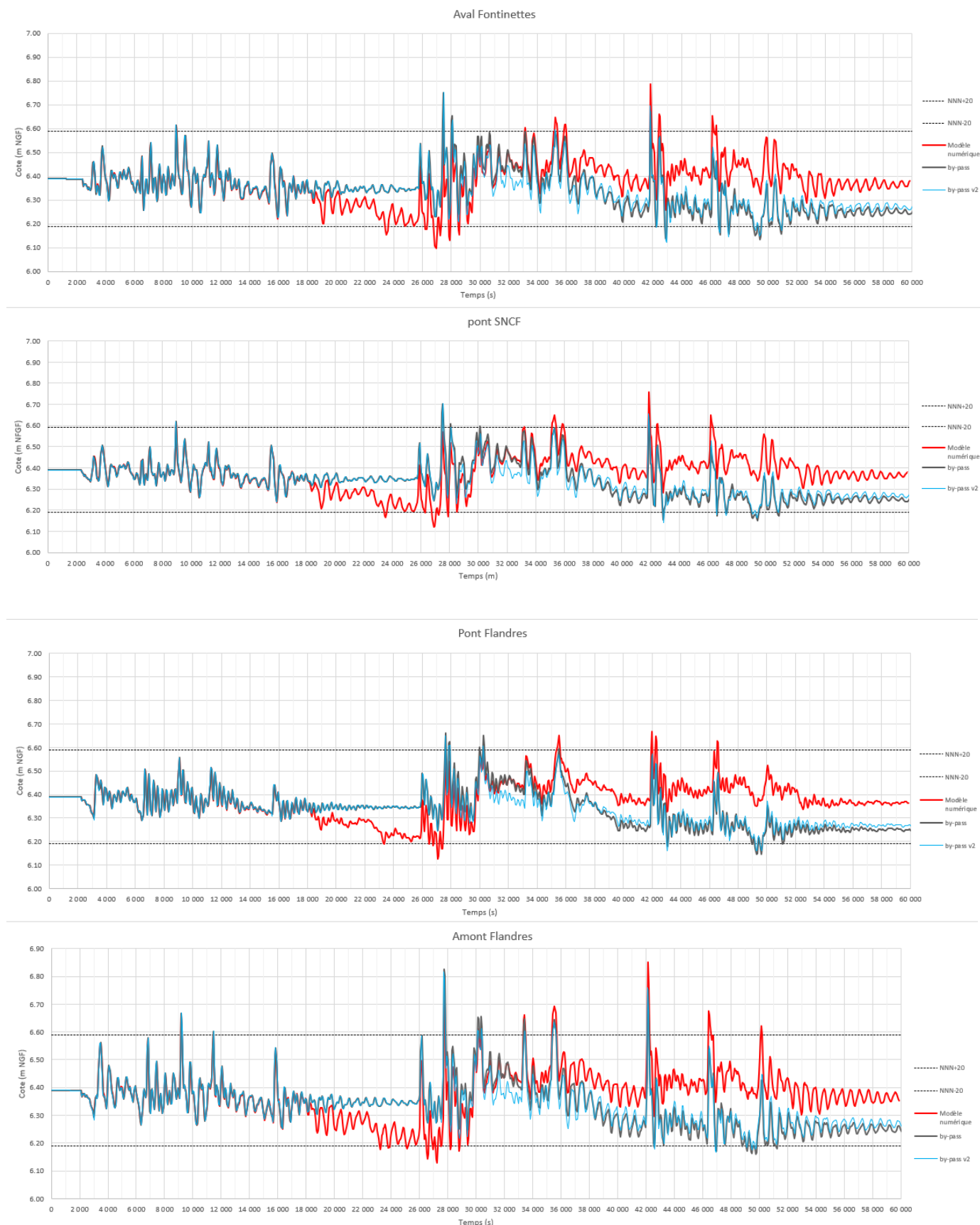
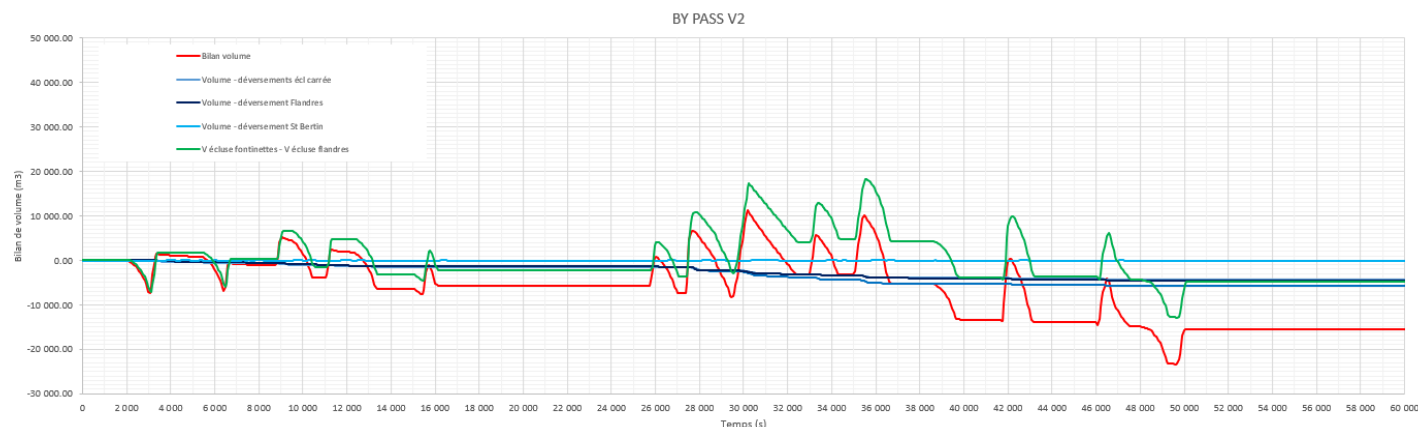


Figure 3-24 : Evolution de la ligne d'eau au droit des 4 sondes de niveau – comparaison entre l'état initial (rouge – simulation) et la solution projetée (en gris :by-pass à Flandres 3 m³/s / en bleu :by-pass 6 m³/s)



**Figure 3-25 : Evolution des volumes et bilans de volume au cours du 11 juin 2021
(avec mise en œuvre du by-pass à Flandres – 6m³/s)**

Les résultats montrent que la modification apportée sur le dimensionnement du by-pass permet d'équilibrer le bilan de volume entre $t = 30\,000$ et $34\,000$ s. On retrouve un niveau dans le bief à NNN (voire plus bas) avant chaque bassinée à Fontinettes. Toutefois, cette action ne suffit pas à elle seule pour solutionner la problématique du dépassement temporaire de la cote NNN lors des sassées.

Elle doit être couplée à une modification de la séquence de manœuvre des vannes à moyen sas et petit sas pour limiter les ondes d'intumescences (cf. §3.1.3.2.1).

3.2. Conclusion sur les actions de gestion du bief aval

L'analyse et la modélisation des actions envisageables pour améliorer la gestion des niveaux du bief Fontinettes-Flandres a permis de mettre en évidence l'intérêt et l'efficacité relative de quatre axes de gestion :

- L'étalement des hydrogrammes restitués dans le bief à l'écluse des Fontinettes pour toutes les situations de sassée. **Cette action est très efficace** pour réduire les phénomènes d'intumescences et éviter les dépassements du niveau de restriction au franchissement du pont RFF et du pont routier, dès lors que le niveau moyen du bief est correctement régulé. **La mise en œuvre de cette action nécessite de revoir et reprogrammer les séquences d'ouverture des vannes pour chaque type de sassée**, ce qui devrait être réalisé ou initié par VNF dans l'année 2022 après modernisation des vannes sur l'aqueduc de l'écluse.
- La régulation effective du niveau du Bief au NNN ou à NNN-10 cm. Le retour à un niveau ordinaire au NNN ou légèrement en dessous du NNN présente une **efficacité modérée mais est recommandé en accompagnement** de la modification de gestion des vannes des Fontinettes, pour limiter les incidences des intumescences.
- L'accroissement des volumes évacués par augmentation des linéaires de déversoirs pour écrêter les volumes excédentaires dans le bief. **Cette action est peu efficace** que ce soit pour réduire les sur-hauteurs des intumescences ou pour réguler dynamiquement le volume du bief à chaque éclusée, en raison du positionnement très aval des ouvrages facilement aménageables (à l'écluse carrée d'Arques, à l'écluse Saint Bertin, en amont rive gauche de l'écluse de Flandres) et du fonctionnement statique par surverse. **Les actions d'augmentation des déversoirs ne sont pas pertinentes pour la gestion des ondes d'éclusées.**
- La régulation du niveau du bief par une conduite vannée en by-pass de l'écluse de Flandres permettant une gestion dynamique des volumes en transit : **Cette action est très efficace** dès lors que le dimensionnement permet d'associer un transfert de volume équivalent à celui en provenance des Fontinettes dans un délai voisin de celui d'une éclusée complète. Le principe simple de régulation testé, qui consiste à associer en concomitance les transferts d'eau aux deux écluses (assimilable à une gestion de type « BIVAL » ou à celle pratiquée « à volume constant » sur le canal EDF de la Durance) méritera d'être approfondi en étude de projet, mais semble facilement applicable. La régulation sur la base un critère d'un niveau constant mesuré dans le bief est à priori déconseillée en raison des fluctuations rapides d'intumescences difficiles à filtrer sur le bief de faible longueur.

Pour l'établissement des solutions d'aménagement à analyser, **nous retenons deux actions sur le canal :**

- **La modification des séquences d'ouverture des vannes de l'écluse des Fontinettes, couplée à un meilleur contrôle du niveau moyen du bief (au NNN ou légèrement inférieur au NNN) ;**
- **L'aménagement d'un by-pass à l'écluse de Flandres combiné avec une gestion associée des volumes transférés aux écluses.**

La mise en perspective de ces actions sera faite après prise en compte également des améliorations envisageables du fonctionnement de l'étang de Batavia étudiées dans le chapitre suivant, qui doivent conduire à limiter le nombre d'hydrogramme de type T au cours d'une journée de navigation.

3.3. Faisabilité des solutions retenues

3.3.1. Faisabilité de la modification des séquences d'ouverture des vannes

3.3.1.1. FAISABILITÉ TECHNIQUE

Lors de la réunion du 11/03/2022, VNF a indiqué qu'il serait possible, une fois les capteurs de position des vannes mis en service (courant juin/juillet 2022), de retravailler les séquences d'ouverture des vannes de manière à obtenir un hydrogramme plus plat et étalé, à l'image des hydrogrammes proposés par Tractebel.

Ces modifications nécessiteront une augmentation de la durée d'ouverture des vannes, ouverture plus progressive, sans toutefois affecter la durée totale d'éclusée. En effet les durées de vidange du sas des Fontinettes sont voisines de 14 mn pour les fonctionnements B-GS, B-MS et T-GS, alors qu'elles sont de 6 à 9 mn pour les restitutions brutales de type T-MS 1, T-MS 2 et T-PS (cf Rapport de phase 1 - §5.2.5). L'optimisation des séquences d'ouverture des vannes devra respecter une durée de vidange qui n'excédera pas 14 mn afin de ne pas impacter le trafic.

3.3.1.2. ESTIMATION FINANCIÈRE

Cette solution présente un très faible coût, qui correspond au travail de reprogrammation des séquences d'ouverture de vanne, réalisé en régie par le service d'exploitation.

3.3.2. Faisabilité d'un by-pass à l'écluse de Flandres

3.3.2.1. FAISABILITÉ TECHNIQUE DU BY-PASS

La solution prend la forme d'un ouvrage fonctionnant en charge avec une prise d'eau dans le bief Fontinettes-Flandres en amont de l'écluse de Flandres et une restitution dans le bief Flandres-Watten en aval de l'écluse.

L'ouvrage de by-pass est composé :

- D'un ouvrage d'entonnement, équipé d'une vanne
- Une conduite présentant une longueur d'environ 180 m. Le fil d'eau amont sera calé autour de la cote 3.5 m NGF et le fil d'eau aval autour de la cote 0 m NGF.
- Un ouvrage de restitution.

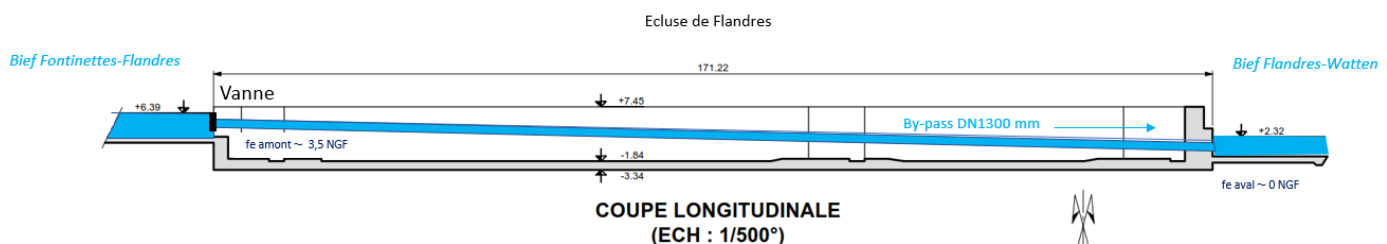


Figure 3-26 : Profil en long du by-pass

Plusieurs solutions ont été envisagées pour l'implantation de cet ouvrage de by-pass. L'ouvrage pourrait soit :

- traverser le génie civil de l'écluse (tracé rouge en figure suivante),
- cheminer dans le remblai adossé contre les voiles et les massifs en béton de l'écluse (tracé vert),
- contourner l'écluse sous le parking et la rue des Alpes (tracé jaune).

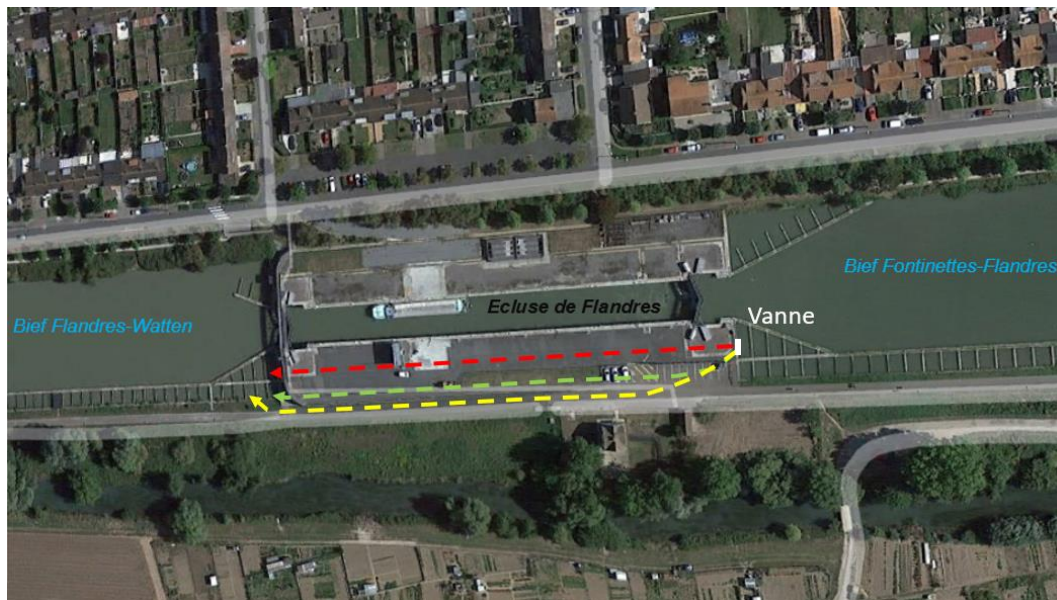


Figure 3-27 : Implantations possibles pour le by-pass

La solution qui consiste à implanter la conduite au sein du génie civil de l'écluse (en rouge sur la figure précédente) n'est pas retenue car elle est jugée beaucoup plus complexe et coûteuse que les autres solutions. Par ailleurs, le tracé proposé se heurte à une faible largeur des piédroits en partie supérieure et à des interférences possibles avec les organes hydro-mécaniques.

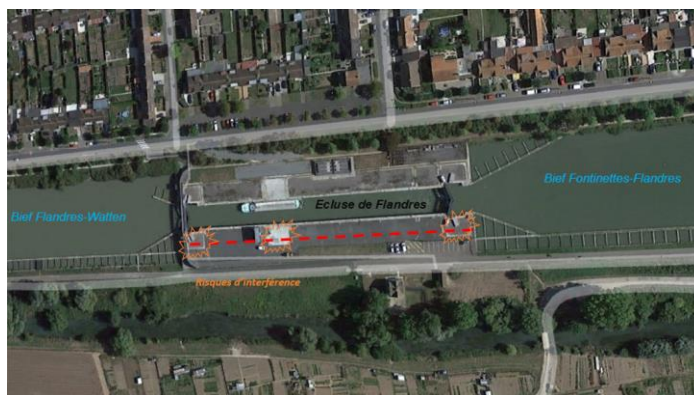
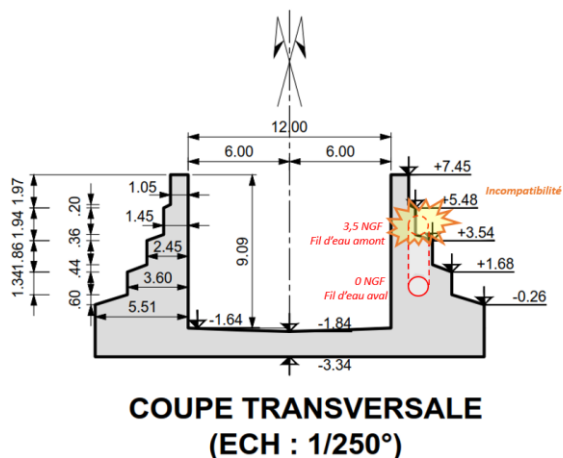


Figure 3-28 : Contraintes du tracé rouge

Les deux autres solutions consistent à contourner le génie civil de l'écluse en passant soit par les remblais adossés le long de l'écluse (tracé vert – crête des remblais proches de la cote 7 NGF sur la majorité du tracé), soit sous le parking, puis sous la route des Alpes (tracé jaune – altitude voirie variable de 7 à 4 NGF, selon profil en long de la route). Le tracé jaune nécessite beaucoup moins de terrassement que le tracé vert car il suit avantageusement le dénivelé de la route. Cette implantation est retenue dans la suite de l'étude.



