

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES

5 Février au 20 Août 2018



**Mission de maîtrise d'œuvre d'études pour la conception de
dispositifs d'assainissement et de drainage d'infrastructures ferroviaires**

pour en savoir plus...
eivp-paris.fr

École des Ingénieurs
de la Ville de Paris
80, rue Rébeval – 75019 Paris
01 56 02 61 00
eivp@eivp-paris.fr

SIONA-HISRY Boris

Promotion 57

Table des matières

RESUME.....	G
ABSTRACT	G
THEASARUS	G
REMERCIEMENTS	H
INTRODUCTION.....	1
I. Présentation de la structure	2
II. Cadrage du stage / Généralités	4
II.1. Les référentiels techniques	4
II.2. Plateforme et voies ferrées.....	4
II.2.1. Notion de remblai et déblai.....	4
II.2.1. Infrastructure ferroviaire.....	5
II.3. L'hydraulique des structures ferroviaires : Enjeux d'un domaine technique support.....	6
II.3.1. La protection de la plateforme via le drainage de la structure d'assise	6
II.3.2. La prévention des risques de glissement de talus sur la voie	7
II.3.3. Le respect de la continuité hydraulique et écologique	8
II.3.4. La protection des passages à niveaux et quais contre la stagnation d'eau	9
II.3.5. La gestion des eaux dans les couches inférieures à la plateforme	9
II.3.6. La gestion des interfaces entre l'hydraulique et les autres domaines.....	9
III. Méthodologie	10
III.1. La visite de site et le programme travaux	10
III.1.1. La visite de site	10
III.1.2. Le programme travaux	11
III.2. Les Phases d'études Projet (APO et PRO).....	11
III.2.1. Validation des zones de mise en place de systèmes de gestion des eaux.....	11
III.2.2. Dimensionnement général des ouvrages de drainage et d'écoulement des eaux.....	13
II.2.2.1. Détermination du bassin versant intercepté par le tronçon étudié.....	13
II.2.2.2. Détermination des débits de projet	14
II.2.2.3. Choix des ouvrages d'assainissement.....	15
II.2.2.4. Dimensionnement hydraulique des ouvrages d'assainissement.....	16
IV. Présentation des résultats	17
IV.1. Régénération des axes ferroviaires de l'Etoile de Saint-Pol.....	17
IV.1.1. Présentation du projet.....	17

IV.1.2. Gestion des données d'entrée	18
IV.1.3. Gestion de projet et rendus	19
IV.1.4. Présentation des programmes travaux.....	20
IV.1.5. Validation des tronçons à aménager	21
IV.1.6. Choix et dimensionnement des ouvrages.....	22
IV.1.6.1. Choix du tronçon présenté	22
IV.1.6.2. Caractéristiques du bassin versant et calcul des débits de projet	23
IV.1.6.3. Choix et Dimensionnement des dispositifs	26
IV.1.6.4. Implantations	28
IV.1.6.5. Gestion des exutoires	29
IV.1.6.6. Représentation graphique.....	29
IV.1.7. Estimation financière	29
IV.2. Réaménagement du nœud ferroviaire de Brétigny	30
IV.2.1. Présentation du projet.....	30
IV.2.2. Inventaire des données d'entrée	31
IV.2.3. Présentation du projet hydraulique de l'étude d'AVP	31
IV.2.2. Réalisation du drainage longitudinal : Enjeux et mise en place.....	32
IV.2.2.1. Implantation en plan des dispositifs.....	33
IV.2.2.2. Détermination des bassins versants.....	33
IV.2.2.3. Dimensionnement des dispositifs.....	33
IV.2.2.3. Implantation altimétrique	34
IV.2.3. Evacuation dans le bassin : Enjeux et mise en place.....	35
IV.2.3.1. Enjeux	35
IV.2.3.2. Méthode des pluies et dimensionnement du volume du bassin Banane	35
IV.2.3.3. Implantation, équipements et dimensions du bassin	36
V. Bilan de l'étude	37
VI. Analyse des difficultés rencontrées et solutions apportées	38
CONCLUSION	40
ANNEXE	41
BIBLIOGRAPHIE	80
LISTE DES ABREVIATIONS	81
GLOSSAIRE	81

Table des figures

Figure 1. Organigramme de Setec International – Source interne	3
Figure 2. Illustrations de remblai et déblai ferroviaire des deux côtés – Source internet Oc'via	4
Figure 3. Coupe schématique de l'infrastructure d'une voie ferrée nouvelle avec de forme normale – Source SNCF.....	5
Figure 4. Coupe de l'infrastructure d'une voie ferrée nouvelle avec couche de forme rapportée – Source SNCF.....	5
Figure 5. Coupe schématique de l'infrastructure d'une voie ferrée existante – Source SNCF...	6
Figure 6. Photographies de remontées boueuses sur le projet Saint Pol – Source interne.....	7
Figure 7. Photographies de coulées de boues sur une voie - Source interne.....	7
Figure 8. Photographies de l'affaissement de talus du déraillement du 14 juin 2018 – Source « Les Echos »	8
Figure 9. Photographies de deux ouvrages hydrauliques de traversée sous voie - Source interne.....	8
Figure 10. Croissance de végétations au niveau d'un quai dû à la non-évacuation des eaux – Source interne.....	9
Figure 11. Ingénieurs setec en visite de terrain pour le projet de Saint Pol - Source interne...	10
Figure 12. Captures d'écran de carte topographique IGN et du levé topographique du nœud ferroviaire de Brétigny	13
Figure 13. Localisation des 4 villes arrêt du projet de Saint Pol –Source « Google Map ».....	17
Figure 14. Levé topographique d'un remblai de part et d'autres de la voie – source interne ...	18
Figure 15. Coulées de boues et anciens travaux de maintien de l'OTS en déblai entre les Pk 126+586 – Pk 127+050 (photo prise depuis la voie) – Source interne	23
Figure 16. Vue du tronçon Pk 127+140 - Pk 127+200 depuis le Pk 127+200.....	28
Figure 17. Localisation du nœud ferroviaire de Brétigny - Source « Google Map ».....	30

Table des tableaux

Tableau 1. Coefficient de ruissellement pour la période de retour $T = 10$ ans	13
Tableau 2. Calcul du temps de concentration	14
Tableau 3 : Coefficients de Manning Strickler et contraintes de conception.....	16
Tableau 4. Dates des rendus des différentes phases du projet	20
Tableau 5. Caractéristiques des bassins versants et calcul des débits de pointe	23
Tableau 6. Tronçons de récupération des eaux en crête de déblai	24
Tableau 7. Débits de projets de descentes d'eau.....	24
Tableau 8. Mise à jour des bassins d'étude du drainage longitudinal et calcul des débits de projet.....	26
Tableau 9. Caractéristiques des aménagements en crête de déblai	26
Tableau 10. Débit correspondant aux types de descente d'eau	27
Tableau 11. Résultats du dimensionnement des descentes d'eau	27
Tableau 12. Caractéristiques du drainage longitudinal (Pk 127+000 - Pk 127+400)	27
Tableau 13. Schématisation graphique de la méthode des pluies	35
Tableau 14. Caractéristiques du bassin Banane	36

Table des Annexes (fournie en annexe)

RESUME

Le monde du ferroviaire est composé de plusieurs domaines techniques dont le rôle est fondamental à la bonne circulation des trains. L'un de ces domaines est l'hydraulique ferroviaire, dont le but est de gérer les eaux pluviales et souterraines afin qu'elles ne créent ou ne participent à des désordres empêchant la bonne utilisation de la voie ferrée. En effet, la présence d'eau dans les structures d'assise de la voie ou dans les talus environnants peut présenter un danger à éviter. De plus, cette gestion des eaux doit être réalisée dans l'environnement très dense et interfacé que constitue les abords des voies ferrées. Le présent document propose l'analyse de deux projets réalisés lors de mon stage de fin d'études à setec international. Il s'agit de projets de développement et de restructuration ferroviaire dans le but d'étudier comment l'hydraulique y est développé, tenant compte des spécificités et des enjeux inhérents à chacun des projets.

ABSTRACT

The railway world is composed of several technical fields essential to a good train traffic. The hydraulic rail is one of these fields; its purpose is to manage stormwater and groundwater in order to not create or participate in disorders that prevent the proper use of the railway. Indeed, the presence of water in the seating structures of the track or in environmental surroundings may present a danger to avoid. In addition, water management must be carried out in the very dense and interfaced environment that constitutes the vicinity of the railways. This document proposes an analysis of two projects realized during my internship at setec international. These are railway development and restructuring projects whose purpose is to study how hydraulics is developed by taking into account the specificities and issues inherent to each project.

THEASARUS

Hydraulique ferroviaire – Gestion des eaux pluviales – Drainage des structures d'assise –
Gestion des interfaces ferroviaires

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais remercier les différentes personnes ayant contribué à la bonne réalisation de ce stage et à la rédaction du présent rapport :

Notamment :

- Mr. Romain DUPIN, mon maître de stage qui, par son encadrement, ses conseils et sa disponibilité, a été un repère de qualité au sein de ces 6 mois d'immersion.
- Mrs. André GUILSOU et Denis REYNARD, respectivement directeur de projets et d'études, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en m'accueillant à setec international.
- Mme. Stéphanie LAPEYRE, Mr Guillaume BOUCHER et Mr. Jean-Yves FLOCH, pour leur disponibilité et aide apportées tout au long du stage. Un merci particulier est accordé à Mr BOUCHER pour son aide à la réalisation de certaines figures annexes après la fin du stage.
- Mr Eric GUERIN, mon tuteur de stage et Chef de la Subdivision Service aux Usagers et Patrimoine Section Assainissement de Paris, pour les conseils prodigués tout au long du stage.
- Ma famille et mes proches, pour avoir fait de moi ce que je suis, pour leur soutien et leur aide tout au long de la rédaction de ce rapport mais également tout au long des six dernières années d'études que vient achever ce travail.

INTRODUCTION

Le Travail de Fin d'Etudes est un stage de six mois effectué par les étudiants en dernière année à l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) et à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES). Il vise à l'intégration des élèves dans une structure professionnelle leur confiant des missions d'ingénierie dans les domaines étudiés au cours de leur formation. Le document entre vos mains présente une analyse du travail que j'ai pu réaliser durant ce stage, sur la période de février à aout 2018.

Avec 30 000 km de lignes, le réseau ferré français est l'un des plus importants en Europe et dans le monde. Pour faciliter et sécuriser la mobilité des voyageurs et le transport de marchandises, la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) aménage et modernise continuellement ce réseau. En effet, pas moins de 1000 km de voies ferrées sont intégralement renouvelés chaque année, nécessitant l'investissement de sommes colossales pour la maintenance et la modernisation du réseau (4.9 Mds€ en 2015).

Vu l'ampleur des travaux à effectuer, la SNCF fait appel, lorsque la disponibilité des équipes d'ingénieurs internes n'est pas suffisante, à des bureaux d'études privées pour la réalisation des études d'ingénierie qui conduiront aux travaux d'entretien ou de création des voies ferrées. Face à la variabilité des métiers engagés sur les infrastructures ferroviaires, (géotechnique, génie civil, électronique, signalisation, voies,...), ce sont de véritables groupements d'entreprises qui doivent travailler ensemble afin de mener à bien ces projets. C'est avec ce rôle de bureau d'étude que se présente setec international, ma structure d'accueil pour ce stage.

Membre du département hydraulique, l'une de mes missions a été la gestion des eaux pluviales sur les infrastructures ferroviaires. Bien que traditionnellement peu mise en avant, la gestion des eaux touche directement à la pérennité des voies ferrées. En effet la présence d'eau dans les ouvrages en terre, qu'il s'agisse des structure de plateforme ou des talus de part et d'autres de cette dernière, peut entraîner des désordres géotechniques graves tels que des problèmes de nivellement, des glissements de talus ou des coulées de boue. Afin de prévenir et d'éviter des problèmes de ce type, les eaux des voies ferrées sont drainées et évacuées selon des règles précises.

Après plusieurs mois à traiter de la place de l'hydraulique dans les infrastructures ferroviaires, je souhaiterais mener autour de ce thème la réflexion de ce rapport. Tout au long des pages suivantes, je recherchai à montrer en quoi les études hydrauliques sont un enjeu dans la conception d'infrastructures ferroviaires et comment s'intègrent elles dans un projet pluridisciplinaire, notamment vis-à-vis de la gestion des interfaces entre les différents métiers.

Pour y répondre, le rapport présentera dans un premier temps ma structure d'accueil, avant d'exposer des éléments de contexte indispensables à l'étude. Par la suite le travail effectué sera présenté via sa méthodologie et les résultats associés. Enfin différentes analyses personnelles sur des thématiques reliées à ma mission vous seront soumises.

I. Présentation de la structure

Créée en 1957, setec (Société d'Etudes Techniques) est un groupe privé d'ingénierie. Le groupe œuvre sur un large domaine d'activité, qu'il s'agisse de projets liés à la construction de bâtiments, d'ouvrages d'arts, d'infrastructures de transports, à l'hydraulique ou à la gestion globale de projets. Pour ce faire, l'entreprise se base sur la quarantaine de sociétés qui la composent, chacune spécialisée dans un domaine de compétences. C'est dans l'une de ces sociétés, setec international, que j'ai réalisé mon travail de fin d'études.

setec international est spécialisée dans la construction d'infrastructures de transports. Elle voit le jour en 1972 et concentre premièrement son activité sur des projets routiers à l'étranger. Par la suite, avec la rareté des projets à l'étranger, l'avènement du grand programme autoroutier français et la privatisation des autoroutes en 1990, l'entreprise recentre son activité en France et se développe fortement. Au cours des années 2000, la France voit l'essor des lignes à grandes vitesses ferroviaires. Setec international s'impose rapidement comme l'un des acteurs majeurs de ce domaine. Outre les sujets ferroviaires et routiers, setec international est acteur dans les domaines aéroportuaires et portuaires.

De façon plus détaillée, la société développe aujourd'hui son activité autour des enjeux suivants :

- Etudes générales et économiques sur les transports (études de trafic,...)
- Etudes à différents niveaux (Faisabilité, Avant-projet & Projet, Dossier de Consultation des entreprises, Suivi de travaux) de maîtrise d'œuvre de grandes infrastructures de transport : voies ferrées, LGV, métros, routes, autoroutes, ports & aéroports
- Etudes d'aménagement urbain
- Etudes d'environnement, études d'impact et études paysagères

L'entreprise est composée d'environ 300 (280 en fin d'année 2018, hors intérim) collaborateurs répartis sur les sites principaux (Vitrolles, Paris & Bordeaux) ainsi que les sites annexes et les chantiers tout autour du globe. Principalement des d'ingénieurs, ces 300 personnes balaient de larges domaines de compétences (Urbanisme, Géotechnique, Hydraulique, Tracé, Projeteurs,...). Cette diversité permet à la structure d'être autonome et de se positionner sur des projets à très grande échelle. Néanmoins, elle peut aussi compter sur son appartenance au groupe SETEC pour travailler en collaboration avec les autres filiales qui présentent des spécialisations dans leurs domaines (Fondations, Ouvrages d'art, Signalisation ferroviaire,...). L'organigramme de l'entreprise est présenté en Figure 1.

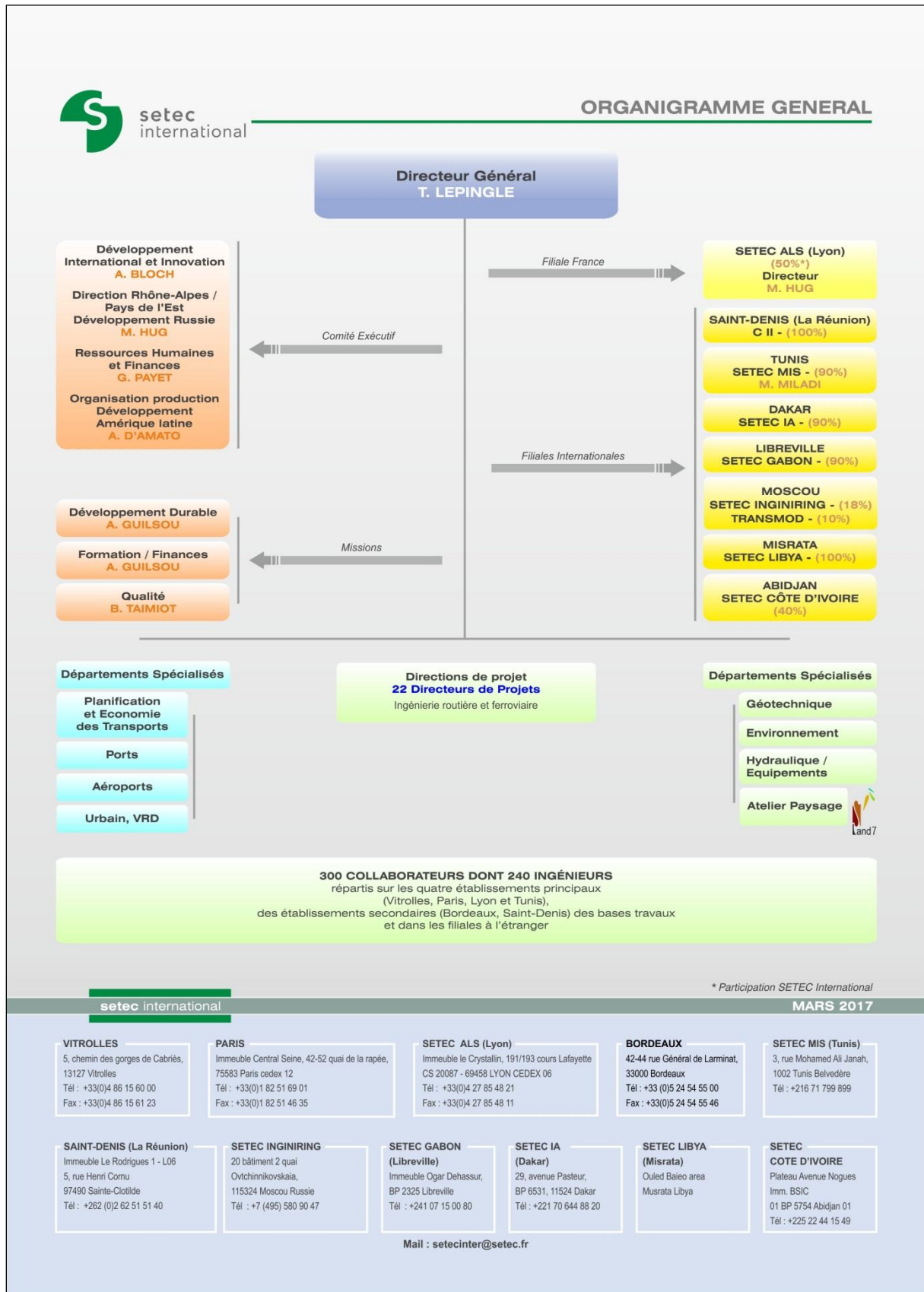


Figure 1. Organigramme de Setec International – Source interne

II. Cadrage du stage / Généralités

Ce chapitre vise à présenter les éléments de contexte relatifs au stage et à l'hydraulique des structures ferroviaires.