Figure 3-29 : Comparaison tracés vert et jaune – Courbes de niveaux



Figure 3-30 : Comparaison tracés vert et jaune – tronçon aval

La pose de la conduite se fera en tranchée. La profondeur de la tranchée est comprise entre 3.20 et 5 m et nécessitera donc un blindage. La largeur de la tranchée sera au minimum égale au diamètre extérieur de la conduite augmenté de 1 m.

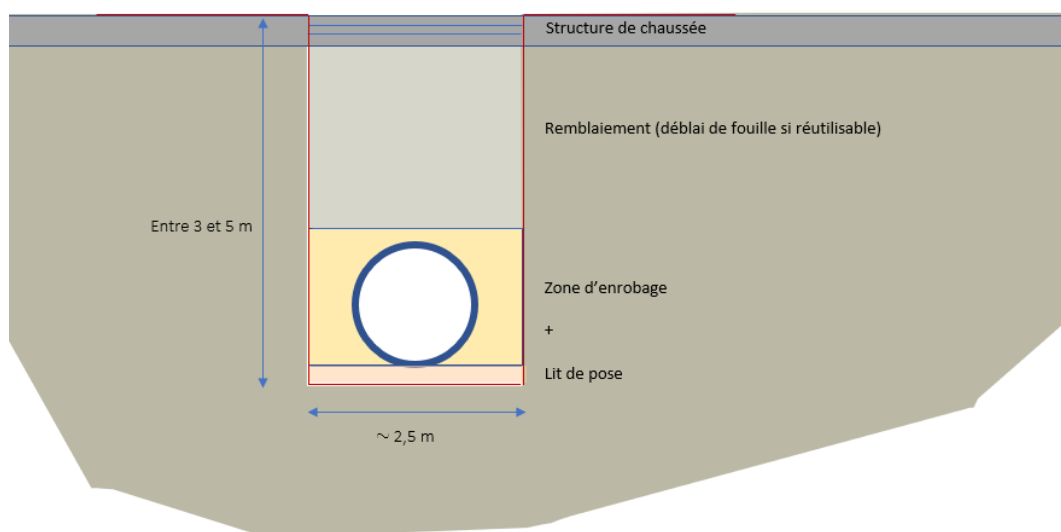


Figure 3-31 : Conduite DN1300 en tranchée

A l'amont, l'ouvrage de prise vanné se situe au droit du mur de fermeture amont de l'écluse de Flandres. Il est volontairement implanté vers le canal, plutôt que vers la rive pour ne pas recouper le rideau de palplanches existant au-delà du mur de fermeture.

A l'aval, la conduite débouche au niveau de la berge du canal.

Avis sur la faisabilité technique :

Au stade actuel de l'étude de faisabilité, une implantation en rive gauche de l'écluse est envisagée, mais pour des raisons d'exploitation ou d'aménagement futur de l'écluse une implantation du by-pass en rive droite de l'écluse est également possible, sans incidence sur les principes proposés de régulation du bief.

Il s'agit de travaux relativement classiques (pose de canalisation en tranchée), qui ne posent pas de difficultés techniques particulières. Une attention devra être portée aux éventuels réseaux existants sous la rue des Alpes, qui n'ont pas fait l'objet d'une identification à ce stade d'étude. La réalisation des travaux n'aura pas d'incidence sur l'exploitation du canal.

Pour pouvoir être déployée efficacement, cette solution devra se baser sur une étude détaillée de régulation pour intégrer dans l'algorithme de pilotage de la vanne, le type d'écluse aux Fontinettes, la navigation à l'écluse de Flandres, les déversés sur le bief, le niveau en cours sur le bief...

3.3.2.2. ESTIMATION FINANCIÈRE DU BY-PASS

Une estimation préliminaire du coût des travaux est présentée ci-après pour la solution de by-pass en conduite béton DN1300 mm, en PN1 (pression intérieure maximale égale à 1 bar soit 10 mCE). Il s'agit d'une estimation sommaire qui doit permettre de comparer les différentes solutions entre elles.

L'estimation se base sur des prix unitaires issus de marchés de travaux similaires pour les postes suivants :

- Découpe de chaussée,
- Démolition de chaussée,

- Déblais meubles (pour tranchée),
- Evacuation en décharge,
- Blindage de tranchée,
- Lit de pose et enrobage,
- Remblai (pour tranchée)
- Fourniture et pose de conduite béton DN1300 mm,
- Réfection chaussée.

D'autres postes ont été estimés au forfait sur la base d'anciens chantiers de travaux.

- Fourniture et pose vanne amont ,
- Travaux génie civil ouvrage amont,
- Dispositif de batardage amont et aval de la conduite.

Les quantités prises en compte dans le chiffrage ont été estimées sommairement en raison du peu de données disponibles sur la topographie du site et du niveau de détail associée à l'étude (faisabilité).

Une provision pour aléas et divers non métrés est intégrée au calcul (25% de l'estimation initiale).

Des prix généraux, correspondant à 15% du montant des travaux, sont comptabilisés dans l'estimation.

On compte 10% pour les investigations et la mission de maîtrise d'œuvre pour la suite des études.

Poste	Unité	Prix unitaire	Quantité	Total
Découpe chaussée	ml	2.00 €	365.00	730 €
Démolition chaussée	m²	10.00 €	450.00	4 500 €
Déblais meubles (tranchée)	m³	50.00 €	2000.00	100 000 €
Evacuation en décharge	m³	10.00 €	600.00	6 000 €
Blindage (tranchée)	m²	25.00 €	1654.00	41 350€
Lit de pose et enrobage	m³	40.00 €	515.00	20 600€
Remblai (tranchée)	m³	30.00 €	1485.00	44 550 €
Fourniture et pose canalisation béton DN1300	ml	750.00 €	180.00	135 000 €
Réfection chaussée	forfait	20 160.00 €	1.00	20 160 €
Vanne amont	forfait	20 000.00 €	1.00	20 000 €
Travaux GC ouvrage amont	forfait	6 000.00 €	1.00	6 000 €
Dispositif de batardage amont et aval de la conduite	forfait	20 000.00 €	1.00	20 000 €
Provisions pour aléa et divers non métrés	25%	de l'estimation initiale		104 722 €
Prix généraux	15%	du total travaux		78 542 €
Investigations et MOE	10%	60 215 €		
MONTANT TOTAL DE L'OPERATION (H.T)				662 369 €

4. SOLUTIONS POUR L'AMELIORATION DU FONCTIONNEMENT DE L'ETANG DE BATAVIA

Une modélisation des transferts entre l'écluse des Fontinettes, l'étang de Batavia et la basse Meldyck a été réalisée en phase 1 dans l'objectif d'apprécier les ordres de grandeur de dimensionnement des actions envisageables.

Cette analyse a permis de mettre en avant les solutions suivantes.

- Mise en place d'une station de pompage de l'étang de Batavia vers le bief amont.
- Aménagement d'un déchargeur gravitaire supplémentaire de l'étang vers la Basse Meldyck.

Ces deux solutions permettent :

- de retrouver un cycle journalier hydraulique reproductible, c'est-à-dire que l'on ne dégrade pas l'état de saturation de l'étang au fil des journées de navigation (niveau d'eau identique au démarrage de chaque journée de navigation),
- d'absorber le volume transmis par l'écluse des Fontinettes sur 13 à 15 bassinées complètes (grand sas).

Le pré-dimensionnement associé à ces solutions est présenté dans la suite du document.

4.1. Mise en place d'une station de pompage

4.1.1. Principes d'aménagement d'une station de pompage

4.1.1.1. ETUDES ANTÉRIEURES

Cette solution a déjà été envisagée (cf. rapport de phase 1) par le passé lors de la conception de l'écluse des Fontinettes et lors des études récentes (ISL et ARTELIA).

Dans son étude de DIAG, ARTELIA a étudié la création d'une station de pompage au niveau de l'étang de Batavia, avec la réutilisation des canalisations préexistantes entre l'étang et l'amont de l'écluse des Fontinettes en vue de leur réutilisation en refoulement de la station de pompage à créer. A l'époque, la nature et l'état de ces canalisations étaient méconnus, seuls des plans d'archives étant disponibles. Une campagne d'investigations par sondages, inspections télévisuelles et essais pression a alors été menée pour valider la nature, l'implantation et l'état de ces canalisations.

Les investigations réalisées ont permis de confirmer la présence des deux conduites DN900 en acier sur l'ensemble du linéaire, soit 890 m entre l'étang de Batavia et une chambre de raccordement qui débouche sur le bief en amont de l'écluse des Fontinettes. Les passages caméra réalisés sur environ 84% du linéaire total ont révélé une corrosion intérieure généralisée des deux canalisations sur une épaisseur de 1 à 2 mm sur les parties restées en contact avec l'air et la présence généralisée de concrétions diverses et d'un biofilm sur les parties restées en contact avec l'eau. Dans ces conditions, face aux incertitudes sur des défaillances possibles, les essais sous pression ont été annulés et les conduites ont été jugées non réutilisables en l'état.

Les solutions suivantes de remise en état ont été étudiées par Artelia :

- Décapage de la couche de corrosion superficielle par sablage puis application d'une peinture EPOXY intérieure en revêtement anti-corrosion ;
- Décapage de la couche de corrosion superficielle par sablage et chemisage des conduites ;
- Tubage par tuyau PEHD.

Ces solutions se heurtent toutes à des problématiques foncières car elles nécessitent de nombreux passages en terrain privé (fenêtres d'accès en surface à réaliser tous les 150/200 m), en plus de problématiques techniques et financières.

Au final, le renouvellement à neuf des conduites a été préféré aux solutions de remise en état de l'existant, car cette solution permettait de s'affranchir des contraintes foncières (tracé en emprise publique ou emprise VNF), même si de nombreuses interférences réseaux étaient anticipées.

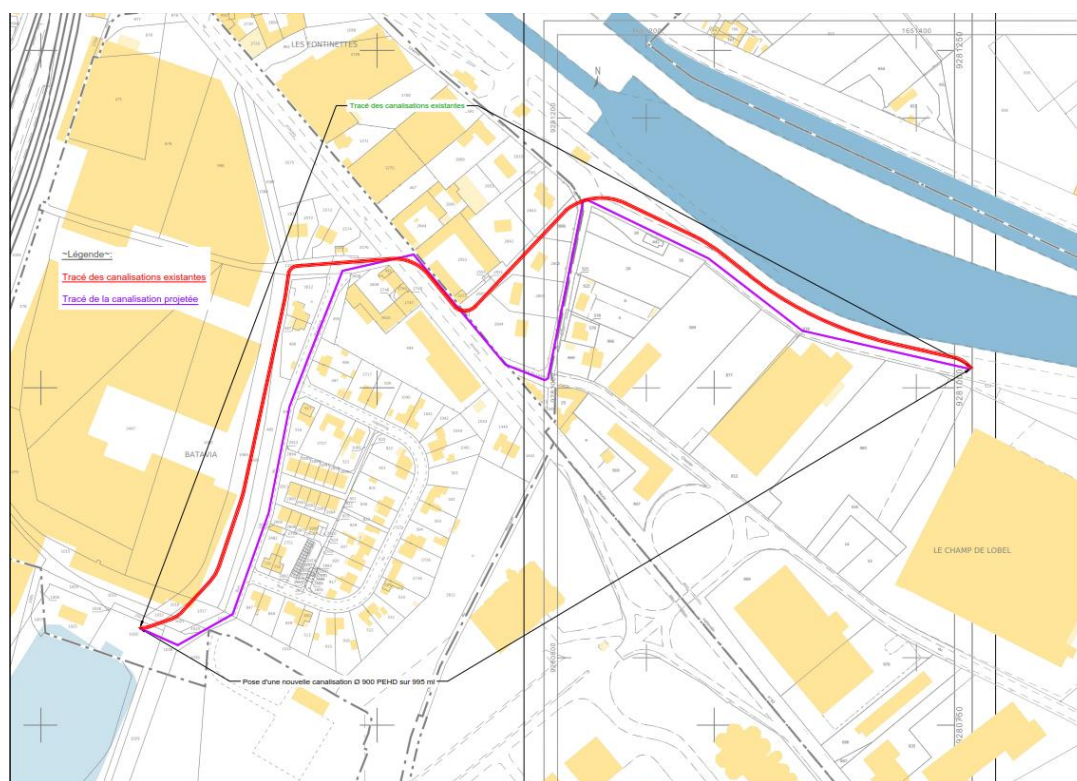


Figure 4-1 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Source : DIAG ARTELIA

La solution a ensuite été développée au stade AVP par ARTELIA. Le tracé part de la parcelle n°1028 à proximité de l'étang et se termine au niveau de l'ouvrage de raccordement existant, au niveau de la rive gauche du bief amont. Plusieurs tracés ont été envisagés mais tous recoupent des réseaux sensibles et/ou passent dans des parcelles privées, notamment celles de l'entreprise ARC International.

Une consultation technique a été organisée avec les services d'Arc afin d'obtenir un accord de principe sur l'un des tracés. Il ressort de cette consultation que les tracés recoupent de nombreux réseaux qui alimentent l'entreprise (GAZ, Oxyduc, HT, BT, AEP, EP, EU) et qui sont stratégiques pour le fonctionnement et le maintien en vie du process de l'entreprise et de ses équipements. Des travaux de terrassement de grande ampleur réalisés à proximité de ses réseaux présentent des risques humains, matériels et financiers, qui sont jugés extrêmes et inacceptables par l'entreprise.

Face à ce constat, un tracé « mixte » qui consisterait dans la mise en place d'une nouvelle canalisation hors des croisements avec les réseaux d'Arc-International et une réutilisation des 2 canalisations existantes (tubage) au niveau de ces croisements a ensuite été envisagée par ARTELIA afin de tenter de s'affranchir au maximum des zones problématiques de croisement avec les réseaux d'Arc International et ainsi réduire les risques et donc les coûts associés. Deux zones de croisement (prévues par réhabilitation des canalisations existantes) restent cependant obligatoires sur ce nouveau tracé :

- la sortie de l'étang de Batavia qui croise l'oxyduc, les lignes électriques HT, les communications électroniques et lignes électriques, les canalisations d'eau potable et usées et l'éclairage. Cependant, la présence de coudes à 45° dans les canalisations existantes à cet endroit précis remet en cause la faisabilité d'un tubage (qui nécessite des portions rectilignes). Il faudrait donc envisager à cet endroit un fonçage tarière (sans ouverture de tranchées) qui nécessiterait toutefois l'arrêt temporaire des conduites d'oxygène et haute tension.
- une zone intermédiaire croisant les lignes électriques HT, les canalisations gaz et l'éclairage. Une solution par tubage a été proposée.

Cette solution ne permet donc pas de s'affranchir de l'ensemble des réseaux problématiques. La figure suivante illustre la solution proposée pour la gestion des croisements de réseaux.

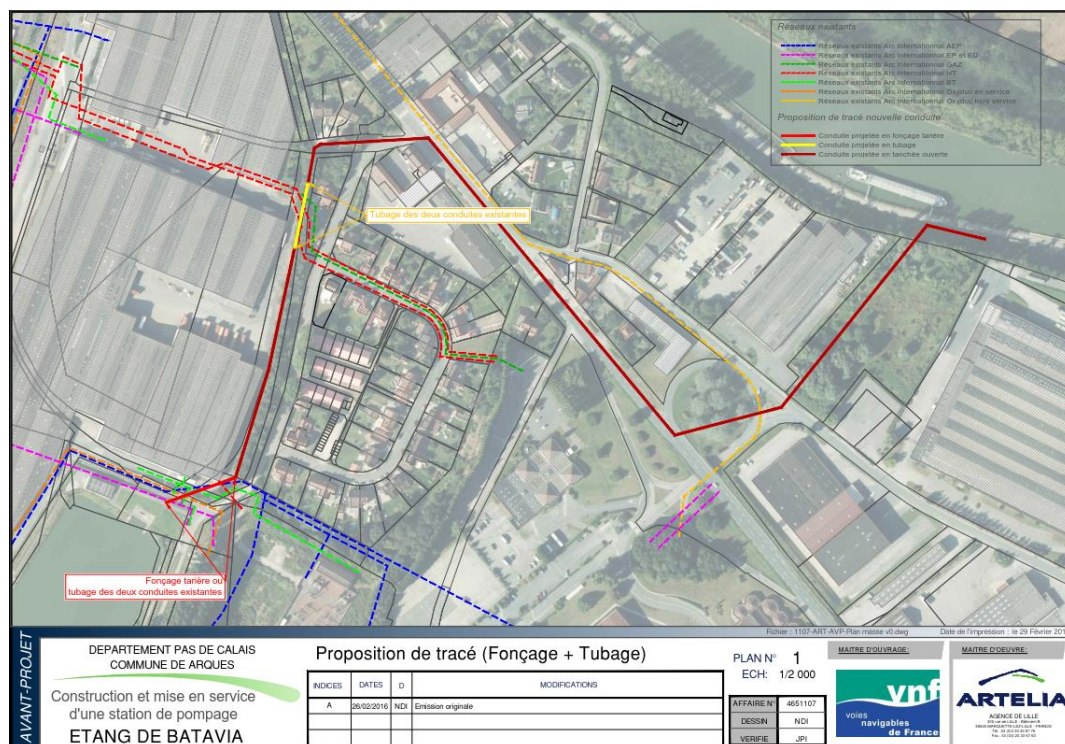


Figure 4-2 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Gestion des croisements réseaux – Source : AVP ARTELIA

VNF a alors décidé de réorienter le projet vers une solution alternative pour la mise en place des conduites, qui consistait à utiliser la technique du micro-tunnelier pour passer en grande profondeur sous les réseaux à enjeu capital. La figure suivante illustre le tracé proposé.

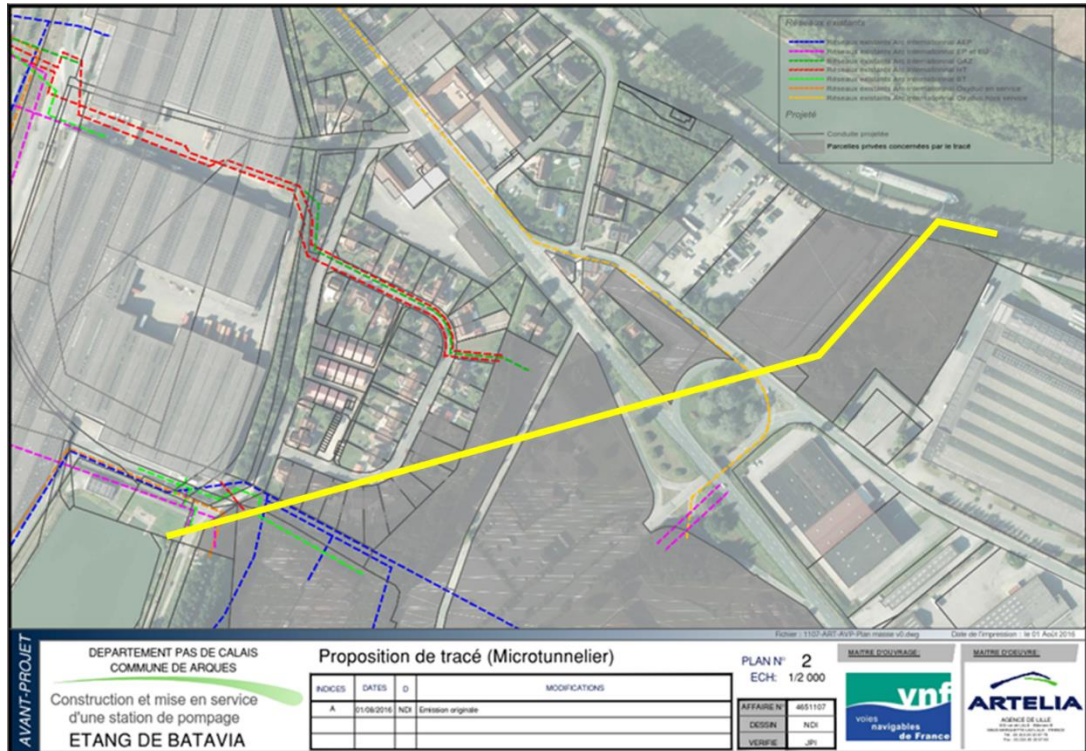


Figure 4-3 : Tracé envisagé pour le renouvellement à neuf de la canalisation de refoulement – Variante microtunnelier en jaune – Source : AVP ARTELIA

Estimant que la proposition ne permettait pas de répondre aux risques extrêmes identifiés (impact des vibrations sur des réseaux de près de 50 ans, risque de mouvements de terrain,...), ARC International s'est à nouveau opposé au projet et a exigé des garanties financières extrêmement élevées.

4.1.1.2. PROPOSITION TRACTEBEL

Comme indiqué précédemment,

- les deux conduites de refoulement existantes (DN900 en acier) ne sont pas réutilisables en l'état et les solutions de remise à neuf de ces conduites restent coûteuses et impliquent des interventions difficiles sur des parcelles privées. De plus la réutilisation même partielle des deux conduites positionnées au-dessus de la galerie de l'évacuateur des Fontinettes pose le problème de la traversée des réseaux sensibles en périphérie de l'étang.
- de nombreuses contraintes limitent les possibilités d'implantation de nouvelles conduites de refoulement entre l'étang de Batavia et le bief amont de l'écluse des Fontinettes et les solutions jusqu'alors envisagées n'ont pas pu être validées avec tous les acteurs du projet :
 - les solutions en tranchée ne sont pas compatibles avec les contraintes foncières et la présence de réseaux sensibles (nombreux croisements),

- les solutions mixtes du type « réutilisation localisée des conduites existantes », au droit des croisement, et « conduites neuves ailleurs » ne sont pas applicables (impossible près de l'étang de Batavia)
- les solutions sans tranchée type microtunnelier profond n'ont pas convaincu l'ensemble des participants (refus d'ARC International). Au-delà de ce refus, on signale que le tracé donné en figure précédente reste très optimiste. En effet, sur un linéaire de près de 700 m à réaliser au microtunnelier, il est nécessaire de prévoir plusieurs puits intermédiaires (environ 5), la longueur de tir étant limitée à 130 – 150 m au maximum sur des conduites de diamètre inférieurs à 1400 mm (car non visitables). Or, on note que le tracé proposé se situe au droit de parcelles privées, ce qui pénalise d'autant plus cette solution, sans parler du surcoût associé à la réalisation de ces 5 puits profonds.

Compte tenu de ces différents éléments, une configuration différente est proposée ici pour l'implantation de la conduite de refoulement.

Elle consiste à restituer les débits dans le bief amont par une conduite de refoulement qui serait implantée :

- dans la galerie de l'évacuateur existante, sur le linéaire de section de 6 m de large et 3.85 m de haut,
- puis en tranchée, lorsque l'aqueduc se scinde en deux galeries de section 3 m x 3.85 m. En effet, sur ce dernier tronçon, obstruer la section hydraulique par une conduite de refoulement de diamètre 1,4 m reviendrait à dégrader trop fortement la débitance d'un des deux évacuateurs au départ de l'écluse des Fontinettes, ce qui n'est pas acceptable.



Figure 4-4 : Cheminement de la conduite de refoulement envisagée

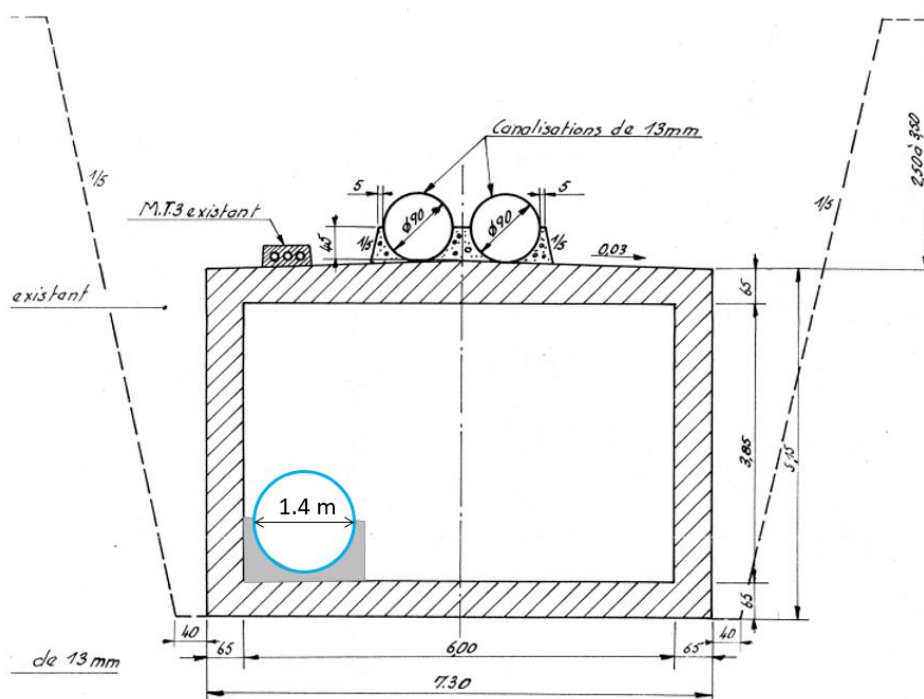


Figure 4-5 : Encombrement d'une conduite Ø1400 mm dans la galerie de l'évacuateur 6 m x 3.85 m

Au regard du tracé et du point de sortie vers l'écluse, il est préférable d'implanter la conduite en rive droite (du côté Ouest) dans la galerie, ce qui conduit à privilégier un positionnement à l'intérieur des coudes, hydrauliquement les moins sollicités, sauf dans la courbe amont au franchissement de l'avenue Général De Gaulle, où la conduite serait dans l'extérieur de la courbe. La protection de la conduite vis-à-vis des sollicitations hydrauliques devra être étudiée à un stade d'études ultérieur. A ce stade des études, on considère sur tout le linéaire de la conduite un enrobage en béton sur la moitié de sa circonférence, liaisonné au radier de l'aqueduc. Ce point pourra être optimisé par la suite, en limitant le linéaire concerné aux zones de coudes exclusivement.

Pour éviter la flottaison de la conduite lorsqu'elle est vide, des cerces fixées à l'existant sont prévues tous les 3 m.

La conduite sortira de la galerie dans l'espace ouvert (dégagement, parking) au Nord de l'avenue, où la couverture en remblais est faible (environ 2m), pour se poursuivre ensuite en tranchée jusqu'à sa restitution dans le bief amont. Afin de ne pas affecter le gabarit de la galerie de l'évacuateur la traversée latérale de la paroi en béton sera réalisée en partie basse et la remontée de la conduite sera réalisée à l'extérieur de la galerie.

Un projet de commerce (« LIDL ») accompagné de son parking est en cours sur ce secteur. L'achèvement des travaux est prévu pour la fin de l'année 2022. Le plan masse de ce projet montre que des parkings sont prévus au-dessus des galeries hydrauliques de l'adducteur existant et du faisceau d'implantation envisagé pour le refoulement de la station de pompage. Dans ces conditions, l'aménagement de la zone commerciale n'apparaît pas bloquant du point de vue technique. Les travaux d'aménagement de la conduite induiront des perturbations temporaires pour l'usage du parking. Une optimisation du projet de la conduite de refoulement sera nécessaire lors des études de conception détaillée pour limiter les impacts et s'assurer de la compatibilité avec les nouveaux aménagements en surface.

La solution proposée présente l'avantage, de ne pas impacter les usines voisines et d'éviter les problèmes de franchissement des réseaux sensibles d'Arc International. Les seuls réseaux à prendre en considération devraient se limiter à ceux qui longent le canal ou rejoignent l'écluse des Fontinettes.

Ce tracé permet de plus de se situer pour la partie amont sous des parcelles en grande partie dans le DPGF (cf Figure 4-6).

Dans la perspective d'aménagement d'une nouvelle conduite de refoulement, les contraintes foncières sont à vérifier sur la parcelle du dégagement/parking riverain de l'Avenue Général de Gaulle (OF 0962), sur les parcelles en continuité (OF1068) ainsi que sur l'emprise du centre commercial « LIDL » en construction. La forme du parcellaire qui suit l'emprise des galeries souterraines laisse penser que des modifications foncières ont été faites lors de l'aménagement de l'écluse des Fontinettes pour la maîtrise des surfaces ou pour la définition de servitudes de tréfonds. Ce dernier point a été vérifié par VNF qui confirme qu'il existe bien une servitude pour l'accès aux réseaux sur le parking du futur magasin LIDL.

L'optimisation du tracé devra également prendre en considération la topographie et les réseaux enterrés éventuels, entre la sortie de la galerie et la restitution au bief amont.

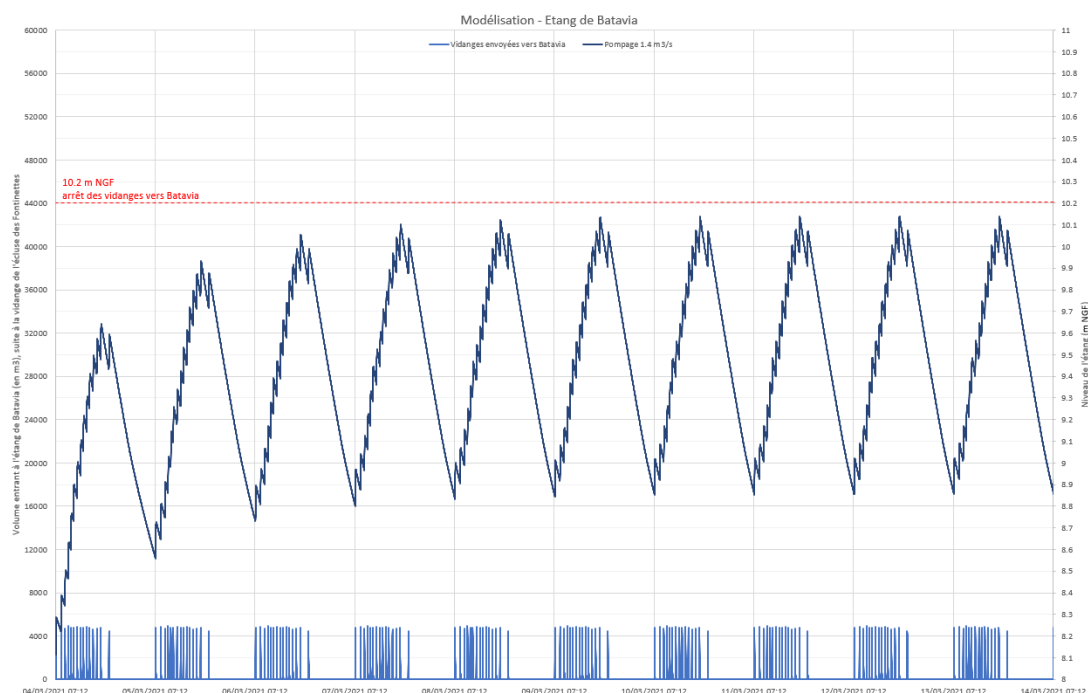


Figure 4-6 : Parcelles cadastrales au droit du cheminement envisagé, en jaune aqueduc existant, en vert, conduite de refoulement projetée, en pointillés verts – passage en tranchée

Plusieurs principes de fonctionnement ont été envisagés en phase 1 :

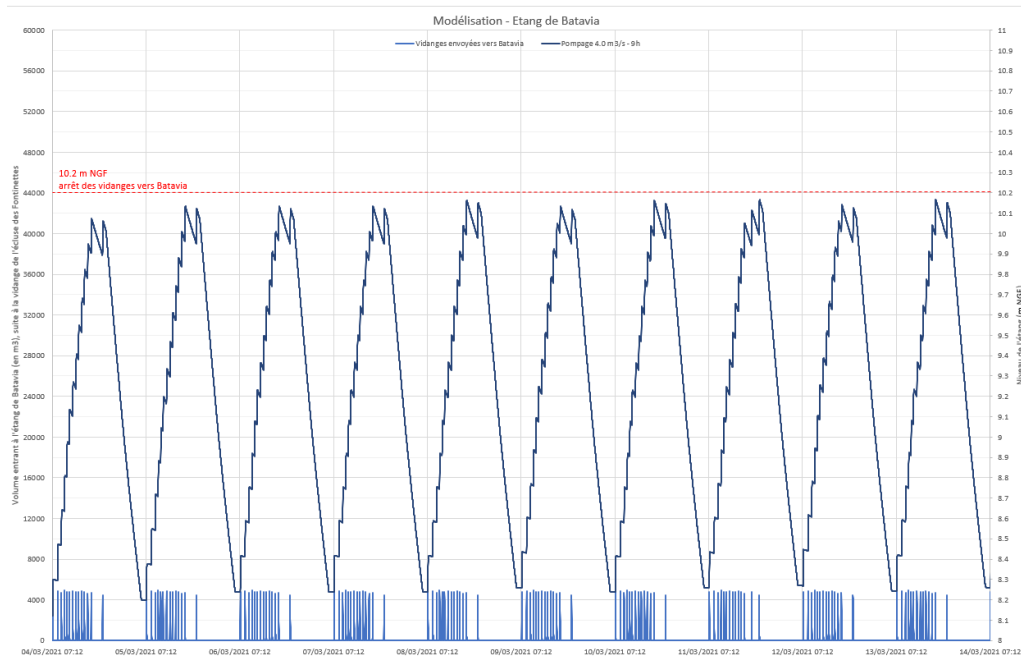
- Pompage en permanence d'un débit de 1.4 m³/s.

Cette configuration permet d'absorber le volume transmis par l'écluse de Fontinettes sur 15 bassinées complètes et de retrouver le niveau d'eau dans l'étang au démarrage de la navigation la journée suivante, comme le montre le résultat de simulation ci-après (*On teste ici l'enchaînement de 10 journées du 4 mars 2021 - avec bassinées complètes - pour évaluer si cette solution permet ou non de ne pas saturer l'étang au fil des journées de navigation*).



- Pompage de 4.0 m³/s de nuit 21h à 6h.

Cette configuration permet d'absorber le volume transmis par l'écluse de Fontinettes sur 14 bassinées complètes et de retrouver le niveau d'eau dans l'étang au démarrage de la navigation.



Le prédimensionnement de la station de pompage associé à chaque configuration est donné au chapitre suivant. Il est à noter que ces configurations sont associées à un dimensionnement de pompes de forte puissance (entre 270 et 850 kW), nettement plus important que dans les études antérieures (entre 100 et 250 kW). Mais ces configurations ne sont pas réellement comparables aux solutions présentées ici, les résultats atteints n'étant pas équivalents.

En effet, l'étude ISL présente un principe d'équipement permettant d'absorber 14 bassinées sur une journée, mais il s'agit de 14 bassinées réparties sur 24h (dont une entre 20h30 et minuit et deux entre minuit et 6h du matin).

Si on se concentre sur la plage de navigation actuelle (6h30 – 20h30, retenue dans notre étude), la solution d'ISL ne permet plus d'absorber que 11 bassinées, alors que les solutions de la présente étude permettent d'absorber 14 à 15 bassinées réparties entre 6h30 et 20h30 ce qui est plus pénalisant et conduit donc à un dimensionnement plus important de la station de pompage.