II.1. Les référentiels techniques

Tout domaine technique se base sur des normes et des directives afin d'unifier et réglementer à une certaine échelle la pratique de ce domaine. L'hydraulique ferroviaire n'est pas en reste puisqu'elle est régie par des documents : **les référentiels techniques**. Ces derniers sont des documents rédigés par la SNCF (SNCF Réseau) et des experts ferroviaires qui présentent les exigences de SNCF Réseau concernant la conception, la réalisation et la réfection des différents ouvrages sur les LGV (IN 3278 en plusieurs tomes) et les lignes ne pratiquant pas la grande vitesse (IN. 0259 , IN. 0260, ...). Organisé en 3 parties, chaque tome présente :

- Les conditions d'application du référentiel et les références utilisées
- Les modalités de conception des ouvrages concernés par le tome
- Les pratiques de référence en matière de réalisation des ouvrages et de suivi de travaux.

Si ces référentiels constituent la norme à suivre, leur respect peut être contourné ou assoupli. Des solutions alternatives dérogeant à ces standards peuvent être proposés par les maîtres d'œuvre, afin de s'adapter aux contraintes des sites étudiés. Ils doivent néanmoins démontrer que même si ces solutions dérogent aux standards des référentiels, elles permettent le bon fonctionnement des infrastructures. Ces demandes de dérogation sont formalisées via des dossiers type par le maître d'œuvre auprès du maître d'ouvrage (SNCF Réseau en général).

Concernant l'hydraulique, les référentiels utilisés au cours du stage sont les suivants :

- IN 3278 : Tome III LGV « Voyageurs » ; Hydraulique et drainage
- IN 0259 : Conception, réalisation et entretien des ouvrages de drainage et d'écoulement

L'ensemble des éléments techniques de référence (règles de dimensionnement, schémas de principe,...) présentés dans ce rapport se baseront sur ces documents.

II.2. Plateforme et voies ferrées

II.2.1. Notion de remblai et déblai

La voie ferrée est caractérisée par son positionnement vis-à-vis des talus qui la bordent de part et d'autres. Ainsi il est dit que la voie présente un **remblai** si elle est positionnée en crête de talus. A l'inverse, il est dit que la voie présente un **déblai** si elle est positionnée en pied du talus (cf. Fig. 2). Enfin si la voie ne présente pas de talus à proximité et qu'elle est au même niveau que le terrain naturel à proximité, il est question de **remblai rasant**. Il est important de préciser qu'une voie peut présenter d'un côté un remblai et de l'autre côté un déblai, notamment pour une voie à flanc de montagne. La figure 3 présente une illustration schématique de déblai et de remblai.

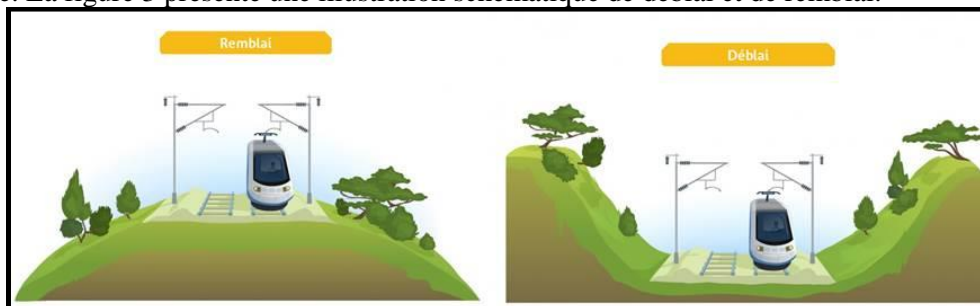


Figure 2. Illustrations de remblai et déblai ferroviaire des deux côtés – Source internet Oc'via

II.2.1. Infrastructure ferroviaire

La voie ferrée est composée des rails, des traverses, des attaches et du ballast. Cette voie est placée sur une succession de couches de divers matériaux. Ces couches sont posées sur une surface appelée **plateforme**. Elle a pour premier objectif la répartition des charges induites par le passage des trains vers le sol support. Elle est sensible à l'eau, dont la présence dégrade ses caractéristiques mécaniques ainsi que celle du sol support. La récupération des charges ferroviaires y est alors plus difficile et dégradée. De ce fait, l'infrastructure ferroviaire doit être conçue pour éviter la présence d'eau stagnante sur la plateforme. On distingue deux types de plateformes :

➤ Les plateformes des voies nouvelles

Les préconisations suivantes concernent les lignes à grande vitesse (LGV). La plateforme représente la surface située sous la sous-couche ferroviaire et le ballast. Le ballast a un rôle de maintien du nivellement vertical et longitudinal. La sous-couche sert de support au ballast et assure la répartition des charges ferroviaires vers la plateforme. De plus la sous-couche joue un rôle d'intermédiaire et de protection de la plateforme vis-à-vis des agressions provenant du ballast. Ce rôle sera détaillé par la suite

La localisation de la plateforme vis-à-vis des couches inférieures varie en fonction de la couche de forme. En effet, cette couche située immédiatement sous la plateforme est normalement composée de matériaux du sol en place, compacté selon des normes précises. L'infrastructure est alors semblable à la figure 3. On parle alors de voies nouvelles avec couche de forme normale.

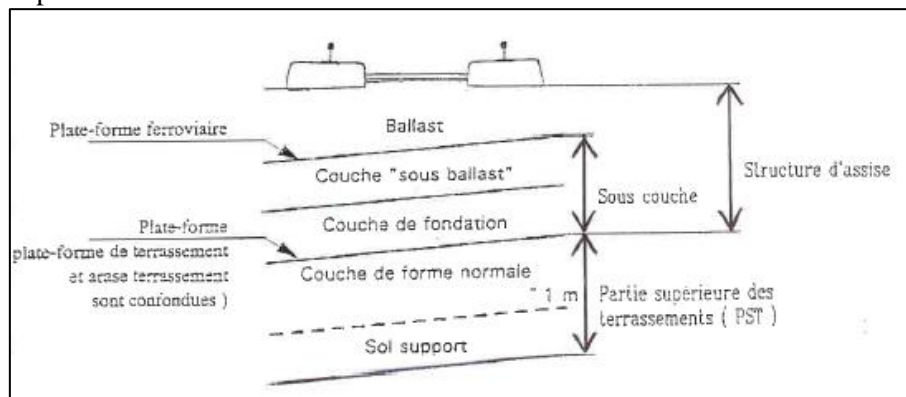


Figure 3. Coupe schématique de l'infrastructure d'une voie ferrée nouvelle avec de forme normale – Source SNCF

Néanmoins il peut arriver que le sol en place ne présente pas une portance suffisante pour supporter les charges induites. Dans ce cas, des matériaux de meilleure qualité sont « rapportés » et posés sur l'arase de terrassement pour constituer la couche de forme. L'infrastructure est alors semblable à la figure 4. On parle alors de voies nouvelles avec couche de forme rapportée.

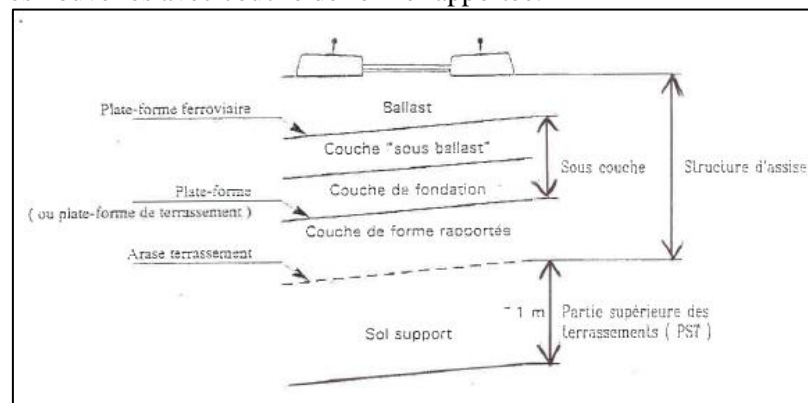


Figure 4. Coupe de l'infrastructure d'une voie ferrée nouvelle avec couche de forme rapportée – Source SNCF

➤ Les voies existantes

Les lignes anciennes n'ont pas été conçues selon les standards actuels, présentés précédemment. Le ballast était alors posé directement sur le sol support. Avec le temps et sous l'action des contraintes ferroviaires, la partie superficielle du sol support s'est muée en une couche aux propriétés mécaniques similaires à la sous-couche des voies nouvelles : la couche intermédiaire. Comme le montre la figure 5, la plateforme est donc située sous la couche intermédiaire.

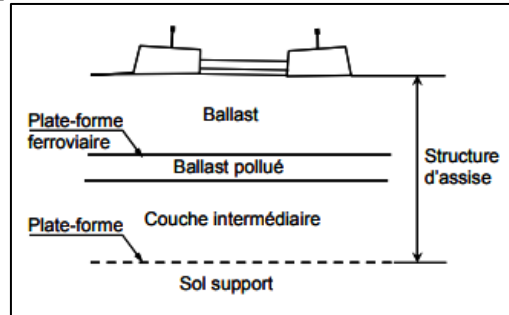


Figure 5. Coupe schématique de l'infrastructure d'une voie ferrée existante – Source SNCF

II.3. L'hydraulique des structures ferroviaires : Enjeux d'un domaine technique support

Bien que l'existence de ce domaine puisse surprendre, l'hydraulique joue un rôle important dans le bon fonctionnement des structures ferroviaires. De par leur visibilité il pourrait sembler que les métiers liés à la voie, la signalisation et la conduite des trains soient les seuls nécessaires pour le bon fonctionnement d'une voie ferrée. Néanmoins, de nombreux domaines d'ingénierie viennent en appui de ceux cités précédemment, notamment le génie civil d'ouvrage d'art, la géotechnique... et l'hydraulique.

Le rôle de cette dernière pourrait être résumée de la sorte : « **Gérer les eaux pluviales et souterraines afin qu'elles ne créent ou ne participent à des désordres empêchant la bonne utilisation de la voie ferrée** ». On peut regrouper en six grands enjeux le travail des ingénieurs hydrauliques ferroviaires.

II.3.1. La protection de la plateforme via le drainage de la structure d'assise

Selon la SNCF (1996) ainsi qu'une enquête et une thèse menée sur le réseau ferré français (Robinet, 2008 & Trinh, 2011), les principaux désordres affectant la tenue de la voie sont dus majoritairement à la présence d'eau non évacuée dans la structure d'assise.

En cas de précipitations, l'eau ruisselle sur la voie et s'infiltré facilement à travers le ballast qui présente une perméabilité très importante. L'eau arrive alors au niveau de la sous-couche, dont le rôle est de créer une protection entre le ballast et la plateforme. En effet la sous-couche répond aux attentes suivantes :

- Répartition des charges transmises
- Protection de la plateforme contre l'érosion hydraulique et le gel, ainsi que l'évacuation des eaux d'infiltration.
- Présence d'une zone d'anticonatamination entre la plateforme et le ballast.

La sous-couche est composée de matériaux bien gradués et insensibles à l'eau. Le tassement de ces derniers est réalisé afin d'obtenir une perméabilité très faible, de l'ordre de 15%. Ainsi l'eau provenant du ballast ruisselle horizontalement dans la sous-couche vers l'extérieur de la structure. L'eau ne parvient donc pas à la plateforme et aux couches inférieures, sensibles à cette dernière. Néanmoins, si un dispositif d'évacuation dans la sous-couche n'est pas mis en place, les eaux s'accumulent dans cette dernière, jusqu'à atteindre la plateforme. Ainsi, sous l'effet des sollicitations répétées des circulations,

les eaux piégées dans la plateforme peuvent provoquer des remontées boueuses (fines des couches inférieures à la plateforme combinées à de l'eau remontant par effet de succion dû au passage des trains) ou/et la rupture du sol support. Ceci engendre de graves conséquences, à savoir la pollution du ballast par des fines, la diminution de la portance de la plateforme et la rupture du nivellement de la voie par tassement. La figure 6 illustre le phénomène de remontées boueuses, observé sur une des lignes étudiées au cours du stage.



Figure 6. Photographies de remontées boueuses sur le projet Saint Pol – Source interne

Afin d'éviter ces dégradations, il est préconisé la mise en place d'un **drainage longitudinal**, consistant à drainer et évacuer les eaux pluviales infiltrées dans la structure d'assise.

II.3.2. La prévention des risques de glissement de talus sur la voie

Les eaux s'infiltrant sur la voie ne proviennent pas toutes directement des précipitations. En effet, les voies récupèrent également les eaux de ruissellement quand la topographie le permet. Une voie en déblai reçoit les eaux de ruissellement du talus ainsi que celles du bassin versant naturel au-dessus du talus, si la topographie est inclinée vers le déblai.

La présence de ces eaux de ruissellement sur la voie est gérée par le drainage longitudinal, comme expliqué au paragraphe précédent. Néanmoins leur ruissellement sur le déblai peut endommager ce dernier et provoquer des coulées de boue et glissements de terrain. Ceci est dangereux si ces dégâts atteignent la voie et empêchent le passage des trains : le trafic peut notamment être perturbé par la présence de terres ou de végétation (arbres) sur la voie, provenant du déblai. Ces phénomènes interviennent davantage si le débit ruisselé est important, si la pente du talus est importante ou si le talus est fragilisé (terriers de rongeurs, terre peu stable, présence d'eau dans la terre). Les figures 7 illustrent la présence de coulées de boues sur une voie.



Figure 7. Photographies de coulées de boues sur une voie - Source interne

Afin d'éviter ces désordres, des systèmes de récupération des eaux en crête de déblai sensible et des descentes d'eaux canalisées peuvent être mis en place. Leur objectif est de diminuer la quantité d'eau

ruisselant sur les talus et ainsi de les protéger, afin de garantir le trafic. De plus, des travaux de stabilisation et de drainage des talus sensibles peuvent également être amorcés.

Nous noterons également que la protection des talus en remblai peut parfois être nécessaire. En effet, les remblais présentant de l'eau non évacuée sont fragilisés. La portance de la voie est diminuée et un risque d'affaissement de cette dernière et de glissement de terrain apparaît suite aux passages répétés des trains. L'occurrence d'un glissement de terrain entraîne l'affaissement du talus et ainsi une rupture importante du nivellement, provoquant le déraillement. Un cas similaire s'est produit le 14 juin 2018 sur la ligne B du RER parisien, près de Courcelle-Sur-Yvette. Suite à des intempéries, un glissement de terrain a créé un affaissement du talus et a provoqué le déraillement de trois voitures du RER. Cet exemple souligne l'importance de l'évacuation des eaux dans les ouvrages en terre. La figure 8 illustre cet incident.



Figure 8. Photographies de l'affaissement de talus du déraillement du 14 juin 2018 – Source « Les Echos »

II.3.3. Le respect de la continuité hydraulique et écologique

Il peut arriver que le tracé ferroviaire traverse des cours d'eau, permanents ou temporaires. Il est important que le passage des eaux soit conservé par la construction et l'entretien d'ouvrages hydrauliques de traversée (OHT par la suite). Ceux-ci varient de forme et de taille en fonction du besoin de passage : dalots, buses, ouvrage d'arts,... Si la construction relève du domaine des ingénieurs génie-civilistes, il appartient aux hydrauliciens de déterminer les débits de transit provenant des bassins versants naturels et de dimensionner les OHT. La mise en place de ces OHT est nécessaire car la déconnexion hydraulique des cours d'eau serait responsable d'inondations des bassins versants naturels amont. De plus la stagnation d'eau au pied des talus de la voie ferrée fragiliserait ces derniers et créeraient des risques de glissement de talus. La figure 9 présente un OHT.



Figure 9. Photographies de deux ouvrages hydrauliques de traversée sous voie - Source interne

Outre la construction et l'entretien des OHT, les hydrauliciens ont pour responsabilité le rejet des eaux drainées sur la ligne ferroviaire dans le milieu naturel ou dans les réseaux d'eau pluviales. Ces rejets se font généralement au niveau des traversées de cours d'eau ou au niveau des PN où passent des réseaux hydrauliques enterrés (eaux usées et pluviales). Lors de rejets de débits trop importants pour l'exutoire, l'utilisation d'un bassin d'écrêtement est obligatoire (pour des projets de création) et peut être utilisé pour des projets de réaménagement. Ce dernier sert à stocker les eaux à évacuer et les rejette à un débit contrôlé.

La continuité écologique est également menacée par la présence de la voie ferrée. C'est le département Environnement de setec international qui a en charge l'analyse de cette problématique. Une fois les enjeux identifiés, ils en font part aux hydrauliciens qui ont pour objectif la mise en place des solutions, sur la base de leurs indications. L'enjeu majeur concerne le passage des espèces d'un coté à l'autre de la voie. Il est en général rétabli par la mise en place d'ouvrages de traversée sous voies. Cette partie n'a pas été traitée dans les projets réalisés mais fait normalement partie du travail sur ce type de projet.

II.3.4. La protection des passages à niveaux et quais contre la stagnation d'eau

Les passages à niveaux (PN par la suite) et les quais constituent des zones d'interface d'utilisation entre le passage des trains et l'utilisation par les voitures et piétons. De ce fait, ces zones présentent des structures différentes de la voie ferrée en place le long de la ligne : les PN sont carrossables grâce à des matériaux roulant imperméables (goudron, bitume) et les quais présentent également des surfaces imperméables pour les utilisateurs. De plus la présence des quais empêche la mise en place d'un drainage longitudinal traditionnel et nécessite l'utilisation de techniques appropriées pour l'évacuation des eaux des couches d'assise. Le nivellement des quais et des PN doit donc être étudié pour qu'il permette l'évacuation des eaux de ruissellement dans des dispositifs particuliers. La figure 10 illustre la croissance de végétations sur la voie face au quai, dû à l'absence d'évacuation de l'eau sur la voie.



Figure 10. Croissance de végétations au niveau d'un quai dû à la non-évacuation des eaux – Source interne

II.3.5. La gestion des eaux dans les couches inférieures à la plateforme

Selon l'IN 3278, le drainage longitudinal doit permettre l'évacuation des eaux situées sous la plateforme. En effet les eaux internes de la partie supérieure de terrassement (PST, cf figure 3 & 4) doivent être évacuées lorsque le maintien de la pérennité de la portance l'impose. Ceci est déterminé lors du dimensionnement des structures d'assise. De plus, en cas de présence de nappe haute, le drainage doit permettre le rabattement de cette dernière. L'objectif est l'évacuation des eaux profondes afin qu'elles n'endommagent pas la plateforme et que la portance de cette dernière soit préservée.

Le drainage longitudinal présenté précédemment est compétent pour ces problématiques. Des spécificités peuvent néanmoins être apportées.

II.3.6. La gestion des interfaces entre l'hydraulique et les autres domaines

Comme évoquée précédemment, la construction ferroviaire est un domaine faisant intervenir de nombreux domaines techniques. La quantité importante d'installations de différents types à implanter rend l'espace autour des voies précieux. De ce fait la pose des ouvrages hydrauliques doit constamment être optimisée et réfléchi en collaboration avec les autres domaines ferroviaires. Si des normes régissent globalement les sujets d'interface, il est nécessaire d'échanger fréquemment avec l'ensemble des acteurs du projet.

III. Méthodologie

La partie suivante présentera une méthodologie comparative des deux projets réalisés. Elle mettra en valeur les spécificités de chaque projet pour les tâches similaires ainsi que les tâches exclusives de l'un et de l'autre. La présentation

III.1. La visite de site et le programme travaux

Même si mon intégration aux projets du stage est postérieure à la réalisation de ces tâches, j'ai pu les réaliser sur un projet différent mais similaire : la régénération ferroviaire de la ligne Louches-Valenciennes. De plus, ces étapes sont fondamentales dans le déroulement de la méthode et il m'a semblé pertinent d'en parler.

III.1.1. La visite de site

Quel que soit le projet, la phase de visite de terrain constitue la première étape. Elle permet de visualiser la zone d'étude et de se rendre compte clairement des désordres, des enjeux, des contraintes du site et des travaux à effectuer. Elle permet de récupérer des données brutes qui seront exploitées par la suite. De manière concrète, une visite de terrain consiste en une marche analytique sur tout le linéaire de voies à traiter. Encadrés par des annonceurs, garants de la sécurité, les ingénieurs d'étude prennent des photos/vidéos et notent les points importants. Les visites de terrain sont réalisées idéalement avec un exploitant du réseau ferré. Il peut donner de plus amples explications sur des points clefs, et attirer l'attention sur des problématiques particulières auxquelles il est confronté. La figure 11 illustre une visite de terrain.



Figure 11. Ingénieurs setec en visite de terrain pour le projet de Saint Pol - Source interne

Concernant l'hydraulique, les objectifs opérationnels d'une visite de terrain sont les suivants :

- Le relevé des zones présentant des dégâts hydrauliques. En hydraulique ferroviaire, un désordre visuel est souvent témoin d'un dysfonctionnement interne. Il s'agit essentiellement des remontées boueuses, zones humides, glissements de terrain et fragilisation de talus.
- Le relevé des dispositifs de drainage et d'assainissement en places, et leur état. (fossé terre non fonctionnel par la présence de végétation, par exemple)
- Le relevé de la présence d'exutoires : OHT (aqueduc, pont, dalot, buses,...) et réseaux d'assainissement enterrés. Même si des documents recensant tous les OHT existent, il est toujours prudent de confronter cette théorie à la réalité.
- Le relevé des Ouvrages en terre Sensibles (OTS). Il s'agit de talus en déblai ou remblai peu stables d'un point de vue géotechnique ou dont la stabilité est diminuée par le ruissellement des eaux. La caractérisation d'OTS est liée à des critères géotechniques. Il peut arriver d'un talus ne soit pas un OTS au sens géotechnique mais qu'il présente une sensibilité hydraulique.
- Le relevé de tous les éléments en interface avec l'hydraulique

➤ La prise de photos tout au long de la visite. Les photos étant les seuls éléments visuels exploitables après la visite, leur présence et leur quantité est importante en cas de besoin d'analyse d'un point. Les photos doivent permettre de voir la voie ferrée et les talus de part et d'autres. Il est intéressant de noter que les voies ferrées possèdent un système de point kilométrique (**Pk**) et hectométrique permettant de se repérer.

III.1.2. Le programme travaux

Le programme travaux constitue la réponse du maître d'œuvre, basée uniquement sur la visite de terrain et d'éventuels demandes de l'exploitant. Il s'agit de préconisations qui devront être validées par le maître d'ouvrage avant que leurs mises en place ne soient étudiées en phase AVP et PRO (ou APO). La méthodologie de réalisation de ce document est précisée dans une note. Ce programme présente les éléments suivants, pour l'hydraulique :

➤ L'entretien des dispositifs de drainage et d'assainissement existant. Il s'agit essentiellement de préconisation de curage de fossés en terre et d'aqueducs

➤ Des solutions afin de pallier aux désordres constatés sur site. L'annexe 1 présente les différents désordres et les solutions envisageables. Le choix d'une solution dépend de l'espace disponible, du type de projets et des préférences du maître d'ouvrage.

➤ Une estimation large du prix des travaux proposés. Les études de mise en place n'ayant pas été réalisées, cette estimation se base sur des ratios globaux. Ils permettent seulement d'avoir un ordre d'idée du prix et seront affinés par la suite.

Il peut arriver que l'exploitant ait prévu des travaux sur la ligne. Ces travaux, ou une alternative optimisée, peuvent être joints au programme travaux fourni.

III.2. Les Phases d'études Projet (APO et PRO)

Les phases d'étude constituent la majeure partie du travail d'ingénierie d'un projet. Il s'agit de dimensionner, placer et représenter graphiquement les futurs ouvrages. La différence entre les phases APO et PRO réside dans le niveau de détail de la réflexion et des plans fournis. Les phases d'un projet d'Etudes d'ingénierie sont traditionnellement au nombre de deux : la phase d'Avant-Projet (AVP) et la phase de Projet (PRO). La première pose de solides bases au projet tandis que la deuxième est plus précise vis-à-vis de la mise en place de celui-ci. Les deux phases permettent également de mettre à jour le projet en cas d'évolution. Néanmoins, si le maître d'ouvrage le souhaite, il est possible de fusionner ces deux phases en une, plus détaillée que l'AVP et moins que le PRO : l'APO.

III.2.1. Validation des zones de mise en place de systèmes de gestion des eaux

Les zones de mise en place d'ouvrage hydrauliques varient s'il s'agit d'un projet de création ou de régénération ferroviaire. S'il s'agit d'une création, l'ensemble du linéaire doit être doté d'un drainage longitudinal selon les normes des LGV, sauf si les IN précisent des dispositions d'aménagement pour les voies classiques. De plus les OTS doivent être sécurisés par la création de fossé en crête de déblai, reliés au drainage longitudinal via des descentes d'eau.

Concernant les régénérations ferroviaires, ces lignes n'ont pas été construites sur les normes LGV. La présence d'un drainage longitudinal est donc disparatée, d'où l'importance de la visite de terrain afin de recenser les zones où les eaux sont drainées et évacuées. Afin d'éviter des travaux sur de très longs tronçons et valoriser les zones sans système de gestion des eaux mais ne présentant jusqu'alors pas de problèmes, une méthodologie particulière a été retenue pour le choix des zones d'études. Les zones à aménager viendront donc :

➤ du programme travaux

L'origine du programme travaux a été présentée précédemment. Ce dernier est validé par le maître d'ouvrage ou modifié.

➤ du programme de reprise de plateforme

Comme expliqué lors de la présentation des projets, les régénérations ferroviaires se basent sur des études de disciplines diverses, dont la géotechnique. Les ingénieurs géotechniciens se chargent du maintien des ouvrages en terre (déblai, remblai) et s'occupent du dimensionnement des structures d'assise et de la plateforme. La capacité de la plateforme à reprendre les efforts est évaluée via sa **portance**. Il existe différentes classes de portance en fonction de l'état de la plateforme. Selon la méthodologie des géotechniciens, si la classe de la plateforme est trop faible, des travaux de reprise de plateforme sont mis en place. Il s'agit de remplacer les couches d'assise, en fonction du besoin de l'existant.

En cas de travaux de reprise de plateforme, la mise en place d'un drainage sera effectuée. Ces zones seront donc étudiées. Néanmoins, ce drainage peut être à créer ou naturel. En effet, il a été montré que les eaux sont naturellement évacuées dans les remblais de forte hauteur. Ainsi dans un remblai de grande hauteur, l'eau arrivée au niveau de la voie s'infiltrera jusqu'à la sous-couche ou la couche de forme et sera évacuée vers le pied du remblai. De ce fait la plateforme est naturellement drainée et ne nécessite pas d'aménagements pour le drainage longitudinal. L'IN 3278 a fixé la limite entre les remblais de « grande hauteur » et les remblais rasant. Ainsi pour les tronçons où une reprise de plateforme est réalisée, les remblais de plus d'1.5m de haut ne nécessiteront pas de drainage longitudinal. Les déblais et les remblais de moins d'1.5m se verront équipés de drainage longitudinal.

Néanmoins le devenir de l'eau évacué dans un remblai de grande hauteur pourrait être questionné. Il est important de préciser que le but du drainage longitudinal est le drainage de la **plateforme**. Dans le cas d'un remblai de grande hauteur, lorsque l'eau est évacuée, elle ruisselle au loin ou reste au pied de celui-ci, en fonction de la topographie. La présence d'eau non évacuée au pied du remblai n'est pas un problème pour la plateforme car cette eau n'est plus en contact avec cette dernière. Néanmoins il est possible que cette eau fragilise le pied de remblai par érosion. Dans ce cas, ce remblai est sensible et il aura été repéré lors de la visite de site, son traitement ayant été acté dans le programme travaux. Ainsi, les eaux évacuées dans un remblai de grande hauteur sont bien prise en compte.

Un dernier élément est à prendre en compte pour le choix des zones à équiper d'ouvrages de gestion des eaux : l'évacuation vers l'exutoire. Tout écoulement a un sens et doit se rejeter dans un exutoire. Cette règle est valable également pour le drainage longitudinal. Le choix du sens de l'écoulement dépend du sens de la pente de la plateforme. Le sens d'écoulement devra respecter au maximum le sens naturel de cette dernière. Néanmoins une contrepente de l'écoulement vis-à-vis du profil en long peut être envisagée si elle permet la réduction du tronçon à aménager par la connexion à un exutoire plus proche. En effet un exutoire doit être trouvé pour chaque tronçon hydraulique créée. Les exutoires sont les passages d'eau croisant la voie ferrée : aqueducs ou réseaux enterrés. De ce fait, le drainage longitudinal résultant des analyses précédentes devra être prolongé jusqu'à l'exutoire approprié (de taille suffisante pour évacuer le débit aval) le plus proche. Il est également possible que cet exutoire soit à l'intérieur du tronçon créé et dans ce cas, un contrepentage sur une partie du tronçon pourra être effectué, s'il est viable.

Fort de toute cette analyse, l'ensemble des tronçons à équiper en dispositif de récupération et évacuation des eaux ainsi que leurs exutoires sont connues. Ils peuvent alors être dimensionnés. Le logigramme en Annexe 2 récapitule la méthode de détermination des tronçons à aménager.

III.2.2. Dimensionnement général des ouvrages de drainage et d'écoulement des eaux

Ce paragraphe vise à présenter la méthodologie générale pour le dimensionnement d'un ouvrage d'assainissement (fossé, FBPB, caniveaux,...). Des spécificités relatives à l'objectif de chaque ouvrage seront détaillées par la suite. Les éléments suivants sont donc communs à toute création de système de gestion des eaux.

II.2.2.1. Détermination du bassin versant intercepté par le tronçon étudié

Le bassin versant d'interception du tronçon correspond à l'ensemble des surfaces sur lesquelles une goutte d'eau peut ruisseler avant d'atteindre le dispositif hydraulique à dimensionner. Le calcul du débit de dimensionnement des fossés se base sur la surface et les caractéristiques du bassin versant. La délimitation de ce dernier peut être réalisée à l'aide d'outils différents. Il s'agit essentiellement de cartes topographiques IGN, de logiciels SIG, ou de levés topographiques réalisés pour l'étude. Le choix de la méthode dépend des données disponibles et de la complexité des bassins versants. La figure 12 présente des exemples d'outils utilisés.

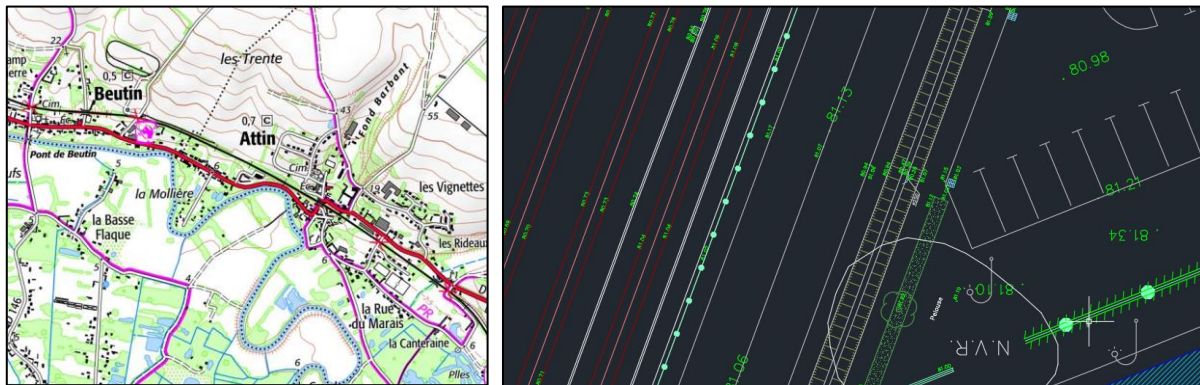


Figure 12. Captures d'écran de carte topographique IGN et du levé topographique du nœud ferroviaire de Brétigny

Coefficients de ruissellement

Les coefficients de ruissellement retenus pour les estimations des débits ont été définis en fonction de la nature du sol, de la couverture végétale et de la pente des bassins versants.

Les coefficients calculés pour la période de retour décennale (C10) sont les suivants :

Plateforme ferroviaire	Talus	Zone de délaissé	Zones boisées	Zones de culture	Routes / parkings/ quai
0.85	0.35	0,35 - 0.60	0.10	0.30	1.00

Tableau 1. Coefficient de ruissellement pour la période de retour T = 10 ans

Les coefficients de ruissellement pour une période de retour $T > 10$ ans sont calculés à partir de la formule suivante:

- pour $T = 10$ ans : le coefficient C_{10} varie en fonction de la nature géologique des sols, de la pente du terrain et de la couverture végétale; ainsi on peut en déduire la rétention initiale P_0 (en mm) :
 - si $C_{10} < 0,8$, $P_0 = (1 - C_{10}/0,8).P_{10}$
 - si $C_{10} \geq 0,8$, on admettra $P_0 = 0$ et $C_T = C_{10}$
- pour $T > 10$ ans,

$$C_T = 0.8 \left(1 - \frac{P_0}{P_T}\right)$$

Avec :

P_T : Pluie journalière de période de retour T.

Temps de concentration

Le temps de concentration est estimé par la formule suivante :

$$t = \frac{L}{60 \times V}$$

Avec :

L : Longueur de l'ouvrage,

V : Vitesse réelle de remplissage de l'ouvrage projeté, au point de calcul.

Écoulement en nappe (dans le bassin versant)	Écoulement concentré (écoulement dans le fossé jusqu'à l'exutoire)
$V = 1.4\sqrt{p}$ <p>Où p est la pente du bassin versant (m /m)</p>	$V = k\sqrt{pR_h}^{2/3}$ <p>Où R_h est le rayon hydraulique et k est le coefficient de Manning-Strickler du dispositif de collecte (fossé, talweg...)</p>

Tableau 2. Calcul du temps de concentration

Le temps de concentration minimal retenu est de 6 minutes.

II.2.2.2. Détermination des débits de projet

L'estimation des débits de référence des Bassins Versants Naturels (BVN) et Ferroviaires (BVF) s'appuiera sur la méthodologie préconisée par le SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) dans le Guide Technique de l'Assainissement Routier en date d'Octobre 2006.

Cette méthode de calcul fait intervenir les formules « rationnelle » (pour les bassins versants de surface inférieures à 1 km²) et « Crupédix » (pour les bassins versants de surfaces supérieures à 10 km²), ainsi qu'une formule de transition permettant de faire le lien entre elles. Les formules de Crupédix et de transition n'étant pas utilisées par la suite, elles seront présentées en Annexe 3.

Le dimensionnement du réseau de drainage est normé sur les débits de projet fixés par le référentiel technique IN 0259. Ainsi, la période de retour retenue pour l'ensemble du réseau de collecte longitudinal en déblai, en profil rasant ou en remblai de hauteur inférieure à 1.50m est de T=10 ans.

Afin de ne pas mettre en cause la pérennité de la ligne, au droit des points singuliers comme les ouvrages de transit des eaux de drainage d'un côté à l'autre de la plate-forme (OHT), leur dimensionnement est effectué, conformément au référentiel technique IN 3278, pour 1.8xQ_{projet} soit 1.8xQ₁₀ dans le cas des déblais.

La continuité des drainages sous les Ponts routes (PRO) est assurée (sauf si contraintes techniques importantes) par des buses de diamètre minimum 600 mm et elles seront dimensionnées pour le débit 1.8xQ_{projet}.

Le drainage en crête de déblai sera quant à lui dimensionné pour la période de retour T = 100 ans. Les descentes d'eau sur les OTS en déblai seront dimensionnées à 1,8*Q₁₀.

Présentation de la formule rationnelle

La méthodologie pour l'estimation des débits de projet pour les bassins versants dont la surface est inférieure à 1km² est la méthode rationnelle.

$$Q_T = \frac{C_T \times i_T \times A}{3.6}$$

Avec :

- Q_T : Débit d'apport du BV (m³/s) bassin versant,
- A : Surface du bassin (km²),
- T : Période de retour considérée,
- C_T : Coefficient de ruissellement,

$$C_T = \frac{\sum(A_j \times C_j)}{A}$$

Avec A_j : surface partielle du BV de coefficient C_j en km².

i_T : Intensité de la pluie de période de retour T (mm/h),

$$i_T = a t_c^{-b}$$

Où :

- a et b : paramètres de Montana pour la pluie de période de retour T,
- t : durée de la pluie en minutes

II.2.2.3. Choix des ouvrages d'assainissement

Les ouvrages d'assainissement assurent la collecte et le transport des eaux de ruissellement (ruissellement de plate-forme et de bassins versants naturels, drainage des eaux internes sous-couche et couche de forme) et des eaux de rabattement de nappe en cas de déblai humide.