Par ailleurs, l'étude ISL ne définit pas le schéma hydraulique associé à cette solution (diamètre des conduites, linéaire associé) et ne tient donc pas compte des pertes de charge du circuit, qui augmentent la charge à relever par la pompe et donc la puissance à prévoir.

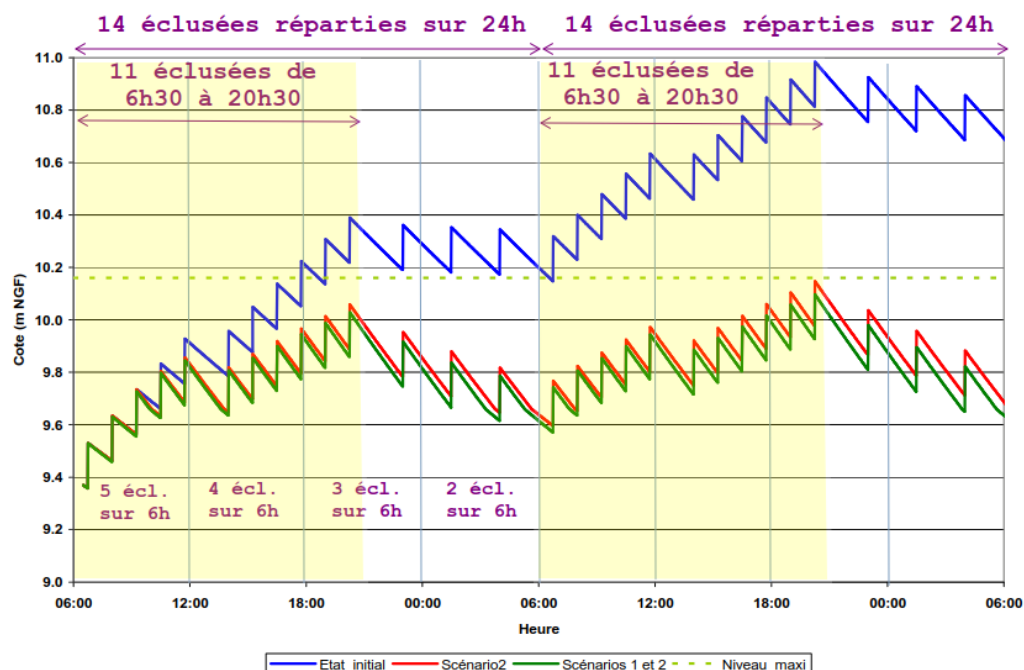


Figure 4-7 : Extrait rapport ISL, interprétation Tractebel (en jaune et violet) du nombre de bassinée par plage de 6h

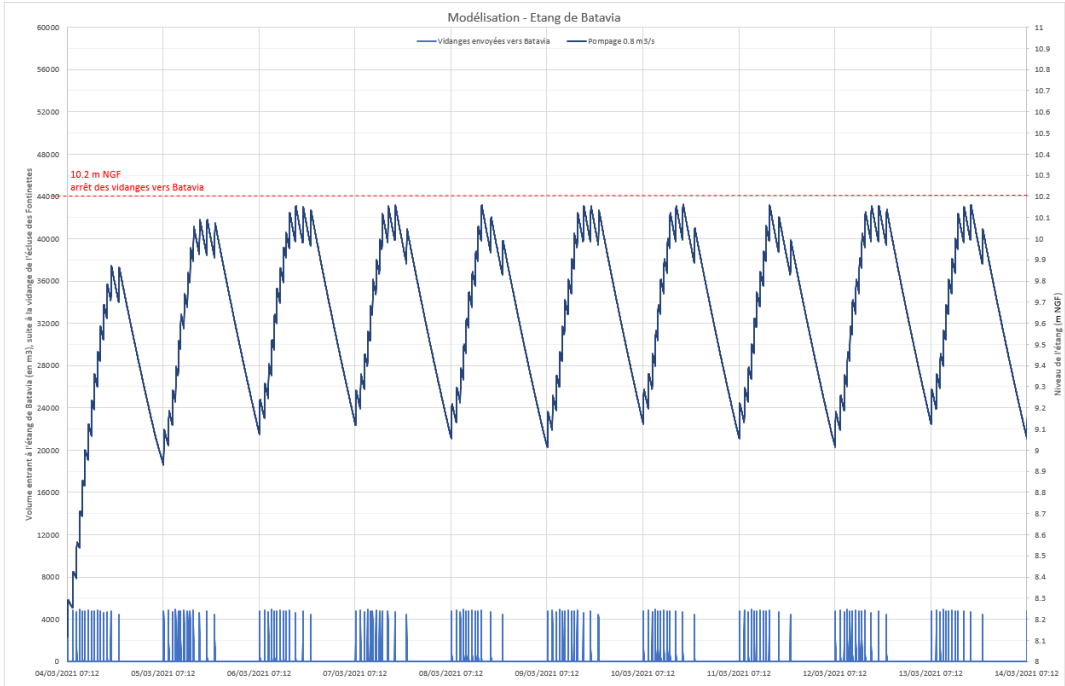
ARTELIA, dans son diagnostic, intègre les pertes de charge à son dimensionnement mais ne revient pas sur l'objectif visé.

Le tableau suivant récapitule les configurations étudiées dans les études antérieures.

	Débit	Durée de fonctionnement	Schéma hydraulique	Puissance	Résultat associé
Etude ISL (phase 2) 2011	0.8 m ³ /s	24 h	Non défini	100 kW	14 bassinées sur 24h avec retour à la normale Mais uniquement 11 bassinée de 6h30 et 20h30
DIAG Artelia 2014	0.8 m ³ /s	24 h	DN900 L = 890 m	114 kW <i>Non retenu</i>	Volume journalier pompé de 69 000 m ³ ~ 3 bassinées
DIAG Artelia 2014	1.07 m ³ /s	18 h	DN900 L = 890 m	165 kW	
DIAG Artelia 2014	2.75 m ³ /s	7h (heures creuses)	2 * DN900 L = 890 m	250 kW <i>Non retenu</i>	
Etude VNF 2015	1.07 m ³ /s	24 h	DN900 L non précisé	Non précisée	15.37 bassinées avec retour à la normale
Etude VNF 2015	3.29 m ³ /s	24 h	2* DN1200 L non précisé	Non précisée	30.86 bassinées avec retour à la normale

4.1.2. Efficacité pour la gestion hydraulique

A titre de validation, la simulation précédente a été relancée en tenant compte d'un débit de pompage de 0,8 m³/s sur 24h. On estime que 12 bassinées complètes peuvent être absorbées dans cette configuration, ce qui reste cohérent avec les 11 déduites de la figure précédente.



Le tableau suivant récapitule les solutions envisagées dans la présente étude et donne à titre d'indicatif le dimensionnement à prévoir pour une configuration type ISL (0.8 m³/s sur 24h).

	Débit	Durée de fonctionnement	Schéma hydraulique	Puissance nominale	Résultat associé
Pompage en permanence	1,4 m ³ /s	24 h	DN1400 L = 920 m	270 kW	15 bassinées réparties sur la journée de navigation (6h30 – 20h30), avec retour à la normale
Pompage la nuit	4,0 m ³ /s	9 h	DN1600 L = 920 m	850 kW	14 bassinées réparties sur la journée de navigation (6h30 – 20h30), avec retour à la normale
Type ISL	0,8 m ³ /s	24 h	DN900 L = 920 m	131 kW	12 bassinées réparties sur la journée de navigation (6h30 – 20h30), avec retour à la normale

4.1.3. Faisabilité technique de la station de pompage

4.1.3.1. STATION DE POMPAGE

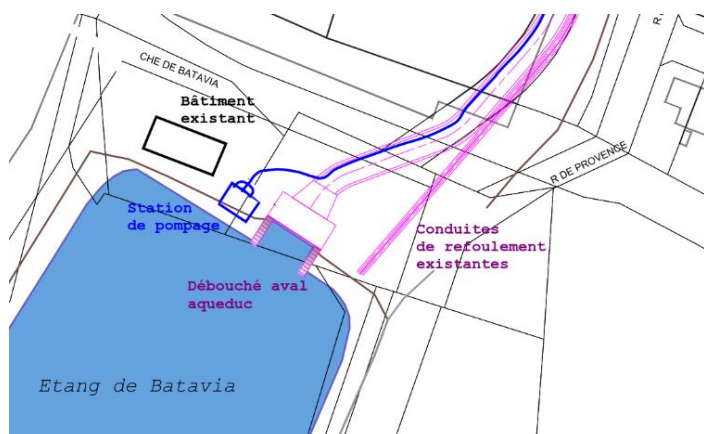
Le pré-dimensionnement associé aux solutions de pompage est présenté ci-après. Les hypothèses retenues sont :

- Niveau de restitution (bief amont) : 19.42 m NGF (NNN)
- Niveau de prélèvement (Batavia) : 8.12 m NGF (niveau minimal)
- On tient compte d'une marge de 50 cm sur la hauteur de relevage, pour intégrer d'éventuelles variations sur le bief amont

Soit un hauteur géométrique maximale de 11,80 m.

- Coefficient de Strickler : 90 (conduite en acier)
- Linéaire conduite : 765 m majoré par 1.2 soit 918 m
- Coefficient de pertes de charge singulières global de l'ordre de 4.53 pour entrée brusque, vannes, convergent, divergent, multiples coudes, sortie brusque , sectionnement au départ du canal,...
- Rendement pompage : 0.75

L'implantation envisagée de la station de pompage est illustrée ci-après.



L'essentiel du génie civil sera enterré ou faiblement émergeant. Le génie civil de la station de pompage pourra inclure un bâtiment local pour le contrôle-commande et l'alimentation électrique, si le bâtiment existant est affecté à d'autres usages n'est pas disponible.

4.1.3.1.1. Configuration pompage en permanence Q = 1.4 m³/sDonnées d'entrée

Débit	1.4 m³/s	24 h
Z min étang	8.12 NGF	
Z max étang	10.2 NGF	
Z bief amont	19.42 NGF	
Hauteur relevage	11.8 max 9.22 min	50 cm de marge pris en compte

Calcul perte de charge

Linéaire conduite	918.00 m	
Ks	90.00	
D	1.40 m	Vitesse = 0.91 m/s
S	1.54 m²	
P	4.40 m	
Rh	0.35 m	
Perte de charge régulière	0.38 m	
K in	0.50	entrée
K out	1.00	sortie
K1	1.32	coudes en plan
K2	0.74	coudes selon la verticale
K3	0.24	vannes
K4	0.15	convergent
K5	0.15	divergent
K6	0.27	coude à 90°
K7	0.16	coude à 45°
Perte de charge singulière	0.19 m	
Perte de charge totale	0.57 m	
HMT	12.37 m	
Puissance	226.54 kW	

Le diamètre de la conduite (1.4 m) a été choisi pour avoir des vitesses raisonnables dans la conduite (1 à 2 m/s). Une conduite en acier a été prise en compte dans les calculs. Ce choix devra être confirmé à un stade d'étude ultérieur au regard des problématiques de durabilité des conduites (risque corrosion) et de facilité de mise en œuvre dans l'aqueduc.

La puissance de la station de pompage est de l'ordre de 230 kW. Compte tenu des fortes puissances envisagées, on propose de mettre en place 3 pompes de puissance nominale 90 kW soit une puissance installée de 270 kW.

Une 4ème pompe est prévue pour le secours ou s'il est nécessaire d'effectuer une maintenance sur une des trois pompes.

Les pompes envisagées sont de type pompes submersibles, en fonte, avec une installation immergée sur pied d'assise. Le diamètre de la roue est de 455 mm. Les diamètres de refoulement et d'aspiration sont en 350 mm.

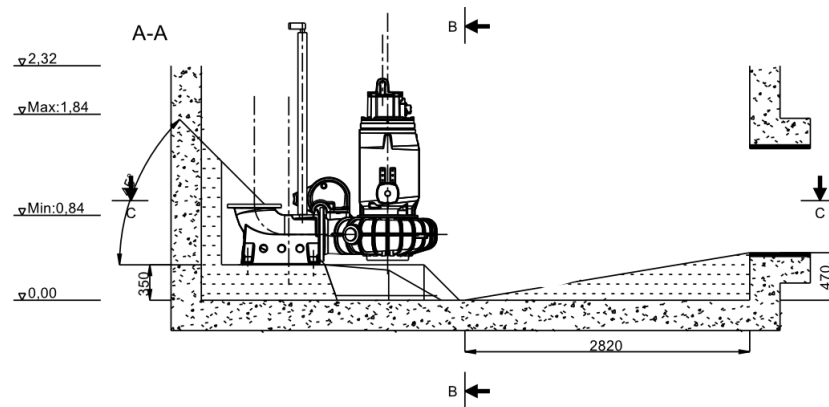


Figure 4-8 : Plan de principe d'une pompe

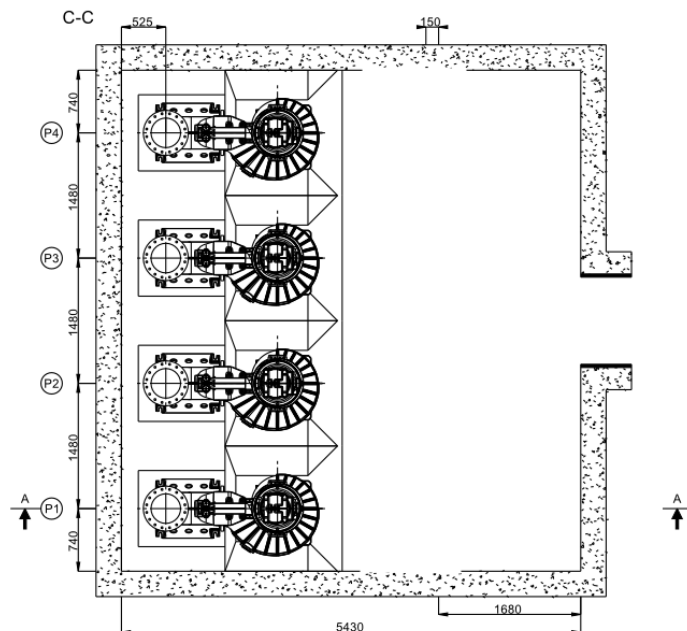


Figure 4-9 : Vue en plan de principe des 3 pompes (+1 secours)

Pour respecter le NPSH requis des pompes et éviter la formation de vortex, les pompes doivent en permanence être immergées sous une hauteur d'eau minimale de l'ordre de 1,70 m. L'arase supérieure de la conduite d'aspiration sera donc calée sous la cote 6.42 m NGF.

Pour maintenir l'alimentation des pompes en toutes circonstances, il sera nécessaire de s'assurer que la bathymétrie de l'étang au droit de la station de pompage n'est pas supérieure à la cote 8.12 m NGF (comme c'est le cas actuellement au droit de la sonde de niveau). Si tel est le cas, un reprofilage localisé du fond de l'étang sera nécessaire au niveau de la berge.

Une bifurcation permettra aux conduites de refoulement des pompes de se raccorder sur la conduite de refoulement en DN1400 m.

Une vanne guillotine sera installée sur chaque refoulement en DN350 mm.

4.1.3.1.2. Configuration pompage la nuit Q = 4 m³/sDonnées d'entrée

Débit	4 m ³ /s	9 h
Z min étang	8.12 NGF	
Z max étang	10.2 NGF	
Z bief amont	19.42 NGF	
Hauteur relevage	11.8 max 9.22 min	50 cm de marge pris en compte

Calcul perte de charge

Linéaire conduite	918.00 m	
Ks	90.00	
D	1.60 m	Vitesse = 1.99 m/s
S	2.01 m ²	
P	5.03 m	
Rh	0.40 m	
Perte de charge régulière	1.52 m	
K in	0.50	entree
K out	1.00	sortie
K1	1.32	coudes en plan
K2	0.74	coudes selon la verticale
K3	0.24	vannes
K4	0.15	convergent
K5	0.15	divergent
K6	0.27	coude à 90°
K7	0.16	coude à 45°
Perte de charge singulière	0.91 m	
Perte de charge totale	2.44 m	
HMT	14.24 m	
Puissance	744.82 kW	

Le diamètre de la conduite (1.6 m) a été choisi pour avoir des vitesses raisonnables dans la conduite (1 à 2 m/s).

La puissance de la station de pompage est de l'ordre de 750 kW. Compte tenu des très fortes puissances envisagées, il faudrait mettre en place au moins 5 pompes de puissance nominale 170 kW soit une puissance installée de 850 kW. Cette solution n'est pas jugée pertinente et n'est pas retenue pour la suite de l'étude.

4.1.3.2. CONDUITE DE REFOULEMENT

En sortie de station de pompage et après la bifurcation entre les 3 DN350 mm, la conduite de refoulement rejoint l'aqueduc reliant gravitairement l'écluse de Fontinettes à l'étang de Batavia. Il sera nécessaire de réaliser une ouverture dans le voile de l'aqueduc pour introduire la conduite dans l'aqueduc.

Comme indiqué précédemment, la conduite de refoulement est implantée sur ses premiers 500 m dans l'aqueduc qui présente dans cette zone une section de 6 m de large par 3.85 m de hauteur et un fil d'eau variant entre 7.27 m (côté batavia) et 9.17 m NGF.

L'amenée des tuyaux à l'intérieur de l'aqueduc se fera avec une mini-pelle ou pelle mécanique moyenne.

La nature et les caractéristiques de la conduite feront l'objet d'une étude particulière en phase AVP. En première approche, et comme indiqué précédemment, nous retenons une conduite en acier dont les éléments seront soudés. Ce choix sera à confirmer.