Les critères de choix entre les différents types de dispositif de drainage sont :

- La présence d'un drainage existant (dans ce cas il sera reproduit à l'identique),
- L'implantation : remblai, déblai, etc..,
- La fonction du dispositif prévu : collecte des eaux superficielles, rabattement de nappe souterraine, ou drainage des eaux internes,
- Les contraintes géotechniques : la vitesse d'écoulement qui doit rester inférieure à la vitesse d'entraînement des matériaux pour assurer la pérennité d'un fossé en terre et la tenue des terrains sur les bords des talus,
- La capacité du fossé à écouler le débit,
- Le réseau existant et les dysfonctionnements avérés (cohérence pour l'entretien),
- La contrainte accessibilité : mise en œuvre et maintenance,
- Les contraintes de phasage/ coût réalisation : durée des travaux, travaux de nuit,
- Les contraintes d'emprises : dispositifs de surface à faible largeur.

Pour la conception du drainage, il a été considéré que les pentes des structures nouvelles seront mises en cohérence avec les structures existantes en place. L'objectif étant d'éviter les points bas de plate-forme. Les dispositifs de drainage retenus sur les deux projets sont les suivants :

- pied de déblai : fossé terre ou revêtu, fossés bétons à barbacanes, collecteur drainant
- pied de remblai: fossé terre ou revêtu, caniveau béton (emprises restreintes)

- crête de déblai/mur : fossé revêtu, caniveau béton
- Quais : quai drainant, collecteur drainant dans le quai, FBPB en entre quai
- Passage à niveau : Caniveaux en U

II.2.2.4. Dimensionnement hydraulique des ouvrages d'assainissement

Le dimensionnement des ouvrages de collecte est effectué à l'aide d'un logiciel ou une feuille de calcul (interne à setec) qui vérifie la formule de Manning-Strickler suivante :

$$Q = K.R_H^{2/3}.I^{1/2}.S$$

Avec:

Q: Débit (m³/s)

R_H : Rayon hydraulique (m)

I : Pente (m/m)

S : Surface mouillée (m²)

K : Coefficient de Strickler (m^{1/3}/s)

La démarche est de tester différents dispositifs et tailles de dispositifs standards et de vérifier que les contraintes d'écoulement y sont respectées : passage du débit de projet, hauteurs d'eaux et vitesses inférieures aux valeurs limites. Le tableau 3 présente les coefficients de Strickler ainsi que les contraintes de dimensionnement à respecter pour le réseau.

Réseau	Collecteur drainant	Quai drainant	Collecteur / Dalot béton	Caniveau rectangulaire en béton	Fossé béton préfa. à barbacanes	Caniveau à fente	Fossé terre	Fossé revêtu
K	100	60	75	60	60	75	30	60
% de remplissage	70	toléré jusqu'à 5 cm sous les structures	75	90	jusqu'à 1 cm sous les couvercles ou les butons	75	90	90
Vitesse max (m/s)	5	4	4	4	4	5	1,2	4

Tableau 3 : Coefficients de Manning Strickler et contraintes de conception

La pente minimale des dispositifs de drainage est de 0,002 m/m. La pente suivra au maximum celle de la plateforme.

IV. Présentation des résultats

Cette partie vise à présenter l'application de la méthodologie aux deux projets d'illustration de ce rapport : la régénération des axes ferroviaires de l'étoile de Saint Pol et le réaménagement du nœud ferroviaire de Brétigny.

IV.1. Régénération des axes ferroviaires de l'Etoile de Saint-Pol

IV.1.1. Présentation du projet

Le premier projet étudié concerne la régénération ferroviaire de trois lignes de train dans le Haut de France. Situées dans le département du Pas-de-Calais, les villes de Saint-Paul, Béthune, Etaples et Arras sont reliées par une étoile ferroviaire composée de 3 lignes : il s'agit des lignes Saint Pol – Béthune (n° 289 000, notée ligne 1 par la suite), Saint Pol – Etaples (n° 308 000, notée ligne 2 par la suite) et Arras – Saint Pol (n° 307 000, notée ligne 3 par la suite). La figure 13 présente une localisation de ces quatre villes.

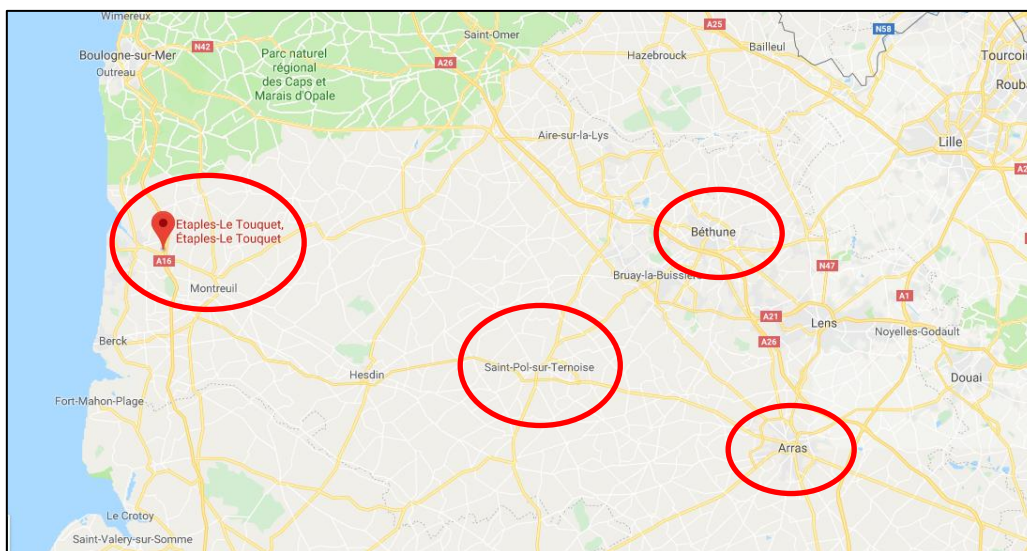


Figure 13. Localisation des 4 villes arrêt du projet de Saint Pol –Source « Google Map »

Suite à de nombreuses années d'exploitation sans réinvestissement, les infrastructures des trois lignes se sont fortement dégradées. Les dégradations touchent l'ensemble des domaines techniques de la voie ferrée : signalisation, voies, hydraulique, géotechnique, ouvrage d'arts, électricité. La situation est telle que le trafic ne peut plus être assuré correctement. Les lignes 1 (27,144km) et 3 (36,4km) sont encore en fonctionnement, mais la vitesse des trains y est réduite de moitié (40 km/h au lieu de 80 km/h). Le nombre de trains quotidiens a également été réduit. Leurs fermetures sont prévues pour le second semestre 2018. La ligne 2 (61,2 km) a été fermée en 2017 car elle ne permettait pas le passage des trains en toute sécurité.

En 2017, le maître d'œuvre des lignes, SNCF Réseau, lance alors un appel d'offre pour la régénération des axes ferroviaires. Le contrat vise à la remise en état des lignes (Renouvellement Voie-Ballast) afin de garantir un fonctionnement normal pour les trente prochaines années. Le groupement setec répond et gagne le marché. Avec Setec Ferroviaire comme mandataire (voies, gares et signalisation), ce groupement est composé de deux autres filiales du groupe, intervenant dans leurs domaines de compétence : setec Diadès (création d'ouvrages d'arts) et setec international (Géotechnique & hydraulique).

Concernant la partie hydraulique, setec international devait fournir pour chacune des lignes un compte rendu de visite, un programme de travaux sommaire basé sur les observations de la visite, une étude de niveau APO (phase mixte entre AVP et PRO) pour la réalisation des travaux (mis à jour) ainsi que le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE). Enfin, le bureau d'études devait également s'occuper de passer les marchés de travaux. J'ai intégré le projet juste après l'envoi des programmes de travaux et ai eu pour mission la réalisation des études APO pour les trois lignes et la rédaction des notes récapitulatives. La présentation du travail effectué pour ce projet aura pour but d'analyser la façon de traiter les problématiques hydrauliques sur des projets de régénération ferroviaire à long linéaire et avec des données d'entrée peu détaillées.

IV.1.2. Gestion des données d'entrée

La qualité des données d'entrée conditionne le niveau du travail produit. Celles-ci sont présentées dans le tableau présenté en annexe 4, pour les trois lignes. L'analyse suivante met l'emphase sur les points clés liés aux données d'entrée.

L'une des particularités de cette étude a été l'absence de données topographiques fiables pour les talus aux alentours de la voie. Le levé topographique réalisé ne présente que des formes projetées sur un plan, sans indication de pente ou d'altitudes. La figure 14 montre un exemple de ce levé. Sont représentés en vert les crêtes et en jaune les pieds de talus.

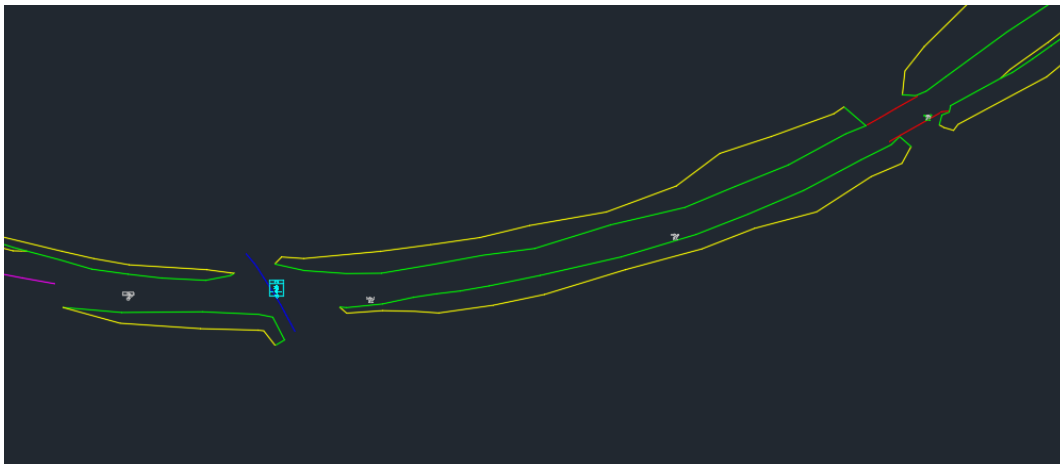


Figure 14. Levé topographique d'un remblai de part et d'autres de la voie – source interne

Le linéaire étant très important, 124,744 km pour les trois lignes, il peut être compréhensible de ne pas disposer de plan de nivellement précis : leur traitement aurait été long et fastidieux. Néanmoins cette absence complique la détermination de la hauteur des talus, sachant que la hauteur d'un remblai (< ou > 1.5 m) peut déterminer l'installation ou non de drainage longitudinal. La hauteur des talus a dû être estimée visuellement, à l'aide des photos de la visite de terrain. Cet exemple illustre bien la **perte de précision** qu'induit l'absence de données fiables. Il montre aussi le travail **d'adaptation et d'inventivité** réalisés les ingénieurs.

La ligne ferroviaire passant majoritairement dans des zones rurales, le ruissellement provient souvent de larges bassins versant végétaux. Les levés topographiques de ces zones n'ont pas été réalisés pour l'étude, entraînant des difficultés pour le tracé et la caractérisation des bassins versants. Deux alternatives ont été mises en place afin de contourner ce problème :

- ❖ La première consiste à l'utilisation d'un logiciel SIG pour le tracé des bassins versants. Le département SIG de setec international a accès à des bases de données topographiques sur l'ensemble du territoire français, comblant l'absence des levés topographiques. A l'aide de leurs logiciels, ils sont capables de nous fournir un tracé des différents bassins versants.

❖ L'autre alternative consiste à réaliser le tracé des bassins versants sur le site en accès libre « Géoportail ». Ce site met à disposition dans des formats simples d'utilisation des cartes topographiques IGN. Il permet également aux utilisateurs de réaliser des profils en travers, ce qui s'est avéré très utile.

Il a été observé que les deux méthodes nécessitaient globalement le même temps de travail, mais sollicitaient davantage de personnels pour l'utilisation du SIG. Les bassins versants « simples » et majoritaires ont donc été étudiés selon la deuxième méthode tandis que les zones plus complexes ont été analysées à l'aide du SIG. Néanmoins, les deux alternatives mises en place restent **chronophages et moins précises** que l'utilisation d'un plan de nivellement orienté projet, qui reste la solution de travail idéale.

Un autre élément déterminant sur ce projet a été l'absence de modélisation 3D de la plateforme. Ce type de modélisation offre la localisation précise des différentes structures (sous-couche, plateforme,...) sur tout le linéaire, ainsi que leurs pentes. **Son absence ne permet donc pas le calage altimétrique des ouvrages de drainage.** Ce dernier n'a d'ailleurs pas été réalisé, compte tenu de cette difficulté. La pente de la plateforme, pour le dimensionnement hydraulique des ouvrages, a été approximée par la pente du profil en long des rails. Ceci est un nouvel exemple d'adaptation des rendus face aux données d'entrée disponibles. Lors de la présentation des résultats, plutôt qu'un calage précis des équipements, nous avons fourni des pentes de pose à respecter. L'incertitude liée à l'utilisation des pentes des rails plutôt qu'aux pentes de la plateforme sera corrigée lors des études d'exécution (EXE). En effet, le calage altimétrique précis sera réalisé lors de cette phase.

Enfin, le dernier point que je souhaiterais aborder pour l'analyse des données disponibles concerne la connexion des infrastructures hydrauliques aux exutoires. Les exutoires sont essentiellement les ouvrages d'art de traversée (majoritairement) et les réseaux enterrés aux passages à niveaux. Les rejets hydrauliques sont des points particuliers du fait des jonctions avec l'assainissement, différentes en fonction du type d'exutoire et de la topographie du terrain. Or aucun levé topographique des ouvrages d'art n'a été fourni et les levés aux passages à niveau n'étaient disponibles que pour les passages à niveaux présentant des désordres. Néanmoins, les fiches de maintenance des ouvrages d'art nous ont été fournies, présentant parfois des photographies (de plus ou moins bonne qualité). Pour contourner ces difficultés, les jonctions aux exutoires ont été largement mises en place à l'aide des photos prises lors de la visite et fournies dans les fiches d'ouvrage d'art. En cas de lacune de levé topographique, la présence de réseaux enterrés aux passages à niveaux a été supposée par la visibilité de tampons d'assainissement sur la chaussée. Ces derniers ont été observés sur les photos de visite mais également sur les « Street View » de « Google Map ». Leurs présences seront confirmées par la suite. Néanmoins, bien que l'étude des rejets aux exutoires se soit basé sur des éléments alternatifs aux méthodes traditionnelles (Google Map, photographies,...), elle reste de bonne qualité vis-à-vis de l'ensemble du projet et plutôt ingénieuse vis-à-vis des données disponibles.

L'analyse de la disponibilité des données d'entrée révèle un projet peu optimal. Néanmoins il met en relief toute la ressource des ingénieurs pour s'adapter à la situation et fournir un travail de qualité à partir de données de qualité moyenne.

IV.1.3. Gestion de projet et rendus

Mon intégration à l'équipe de setec international correspond au lancement des études d'APO pour les trois lignes. Le pilotage du projet a été effectué par setec ferroviaire. Il se matérialisait par des réunions hebdomadaires avec tous les participants du groupement. Ces dernières avaient pour but de traiter de l'avancé de chacun et de la gestion des interfaces entre les domaines. De plus, elles permettaient au fur et à mesure d'avoir les différents retours du maître d'ouvrage afin d'ajuster nos prestations.

Le projet s'est basé sur la production de deux phases d'APO pour chacune des lignes, la seconde devant servir à l'ajustement du travail en fonction des retours du maître d'ouvrage. Le planning des rendus est présenté dans le tableau 4 ci-dessous. Il est précisé que la production de phases de DCE intermédiaires a été réalisée au cours de cette période. Néanmoins, n'y ayant pas travaillé, cette partie sera occultée.

26-févr	12-avr	08-juin	15-juin	06-juil	14-juil
APO intermédiaire Saint Pol - Béthune	APO intermédiaire Saint Pol - Etaple	APO intermédiaire Arras – Saint Pol	APO définitif Saint Pol - Béthune	APO définitif Saint Pol - Etaple	APO définitif Arras – Saint Pol

Tableau 4. Dates des rendus des différentes phases du projet

Chaque phase de rendu était composée des documents suivants, pour l'hydraulique :

- ❖ Une note méthodologique expliquant la démarche réalisée pour l'étude et les résultats de son application
- ❖ Diverses pièces graphiques :
 - Implantation en plan des dispositifs de gestion des OTS en déblai
 - Implantation en plan des dispositifs pour le drainage longitudinal et raccord aux exutoires
 - Implantation en plan des dispositifs hydrauliques aux passages à niveau
 - Implantation en plan d'éventuels ouvrages de gestion des eaux au droit des quais
- Une estimation financière des travaux proposés

Initialement le projet devait garantir la pérennité des infrastructures ferroviaires pour une trentaine d'années. Néanmoins, il fut marqué par une forte contrainte financière, engendrant une forte optimisation des études. De plus cette contrainte n'a été clairement affirmée par le maître d'ouvrage que peu de temps avant le rendu de l'APO intermédiaire de la ligne 2. De ce fait, les rendus intermédiaires des lignes 1 et 2 ont été largement hors budget, par rapport aux attentes du maître d'ouvrage. Pour respecter les coûts, une méthodologie à la fois moins rigoureuse et plus opérationnelle a dû être mise en place par l'ensemble des acteurs du groupement. Ces évolutions se sont appuyées sur une tolérance accrue à la dégradation future de la voie et sur davantage d'échanges avec l'exploitant afin d'identifier les zones nécessitant un entretien fréquent. Le résultat est un projet davantage ciblé sur la suppression des désordres actuels et moins tournée sur la pérennité des lignes. Ce changement d'objectif se traduit par des travaux moindres et donc par des coûts maîtrisés. Cependant, pour les ingénieurs d'études, il s'agit également d'un travail moins rigoureux et frustrant. En effet un travail conséquent fut fourni, avant d'être fortement tronqué.

IV.1.4. Présentation des programmes travaux

Les programmes travaux ont été établis antérieurement à mon implication aux projets mais ils ont été l'une des bases de mon travail. Ceux-ci sont consultables en annexe 5 pour les trois lignes. Ils présentent les travaux prévus antérieurement par le maître d'ouvrage (noir), auxquels viennent s'ajouter les recommandations de setec international (rouge). De manière globale, pour diverses causes, ces programmes préconisent :

- ❖ **L'entretien de dispositifs de drainage existant.** Il s'agit majoritairement de fossés en terre assurant le drainage longitudinal, aujourd'hui inefficaces par la présence de végétaux ou de terre. Leur remise en état passe par un curage ou/et un reprofilage. Il peut également être question de buses à curer.