Au bout de 500 ml comptés depuis l'aval, la galerie reçoit les deux aqueducs de plus petites dimensions (3m x 3,85 m) issus de l'écluse. La conduite de refoulement sortira latéralement de la galerie avant ce raccordement, au droit d'une plateforme existante calée à la cote 14 m NGF environ, puis remontera pour passer au-dessus de l'aqueduc.

La conduite sera prolongée en tranchée en direction du bief amont du canal, sur environ 265 ml. La conduite débouche sur la berge rive gauche du bief amont, à la cote 17.5 m NGF environ.

Le raccordement entre les deux tronçons de conduite prendra la forme d'un S, reliant la conduite située dans l'aqueduc avec un fil d'eau proche de la cote 7 m NGF à la conduite posée en tranchée avec un fil d'eau de départ proche de la cote 12 m NGF.

Le profil en long de la conduite, superposé sur le profil en long de l'aqueduc existant est donné en figure suivante.

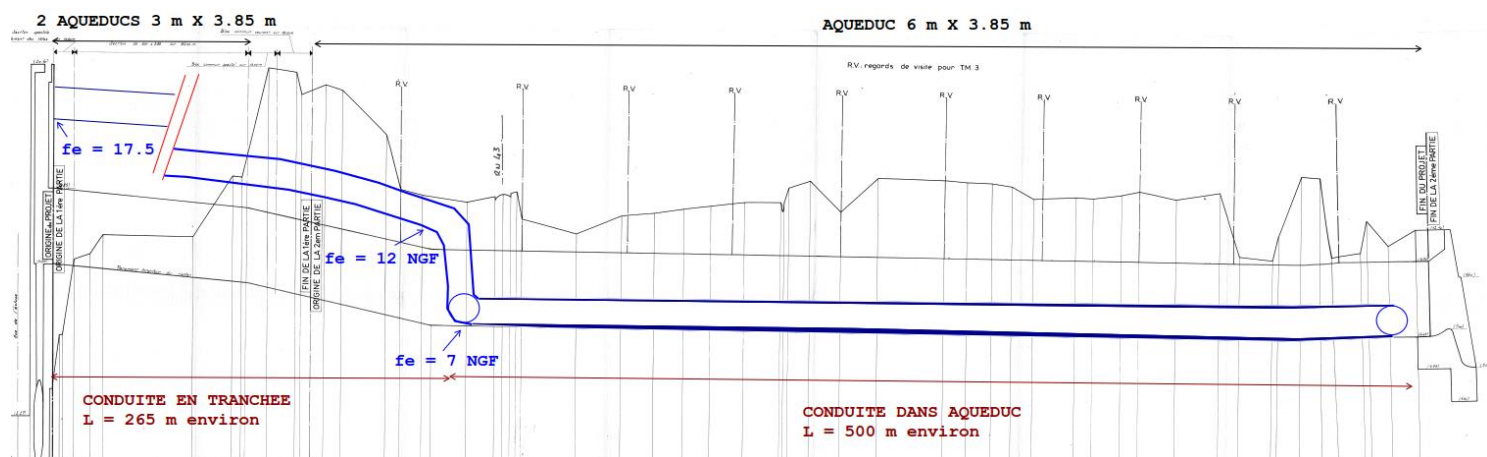


Figure 4-10 : Profil en long conduite de refoulement

Le tracé sera à optimiser en phase d'études ultérieure, sur la base de données topographiques plus précises.

4.1.4. Evaluation financière

4.1.4.1. INVESTISSEMENT INITIAL

Une estimation préliminaire du coût des travaux est présentée ci-après pour la construction d'une station de pompage avec une puissance nominale installée de 3x90kW (et 1 pompe de secours) et la fourniture, transport et pose d'une conduite de refoulement DN1400 mm en acier, installée dans l'aqueduc sur 500 ml puis en tranchée en 265 ml.

Il s'agit d'une estimation sommaire qui doit permettre de comparer les différentes solutions entre elles.

L'estimation se base sur des prix unitaires issus de marchés de travaux similaires pour les postes suivants :

- Déblais meubles,
- Déblais meubles (tranchée),
- Evacuation en décharge,
- Blindage de tranchée,
- Lit de pose et enrobage,
- Remblai (tranchée),
- Fourniture et pose de conduite acier DN1400 mm (cerces comprises),
- Béton (pour enrobage conduite)

Les équipements hydro-électromécaniques ont été chiffrés auprès de fournisseurs (pompes, vannes, équipements annexes, poste d'arrivée MT/BT et transformateur 350 kVA).

D'autres postes ont été estimés au forfait sur la base d'anciens chantiers de travaux.

Les quantités prises en compte dans le chiffrage ont été estimées sommairement en raison du peu de données disponibles sur la topographie du site et du niveau de détail associée à l'étude (faisabilité).

Une provision pour aléas et divers non métrés est intégrée au calcul (25% de l'estimation initiale).

Des prix généraux, correspondant à 15% du montant des travaux, sont comptabilisés dans l'estimation.

On compte 10% pour les investigations et la mission de maîtrise d'œuvre pour la suite des études.

Poste	Unité	Prix unitaire	Quantité	Total
CONDUITE EN TRANCHEE				
Déblais accès aqueduc (puits)	m³	10.00 €	63.00	630 €
Blindage puits	Forfait	10 000.00 €	1.00	10 000 €
Déblais meubles (tranchée)	m³	50.00 €	1 932.00	96 600 €
Evacuation en décharge	m³	10.00 €	580.00	5 800 €
Blindage tranchée	m²	25.00 €	1 471.00	36 775 €
Lit de pose et enrobage	m³	40.00 €	133.00	5 320 €
Remblai (tranchée)	m³	30.00 €	1 800.00	54 000 €
Fourniture et pose canalisation acier DN1400 + coudes (transport inclus)	ml	2 000.00 €	318.00	636 000 €
Fenêtre dans aqueduc pour accès conduite et rebouchage soigné	Forfait	8 000.00 €	1.00	8 000 €
Sous total				853 125 €
CONDUITE DANS AQUEDUC FONTINETTES --> BATAVIA				
Fenêtre dans aqueduc pour accès conduite et rebouchage soigné	Forfait	8 000.00 €	1.00	8 000 €
Béton (pour enrobage conduite)	m³	500.00 €	426.00	213 000 €
Fourniture et pose canalisation acier DN1400 + coudes	ml	2 000.00 €	600.00	1 200 000 €
Sous total				1 421 000 €
STATION POMPAGE				
Pompe	Unité	82 500.00 €	4.00	330 000 €
Equipements annexes	forfait	11 270.00 €	1.00	11 270 €
Vanne guillotine	Unité	7 000.00 €	4.00	28 000 €
Vanne de sectionnement amont	Unité	20 000.00 €	1.00	20 000 €
Génie civil et terrassement station pompage	forfait	80 000.00 €	1.00	80 000 €
Fourniture et pose canalisation acier DN350 + coudes (transport inclus)	ml	500.00 €	100.00	50 000 €
Poste d'arrivée MT/BT (transformateur 350kVA inclus)	forfait	400 000.00 €	1.00	400 000 €
Raccordement au réseau	forfait	50 000.00 €	1.00	50 000 €
Sous total				969 270 €
AUTRES				
Provisions pour aléa et divers non métrés	25%	de l'estimation initiale		810 848 €
Prix généraux	15%	du total travaux		608 136 €
Investigations et MOE	10%	466 238 €		
MONTANT TOTAL DE L'OPERATION (H.T)				5 128 618 €

4.1.4.2. COUT D'EXPLOITATION

Le coût de fonctionnement de la station de pompage est estimé sur la base des hypothèses suivantes :

- Fonctionnement 24h/24 des 3 pompes – 6 jours sur 7
- Utilisation longue durée selon la dénomination des tarifs EDF
- Distinction du coût du kWh selon :
 - Saison haute (novembre à mars)
 - Saison basse (avril à octobre)
 - Heures de pointe de décembre à février inclus, de 9h à 11h et de 18h à 20h, hors week-end et jours fériés,
 - Heures pleines de 7h à 23h tous les jours ouvrés
 - Heures creuses entre 23h et 7h les jours ouvrés, ainsi que les samedi, dimanches et jours fériés,

Qui donne un coût moyen de 0,07 € le kWh.

Pour une consommation annuelle estimée à 2 054 160 kWh environ, le coût de fonctionnement de la station de pompage est estimé à 145 000 € environ, auquel on rajoute 10 000€ de maintenance annuelle soit un coût annuel total de fonctionnement de 155 000 €.

Il est à noter que cette estimation reste très sommaire et méritera d'être affinée à un stade d'études ultérieur. En effet, depuis 2015, les tarifs réglementés pour les sites souscrivant une puissance supérieure à 36 kVA ont été abolis. Désormais, les fournisseurs d'électricité font des offres commerciales basées sur le prix de marché de gros de l'électricité, qui est soumis à d'importantes fluctuations.

4.2. Aménagement d'un déchargeur gravitaire supplémentaire de l'étang vers la Basse Meldyck

4.2.1. Principes d'aménagement d'un déchargeur supplémentaire

Le principe d'accroître la décharge gravitaire de l'étang de Batavia a déjà été envisagé par le passé (cf. rapport de phase 1). Deux faisceaux d'implantation ont été étudiés pour le cheminement de la conduite, son diamètre, le point de restitution (en pointillés rouges sur la Figure 4-11), qui se sont heurtés à la difficulté d'insérer cet ouvrage dans un environnement urbain très contraint (habitations, réseaux, passages sous la route, franchissement de la voie ferrée,...).

Une configuration différente est proposée (en pointillés jaunes ci-après). Elle consiste à faire cheminer la conduite dans le corridor libre au pied de la RD942.

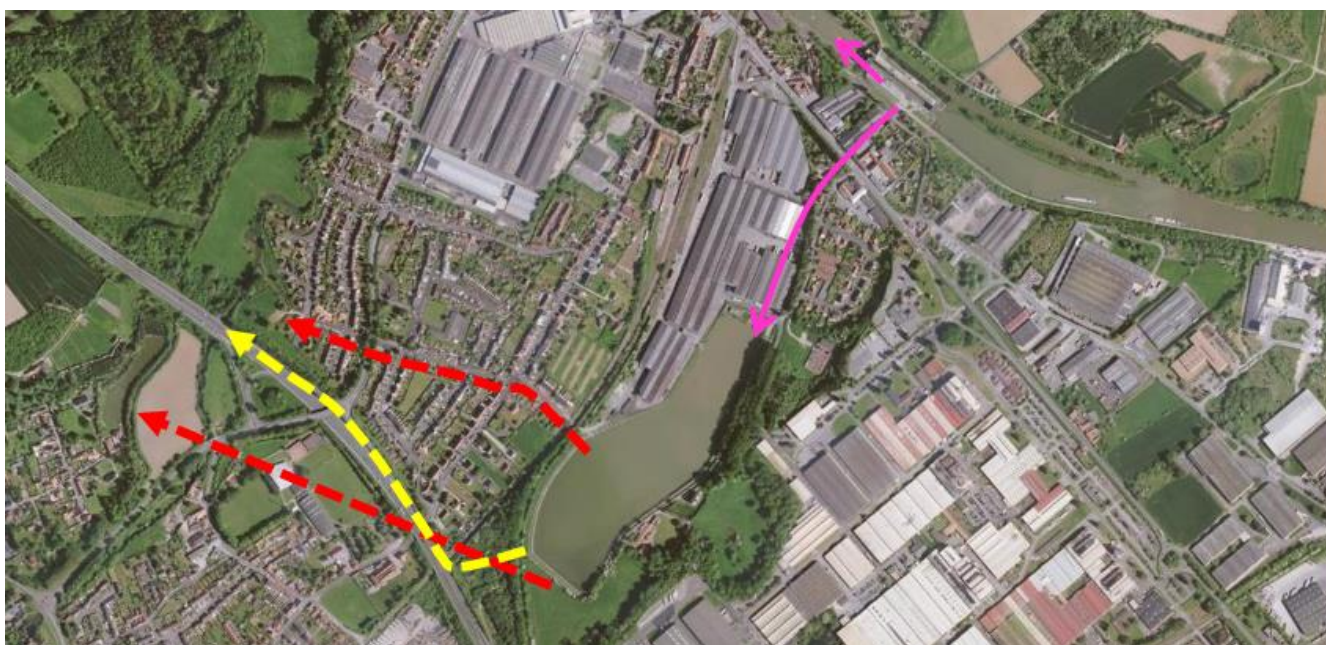


Figure 4-11 : Faisceaux d'implantation envisagés pour la conduite (proposé en jaune, non retenus en rouge)

L'implantation proposée induit trois tronçons réalisés sans tranchée sous la voie ferrée et la rue de l'Europe, et sous l'avenue Bernard Chochoy. Le reste du linéaire pouvant être réalisé traditionnellement soit par une conduite enterrée soit en fossé ou canal ouvert (variantes à étudier en phase AVP). La définition technique des ouvrages devra être optimisée lors d'études de conception détaillées.