❖ **L'entretien de dispositifs de stockage (bassins à ciel ouvert).** Il s'agit de la suppression de végétations invasives dans ces ouvrages, les rendant inefficaces. De plus l'entretien des équipements hydrauliques sera réalisé.

❖ **La création de dispositifs hydrauliques pour le drainage des structures dans des zones sensibles.** Les fossés terre sont proposés de façon standard à ce stade du projet car ils sont les plus simples à mettre en œuvre. Lors des études postérieures, le type de dispositifs sera affiné si besoin (FBPB, fossés terre revêtu, fossés d'infiltration,...). Néanmoins, ces dispositifs autres peuvent être soumis dès le programme travaux. Des buses sont également proposées pour les raccordements et contournements.

❖ **La création de dispositifs d'écrêtement des eaux (bassins)**

❖ **La création de dispositifs hydrauliques en crête de déblai pour la gestion des ouvrages en terre sensibles.** Il s'agit ici de fossés en terre revêtus pour empêcher les infiltrations d'eau en crête de déblai. Ils sont accompagnés de descentes d'eaux.

❖ **La création de dispositifs de récupération des eaux aux passages à niveaux.** Il s'agit essentiellement de mise en place de caniveaux à grilles. Ceux-ci peuvent être accompagnés de pose de bordure T2 pour diriger les écoulements.

❖ **La création de traversées hydrauliques sous voies.** Il s'agit de création d'ouvrages d'arts ou de la mise en place de buses de traversée sous voies.

IV.1.5. Validation des tronçons à aménager

Les tronçons à traiter ont fortement évolué au fur et à mesure du projet, compte tenu de la restriction financière. Seuls les résultats de la ligne Saint Pol - Etaples seront présentés car la présentation pour les trois lignes prendrait trop de place et serait redondante. De plus, cette ligne étant la plus complète et variée, elle est donc un bon objet d'étude.

L'étude APO intermédiaire a été réalisée selon la méthodologie initiale, sans restriction financière. Les zones à équiper sont les suivantes :

❖ Les zones préconisées dans le programme travaux. Ce dernier a subi quelques ajustements au cours de l'étude mais reste fortement similaire celui présenté en annexe 5

❖ Au niveau des tronçons où des reprises de plateforme seront mises en place (déterminés par les géotechniciens), l'ensemble des zones présentant des déblais ou des remblais de hauteur inférieures à 1,5 m. Un drainage longitudinal y sera installé

❖ Après une analyse en collaboration avec les géotechniciens, il est apparu que trois zones présentaient des déblais sensibles, et nécessitaient une intervention (Pk 126 + 586 – Pk 127+050 ; Pk 128 + 316 – Pk 128+657 ; Pk 129+348 – Pk 130+221). Cette protection sera réalisée via la pose de fossés en crête de déblai, connectés au drainage longitudinal en pied de déblai.

L'annexe 6 présente la mise en place de la méthodologie de validation des tronçons d'étude pour la ligne Saint Pol – Etaple, en phase intermédiaire (puis définitive). En phase intermédiaire, le tableau peut être consulté sans tenir compte des couleurs. La colonne « Tronçon initial » présente les tronçons où la plateforme est reprise ainsi que la mise en place ou non de drainage longitudinal sur ces derniers et les tronçons à emménager selon les recommandations du programme travaux. La colonne « Tronçon final » présente les tronçons à équiper en fin de processus, après prolongement des tronçons précédents jusqu'à un exutoire. Les exutoires ne sont pas précisés pour le curage/reprofilage de l'assainissement existant, ceux-ci ne nécessitant pas d'aménagements ou de remise en état.

L'application de la méthodologie économique, pour l'APO définitif, a fortement modifié le projet :

- ❖ Premièrement, les géotechniciens ont fortement abaissé les critères de reprise de plateforme. Ainsi, alors qu'il était question en phase intermédiaire de 9 308 m de plateforme à reprendre, seuls 1 731 m seront concernés dans la solution alternative, soit une diminution de 81%. Cette diminution aurait dû directement impacter la quantité de zones de drainage longitudinal mais une méthodologie différente a été appliquée pour le choix des zones à conserver et supprimer hydrauliquement. Cette évolution est observable dans l'annexe 6 (les tronçons bleus/orange présentent les zones de reprises de plateforme reconduites/supprimées en phase définitive).

- ❖ Des échanges ont été établis avec le mainteneur de la voie (exploitant) afin d'optimiser l'ensemble des travaux hydrauliques. Le travail entier réalisé à l'APO intermédiaire lui a été soumis et il en a supprimé l'équipement des zones qu'il ne jugeait pas problématique pour son exploitation. Seuls les aménagements sur les zones nécessitant des interventions fréquentes de ses équipes ont été conservés.

L'annexe 6 permet de visualiser les linéaires d'aménagement hydrauliques supprimés (rouges) et conservés (vert) entre les deux phases. En terme quantitatif, pour l'hydraulique, 11,2 km de voies seront équipées avec la solution alternative tandis que 22,6 km devaient initialement être équipés, soit une suppression de 50% du linéaire de travaux. Ainsi le choix des tronçons est finalement purement dirigé par l'exploitation et l'entretien de la ligne (entretien avec le mainteneur). La mise aux normes hydrauliques des zones de reprise de plateforme a été laissée de côté, sauf besoin du mainteneur. En effet on peut observer sur l'annexe 3 qu'il n'y a plus qu'une très faible corrélation entre les aménagements hydrauliques et les zones de reprise de plateforme (conservation importante en phase définitive d'aménagements hydrauliques liés à des reprises de plateforme supprimés par les géotechniciens en phase définitive).

IV.1.6. Choix et dimensionnement des ouvrages

Il est proposé dans cette partie d'étudier uniquement les résultats de la phase APO définitive. Bien que moins fournie, elle reste variée et permettra au lecteur de comprendre correctement l'application de la méthode. L'ensemble des tronçons à aménager en phase définitive de l'annexe 6 (verts) ont été analysés et leurs équipements dimensionnés. Dans un but de concision, il sera proposé ici la lecture de l'étude complète d'une zone. Les résultats de l'ensemble du projet seront néanmoins consultables dans les annexes 7, 8 et 9

IV.1.6.1. Choix du tronçon présenté

La zone d'étude s'étendra du Pk 126 +586 au Pk 127+200. Cette zone présente un déblai sensible sur la droite de la voie, du Pk 126+586 au Pk 127+050 (Cf figure 15). Un fossé sera aménagé en crête de déblai et connecté au drainage longitudinal via différentes descentes d'eaux. Un premier tronçon de drainage longitudinal sera mis en place du Pk 126+586 au Pk 127+140 (passage à niveau) : il est composé d'un fossé existant à réhabiliter (Pk 126+586 au Pk 127+000) et d'un tronçon à créer du Pk 127+000 au Pk 127+140. De l'autre côté du passage à niveau, le second tronçon de drainage va du Pk 127+140 au Pk 127+200. Les eaux provenant de cet ensemble d'aménagements seront évacuées dans un réseau d'eau pluviale traversant le passage à niveau au Pk 127+140.

Un récapitulatif graphique des travaux prévus dans la zone est consultable en annexe 15. De plus, les figures 15 illustrent l'ouvrage en terre sensible de ce tronçon. Ce dernier présente des coulées de boues (photo de droite) et la présence de travaux antérieurs (photo de gauche) dont le but était le maintien du déblai (synonyme de sa fragilité).



Figure 15. Coulées de boues et anciens travaux de maintien de l'OTS en déblai entre les Pk 126+586 – Pk 127+050
(photo prise depuis la voie) – Source interne

L'intérêt de l'étude de cette zone réside dans le fait qu'elle pourra en un seul tronçon nous permettre d'étudier les concepts de fossé en crête de déblai et de drainage longitudinal. Il est important de rappeler que la méthode présentée sera également applicable à des ouvrages de gestion des eaux aux passages à niveaux. La seule différence réside dans le type d'ouvrages mis en place : des fossés pour le drainage longitudinal et des caniveaux à grilles pour les passages à niveaux.

IV.1.6.2. Caractéristiques du bassin versant et calcul des débits de projet

La voie au droit de la zone d'étude est à l'aval d'un large bassin versant naturel sur la droite. La voie récupère donc des eaux de ruissellement de ce bassin, via le déblai sensible pour les Pk 126+586 à 127+050 et directement pour les Pk 126+050 à 127+200. A l'aide de la technologie SIG, les écoulements ont été étudiés sur cette surface naturelle afin de délimiter les sous-bassins versants qui la composent. Le résultat est présenté en annexe 10.

3 bassins versants, découpés chacun en 2 sous bassins-versant, ont été isolés et serviront pour le dimensionnement. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 5 (surface, coefficient de ruissellement, pente). Les bassins mesurant tous moins d'1 km², les débits de pointe décennaux et centennaux ont été calculés à l'aide de la formule rationnelle.

Bassin Versant	Pk début	Pk fin	Surface (km ²)	Coefficient de ruissellement	Pente	Q 10 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
1a	126+586	126+707	0,138	0,428	1,2%	0,288	0,683
1b	126+707	126+807	0,084	0,428	1,5%	0,180	0,425
2a	126+807	126+911	0,069	0,43	1,0%	0,168	0,394
2b	126+911	126+953	0,065	0,43	3,8%	0,160	0,375
3a	126+953	127+140	0,070	0,46	1,7%	0,174	0,384
3b	127+140	127+200	0,033	0,51	1,5%	0,089	0,187

Tableau 5. Caractéristiques des bassins versants et calcul des débits de pointe

Il est précisé que les données pluviométriques pour l'étude la ligne de Saint Pol – Etaple proviennent de la station météo du Touquet. Il s'agit de la station la plus proche de la zone d'étude et ayant la

période d'observation la plus longue. La localisation de cette dernière ainsi que les coefficients de Montana utilisés sont présentés dans les annexes 11 et 12.

➤ Crête de déblai

La crête du déblai a été séparée en 5 cinq tronçons. Les quatre premiers correspondent exactement aux 4 premiers sous bassins versants. Le cinquième et dernier tronçon correspond à la moitié du bassin versant 3_1 mais il sera dimensionné sur la base du bassin entier. Le dispositif du tronçon 5 sera donc surdimensionné. Selon l'IN 3278, les fossés en crête de déblai sont dimensionnés pour une période de retour $T = 100$ ans. Les débits de projets sont rappelés dans le tableau 6.

Tronçon	BV	Pk début	Pk fin	Q 100 (m3/s)
1	1a	126+586	126+707	0,683
2	1b	126+707	126+807	0,425
3	2a	126+807	126+911	0,394
4	2b	126+911	126+953	0,375
5	3a	126+953	127+050	0,384

Tableau 6. Tronçons de récupération des eaux en crête de déblai

➤ Descentes d'eaux

4 descentes d'eaux ont été positionnées pour connecter les fossés en tête de déblai au drainage longitudinal. Celles-ci ont été positionnées aux différents points bas du profil en long de la crête du déblai. Ils sont matérialisés sur l'annexe 10 par des cercles rouges. Ainsi les descentes d'eaux peuvent évacuer les eaux d'un ou de deux bassins versants.

Selon l'IN 3278, les descentes d'eau doivent être dimensionnées pour un débit de $1,8 \cdot Q_{10}$. Cette norme peut paraître surprenante quand on sait que les fossés en amont sont dimensionnés à Q_{100} (cf partie « Crête de déblai ») et que le rapport entre Q_{100} et Q_{10} est d'environ 2 en général (moyenne de 2.3 pour les tronçons étudiés ici) : les descentes d'eau apparaîtraient donc comme sous-dimensionnées vis-à-vis de l'eau provenant des fossés amont. Néanmoins, il faut noter que dans le cas de deux fossés se rejetant dans une descente d'eau, le débit de pointe au niveau de la descente d'eau est inférieur à la somme des débits de pointe des deux tronçons. Or c'est la somme des débits de pointe qui est traditionnellement utilisée. Ce rappel pourrait expliquer la marge laissée pour le dimensionnement des descentes d'eaux.

Le tableau 7 présente donc les débits de projet pour les 4 descentes d'eau.

BV récupéré	Pk	Q10 (1) (m3/s)	Q10 (2) (m3/s)	Q 10 tot (m3/s)	Q proj = 1,8 Q 10 tot (m3/s)
1a	126+586	0,288	-	0,29	0,519
1b	126+707	0,180	-	0,18	0,323
2a+2b	126+911	0,168	0,160	0,328	0,591
3a	127+050	0,174	-	0,17	0,312

Tableau 7. Débits de projets de descentes d'eau

➤ Drainage longitudinal

Le drainage longitudinal est ici composé de 3 parties :

❖ Du Pk 126+586 au Pk 127+000 : Curage/ reprofilage d'assainissement existant. Il s'agit d'un fossé en pied de déblai recouvert de végétation. Comme précisé dans la méthodologie, son dimensionnement n'est pas réalisé mais un curage/reprofilage afin de le rendre fonctionnel est effectué.

❖ Du Pk 127+000 au Pk 127+140 : Création d'un dispositif de drainage longitudinal. Le rôle de ce dispositif est double : récupérer les eaux du bassin naturel en déblai & le drainage de la structure d'assise de la voie. Le futur équipement récupèrera donc l'ensemble des eaux des bassins versants présenté précédemment (excepté le 3.2). De plus, il récupèrera après leur ruissellement les précipitations tombées sur le corps du déblai et sur la voie ferrée. Le bassin versant d'étude est donc mis à jour et ses nouvelles caractéristiques ainsi que le débit de pointe de ce tronçon sont présentés dans le tableau 8.

Il est rappelé que le drainage longitudinal est dimensionné pour une période de retour 10 ans. La différence de normes de dimensionnement entre la crête et le pied du déblai (100 ans en crête de déblai) s'explique par l'importance du risque pour lequel intervient chaque dispositif :

- Le drainage longitudinal protège les structures d'assise d'une diminution de leur portance, due à des phénomènes physiques divers. Ces phénomènes prennent de longues périodes pour se mettre en place et nécessitent la présence d'eau dans la structure d'assise tout au long de ce processus. Le risque est maximum en présence d'eau stagnant dans les structures, c'est-à-dire lorsque celles-ci ne sont pas drainées. En cas d'occurrence d'une pluie centennale avec la présence d'un fossé dimensionné à 10 ans, l'eau débordera du fossé sur la voie puisqu'il n'est pas prévu pour cette période de retour, entraînant de la présence d'eau dans les structures d'assise. Cependant, une fois l'épisode pluvieux terminée, le drainage de cette eau dans la structure d'assise s'effectuera via le fossé qui est désormais vide et empêchera la perte de portance de la structure. Le risque est donc mesuré avec la pose d'un dispositif décennal.

- Les fossés en crête de déblai ont pour objectif le maintien du talus. En cas d'occurrence d'une pluie centennale, il existe un fort risque de coulées de boues sur la voie si l'eau n'est pas récupérée via un système adapté en tête de déblai. Une fois emmenée en pied de talus via les descentes d'eau, le fait qu'elle ne soit pas évacuée immédiatement ne pose pas de graves problèmes, comme démontré précédemment. En revanche un système dimensionné à une forte période de retour est nécessaire à l'endroit où le risque est le plus fort (coulées de boues → immobilisations de la voie ou accident) : la crête de déblai.

❖ Du Pk 127+140 au Pk 127+200 : Création d'un dispositif de drainage longitudinal. Le dispositif de ce tronçon devra récupérer les eaux provenant du bassin versant 2.3 via ruissellement ainsi que les eaux ruisselant sur la voie. La mise à jour du bassin versant et le débit de projet est précisé dans le tableau 8, suivant.

Drainage longitudinal		BV initiaux			Ajout de déblai		
Pk inf	Pk sup	BV intercepté	Surface (m ²)	C ruiss initial	Tronçon ajouté	Linéaire ajouté (m)	Surface de déblai (m ²)
127+000	127+140	1a+1b+2a+2b+3a	426923	0,434	Pk 126+586 - Pk 127+050	464	1856
127+140	127+200	3b	33035	0,505	-	-	0

Drainage longitudinal		Ajout de plateforme ferroviaire			BV final			
Pk inf	Pk sup	Tronçon ajouté	Linéaire ajouté (m)	Surface de voie ferrée (m ²)	Surface totale (m ²)	C ruiss global	Pente moy PL voie ferrée (%)	Q 10 (m ³ /s)
127+000	127+140	Pk 126+586 - Pk 127+140	554	2770	431 549	0,436	0,48	1,326
127+140	127+200	Pk 127+140 - Pk 127+204	60	300	33 335	0,501	0,2	0,112

Tableau 8. Mise à jour des bassins d'étude du drainage longitudinal et calcul des débits de projet

IV.1.6.3. Choix et Dimensionnement des dispositifs

Une fois le débit de projet déterminé, il s'agit de dimensionner les équipements sur cette base.

➤ Crête de déblai

Le dispositif testé par défaut est le fossé en terre revêtu. Le fossé en terre présente une mise en œuvre simple et un coût faible. De plus, en crête de déblai, ces derniers doivent présenter un revêtement en béton afin d'empêcher les infiltrations d'eau dans le déblai et ainsi prévenir le risque de glissement de talus. L'objectif est de créer un fossé dont le débit de remplissage (90% de remplissage) est supérieur au débit de projet. Les cinq sous-tronçons étudiés ont été dimensionnés avec des fossés en terre revêtu. Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Tronçon	Pk		Q projet (m ³ /s)	Ouvrage	Largeur fond (m)	Pente des bords du fossé	Pente longitudinale (%)	Q 90% (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Lame d'eau (m)	Pk exutoire (Descente d'eau)
	Début	Fin									
1	126+586	126+707	0,683	Fossé Terre rev.	0,5	3/2	1.2	1,125	2.2	0.32	126+586
2	126+707	126+807	0,425	Fossé Terre rev.	0,5	3/2	1.5	1,234	2.08	0.24	126+707
3	126+807	126+911	0,394	Fossé Terre rev.	0,5	3/2	1.0	0,985	1.73	0.26	126+911
4	126+911	126+953	0,375	Fossé Terre rev.	0,5	3/2	3.8	1,966	2.82	0.17	126+911
5	126+953	127+050	0,384	Fossé Terre rev.	0,5	3/2	1.7	1,312	2.12	0.22	127+050

Tableau 9. Caractéristiques des aménagements en crête de déblai

Pour tous les fossés, le débit capable est supérieur au débit de projet. De plus, la vitesse d'écoulement est inférieure à 4 m/s, limite maximale admissible. Enfin le niveau d'eau est bien inférieur à 90% de la hauteur admissible ($0,9 \times 0,45\text{m} = 0,405\text{m}$). L'ensemble des dispositions techniques sont vérifiées par les fossés proposés.