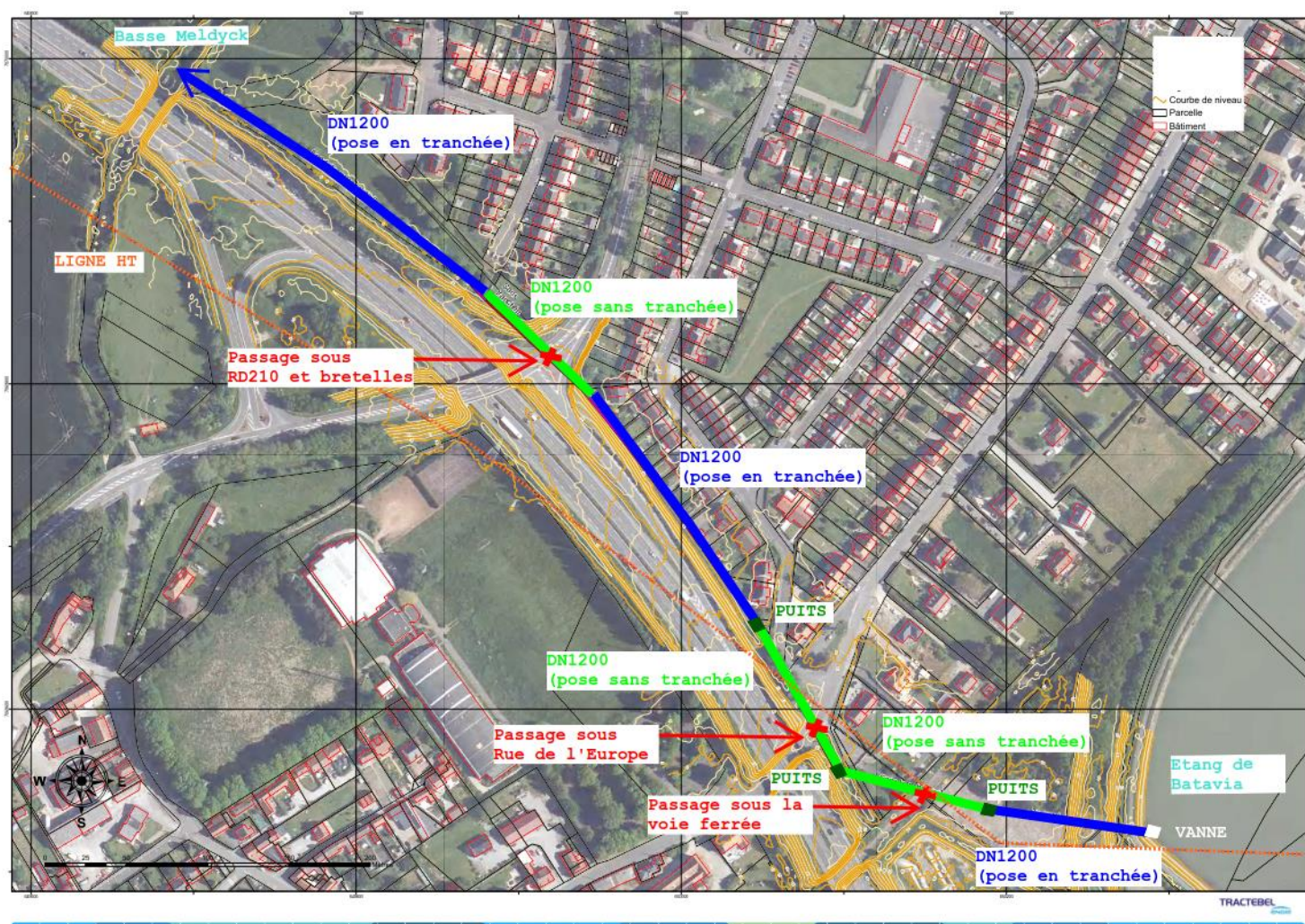


Figure 4-12 : Tracé de principe proposé pour la conduite

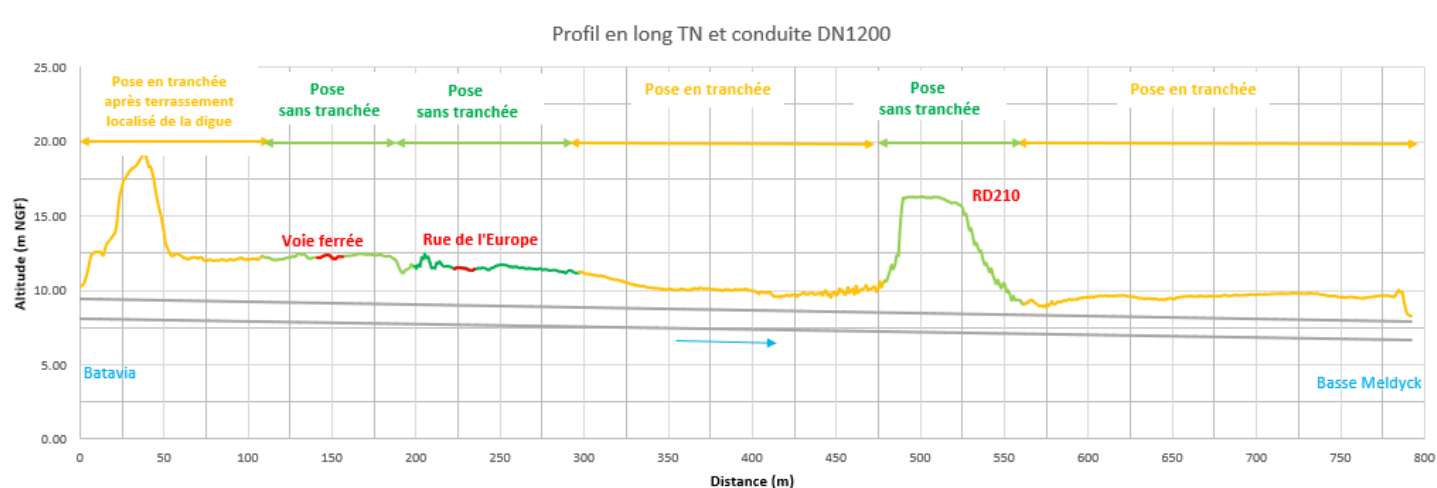
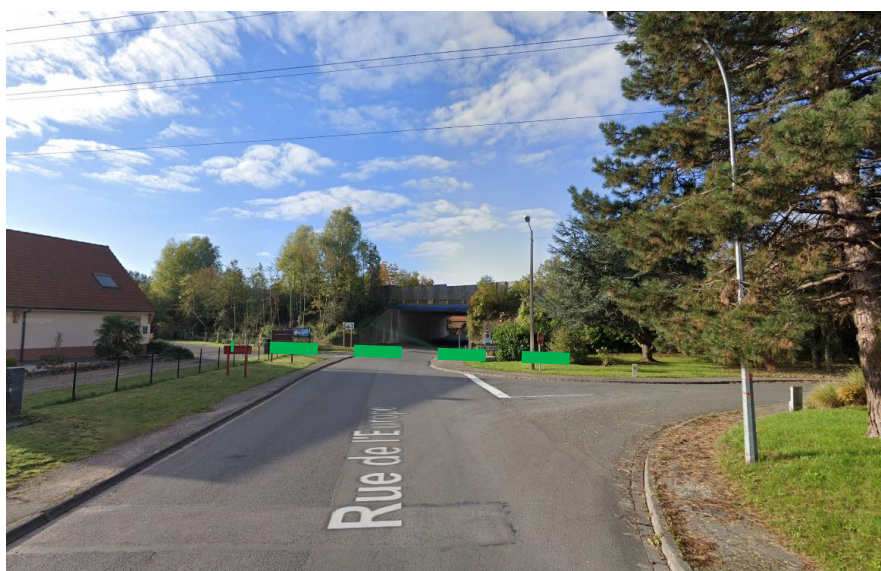


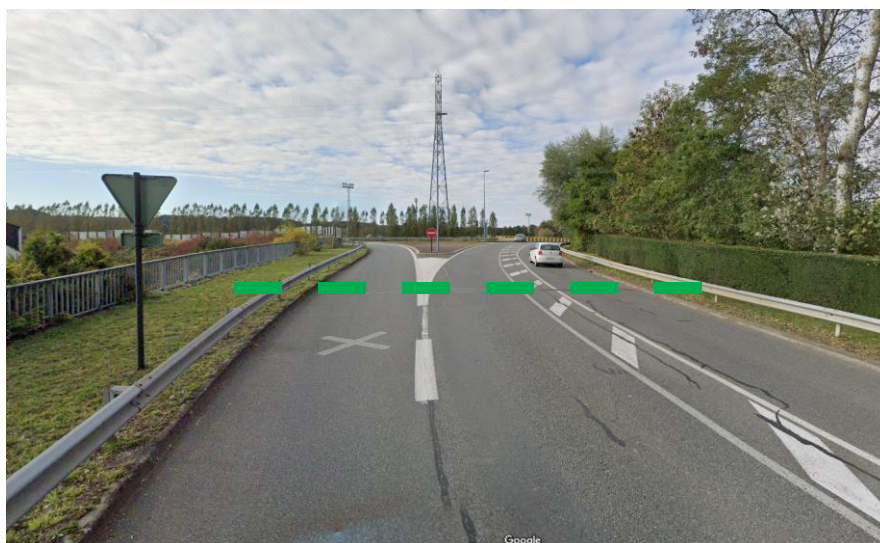
Figure 4-13 : Profil en long du terrain naturel et de la conduite, pour le tracé envisagé



Photographie 1 : Passage avec pose sans tranchée n°1 – sous la voie ferrée



Photographie 2 : Passage avec pose sans tranchée n°2 – sous la rue de l'Europe



Photographie 3 : Passage avec pose sans tranchée n°3 – sous le raccordement à la RD210

4.2.2. Efficacité pour la gestion hydraulique

Le fonctionnement de l'ouvrage, et sa débitance, varient en fonction du niveau d'eau dans l'étang. A niveau bas, la conduite fonctionne à surface libre puis lorsque le niveau d'eau est suffisamment haut par rapport à la génératrice supérieure de la conduite, l'ouvrage passe en charge. Il n'est donc pas réaliste de disposer d'un débit de fuite constant sur toute la journée de navigation.

La simulation de phase 1 (journée du 4 mars, avec 15 bassinées complètes), mise en œuvre en phase 1, est reprise ici en considérant en plus la loi de débitance d'une conduite de diamètre 1200 mm, donnée ci-après.

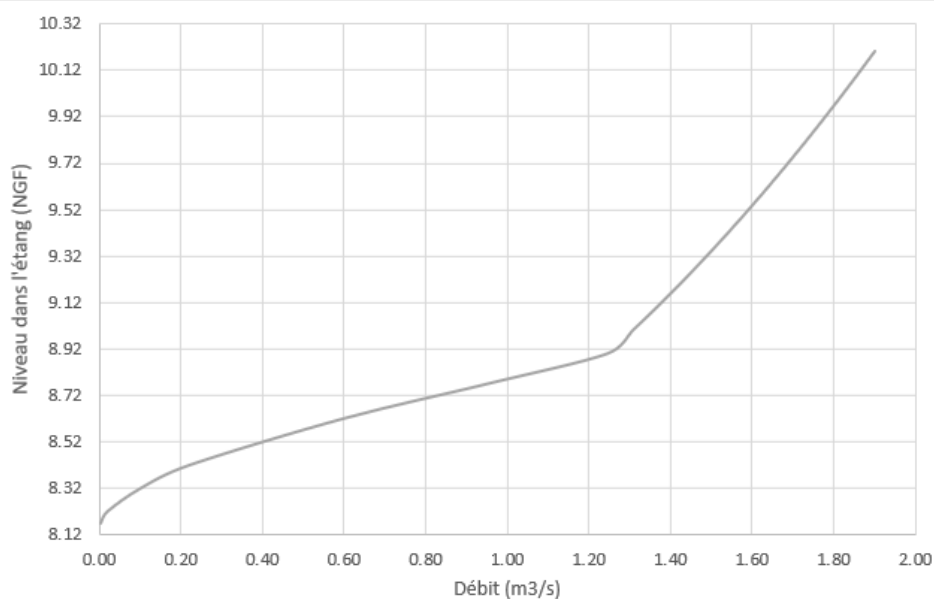


Figure 4-14 : Loi de débitance DN1200

Cette loi a été sommairement estimée sur la base des hypothèses suivantes :

- Niveau amont : variable
- Niveau aval : 7,92 m NGF
- Linéaire de conduite : 820 m
- Pente conduite : 0.18% (fil d'eau amont : 8,12 m NGF / fil d'eau aval : 6,62 m NGF)
- Coefficient de Manning : 75 (conduite en béton)
- Coefficient de perte de charge singulières : 0,6 en entrée et 1 en sortie

On teste l'enchaînement de 10 journées du 4 mars 2021 (avec bassinées complètes) pour évaluer si cette solution permet ou non de ne pas saturer l'étang au fil des journées de navigation.

Un niveau initial de l'étang à 8,12 m NGF est pris en compte dans la simulation.

Les résultats obtenus sont donnés ci-après.

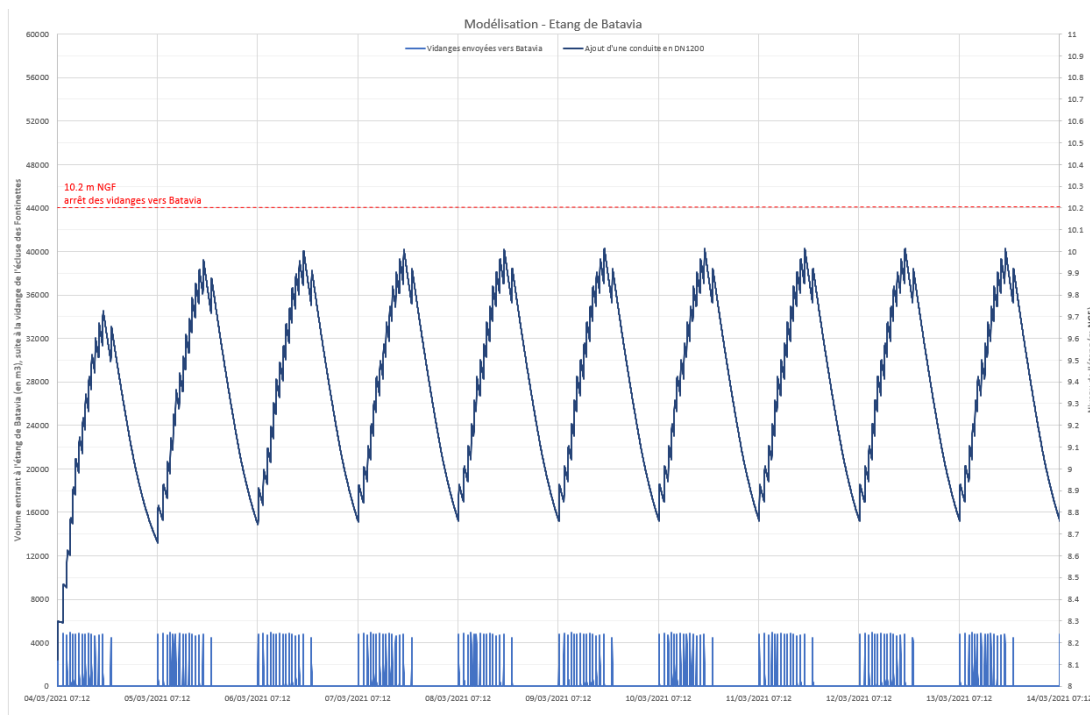


Figure 4-15 : Evolution du niveau d'eau à Batavia pour 10 journées de navigation à 15 bassinées complètes par jour

Avec l'hypothèse de trafic retenu, on constate qu'une conduite supplémentaire en DN1200 permet d'obtenir une configuration stable, mais avec une redescente du plan d'eau un peu supérieure au seuil de déversement de 8,12 NGF. Avec un démarrage à 8,12 m NGF, la simulation montre qu'au début de la deuxième journée, le niveau d'eau dans l'étang est de l'ordre de 8,66 m NGF puis augmente à 8,74 m NGF puis 8,76 m NGF respectivement au démarrage des deuxième et troisième journées. Le cycle se stabilise ensuite avec un niveau minimum à 8,76 m NGF ce qui est acceptable.

L'étang retrouvera son niveau minimum à 8,12 NGF lors des baisses de trafic et lors des arrêts de navigation (le dimanche et jours fériés, avec le planning actuel).

Le niveau maximum de l'étang n'est pas atteint et il n'y a plus de saturation de l'étang au fil des journées de navigation.

Cette configuration permet d'absorber les 15 bassinées complètes de la journée du 4 mars 2021. Le débit moyen sur une journée restitué à la Basse Meldyck est égal à 1,50 m³/s.

Le niveau maximal atteint dans l'étang est égal à 10,01 m NGF, ce qui laisse une revanche de 20 cm par rapport à la cote maximale autorisée dans l'étang.

Compte tenu de la marge disponible, la simulation est relancée à titre d'information pour évaluer si l'étang est capable d'absorber une bassinée supplémentaire, ce qui est le cas, comme le montre la figure suivante.

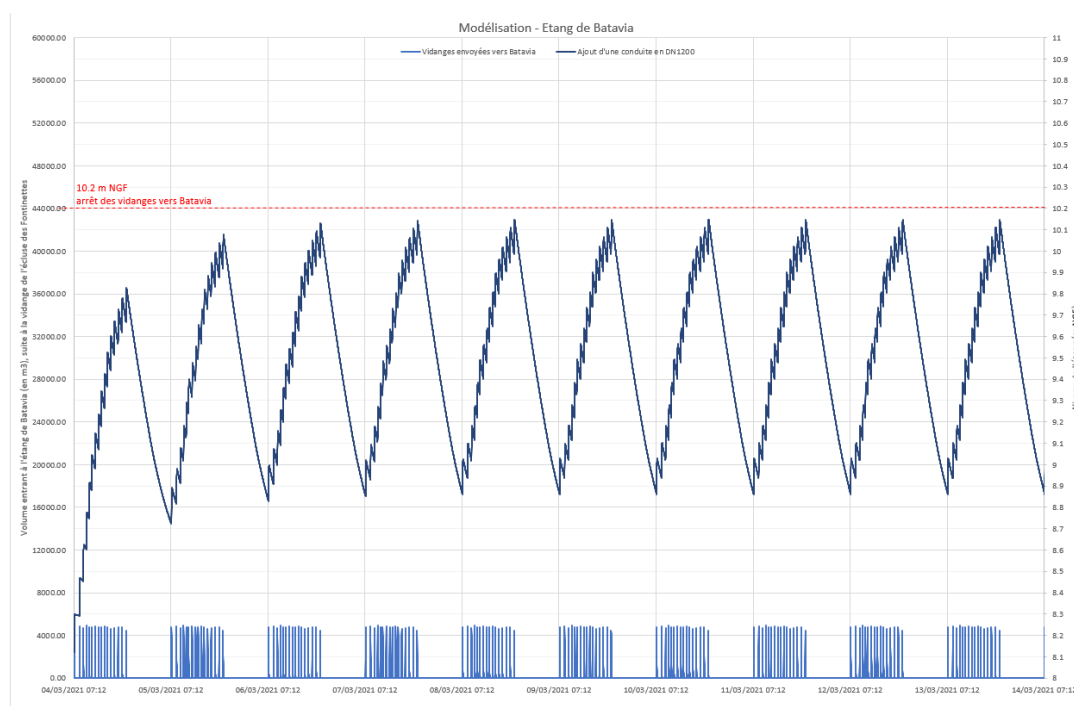


Figure 4-16 : Evolution du niveau d'eau à Batavia pour 10 journées de navigation à 16 bassinées complètes par jour

Le niveau maximal dans l'étang est égal à 10,15 m NGF et le niveau minimal se stabilise autour de la cote 8,87 m NGF.

Au final, la configuration étudiée permet d'absorber 16 bassinées complètes. Au-delà, la cote de 10,20 m NGF est dépassée. Le débit moyen journalier restitué à la Basse Meldyck atteint 1,58 m³/s pour 16 bassinées par jour, avec un débit maximal égal.

4.2.3. Faisabilité technique du déchargeur gravitaire

4.2.3.1. POSE DE CONDUITE SANS TRANCHEE

Comme indiqué précédemment, le tracé retenu comporte trois tronçons de conduite à réaliser sans tranchée :

- sous la voie ferrée touristique en exploitation,
- sous la rue de l'Europe,
- sous l'avenue Bernard Chochoy.

Sous la voie ferrée et sous la rue de l'Europe, les possibilités de tracé de la conduite et d'implantation des points d'entrée et de sortie sont limitées car les contraintes sont nombreuses :

- présence d'une ligne haute tension avec notamment un pylône dans la zone de chantier,
- présence d'un bassin de rétention entre la RD 942 et le pylône,
- nombreuses habitations.

La proximité de la voie ferrée et de la rue de l'Europe milite en faveur de la réalisation d'un unique tronçon, de 120 à 150 ml environ (tracé noir ou blanc sur la figure suivante).



Figure 4-17 : Passage sous la voie ferrée et sous la rue de l'Europe – Solution avec un unique tronçon sans tranchée

Néanmoins, les tracés possibles se situent très proches des habitations et les points d'entrée ou de sortie se trouvent sous la ligne HT, ce qui sera très contraignant pour les engins de chantier. Cette option n'est donc pas retenue.

On propose à la place de scinder le tronçon en deux, de 100 ml chacun environ, de manière à s'éloigner des habitations et à décaler les points d'entrée/sortie de la ligne HT (tracé vert en figure suivante).



Figure 4-18 : Passage sous la voie ferrée et sous la rue de l'Europe – Solution avec deux tronçons sans tranchée

Plusieurs techniques de réalisation existent pour la pose de conduite sans tranchée. A ce stade des études, on reste sur des solutions de principe. Elles devront être confirmées sur la base d'investigations géotechniques et de levés topographiques à mener sur site dans le cadre d'études ultérieures.

- Micro-tunnelier :

Pour un diamètre DN1200, il est nécessaire d'avoir recours à du micro-tunnelage. Le linéaire envisagé (100 ml) reste compatible avec cette méthode, qui est limitée à des tirs de 130-150 ml en général pour des conduites de diamètre inférieur à 1400 mm. Au-delà, il faut prévoir des puits intermédiaires ou augmenter le diamètre de la conduite au-delà de 1400 mm pour la rendre visitable et donc compatible avec l'installation et la dépose de bancs de poussée intermédiaires.

La couverture minimale à prévoir est de l'ordre de 2 fois le diamètre extérieur de la conduite (à adapter en fonction de la nature du terrain). Cela est compatible avec le profil en long de la conduite et du terrain naturel.

Cette technique est assez lourde. Elle nécessite des infrastructures de départ et de creusement conséquentes (puits avec bancs de poussée, bacs de traitement, etc).