➤ Descentes d'eaux

Il existe différents types de descente d'eaux. Le choix d'un type se fait sur la base du débit y transitant. Le tableau 10 présente les valeurs limites de débit pour les différents types de descente d'eaux. En outre, les déblais de hauteur supérieure à 4 m seront dotés de descente d'eau en escalier, quel que soit le débit y transitant. Les résultats du choix des descentes d'eaux de nos tronçons sont présentés dans le tableau 11.

Type	DE tuile - petit débit	DE tuile - grand débit	Toboggan	Escalier
Débit projet (m ³ /s)	< 0,03	0,03 - 0,1	0,1 - 1	> 1

Tableau 10. Débit correspondant aux types de descente d'eau

Pk	Q projet (m ³ /s)	Hauteur du déblai (m)	Type de descente
126+586	0,519	<4	Toboggan
126+707	0,323	<4	Toboggan
126+911	0,591	<4	Toboggan
127+050	0,312	<4	Toboggan

Tableau 11. Résultats du dimensionnement des descentes d'eau

➤ Drainage longitudinal

❖ Du Pk 127+000 au Pk 127+140 : Les systèmes de drainage premièrement testés, comme pour les ouvrages en crête de déblai, sont les fossés.

Il est important de préciser que la pente longitudinale, l'un des paramètres permettant de calculer le débit capable via la formule de Maning-Strickler, est supposée suivre celle de la plateforme (pour ce projet, celle de des rails). La pente moyenne du profil en long a été utilisée pour le calcul du débit de projet et la pente minimale présente sur le tronçon a été utilisée pour le calcul du débit capable dans le fossé. Ce choix maximise le débit de projet et minimise le débit capable, laissant une marge au dimensionnement. Pour notre cas, d'étude, les pentes moyenne et minimale sont les mêmes.

Les débits capables de différents fossés en terre (fond de 0,5 ; 1 ; 1,5 m) ont été calculés et ont été trouvés insuffisants (débits capables de 0,43 ; 0,68 ; 0,94 m³/s) pour le passage du débit de projet. Les fossés en terre étant inefficaces, les mêmes calculs ont été effectués avec des fossés en terre, revêtu de béton. Le revêtement en béton augmente le coefficient de Maning (Ks = 60 pour fossés béton et 30 pour fossé terre) et augmente ainsi le débit de passage dans le fossé. Après calcul pour les fossés de dimension 0,5 et 1m de fond, seul les fossés de 1,5m de fond ont été calculés apte à faire transiter le débit de projet. Ce dernier sera donc retenu et installé sur ce tronçon. Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 12.

Tronçon	Pk		Q projet (m ³ /s)	Ouvrage	Largeur fond (m)	Pente des bords du fossé	Pente longitudinale (%)	Q 90% (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Lame d'eau (m)	Pk exutoire
	Début	Fin									
1	127+000	127+140	1.326	Fossé Terre revêtu	1,5	3/2	0.48	1,55	1.73	0.37	127+140

Tableau 12. Caractéristiques du drainage longitudinal (Pk 127+000 - Pk 127+400)

❖ Du Pk 127+140 au Pk 127+200 : Utilisation de systèmes de drainage autre que des fossés

Ce tronçon illustre parfaitement l'un des problèmes assez fréquemment rencontrés : le manque de place pour l'implantation des dispositifs de drainage. Le dimensionnement du drainage longitudinal

avait initialement été fait avec un fossé en terre. Cependant une partie de l'implantation du fossé était en conflit avec le léger déblai en place (visible sur la gauche de la figure 16). Pour y remédier, le choix a été fait d'utiliser un système alternatif nécessitant moins de place mais plus onéreux : le Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes (FBPB). Ce dernier est un dispositif moins large mais plus profond, la pente des bords étant verticale du fait de la structure en béton. L'annexe 13 présente le fonctionnement d'un FBPB.



Figure 16. Vue du tronçon Pk 127+140 - Pk 127+200 depuis le Pk 127+200

Le dimensionnement a été réalisé sur le même principe que pour les fossés étudiés précédemment. Les résultats du dimensionnement sont présentés dans le tableau 16. Avec une largeur extérieure de 55 cm, le FBPB choisi est moins large que le fossé en terre le moins large (Fossé Terre de 50 cm de fond : 2.3 m de large en surface).

Tronçon	Pk		Q projet (m ³ /s)	Ouvrage	Largeur dispositif/utile (m)	Hauteur utile (m)	Pente longitudinale (%)	Q capable (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Lame d'eau (m)	Pk exutoire
	Début	Fin									
1	127+140	127+200	0.11	FBPB	0.55/0.43	0.5	0.2	0.14	0.71	0.37	127+140

IV.1.6.4. Implantations

L'implantation en plan des dispositifs dimensionnés doit respecter des règles définies dans les IN. De façon générale, ces derniers préconisent essentiellement des distances minimales à respecter entre :

- ❖ Le bord des dispositifs et le rail : cette distance doit garantir le passage de divers trains-travaux dont les gabarits et les travaux ne doivent pas être gênés par les dispositifs d'assainissement.
- ❖ Le bord des dispositifs et les crête/pieds de talus. Ces distances doivent empêcher la déstabilisation du talus par la présence des dispositifs

Outre des distances minimales à respecter, les IN présentent des recommandations particulières à chaque dispositif et les recommandations de pose de ces derniers. Les règles graphiques d'implantation des éléments dimensionnés dans cette partie sont présentées en annexe 13 et 14.

L'implantation en plan a été réalisée à l'aide du logiciel de dessin AutoCad. Nous rappelons que les implantations altimétriques n'ont pas été réalisées par manque de données. Nous précisons également que nous ne pouvons affirmer la fiabilité de tout le calage en plan, notamment aux niveaux des déblais (exemple du drainage Pk 127+000 – Pk 127+140). Comme dit lors de l'analyse des données d'entrée, les levés topographiques des talus ne sont pas fiables et nous empêchent donc de fiabiliser le calage. Cette fiabilisation sera effectuée lors de la phase d'Exécution (EXE). Cette dernière nécessitera une représentation de la réalité plus fiable afin de caler les plans d'exécution. Cette phase permettra notamment de vérifier que la place nécessaire au respect des dispositions constructives est bien disponible.

IV.1.6.5. Gestion des exutoires

Les eaux récupérées dans cet ensemble sont évacuées au niveau du passage à niveau au Pk 127+140. Il s'agit d'un réseau d'assainissement (EU ou EP) passant sous le PN. Les informations sur ce dernier ne sont pas disponibles et seront à vérifier avec le gestionnaire du réseau. Néanmoins, la connexion entre les drainages longitudinaux et cet exutoire a été dimensionnée. Il s'agit d'une connexion entre les deux ouvrages hydrauliques via une buse et deux regards de jonction. La buse a été dimensionnée selon le débit de projet, sur la base de la pente du drainage longitudinal (cette dernière sera optimisée en phase EXE et devrait augmenter, diminuant ainsi le diamètre des buses à implanter). Pour l'instant, le dimensionnement préconise la pose de buses de diamètre $\phi 1000$ et $\phi 500$ pour le premier et deuxième tronçon étudié. La possibilité de rejet de ces deux « gros » apports dans le réseau sera étudié avec le gestionnaire du réseau exutoire. En cas d'impossibilité, une autre possibilité de rejet ou la suppression des aménagements seront étudiés. La pose des buses et la connexion à l'exutoire est observable sur l'annexe 15.

IV.1.6.6. Représentation graphique

Une fois l'ensemble des dispositifs dimensionnés, il faut les représenter graphiquement sur différents fichiers de dessin. Les éléments graphiques ont été réalisés sur le logiciel Autocad, en collaboration avec l'équipe de projeteurs et dessinateurs de setec international. Généralement, nous leur fournissions les éléments listés des dispositifs et les règles d'implantation, et ils réalisaient les dessins. Cette collaboration fut intéressante car elle force à communiquer de façon claire de manière à se faire comprendre par des personnes découvrant le projet et n'ayant pas le même langage technique ; la communication fut ici la clef d'un travail de qualité. Différents documents graphiques ont été réalisés, concernant l'hydraulique :

- ❖ La représentation des axes des dispositifs de drainage longitudinal
- ❖ La représentation des axes des dispositifs en crête de déblai
- ❖ La représentation des axes des tronçons à curer

L'ensemble de ces documents ont été compilés et sont présentés dans l'annexe 15, pour le tronçon étudié. Une tentative de représentation de l'ensemble des aménagements sur la ligne Saint Pol -Etaples a été effectuée, mais la ligne était tellement grande que ces derniers n'étaient pas visibles.

Il est précisé que l'ensemble que les dispositifs mis en place sur la ligne Saint Pol Etaples (APO définitif) est présenté dans les annexes 7, 8 et 9. Les informations spécifiques aux tronçons exemples sont en surbrillance.

IV.1.7. Estimation financière

La dernière phase de l'étude APO consiste en une estimation financière fine des éléments préconisés. Les prix unitaires utilisés comprennent l'achat des matériaux et la réalisation des travaux. Ces derniers doivent donner un ordre d'idée précis du montant des investissements au maître d'ouvrage, et aider à la réalisation du DCE. Les prix unitaires ont été tirés d'un IN spécifiques aux bordereaux de prix, interne à la SNCF. Néanmoins, sur la base de l'expérience des ingénieurs setec international, certains prix ont été modifiés s'ils estimaient qu'ils étaient trop éloignés de la réalité.

Un Qav (Quantité à valoir : 5%) et un Sav (Somme à valoir : 10%) ont été appliqués aux aménagements prévus afin de garantir une marge sur les estimations (15% de marge). La mise en forme de cette estimation financière a été faite sur un modèle précis afin qu'il soit intégrée au logiciel interne de la SNCF : LEA. Un exemple de ces fichiers est présenté en annexe 16 (Estimation financière des ouvrages en crête de déblai) pour la phase APO définitif de la ligne Saint Pol Etaples.

Les évolutions des estimations financières entre les phases APO et définitives sont les suivantes, suite à la mise en place de la méthode économique :

❖ Pour les Ouvrages en Terre Sensible : **1 521 740 € → 629 240 €**

La différence vient du fait que les bassins d'écêtement prévus en phase intermédiaire avaient été estimés avec les ouvrages en terre sensible. Ces derniers ont été estimés à part en phase définitive mais sont optionnels (leur suppression ou mise en place est en cours de discussion). Ceux-ci ont été estimés à **1 364 240 €** en phase définitive.

❖ Pour le drainage longitudinal et le curage : **1 618 733 € → 669 701 €**

La différence vient de la suppression de nombreux tronçons étudiés avec la méthodologie économique.

❖ Pour la gestion de l'eau au droit des passages à niveaux : **88 000 € → 88 000 €**

L'ensemble du projet passe de **3 228 473 €** en phase intermédiaire à **1 386 941 €** en phase définitive (**2 751 181 €** en comptant les bassins). Ceci représente une réduction de **1 841 532 €**, soit 57 % (ou **477 292**, soit 15 % avec les bassins) entre les deux phases.

IV.2. Réaménagement du nœud ferroviaire de Brétigny

IV.2.1. Présentation du projet

Le second projet étudié concerne le réaménagement d'une zone ferroviaire sensible : le nœud ferroviaire de Brétigny. Situé au Sud de Paris dans le département de l'Essonne, la ville de Brétigny présente l'un des plus importants nœuds ferroviaires du Sud de Paris. Chaque jour, environ 400 trains passent par ce dernier. Il permet le passage du RER C, de TERs et de trains inter cités.

Néanmoins, les installations actuelles, vieillissantes et sous-dimensionnées, ne permettent plus de répondre correctement aux besoins de la zone. A titre d'exemple, la gare de Brétigny est tristement connue pour l'accident ferroviaire meurtrier survenu le 12 juillet 2013. Depuis 2011, des études d'aménagement de ce nœud ferroviaire dans le cadre de deux projets sont lancés : la modernisation de la ligne C du RER et la modernisation des lignes dédiés à la SNCF. C'est sur ce deuxième projet que nous nous focaliserons ici. La figure 17 présente la localisation de la ville de Brétigny.

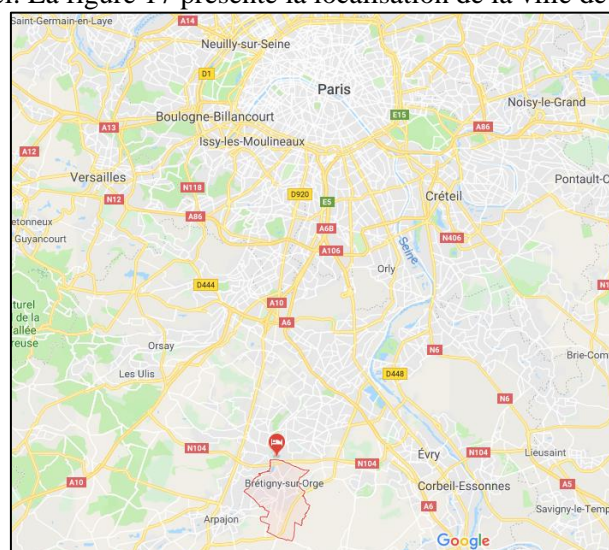


Figure 17. Localisation du nœud ferroviaire de Brétigny - Source « Google Map »

Après plusieurs évolutions du projet, des objectifs finaux ont été établis. Ceux-ci passeront par la mise à niveau du matériel existant et la création de nouvelles voies et installations. L'appel d'offres lancé par SNCF Réseau a été remporté par le groupement setec. Il est composé de setec ferroviaire (mandataire, voies et signalisations), setec tpi (Ouvrages d'arts), hydratec (hydrogéologie), setec bâtiment (gares et bâtiments), setec organisation (gestion de projets) et setec international (hydraulique & géotechnique, environnement & tracé).

Concernant l'hydraulique, setec international devait réaliser des visites de site, des études d'avant-projet (AVP) et des études de projet (PRO). La réalisation du Dossier de Consultation des Entreprises, le passage des marchés de travaux et le suivi des travaux (DET) faisaient également partie des prérogatives du groupement. Mon intervention sur ce projet s'est cantonnée à la réalisation d'une partie des études phase PROjet. Il s'agissait de la mise en place de l'assainissement pour les voies nouvelles. L'analyse de ces travaux permettra d'étudier la gestion de la problématique de l'hydraulique sur un projet de création ferroviaire très détaillé. Ce projet se distingue de celui de Saint Pol par un linéaire très faible (2.5 km environ pour l'ensemble du nœud) et une précision plus importante dans les études. Néanmoins, ce niveau de précision est normal pour des études de niveau PRO, la forte différence entre les deux projets résidant dans la qualité des données disponibles (très bonne pour Brétigny).

IV.2.2. Inventaire des données d'entrée

Comme le révèle le l'annexe 17, l'ensemble des données nécessaires à la réalisation du projet sont ici disponibles. Leur présence a permis la réalisation du travail dans des conditions optimales, rendant possible l'utilisation d'outils non utilisables sur le projet de Saint-Pol.

IV.2.3. Présentation du projet hydraulique de l'étude d'AVP

L'étude APO que nous avons réalisée se base sur l'étude de niveau AVP (Avant-Projet) réalisée en amont. L'ensemble des aménagements hydrauliques seront sommairement présentés et seuls les aménagements qui seront étudiés par la suite seront présentés en détail. La présentation se fera à l'aide des plans annexe 18 Annotés. Il est rappelé que ce projet étant un projet de création de voies nouvelles, il respecte les normes de conception des lignes LGV : toute création de voies ferrées s'accompagne de la mise en place d'un drainage de ces dernières et d'une évacuation de l'eau (directement dans les exutoires ou via un bassin d'écêtement).

Zone Estacade (voir annexe 18 A&B / Pk 30+765 au Pk 31+100)

Cette zone s'étend du Pk 30+765 au Pk 31+100. Elle marquée par :

- ❖ la création d'un pont en estacade avec une voie de train (le pont commence aux Pk inférieur mais ne sera pas étudié) du Pk 30+765 au Pk 30+775 → La pose d'un caniveau en U le long de cette voie sera effectuée pour la récupération des eaux.
- ❖ Du Pk 30+775 – Pk 30+860 : La création de nouvelles voies en crête de remblai. Celles-ci seront accompagnés de la pose de caniveau en U et de descentes d'eaux afin d'évacuer les eaux en pied de remblai vers le bassin Blutin (Pk 30+860). Ce dernier sera également construit pour le projet.
- ❖ Du Pk 30+860 – Pk 31+100 : Les voies nouvelles sont drainées via un dispositif de caniveau en U en pied du remblai. L'exutoire de ces caniveaux est également le bassin Blutin. Ce bassin évacue ensuite ces eaux à débit contrôlé dans le réseau pluvial à proximité.

Zone Avant Quai (voir annexe 18 B / Pk 31+130 – Pk 31+225)

Cette zone s'étend du Pk 31+130 au Pk 31+175. Elle est marquée par la présence de voies nouvelles et des dispositifs de drainage associés :

- ❖ Pk 31+130 – Pk 31+175 : Pose de caniveaux en U pour la récupération des eaux de la voie et du remblai
- ❖ Pk 31+175 – Pk 31+225 : Pose de caniveaux en U pour la récupération des eaux du remblai

L'eau récupérée est évacuée directement dans le réseau d'eau pluviale « Cœur d'Essonne » à proximité (Pk 31+225).

Zone Quai (voir annexe 18 B / Pk 31+175 – Pk 31+270)

Ce tronçon est marqué par la récupération des eaux de la voie du Pk 31+275 au Pk 31+225 via un caniveau en U (FBPB en phase PRO). De plus, la future présence d'un quai du Pk 31+225 au Pk 31+270 entraîne l'utilisation d'un quai drainant pour la récupération des eaux de ce tronçon. L'exutoire de cette zone est le futur bassin Quai, localisé au Pk 31+230, puis le réseau d'eau pluviale à proximité.

Zone Arrière Gare (voir annexe 18 B&C / Pk 31+345 – Pk 31+930 (Planche 2&3))

Cette zone est caractérisée par la fin du quai évoqué précédemment. Un quai drainant pour récupérer les eaux de toutes les nouvelles voies s'étend du Pk 31+470 au Pk 31+740. Du Pk 31+740 au Pk 31+930, c'est un réseau de buses et collecteurs drainant (uniquement FBPB en phase PRO) qui a en charge la récupération des eaux. L'exutoire de ce tronçon est le futur bassin Arrière Gare, localisé au Pk 31+750, puis le réseau d'eau pluviale à proximité. Ce bassin récupérera également les eaux d'un futur parking, construit au droit du bassin.