- Forage dirigé

Cette technique est moins lourde que la précédente mais son domaine d'application est limité à des diamètres de conduite de l'ordre de 800 à 1000 mm.

Pour avoir recours à cette technique, il serait donc nécessaire d'adapter le projet en prévoyant localement le passage sur deux conduites de diamètre inférieur (ici 2 DN850), disposées en parallèle, avec un espacement de l'ordre de 1,5 fois le diamètre de nu à nu. Sur du forage dirigé, il est d'usage de réaliser des tirs courbes.

Dans le cas présent, la conduite est enfouie à plus de 4 m de profondeur par rapport au terrain naturel. Le rayon de courbure qui permettrait l'atteinte de cette profondeur n'est pas compatible avec les emprises disponibles de part et d'autre des ouvrages à franchir. Il serait alors nécessaire de réaliser des puits pour installer le matériel de forage. La solution n'est pas avantageuse par rapport au micro-tunnelier et n'est pas jugée adaptée au cas présent.

Conclusion sur la technique de pose sans tranchée :

On retient pour la suite la solution du microtunnelage.

Sous la RD210, les deux solutions précédentes de pose sans tranchée peuvent être appliquées. Toutefois, pour rentabiliser les coûts d'aménée/repli du microtunnelier, on conserve une seule technique de pose sans tranchée pour le chantier, à savoir celle du microtunnelage.

4.2.3.2. POSE DE CONDUITE EN TRANCHEE

Partout ailleurs, la conduite sera posée en tranchée. Compte tenu de la profondeur importante de la tranchée (entre 2 et 4 m), il sera nécessaire de blinder la fouille.

Il est à noter que nous prévoyons de terrasser localement l'ancien remblai ferroviaire qui forme une digue en proximité de l'étang de Batavia, sur 10 m de largeur environ, pour permettre la réalisation d'une plateforme de travail calé à une cote proche du TN existant à proximité de la digue (12 m NGF environ), et ce pour permettre la pose de la conduite en tranchée reliée à la tête amont vannée à créer dans l'étang.

Conclusion sur la faisabilité technique :

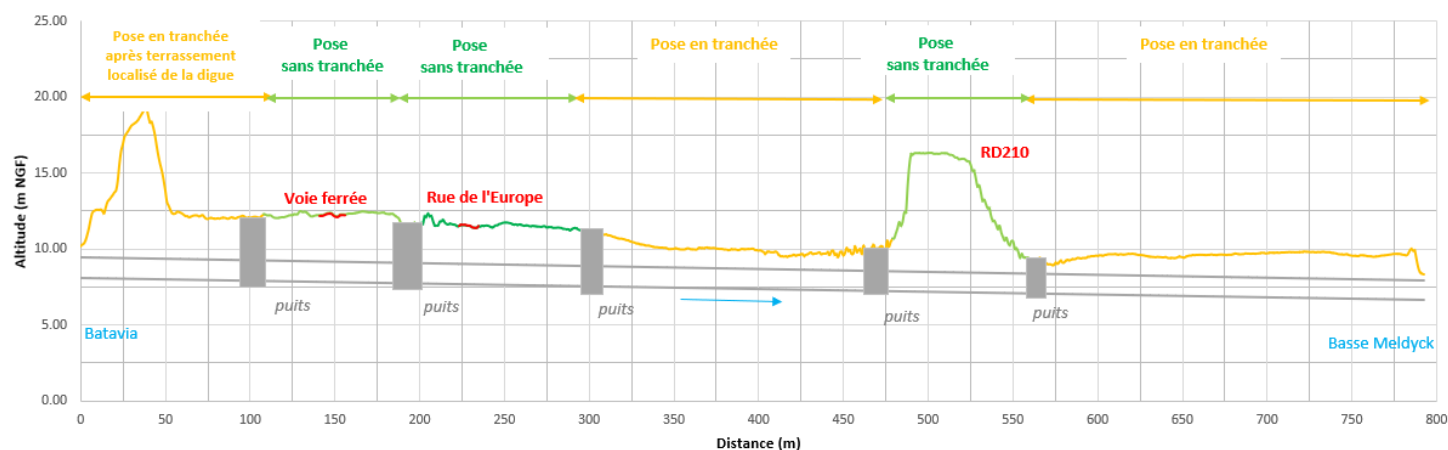
Les tronçons de conduite concernés par la pose en tranchée ne posent pas de problématiques techniques particulières. Il s'agit de travaux classiques, même si la profondeur des tranchées est relativement élevée et nécessitera la mise en place d'un blindage des fouilles.

Le recours aux techniques du micro-tunnelage est indispensable au franchissement de la voie ferrée et des voiries. Le recours à cette technique, très bien maîtrisée pour ce type d'implantation périurbaine, aura une incidence sur le coût des travaux et sur le phasage de l'opération.

Des investigations topographiques et géotechniques seront nécessaires en préalable aux études de conception détaillée.

La profondeur des tranchées et la couverture disponible au-dessus des passages sans tranchée sont données en figure suivante.

Profil en long TN et conduite DN1200



Profondeur des tranchées et couverture disponible au droit des passages sans tranchée

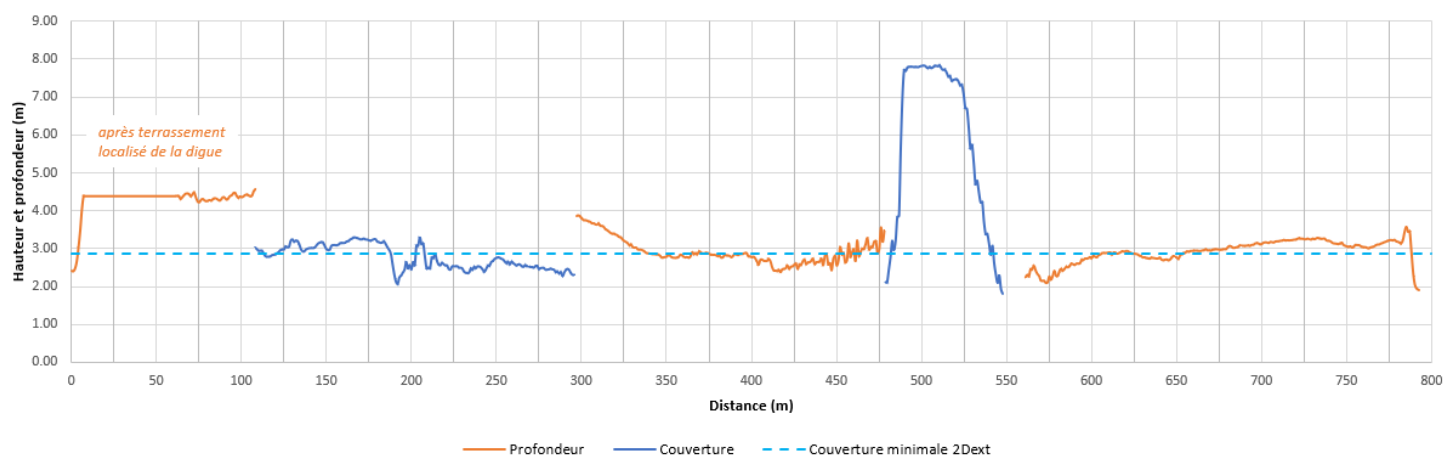


Figure 4-19 : Profils en long TN et conduite (graphique du haut) – Profondeur tranchée et couverture au droit des tronçons sans tranchée (graphique du bas)

4.2.4. Evaluation financière

Une estimation préliminaire du coût des travaux est présentée ci-après pour la solution de déchargeur gravitaire en conduite béton DN1200 mm, en PN1 (pression intérieure maximale égale à 1 bar soit 10 mCE).

Il s'agit d'une estimation sommaire qui doit permettre de comparer les différentes solutions entre elles.

L'estimation se base sur des prix unitaires issus de marchés de travaux similaires pour les postes suivants :

- Déblais meubles,
- Déblais meubles (tranchée),
- Evacuation en décharge,
- Blindage de tranchée,
- Lit de pose et enrobage,
- Remblaiement (tranchée),
- Fourniture et pose de conduite béton DN1200 mm,
- Déblais pour réalisation des puits entrées/sorties,
- Fourniture et pose de conduite béton DN1200 mm par microtunnelage,

D'autres postes ont été estimés au forfait sur la base d'anciens chantiers de travaux.

- Amenée, installation, démontage et repris du matériel nécessaire à la pose par micro-tunnelier,
- Récupération du micro-tunnelier,
- Transfert du matériel de micro-tunnelage entre deux puits,
- Blindage des puits,
- Génie-civil pour massif de poussée,
- Fourniture et pose vanne amont,
- Travaux de génie civil ouvrage amont,

Les quantités prises en compte dans le chiffrage ont été estimées très sommairement en raison du peu de données disponibles sur la topographie du site et du niveau de détail limité de la présente étude (faisabilité).

Une provision pour aléas et divers non métrés est intégrée au calcul (25% de l'estimation initiale).

Des prix généraux, correspondant à 10% du montant des travaux, sont comptabilisés dans l'estimation.

On compte 10% pour les investigations et la mission de maîtrise d'œuvre pour la suite des études.

Poste	Unité	Prix unitaire	Quantité	Total
LINEAIRE EN TRANCHEE				
Déblais meubles (démolition localisée digue)	m³	10.00 €	2512.00	25 120 €
Déblais meubles (tranchée)	m³	50.00 €	4168.00	208 400 €
Evacuation en décharge	m³	10.00 €	1251.00	12 510 €
Blindage (tranchée)	m²	25.00 €	3496.00	87 400 €
Lit de pose et enrobage	m³	40.00 €	1495.00	59 800 €
Remblai (tranchée)	m³	30.00 €	2673.00	80 190 €
Fourniture et pose canalisation béton DN1200	ml	700.00 €	525.00	367 500 €
			Sous total	840 920 €
MICRO-TUNNELIER				
Amenée, installation, démontage et repli du matériel nécessaire à la pose par micro-tunnelier - Montage, démontage du matériel dans les puits d'entrée et de sortie	Forfait	100 000.00 €	1.00	100 000 €
Récupération du micro-tunnelier	Forfait	16 000.00 €	3.00	48 000 €
Transfert du matériel de micro-tunnelage entre deux puits	Forfait	15 000.00 €	2.00	30 000 €
Déblais pour réalisation des puits d'entrée/sortie	m³	50.00 €	279.00	13 950 €
Blindage des puits	Forfait	50 000.00 €	1.00	50 000 €
Génie-civil pour massif de poussée	Forfait	25 000.00 €	3.00	75 000 €
Fourniture et mise en place tuyau béton 1200 mm par microtunnelage	ml	3 000.00 €	271.00	813 000 €
			Sous total	1 129 950 €
OUVRAGE AMONT				
Vanne amont	forfait	20 000.00 €	1.00	20 000 €
Travaux GC ouvrage amont	forfait	20 000.00 €	1.00	20 000 €
			Sous total	40 000 €
AUTRES				
Provisions pour aléa et divers non métrés	25%	de l'estimation initiale		502 717 €
Prix généraux	10%	du total travaux		251 359. €
Investigations et MOE	10%	276 494 €		
MONTANT TOTAL DE L'OPERATION (H.T)				3 041 440 €

5. SYNTHÈSE DES ACTIONS, HYPOTHESES ET OBJECTIFS

5.1. Synthèse des actions envisageables

Les chapitres précédents ont permis d'identifier les axes d'amélioration qui peuvent être mis en œuvre pour optimiser la gestion de la ligne d'eau et la maîtrise des intumescences du bief Fontinettes-Flandres, en restant dans des dimensionnements réalistes et raisonnablement applicables sur site. La faisabilité technique, réglementaire et l'estimation de coûts de réalisation et d'exploitation sont examinés au chapitre suivant. Le tableau suivant rappelle l'inventaire des actions réalisées et les conclusions de l'étude

Figure 5-1 : Inventaire des actions et conclusions associées

Ouvrage concerné	Principe d'aménagement	Faisabilité
Aménagements du bief Fontinettes-Flandres	Nouveaux déversoirs : <ul style="list-style-type: none"> Ecluse carrée, RG écluse de Flandres, portes d'écluse de Flandres, Ecluse Saint Bertin 	Solutions inefficaces abandonnées
	BY-Pass vanné de l'écluse de Flandres : <ul style="list-style-type: none"> Conduite vannée en contournement de l'écluse Ouvrage vanné amont RG vers la Basse Meldyck 	Solution faisable, régulation à préciser Variante par la basse Meldyck moins coûteuse mais impactante
Gestion des Vannes de l'écluse des Fontinettes	<ul style="list-style-type: none"> Optimisation des séquences d'ouvertures pour les différents types de sassées 	<ul style="list-style-type: none"> Solution efficace après modernisation des vannes
Gestion des vannes de l'écluse de Flandres	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation pour la régulation du niveau moyen du bief fontinettes-Flandres 	<ul style="list-style-type: none"> Non conçues pour cet usage, exposition aux embâcles, incompatible avec la navigation
Pompage depuis l'étang de Batavia vers le bief amont	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation partielle des 2 conduites existantes Ø900 Tracé alternatif sous le domaine industriel Arc-international Conduite dans la galerie de l'évacuateur puis prolongée le long de l'écluse 	<ul style="list-style-type: none"> Etudes ARTELIA – Le réemploi des conduites existantes est peu envisageable (coûts de réhabilitation, problèmes de reconnexion dans le domaine ARC-International) Solution potentiellement faisable
Pompage depuis l'écluse des Fontinettes vers le bief amont	<ul style="list-style-type: none"> Pompes ou vis d'Archimède dans le bajoyer Rive gauche Impossibilité d'implantation en Rive droite de l'écluse (géotechnique, emprise de doublement possible de l'écluse) 	Etude VNF – grandes difficultés techniques. Principes abandonnés
Pompage depuis l'étang de Batavia vers l'écluse des Fontinettes	<ul style="list-style-type: none"> Refoulement par les galeries d'évacuateur jusqu'au sas des Fontinettes 	Solution abandonnée – perte de capacité de l'évacuateur, incompatible avec la navigation
Etang de Batavia	<ul style="list-style-type: none"> Agrandissement de l'étang Rehausse des berges de l'étang 	<ul style="list-style-type: none"> Solutions de faible intérêt. Nécessitent l'accroissement du débit de surverse de l'étang.
Evacuateur/ surverse de l'étang de Batavia	<ul style="list-style-type: none"> Remplacement/agrandissement des conduites existantes Fonçage au microtunnelier sous la rocade (RD 942) Emissaire en pied de la RD 942 (conduite en tranchée et forages dirigés) 	<ul style="list-style-type: none"> Contraintes urbaines, coûts très élevés (Etude ISL) Coûts très élevés, faisabilité technique incertaine (étude VNF) Solution potentiellement faisable
Autres volumes de compensation	<ul style="list-style-type: none"> Emprise de l'ancien bras de l'ascenseur des Fontinettes Autres localisations 	<ul style="list-style-type: none"> Perte d'emprise pour le doublement de l'écluse, volume limité, difficulté de liaison avec l'écluse, pas d'emprises disponibles en zone péri-urbaine

Le tableau suivant revient sur les actions à retenir et récapitule les effets associés.

Tableau 4 : Bilan des actions à retenir et synthèse

Aménagements envisagés	Incidences sur le volume total transmis au bief aval	Incidences sur les débits max d'écluse et les niveaux dans le bief aval	Incidences sur les sasses à Flandres	Incidences sur les déversés à Batavia	Economie de la ressource en eau de la voie d'eau
Optimisation des manœuvres de vannes	Aucune	Réduction du débit de pointe et des intumescences	Aucune (Maintenance des fausses bassinées à Flandres pour gérer l'excédent de volume)	Aucune	Aucune
Mise en place d'un by-pass à Flandres	Aucune	Aucune	Suppression ou réduction des fausses bassinées	Aucune	Aucune
Station de pompage à Batavia	Réduction du volume transmis au bief aval Réduction de 83 580 à 100 296 m ³ par jour de navigation à 14/15 bassinées complètes ou plus (seulement 1/3 du volume du sas est transmis à l'aval)	Réduction du débit de pointe et des intumescences Jusqu'à 14/15 bassinées par jour : il n'y a plus d'hydrogramme de type T restitué au bief aval	Suppression (jusqu'à 14/15 bassinées par jour) ou réduction des fausses bassinées (au-delà de 15 bassinées à Fontinettes)	Aucune	Réduction importante des volumes prélevés au bief amont
Déchargeur gravitaire à Batavia	Réduction du volume transmis au bief aval Réduction jusqu'à 117 000 m ³ par jour de navigation à 16 bassinées complètes ou plus	Réduction du débit de pointe et des intumescences Jusqu'à 16 bassinées par jour : il n'y a plus d'hydrogramme de type T restitué au bief aval	Suppression (jusqu'à 16 bassinées par jour) ou réduction des fausses bassinées (au-delà de 16 bassinées à Fontinettes)	Augmentation du débit restitué à la Basse Meldyck	Perte d'eau vers le milieu extérieur

Ce tableau de synthèse met en évidence qu'individuellement ces actions peuvent apporter des réponses directes à certains des objectifs d'optimisation de la gestion du bief mais pas à tous, et qu'elles présentent des limites en cas d'accroissement du trafic au-delà de 14/15 ou 16 bassinées par jour.

5.2. Hypothèses et objectifs de fonctionnement

L'établissement des scénarios d'aménagement possibles sera basé sur une combinaison des actions possibles pour satisfaire les hypothèses et les ambitions de fonctionnement souhaitées par VNF à divers horizons, qui concernent le trafic de navigation et éventuellement les objectifs d'économie d'eau du canal :

- À court terme : maintien des règles et horaires de navigation actuellement en vigueur, soit au maximum 15 bassinées complètes. A noter, que le passage prochain à la téléconduite qui joue sur le mode d'intervention des opérateurs, n'a pas d'incidence sur le trafic.
- A court/Moyen terme :
 - Objectif d'économie d'eau
- A moyen/long terme :
 - accroissement du trafic avec doublement de l'écluse des Fontinettes. En considérant une durée totale du cycle d'éclusée proche de 1h, le nombre maximum d'éclusée par jour, en supposant un enchaînement continu, ne devrait pas dépasser 24 à 25.
 - Objectif d'économie d'eau

Ces hypothèses (éventuellement les priorités) doivent être définies de manière concertée avec VNF.

Les combinaisons envisageables devront avoir des performances équivalentes, selon les objectifs visés et les hypothèses de fonctionnement retenues, pour pouvoir être comparées dans l'analyse multicritère.

6. SCENARIOS D'AMENAGEMENT ET COMPARAISON MULTI-CRITERES

6.1. Etablissement des scénarios

Le chapitre précédent a mis en évidence qu'individuellement les actions proposées peuvent apporter des réponses directes à certains des objectifs d'optimisation de la gestion du bief mais pas à tous.

Il est donc nécessaire de combiner les solutions. Plusieurs scénarios sont envisageables. Les scénarios doivent avoir des performances équivalentes, selon les objectifs visés et les hypothèses retenues, pour pouvoir être comparés dans l'analyse multicritères.

Les combinaisons d'actions envisageables sont données dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Combinaisons d'actions possibles (scénario 1 à 5)

	Sc 1	Sc 2	Sc 3	Sc 4	Sc 5
Optimisation des manœuvres de vannes	X	X	X	X	X
Mise en place d'un by-pass à Flandres	X			X	X
Station de pompage à Batavia		X			X
Déchargeur gravitaire à Batavia			X	X	
Efficacité attendue	Ok Ok	Ok Ok Ok	Ok Ok	Ok Ok	Ok Ok Ok

6.2. Critères de comparaison et pondération

Les critères retenus pour l'analyse multicritères sont :

➤ **Pour l'évaluation technique :**

- **Efficacité - atteinte des objectifs relatifs à la gestion des intumescences et régulation du volume d'eau sur le bief Fontinettes-Flandres**
- **Faisabilité technique :**
 - Complexité des travaux
 - Contraintes de réalisation : insertion sur site, facilité de mise en œuvre, Investigations complémentaires,
- **Maintenabilité et contraintes d'exploitation**
- **Délai de réalisation**

- Durée des travaux
- Phasage, compatibilité avec les chômages programmés
- **Incidences :**
 - Sur l'exploitation en phase travaux et en phase d'exploitation,
 - Sur l'environnement : Maîtrise foncière, Contraintes réglementaires,
- **Compatibilité avec l'augmentation du trafic et/ou doublement de l'écluse des Fontinettes.**

➤ **Pour l'évaluation financière :**

- **Coût :**
 - Coût d'investissement,
 - Coût d'exploitation

Ces critères sont évalués pour chaque scénario et affectés d'une note selon la pertinence de la solution vis-à-vis de ce critère.

La note varie entre 1 (solution mal adaptée) et 3 (solution adaptée). La note maximale peut être portée à 4 pour discriminer le critère d'efficacité relative des différents scénarios)

Une pondération est affectée à chaque critère, selon qu'ils sont jugés :

- fondamentaux : coefficient pondérateur égal à 3
- principaux : coefficient pondérateur égal à 2
- secondaire : coefficient pondérateur égal à 1.

Pour ce projet, on propose de retenir l'affectation suivante :

- Critères fondamentaux :
 - Efficacité - atteinte des objectifs :
 - Faisabilité technique
 - Coût
- Critères principaux :
 - Maintenabilité et contraintes d'exploitation
 - Incidences
- Critères secondaires :
 - Délai et contraintes de réalisation (maintien de la navigation pendant les travaux),
 - Compatibilité avec augmentation du trafic et/ou doublement de l'écluse

Cette affectation peut être revue et discutée avec VNF en fonction de ses objectifs et des priorités affectés à chacun.

A l'issue de l'analyse, on attribue une note technique et une note financière à chaque solution. La note finale correspond à la somme des notes technique et financière.

6.3. Classement et scénario proposé

Le Tableau 6 présente les résultats de l'analyse multicritères.

Tableau 6 : Comparaison multicritère des scénarii d'aménagement

Critères	Pondération	Sous critères	Scénario 1 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres		Scénario 2 : Optimisation des manœuvres de Vannes + SP à Batavia		Scénario 3 : Optimisation des manœuvres de Vannes + Déchargeur à Batavia		Scénario 4 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres + déchargeur à Batavia		Scénario 5 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres + SP à Batavia	
				Note		Note		Note		Note		Note
Efficacité	3	<ul style="list-style-type: none"> . Réduction des intumescences . Régulation du NNN du bief Font.-Flan. . Recyclage de l'eau . Amélioration gestion des transferts Lys-Aa 	<ul style="list-style-type: none"> . Bon contrôle des intumescences . Contrôle de la ligne d'eau du bief Font/Flan . Pas de recyclage . Transfert Lys-Aa indépendant des éclusées 	2.5	<ul style="list-style-type: none"> . Bon contrôle des intumescences . Pas de régulation directe de la ligne d'eau du bief Font/Flan . Recyclage et économie d'eau . Pas d'amélioration du Transfert Lys-Aa 	2	<ul style="list-style-type: none"> . Bon contrôle des intumescences . Pas de régulation directe de la ligne d'eau du bief Font/Flan . Pas de recyclage . Pas d'amélioration du Transfert Lys-Aa 	1.5	<ul style="list-style-type: none"> . Amélioration du Scénario 1 du fait des transferts plus importants vers Batavia permettant de réduire le nombre de restitution totale dans le bief Font/Flan . Pas de recyclage 	3	<ul style="list-style-type: none"> . Amélioration du Scénario 1 du fait des transferts plus importants vers Batavia permettant de réduire le nombre de restitution totale dans le bief Font/Flan . Recyclage et économie d'eau 	4
Gestion des ouvrages	3	<ul style="list-style-type: none"> . Automatisation . Insertion dans le dispositif actuel de gestion . Facilité de reprise en main en manuel 	<ul style="list-style-type: none"> . Etude de régulation poussée du By-pass à réaliser . Nécessité de données/mesures externes sur le Bief et écluse de Fontinettes . Peu intuitive, nécessité des informations distantes et une formation adaptée 	2	<ul style="list-style-type: none"> . Automatisation peu complexe . Mesure du niveau de l'étang et fonctionnement des pompes . Facile sur contrôle de niveau 	3	Aucun automatisme, fonctionnement statique, pas d'intervention manuelle autre que le contrôle des ouvrages	3	<ul style="list-style-type: none"> . Idem scénario 1 . Plus de souplesse pour la reprise en manuel 	2.5	<ul style="list-style-type: none"> . Idem scénario 1 . Plus de souplesse pour la reprise en manuel 	2.5
Faisabilité technique	3	<ul style="list-style-type: none"> . Complexité des travaux . Investigations complémentaires . Contraintes de l'environnement en phase travaux . Aléas possibles . Compatibilité des travaux avec l'exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> . Ouvrage GC hydraulique classique, mise au point du contrôle-commande assez complexe . Topographie et Géotechnique . Faibles contraintes de site . Présence éventuelle de réseaux enterrés à identifier . Pas d'arrêt de navigation ni de perturbation de la gestion actuelle pendant les travaux 	2.5	<ul style="list-style-type: none"> . Ouvrage GC et électromécanique hydraulique de complexité modérée (intervention sur ouvrages anciens), mise au point du contrôle-commande simple . Topographie et Géotechnique . Faibles contraintes de site - Environnement péri-urbain localisé pour les travaux en tranchée. . Pas d'arrêt de navigation pendant les travaux, . Arrêt provisoire des transfert vers Batavia pendant les travaux dans la galerie. Durée de travaux à minimiser. 	2	<ul style="list-style-type: none"> . Ouvrage de génie civil hydraulique classique avec recours F7au microtunnelier . Topographie et Géotechnique . Contraintes de site fortes en zone péri-urbaine, traversées de Voie ferrée et VRD, proximité Ligne HT. . Précautions des travaux à proximité et dans un cours d'eau . Pas d'arrêt de navigation pendant les travaux, ni de perturbation de la gestion actuelle pendant les travaux 	1	Idem scénario 1 + scénario 3	1	Idem scénario 1 + scénario 2	2
Contraintes d'exploitation	2	<ul style="list-style-type: none"> . Difficultés de Maintenance . Inscription dans l'exploitation actuelle des ouvrages 	<ul style="list-style-type: none"> . Mineures (entretien vannes, vérins, capteurs, automatismes et moteurs), . Domaines techniques habituels de VNF 	2	<ul style="list-style-type: none"> . Importantes (entretien pompes, vannes, régulation) . Domaines techniques habituels de VNF 	1	Aucune difficulté. A l'identique de la situation actuelle	3	Idem scénario 1	2	Idem scénario 1 + scénario 2	1
Incidences	2	<ul style="list-style-type: none"> . Sur le Milieu Naturel en phase d'exploitation . Sur l'environnement urbain ou péri-urbain en phase d'exploitation . Sur la navigation en phase travaux . Sur les modalités de gestion en phase travaux 	<ul style="list-style-type: none"> . Pas de rejet dans le milieu naturel extérieur . Domaine Fluvial uniquement . Très peu d'incidence des travaux sur la navigation ou sur la gestion des eaux 	3	<ul style="list-style-type: none"> . Pas de rejet dans le milieu naturel extérieur . Domaine Fluvial uniquement . Perturbations possibles de la navigation en cas de niveau trop haut dans le bief Fontinettes/Flandres lors des arrêts de transferts vers Batavia. Travaux en galerie à réaliser pendant le chômage. . Transfert total des éclusées au bief aval, si l'arrêt des transferts vers Batavia se prolonge, pendant les travaux. 	2	<ul style="list-style-type: none"> . Dossier d'autorisation réglementaire Loi sur l'Eau à prévoir, (avec éventuel retour sur la justification du déchargeur existant) . Maîtrise foncière à étudier susceptible de coûts complémentaires . Contraintes RFF/SNCF à intégrer pour la Maîtrise du fonçage sous la voie ferrée . Dispositions particulières de réduction/compensation des Impacts sur l'environnement naturel, urbain et péri-urbain pendant les travaux. . Aucune incidence des travaux sur la navigation et sur la gestion des eaux. 	1	Idem scénario 3	1	Idem scénario 2	2
Durée des travaux	1		Durée courte ≈ 2 à 3 mois (hors période de préparation)	3	Durée ≈ 6 à 8 mois (hors période de préparation)	2	Durée ≈ 8 à 10 mois (hors période de préparation) + délai d'instruction administrative d'au moins 1 an	1	Durée ≈ 10 à 12 mois (hors période de préparation) + délai d'instruction administrative d'au moins 1 an	1	Durée ≈ 10 à 12 mois (hors période de préparation)	2

Critères	Pondération	Sous critères	Scénario 1 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres		Scénario 2 : Optimisation des manœuvres de Vannes + SP à Batavia		Scénario 3 : Optimisation des manœuvres de Vannes + Déchargeur à Batavia		Scénario 4 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres + déchargeur à Batavia		Scénario 5 : Optimisation des manœuvres de Vannes + By pass à l'écluse de Flandres + SP à Batavia	
				Note		Note		Note		Note		Note
Compatibilité avec augmentation trafic et/ou doublement écluse	1		Il faut 48 min pour évacuer avec le by-pass à Flandres une sassée du type T-GS, donc en théorie le by-pass peut absorber 30 bassinées par jour, ce qui est supérieur au nombre maximal d'éclusées envisageables aux Fontinettes (24 à 25/jour) * * Point à affiner lors des études de détail, en fonction des possibilités d'anticipation des sassées et de la régulation effectuée.	2	Valorisation maximale du pompage pour 15 bassinées complètes chaque jour. Au-delà des restitutions totales vers le bief aval seront nécessaires	1.5	Valorisation maximale du transfert vers Batavia à 16 bassinées complètes chaque jour. Au-delà des restitutions totales vers le bief aval pourront se produire (ou transfert partiel éventuel vers Batavia pour des moyens sas ou petits sas).	1.5	Amélioration du scénario 1 en offrant plus de souplesse de gestion du by-pass, grâce au cycle de transfert vers Batavia jusqu'à 16 bassinées complètes *	3	Amélioration du scénario 1 en offrant plus de souplesse de gestion du by-pass, grâce au cycle de transfert vers Batavia jusqu'à 15 bassinées complètes chaque jour *	3
Note Technique			36		30.5		27		29.5		36.5	
Coûts	3	. Coût d'investissement . Coût de fonctionnement	. 663 k€ environ . Faible - Manœuvre de vanne	3	. 5 129 k€ environ . 155 k€ annuel (fonctionnement de la SP)	1.5	. 3 042 k€ environ . Quasiment nuls	2	. 3 705 k€ environ . Faible - idem scénario 1	2	.5 792 k€ environ . 155 k€ annuel (fonctionnement de la SP)	1
Note Financière			9		4.5		6		6		3	
Note finale			45		35		33		35.5		39.5	
Classement proposé			1er		4ème		5ème		3ème		2ème	

L'analyse multicritère précédente met en avant l'intérêt majeur du scénario 1 (1^{er} du classement) et de son évolution, le Scénario 5 (2^{ème} du classement) par ajout de la station de pompage de Batavia.

La comparaison des trois premiers scénarios (respectivement 1^{er}, 4^{ème} et 5^{ème}), qui correspondent à un premier niveau d'aménagement en complément de l'amélioration de la gestion des vannes de l'écluse des Fontinettes, met en évidence :

- La pertinence d'aménagement d'un by-pass à l'écluse de Flandres, scénario 1, qui nécessitera un approfondissement du process de régulation, mais qui ne répond pas aux soucis d'économie d'eau par recyclage. Ce scénario bénéficie d'un environnement très favorable pour sa réalisation à impact minimum, qui favorise sa notation.
- Le scénario 2, Station de pompage de Batavia, présente un intérêt fort car il est seul à répondre à l'objectif de recyclage. Sa mise en œuvre technique reste majoritairement à moindre impact mais présente une certaine complexité qui dégrade la notation.
- Le scénario 3, d'accroissement du déchargeur de Batavia, est très fortement pénalisé par ses impacts potentiels sur l'environnement et les dispositions administratives associées. Bénéficiant d'un fonctionnement inerte très peu contraignant pour son exploitation, ses performances permettent de traiter un train de 16 éclusées complètes vers Batavia chaque jour. Les effets sur le Bief aval sont indirects par minimisation des volumes restitués depuis les Fontinettes.

Les scénarios 4 et 5 sont des évolutions du scénario 1 en ajoutant soit le déchargeur supplémentaire sur l'étang de Batavia, soit la station de pompage de recyclage.

Ce dernier cas, scénario 5, est en fait celui qui valide tous les objectifs et les performances potentielles attendues, ce qui au final le place légèrement en première position technique.

Le scénario 4, malgré les améliorations techniques qu'il apporte pour la gestion hydraulique reste pénalisé par les contraintes administratives et d'environnement.

Du point de vue financier, la solution d'aménagement du By-pass à l'écluse de Flandres est de loin la plus économique, ce qui renforce sa place en tête technico-économique.

L'aménagement de la station de pompage de Batavia induit le coût le plus élevé, justifié par les équipements à mettre en œuvre et à leur fonctionnement, mais qui profite malgré tout d'emprises de réalisation potentiellement favorables et peu impactantes pour l'environnement, comparativement aux schémas de pompage évalués lors des études antérieures. Le choix d'approfondissement et de réalisation de cet aménagement de pompage dépendra de la priorité accordée aux fonctions de recyclage et donc d'économie de la ressource en eau.

7. CONCLUSION

L'étude de phase 2 conduit à dégager des solutions d'amélioration et d'aménagement qui permettent de répondre aux objectifs d'optimisation de gestion hydraulique (maîtrise des niveaux du bief Fontinettes-Flandres, réduction des intumescences, économie de la ressource en eau) tout en s'intégrant facilement dans le dispositif d'exploitation actuel. L'étude permet par ailleurs d'abandonner certaines solutions de principe préalablement identifiées peu efficaces ou dont la faisabilité n'est pas vérifiée.

Les voies d'amélioration privilégient par ordre de priorité :

- L'optimisation de la gestion des hydrogrammes restitués au bief aval par reprogrammation des séquences d'ouverture des vannes de l'écluse des Fontinettes pour tous les cas de fonctionnement de l'écluse,
- La mise en place d'un by-pass à l'écluse de Flandres opéré par une fonction de régulation des volumes en transit dans le bief Fontinettes-Flandres,
- L'installation d'une station de pompage à l'étang de Batavia.

L'alternative d'accroissement du déchargeur de Batavia reste séduisante techniquement par ses performances et son fonctionnement statique, mais elle se heurte à un contexte environnemental à priori très contraignant. Une étude plus détaillée de cette solution, au stade AVP, serait à mener avant de décider de son abandon ou de sa réalisation.

En tant qu'acteur de la transition énergétique, Tractebel propose à ses clients un éventail complet de conseils et services en ingénierie couvrant l'ensemble du cycle de vie des réalisations, y compris la conception et la gestion de projets. Reconnue comme une des plus grandes entreprises mondiales de conseils en ingénierie et s'appuyant sur plus de 150 ans d'expérience, la société a pour mission de façonner le monde de demain. Avec près de 5 000 experts et des implantations dans 33 pays, nous sommes en mesure de proposer à nos clients des solutions multidisciplinaires dans les domaines de l'énergie, de l'eau et des infrastructures.

TRACTEBEL ENGINEERING S.A.

SIEGE SOCIAL
5, rue du 19 mars 1962
92622 – Gennevilliers CEDEX – France
tractebel.engie.fr

Didier MAZEL / Sarah DELMAS
tel. +33 (0)4 66 04 98 73
didier.mazel@tractebel.engie.com
sarah.delmas@tractebel.engie.com