Zone Banane (voir annexe 18 C&D / Pk 31+770 – Pk 32+550)

Cette zone est celle qui servira d'exemple d'étude pour ce rapport. Elle est marquée par la création de voies et de quais. Ainsi, concernant l'hydraulique :

- ❖ Pk 31+770 – Pk 32+200 : L'implantation d'un collecteur drainant / FBPB (FBPB seulement en phase PRO) en tant que drainage longitudinal des voies nouvellement créées, du Pk 31+770 au Pk 32+150. Ce tronçon rejoint l'exutoire de la zone (le Bassin Banane au Pk 32+200) via une buse. La présence de la buse s'explique par la traversée d'une voie par le tronçon. Ce tronçon sera par la suite appelé **FBPB 1**.

- ❖ Pk 31+160 – Pk 32+200 : Un collecteur drainant (FBPB en phase PRO) sera implanté pour récupérer les eaux non gérées par le FBPB1, du fait de son passage en buse (les buses sont des ouvrages de transit d'eau, mais non de drainage). Ce tronçon, qui sera par la suite appelé FBPB 2, est évacué dans le Bassin Banane, au Pk 32+200.

- ❖ Pk 32+200 – Pk 32+550 : Cette zone est caractérisée par la présence de création de 5 quais en courbe, d'où le nom de zone « Banane » (Voir Annexe 18_D_bis pour les quais). Afin d'évacuer les eaux de ces zones (voies + quai), un système de collecteur drainant à l'intérieur des 5 quais a été mis en place en phase AVP. En phase PRO, les aménagements hydrauliques ont été supprimés dans les quais 1 et 3. Ainsi, les eaux récupérées dans le **collecteur drainant Quai 2** sont injectées dans le **collecteur drainant Quai 4** au Pk 32+270. De même les eaux du **collecteur drainant Quai 4 (+2)** sont injectées dans le **collecteur drainant Quai 5** au Pk 32+230. Enfin le **collecteur drainant Quai 5 (+4+2)** se rejette dans le bassin Banane au Pk 32+200.

- ❖ La création de nouvelles voies entraîne la gestion hydraulique de nouvelles surfaces, augmentant ainsi les débits de rejet aux réseaux exutoires. La gestion de ces ajouts de débits est réalisée par la création de bassins d'écêtement. Le Bassin Banane, dimensionné en AVP pour une période de retour 100 ans, présente un volume de 2920 m³. Ce volume sera mis à jour lors des études PRO ici présentées. Le but du bassin est de permettre un écrêtement du débit à évacuer via un stockage et un rejet (vers le réseau pluvial « Cœur d'Essonne ») à débit contrôlé.

IV.2.2. Réalisation du drainage longitudinal : Enjeux et mise en place

L'objectif de cette partie n'est pas de présenter une nouvelle fois la mise en place du drainage longitudinal mais de montrer les particularités inhérentes au projet de Brétigny. L'analyse se basera sur la zone Banane et présentera l'étude PRO, sur la base des travaux de la phase AVP.

IV.2.2.1. Implantation en plan des dispositifs

Contrairement au projet précédant où l'implantation venait après le dimensionnement des ouvrages, un premier positionnement est réalisé en début d'étude. Ceci est dû au besoin des longueurs exactes des dispositifs pour le fonctionnement du logiciel de dimensionnement.

FBPB 1 et 2

L'implantation de ces deux dispositifs s'est basée sur celui de l'AVP, en vérifiant le respect de certaines règles liées à l'exploitation de la voie, notamment le respect de distances minimum entre la voie et le FBPB. Il est préconisé idéalement le respect d'une distance de 4.95 m entre l'axe de la voie et l'axe du FBPB ; cette distance garantit l'absence d'interface avec le dispositif hydraulique. Néanmoins, en cas d'incapacité, une distance de 2.6m doit être absolument respectée : elle garantit le passage d'un train-travaux (la dégarnisseuse) dont le but est le changement du ballast. De plus, pour les voies en déblai, une distance de 1.65m doit toujours être respectée entre le pied du talus et l'axe du FBPB. L'implantation des deux FBPB est présentée en annexe 19.

Collecteurs drainants dans les quais

L'implantation des collecteurs drainants est contrainte par la présence du quai et la forme courbe de ce dernier : l'enjeu est de réajuster régulièrement la direction du collecteur drainant pour que les bords ne sortent pas de la largeur utile de l'intérieur du quai (2,4m). Après calculs, une distance minimum d'1m doit être gardée entre les bords du quai et l'axe du collecteur drainant. Les changements de direction sont réalisés par la pose de regard de changement de direction, entre 40m et 80 m de longueur. (Cf schéma en annexe 20). L'implantation des collecteurs drainants dans les quais est présentée en annexe 19.

IV.2.2.2. Détermination des bassins versants

La détermination des bassins versants est faite sur la base de la modélisation de la plateforme et du plan de nivellement. La modélisation 3D de la plateforme permet de localiser les points hauts de plateforme et les sens d'écoulement sur cette dernière. Les plans de nivellement permettent de voir les sens d'écoulement sur les surfaces imperméabilisées (chaussée, quai, parking...). Même si elle est réalisée avec des outils spécifiques au projet, cette étape est similaire à celle réalisée pour le projet de Saint-Pol. Les bassins versants sont observables sur l'annexe 21. Ils sont ensuite découpés en sous bassins versants à chaque regard, pour les besoins de l'outil de dimensionnement.

IV.2.2.3. Dimensionnement des dispositifs

Le dimensionnement des dispositifs est réalisé à l'aide du logiciel « CALCUL-O ». Il s'agit d'un ensemble de fiches de calcul Excel développé en interne chez setec international. Plus complète que celles utilisées pour le projet de Saint Pol, elles calculent la ligne d'eau le long du dispositif et la vitesse selon un pas d'espace au choix de l'utilisateur. Surtout, elle permet de tester directement la capacité de passage du débit calculé dans différents dispositifs types (caniveaux en U, collecteur drainant, ... pour des tailles différentes). Ainsi, il est possible d'optimiser facilement la taille du dispositif. Un exemple visuel de cet outil est disponible en annexe 22. Les données nécessaires à son fonctionnement sont les mêmes que présentées pour le projet de Saint Pol : pente longitudinale de la plateforme, surface et caractérisation des bassins versants, type de dispositifs testés. Après dimensionnement, les dimensions des collecteurs drainants et des FBPB retenus sont présentés dans le tableau en annexe 23.

IV.2.2.3. Implantation altimétrique

L'une des grandes particularités du projet de Brétigny est le calage altimétrique. Le but est de déterminer en fonction de la plateforme à drainer l'altitude de pose des dispositifs. Ceci est réalisé à l'aide de la modélisation 3D de la plateforme, sous le logiciel « CIVIL 3D ». Les différentes couches de l'infrastructure ferroviaire (plateforme, sous-couche, ballast,...) sont modélisées sur l'ensemble de la surface étudiée. Le logiciel peut fournir le profil en long de toutes ces couches le long de l'axe d'un dispositif hydraulique, ce dernier ayant été dessiné lors de l'implantation en plan des dispositifs. Le dispositif de drainage peut alors être calé vis-à-vis de ce profil en long. Un exemple sera présenté pour les collecteurs drainants du quai ainsi qu'un FBPB.

Collecteurs drainants dans les quais

Le calage altimétrique d'un collecteur drainant doit respecter les deux conditions suivantes :

- ❖ La génératrice supérieure du collecteur doit être située au moins 95 cm sous la plateforme : cette règle doit être appliquée en cas de présence de poteaux caténares. Elle assure le drainage de la plateforme et l'absence de contact entre le collecteur et le poteau. Dans le doute de la présence ou l'absence de poteaux caténares sur le faisceau banane, cette règle sera respectée.
- ❖ La génératrice supérieure du collecteur drainant doit être au moins 5 cm au-dessous de l'arase de terrassement. Cette condition est liée au drainage des structures d'assise. L'arase de terrassement étant la surface basse de ces dernières, le dispositif de drainage doit être situé en-dessous afin d'évacuer l'eau s'y trouvant.

Pour les 3 quais de la banane, la ligne située 95 cm sous la plateforme est plus basse que celle située 5cm sous l'arase de terrassement. Ce sera donc la première condition qui dimensionnera la pose des collecteurs drainants.

Pour le calage des buses faisant la jonction entre les différentes lignes de collecteur drainant, une distance de 95 cm sous la plateforme n'est pas nécessaire car une buse n'est pas un dispositif de drainage, mais de transit. La génératrice supérieure de la buse pourra ainsi respecter une distance minimale de 90 cm avec le bas de la traverse la plus basse du profil en long. Ceci permet de moins approfondir la pose de la buse. De plus, le fil d'eau de la buse ne doit pas être au-dessus de celui de l'aval du collecteur drainant, afin de garantir la continuité hydraulique.

Enfin, l'aval de la buse de fin du tronçon des collecteurs 2 et 4 doit être respectivement au-dessus des collecteurs drainant 4 et 5, aux points d'insertion des débits provenant des collecteurs 2 et 4. Cette règle doit garantir la continuité hydraulique entre les différents collecteurs.

Les résultats graphiques du calage des trois lignes de collecteur drainant sont présentés dans l'annexe 24. Ainsi, le fil d'eau aval de la buse du collecteur drainant 5 est positionné à une altitude de 74.579 m.

FBPB 1

Le calage d'un Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes est quelque peu plus particulier que celui d'un collecteur drainant. Il est présenté dans la méthodologie suivante :

Le haut du FBPB suit la pente du terrain naturel. En effet, il est atteignable depuis la surface. Néanmoins, la pente du terrain naturel n'est pas celle de la plateforme. Afin de remédier à cela, une couche de béton (renformis) est coulée au fond du FBPB afin qu'il présente la pente de dimensionnement.

Le drainage est effectué via les barbacanes présentes sur le côté du FBPB. Afin d'assurer le drainage des structures d'assise, la barbacane de drainage doit être positionnée 5 cm sous l'arase de terrassement. En cas de besoin, le FBPB peut être équipé de rehausses permettant l'approfondissement

du fond et des barbacanes de drainage. De plus, la surface libre de l'écoulement devra être située en dessous de la barbacane de drainage.

Enfin la buse située à l'aval des tronçons respecte les conditions de calage présentée pour la buse en aval des collecteurs drainants.

La mise en place graphique de cette méthode est présentée en annexe 25 pour les FBPB 1 et 2. Ainsi, le fil d'eau aval du FBPB 1 est positionné à 73.721 m et celui du FBPB 2 est positionné à 75.32m.

IV.2.3. Evacuation dans le bassin : Enjeux et mise en place

IV.2.3.1. Enjeux

Le projet nécessite l'élargissement de la plate-forme ferroviaire induisant une imperméabilisation supplémentaire. Combinée à la mise en place de réseaux de collecte, les débits à l'aval seront par conséquent augmentés et concentrés. Il est donc nécessaire de prévoir des bassins d'orage permettant de limiter le débit à l'exutoire selon les contraintes des gestionnaires comme indiqués dans le SDAGE Seine Normandie 2016-2021 et le SAGE Orge et Yvette 2014.

Les eaux de ruissellement sur les plateformes ferroviaires sont réputées propres et ne nécessitent pas de traitement avant rejet au milieu naturel. Néanmoins, étant donné que sur le projet circulent de trains type fret, il sera mis en place un dispositif d'interception et de confinement d'une éventuelle pollution accidentelle. Par ailleurs, sur le faisceau banane une partie des eaux récupérées sont des eaux de nettoyage. Les eaux de nettoyage sont constituées principalement de :

- ❖ Produits de nettoyage extérieurs (vitres, faces,...)
- ❖ Produits d'élimination de graffitis
- ❖ Produits de nettoyage lors des désinfections des WC

Les eaux subiront ainsi un prétraitement par décantation et le rejet se fera dans le réseau d'Eaux Usées de « Cœur d'Essonne ». Une convention de rejet sera effectuée à ce sujet.

Par ailleurs, compte tenu de l'implantation du projet en zone urbaine dense et au-delà des problèmes de faisabilité technique, il a été considéré que des bassins à ciel ouverts ne sont pas adaptés à l'insertion du projet dans son environnement. Les bassins retenus sont des ouvrages en béton enterrés.

IV.2.3.2. Méthode des pluies et dimensionnement du volume du bassin Banane

Le volume utile d'écêtement est établi à partir de la méthode des pluies pour laquelle la courbe des volumes entrants est construite à partir des courbes Intensité-Durée-Fréquence. Pour rappel, le débit de fuite étant admis constant, le problème se présente graphiquement comme suit :

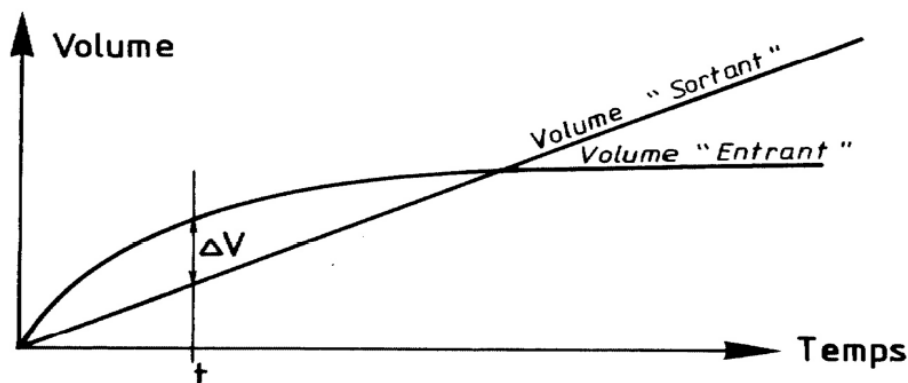


Tableau 13. Schématisation graphique de la méthode des pluies

La différence d'ordonnée maximum ΔV obtenu au temps t , représente le volume à donner au bassin pour la pluie critique. Des pluies plus courtes ou plus longues conduiraient à des volumes inférieurs. Par ailleurs, un coefficient de 1.2 sera appliqué sur le volume, conformément à l'instruction technique de 1977.

Le volume entrant est modélisé pour une pluie de période de retour 100 ans, du fait de l'implantation du bassin à proximité immédiate des voies. Les coefficients de Montana utilisés pour le calcul sont présentés en annexe 26. Pour le débit de fuite du bassin, il est d'1 l/s/ha en temps de pluie, avec un minimum d'1 l/s. Le tableau suivant récapitule les données relatives au bassin Banane. Une capture d'écran de la fiche de calcul du bassin est présentée en annexe 27.

Surface BV récupéré (ha)	Coefficient de ruissellement global	Surface active (ha)	Débit de fuite (l/s)	Volume Bassin (m3)	Temps de vidange (jours)
2,19	0,86	1,886	2,19	2207	10,1

Tableau 14. Caractéristiques du bassin Banane

IV.2.3.3. Implantation, équipements et dimensions du bassin

Fonctionnement général du bassin

Celui est présenté à l'aide des vues en plan et de profil située annexe 28. L'eau arrive via une buse en phi800 dans le dessableur. Celui-ci permet la décantation des particules lourdes (résidus de nettoyage des trains, sable,...). L'eau traverse ensuite le compartiment de confinement pour la pollution accidentelle. La sortie de ce dernier peut être fermée en cas de pollution. L'eau rejoint ensuite le côté opposé où sont placées les chasses. Elle s'écoule ensuite dans les trois compartiments de stockage du bassin. Le volume utile du bassin est compartimenté afin de permettre un meilleur fonctionnement des chasses. L'eau s'écoule ensuite avec la pente de 1% jusqu'à la station de relevage, où les pompes évacuent à débit fixe l'eau du bassin. Enfin, une rigole est mise en place dans la partie aval afin de recevoir l'eau des chasses et de permettre une meilleure efficacité de ces dernières.

Dimensionnement des équipements

Le dessableur, le volume de confinement et la surface de la station de pompage ont été dimensionnés lors de l'étude du bassin. Les valeurs de dimensionnement ont été déterminées avec un expert hydraulique de la société hydratec.

- ❖ La surface de la station de pompage doit être au minimum un carré de **2,5m** de côté, soit 6,25 m² minimum
- ❖ Le volume du confinement est de **50 m³**. La surface accordée à cet équipement variera donc en fonction de la hauteur utile.
- ❖ Le dessableur doit présenter une surface de 10 m² minimum.

Détermination des dimensions du bassin

Le bassin présente en phase PRO un volume utile de dimensionnement de 2207 m³ (2920 m³ en phase AVP ; forte optimisation réalisée ici), à ajouter aux dimensions des équipements. Les dimensions de ce dernier ont été déterminées par itération afin de respecter les emprises disponibles : en effet la zone est très contrainte par la présence de voies à proximité. Les dimensions présentées dans les annexes 29 ont été retenues. Elles permettent les caractéristiques suivantes :

Altitude d'entrée au bassin

La détermination de l'entrée du bassin dépend à la fois de l'altitude d'arrivée du plus profond des dispositifs hydrauliques (Z (FBPB 1) = 73,721) mais également de l'environnement autour du bassin. En l'occurrence, la buse du collecteur drainant du Quai 5 passe au-dessus du bassin, imposant

ainsi son altitude de sa dalle supérieure. Cele-ci bassin doit être placée sous le collecteur drainant (Z collecteur drainant $5 = 74,579$ m & Z lit de pose du CD = $74,479$ m). Le bassin présente au-dessus son entrée hydraulique une dalle de 85 cm et une revanche de 40 cm (hors volume utile). La présence de ces éléments abaisse de 1,25m l'arrivée supérieure au bassin, vis-à-vis du lit de pose du collecteur drainant. Ainsi l'entrée du bassin est comprise entre 72,349m et 73,149 m. L'entrée au bassin se fait via une buse de diamètre $\phi 800$.

Profondeur et largeur du bassin

Trois facteurs ont conditionné ce dimensionnement :

- ❖ La volonté de s'approfondir au minimum, afin d'éviter les fouilles trop profondes lors des travaux. Cette faible profondeur est compensée des une longueur et largeur plus importantes.
- ❖ Une forte contrainte en plan. La présence à proximité des voies a imposé la largeur de bassin. De plus, une trappe d'aération devait être posée à l'extrémité du bassin, au niveau des chasses. Or cette trappe ne pouvait être posée sous le ballast qui empêcherait le passage de l'air. Le bassin a donc dû être prolongé jusqu'au quai n°5 pour y caler cette trappe d'aération. L'augmentation de cette longueur a permis la réduction de la largeur.
- ❖ Le respect des surfaces et volumes des équipements.

Après plusieurs itérations, les résultats présentés en annexe 30. Les dimensions intérieures du bassin sont consultables en annexe 29.

Implantation en plan du bassin

L'annexe 19 présente l'implantation du bassin dans son environnement. Le bassin est implanté partiellement sous les quais 3,4 et 5.

V. Bilan de l'étude

Les projets ayant été présentés, il convient de faire une analyse comparative de leur réalisation.

Le premier élément de différenciation, et le plus important, pour ces deux projets est la différence de données d'entrées disponibles. L'annexe 31 présente le tableau comparatif des données d'entrées disponibles. On remarque que le projet de Brétigny présente toutes les données nécessaires à la réalisation des études tandis que certaines fondamentales sont manquantes pour Saint-Pol. Il s'agit notamment de la modélisation 3D de la plateforme et de divers levés topographiques. Ces absences ont pour conséquence majeure l'absence de calage altimétrique des dispositifs de drainage, diminuant ainsi le niveau de précision de l'étude.

Les deux projets ont également été marqués par deux gestions de différentes : d'un côté le projet de Brétigny s'est déroulé selon les prévisions initiales tandis qu'un changement de stratégie a dû être amorcé pour Saint-Pol, compte tenu de restrictions financières. Autant la gestion de projet a été efficacement réalisée pour Brétigny (notamment par la présence d'ingénieurs planification de setec organisation), autant les difficultés de Saint-Pol auraient peut-être pu être anticipées lors de l'estimation financière du programme travaux. En tout cas, il convient de questionner l'intérêt de la stratégie économique sur le projet de Saint-Pol vis-à-vis du futur. En effet les travaux préconisés constituent un investissement conséquent mais n'assurent pas la pérennité de la ligne. Ils lui accordent simplement un délai de fonctionnement avant sa dégradation générale, alors qu'un investissement moyennement plus important aurait permis son maintien sur le long terme. Le questionnement de ce maintien à long terme se pose d'autant plus que le rapport SPINETTA (« L'avenir du Transport Ferroviaire », février 2018) préconise la suppression des petites lignes financièrement peu rentables

mais très gourmandes en exploitation. De plus une prise de recul révèle que les restrictions financières ont été imposées par la Région Haut de France, qui finance cette régénération ferroviaire. Cette information peut laisser planer le doute sur le réel intérêt de cet investissement ; investissement pour le fonctionnement à long terme ou investissement minimum pour une retombée politique à court terme...

Un autre point de différenciation annoncé était la longueur des lignes à étudier pour les deux projets. D'un côté les trois lignes de Saint-Pol s'étendent sur 125 km tandis que moins de 2 km ont été étudiés pour Brétigny. Il pourrait sembler à première vue que le même niveau de détail ne serait pas demandé pour les deux projets mais pourtant la précision atteinte pour Brétigny aurait été requise sur Saint-Pol si les données avaient été disponibles. Cependant, le temps et le financement alloué à l'étude serait beaucoup plus important. Ainsi, il apparaît que le linéaire d'études influe peu la qualité du travail attendu.

Si le linéaire à traiter impacte peu le travail à effectuer, l'environnement de la zone d'étude a une influence plus importante. En effet les lignes de Saint-Pol étaient marquées par des implantations majoritairement en milieu rural tandis que le nœud ferroviaire de Brétigny se trouve dans un environnement ferroviaire et urbain très dense. Une précision moindre était acceptable sur Saint-Pol car les risques, bien qu'important, étaient moindres. En effet, des erreurs de calage lors des études peuvent être corrigées lors des travaux si l'espace disponible est important et les aménagements peu interfacés. A l'opposé, une telle latitude n'est pas possible dans une zone très contrainte et interfacée telle que Brétigny, où l'organisation de l'espace est optimisée à son maximum.

Il convient également de rappeler quelles sont les suites qui seront données aux deux projets réalisés. Les phases APO et PRO étant proches, le futur des deux projets passera par la réalisation du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) et celle du marché d'attribution. La phase de DCE a déjà été amorcée pour Saint-Pol alors que les études PRO de Brétigny sont encore en cours. Une fois les marchés de travaux attribués, les phases d'Exécution (EXE) et de VISA seront entamées avec pour objectif la réalisation des plans d'Exécution. Ces dernières seront particulièrement importantes pour le projet de Saint-Pol car elles permettront de réaliser la part manquante de la phase APO (calage altimétrique). Enfin, les travaux seront réalisés, avec la réalisation du suivi des travaux à Brétigny pour le groupement setec. L'attribution de l'entreprise réalisant le suivi des travaux n'a pas été effectué pour l'instant concernant Saint Pol. Néanmoins, il devrait s'écouler plusieurs années avant la mise en fonctionnement des projets étudiés.

Enfin, l'étude de ces deux projets révèle surtout la mise en place de deux stratégies différentes motivées par deux enjeux différents. D'un côté, il est question d'un important nœud ferroviaire dans l'agglomération parisienne, nécessitant un développement. A l'opposé, les lignes de Saint-Pol apparaissent comme de petites lignes en fin de vie, dont les autorités politiques essaient de retarder la fermeture. Ces deux enjeux opposés conditionnent ainsi les niveaux d'investissement financier : un investissement important pour le nœud ferroviaire de Brétigny en plein essor tandis que l'investissement est mesuré à Saint-Pol, où les lignes risquent de fermer à moyen ou long terme. Ainsi, l'étude de ces deux projets théoriquement identiques révèle une forte variabilité de réalisation, dû à une forte différence d'enjeux.

VI. Analyse des difficultés rencontrées et solutions apportées

Cette partie a pour objectif le recensement et l'analyse des difficultés observées au cours du stage. L'emphase sera également mise sur les moyens mis en place pour y remédier.

Le premier élément sur lequel je voudrais mettre l'accent concerne la perte de temps lié au changement de méthodologie du projet de Saint-Pol. En effet, 50% des travaux étudiés ont été supprimés entre les phases intermédiaires et définitives des lignes Béthune – Saint Pol et Saint Pol – Etaples. Par rapport à la productivité des équipes et l'avancée des autres projets, ces suppressions représentent des heures perdues. S'il est clair qu'il a fallu l'estimation financière de la première ligne pour réaliser que les travaux préconisés étaient hors-budget, le changement de méthodologie sur la ligne 3 plutôt que sur la ligne 2 peut être questionné. Une anticipation de la part des gestionnaires de projet aurait pu éviter la réalisation de trois semaines de travaux sur la ligne Saint Pol – Etaples en sachant qu'une forte partie du travail en cours serait supprimé. Néanmoins, le changement de stratégie a tout de même été appliqué à l'APO intermédiaire de Saint Pol – Arras, évitant ainsi une perte de temps et de motivation sur la troisième ligne.

Ma deuxième réflexion porte également sur le projet de Saint – Pol, et particulièrement sur le fait qu'il présente un long linéaire d'études. La présence d'un long linéaire entraîne une importante répétition des mêmes tâches. Cette répétition peut entraîner des baisses de concentrations et la réalisation d'erreurs ou de perte de temps. Afin d'éviter ces difficultés, l'automatisation et la simplification d'un maximum de tâches a été effectué, notamment sur les fiches de calcul. L'utilisation de boutons de commande et de macros ainsi que l'optimisation des fiches de calcul sont des éléments simples ayant permis un gain de temps. Par exemple, le calcul chaque vitesse dans les tronçons de Saint-Pol devait être réalisée à l'aide du solveur. Bien que simple, cette tâche répétée une cinquantaine de fois devient lassante et des erreurs entraînant des pertes de temps surviennent. Afin d'éviter cela, j'ai développé un bouton de commandes automatisant la manipulation. Sa création a certes créé une perte de temps, mais qui a été ensuite rattrapé par son utilisation.

L'une des plus grandes difficultés rencontrées au cours du stage a été le thème de ce dernier : l'hydraulique ferroviaire. Cette dernière était totalement nouvelle pour moi. S'il est vrai qu'elle consiste globalement à gérer les eaux pluviales sur les infrastructures ferroviaires, elle est fortement différente de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain, traditionnellement étudiées au cours de mon cursus. La plus grande difficulté a été l'absence de prérequis sur le domaine ferroviaire. Le vocabulaire, les équipements et le fonctionnement des voies ferrées sont des sujets spécifiques et un temps d'adaptation a été nécessaire pour les comprendre. De plus, outre le fonctionnement général des voies ferrées, les spécificités liées à l'hydraulique ont nécessité un temps d'adaptation. En effet, les normes de conception sont régies par les IN, documents spécifiques au ferroviaire. Il a donc fallu un temps de lecture de ces derniers et des méthodologies mais surtout de maturation des méthodes et des objectifs tout au long du stage. Afin de remédier à ces difficultés, ma meilleure solution a été l'échange avec mon maître de stage. Ce dernier a toujours été disponible pour les nombreuses questions que je lui posais (ou reposais). De plus, la lecture des méthodologies appliquées aux projets sur lequel je travaillais m'a été d'un grand secours. En effet, moins dense et détaillé que les INs (très généraux), ces méthodologies mettaient l'accent sur les points qui m'intéressaient directement.

Enfin, le dernier élément que je souhaiterais souligner concerne la difficulté et l'enjeu de travailler sur des projets interfacés entre différents départements. En effet, la réalisation de nombreuses tâches nécessitait des données de travaux en cours par d'autres départements. Un exemple a été donné dans cette présentation avec le besoin des zones de reprise de plateforme (déterminées par les géotechniciens) pour que le dimensionnement des dispositifs hydrauliques soit réalisé. Ainsi la difficulté est de réaliser une bonne organisation de son emploi du temps afin de ne pas être bloqué par l'attente de données. La solution face à ce problème reste la prise de recul vis-à-vis de la totalité du travail à effectuer et le fait d'éviter de se lancer tête baissée dans une tâche. Cette prise de recul est valable aussi bien pour les tâches spécifiques à l'hydraulique que pour la gestion générale d'un projet interfacé. C'est d'ailleurs en ce sens qu'il est intéressant d'avoir sur ces grands projets interfacés (exemple de Brétigny) des ingénieurs en charge du suivi de projet et gérant le planning de production. Pour le projet de Brétigny, un collègue de setec planitec était en charge de ces tâches.

CONCLUSION

Le présent document avait pour objectif de montrer en quoi les études hydrauliques sont un enjeu dans la conception d'infrastructures ferroviaires et comment s'intègrent elles dans un projet pluridisciplinaire, notamment vis-à-vis de la gestion des interfaces entre les différents métiers.

A travers une présentation globale de l'intérêt de la gestion des eaux sur les voies ferrées, le lecteur aura pu comprendre que l'eau peut être un danger dont il faut protéger les équipements ferroviaires. Ainsi il a pu voir que le drainage et l'évacuation de l'eau des infrastructures ferroviaires est fondamentale pour le maintien des structures d'assises et ainsi le maintien de la voie. De plus il aura compris que la protection des talus environnant est aussi importante pour la préservation de désordres pouvant affecter la voie.

De plus, l'étude d'une régénération ferroviaire à long linéaire et du développement d'un nœud ferroviaire dense et très interfacée a permis l'analyse de la réalisation des études hydrauliques. Cette dernière aura permis de comprendre la méthodologie appliquée pour ce type de projet mais également de voir à quel point la réussite et la finesse d'une étude dépend des données disponibles. Il a d'ailleurs été montré qu'un ingénieur doit avoir une forte capacité d'adaptation et une facilité à proposer des solutions alternatives et viables.

Une attention particulière a été mise tout au long de la présentation à montrer en quoi les études ferroviaires (y compris hydrauliques) sont interfacées entre différents domaines et métiers. Ces interfaces doivent être gérées avec une prise de recul suffisante évitant les coupures de production ou le fait de refaire plusieurs fois les mêmes tâches, par omission de certaines données.

L'étude des deux projets présentés met également en lumière le fait que différents enjeux existent et peuvent être portés par les investisseurs vis-à-vis études des travaux ferroviaires. Il convient de bien cibler ces enjeux afin de proposer des offres qui y seront adaptées. Une offre adaptée dès le départ évitera les évolutions intempestives et anti-productives au fur et à mesure du projet, synonyme de perte de temps et d'argent. Un ingénieur d'études doit ainsi être conscient que les études qu'il fournit se traduiront par des investissements financiers afin d'adapter le niveau de détail qu'il apporte à son travail.

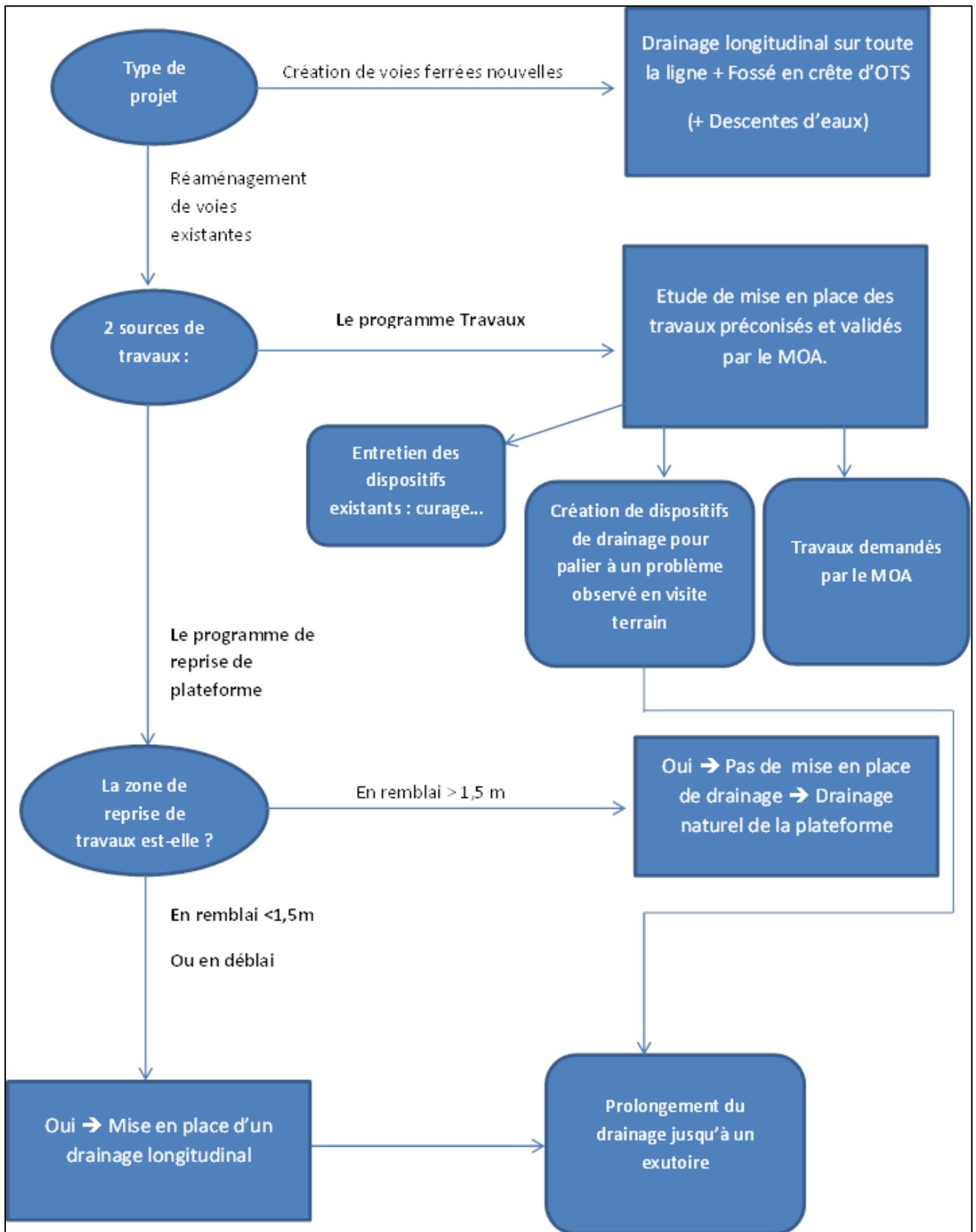
Enfin, avec la parution du rapport SPINETTA (février 2018) qui préconise la fermeture des lignes financièrement peu rentables et très gourmandes en exploitation, il pourrait être intéressant de se questionner sur le devenir du type d'études ici-présentées. L'investissement se concentrera-t-il autour des créations des nouvelles lignes à grande vitesse ou bien l'entretien du réseau ferré historique continuera-t-il à occuper des ingénieurs dans un futur plus ou moins proche?

ANNEXE

Annexe 1 : Désordres présents sur les voies ferrées et solutions possibles

Désordres	Causes	Solution
Remontées boueuses / Problèmes de nivellement / Fontis / Zone Humide/ Végétations sur la voie	Présence et stagnation d'eau dans les couches souterraines	Dispositif de drainage et d'évacuation des eaux: - Fossé en terre ou revêtu (béton) - Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes ➤ Collecteur drainant ➤ Caniveaux à fente
Coulée de boues / Glissement de talus/ Déblai sensible / Remblai sensible	- Présence d'eau dans le talus -Ruissellement trop important sur le talus	Canalisation des eaux en crête de talus pour diminuer le ruissellement sur le talus (via fossé en terre revêtu) + Descente des eaux récupérées via un ouvrage n'abimant pas le talus (Descente d'eau)
Ouvrage en Terre sensible	- Risques de coulée de boues ou de glissement de talus	+ Récupération de l'eau des descentes d'eau et de ruissellement sur le talus (fossé terre/revêtu, ou tout autre dispositif de drainage cité précédemment)
Inondations de plateforme	Stagnation d'eau au niveau de la voie puis infiltration	Dispositif d'interception des eaux de ruissellement & Drainage et Evacuation des eaux infiltrées: - Fossé en terre ou bétonné (revêtu) - Fossé béton Préfabriqué à Barbacanes (FBPB) ➤ Collecteur drainant ➤ Caniveaux à fente
Stagnation au niveau d'un passage à niveau	Non évacuation des eaux	Dispositif d'interception et d'évacuation des eaux au(x) points bas de ruissellement afin de limiter les apports d'eaux, puisqu'il n'est pas possible de drainer : - Caniveau à grilles Caniveau à fentes
Désordres hydrauliques au droit d'un quai	Evacuation des eaux impossibles par la présence du quai	Système d'évacuation dans le quai: -Mise en place de quais drainants

Annexe 2 : Logigramme de détermination des tronçons à aménager



Annexe 3 : Présentation des formules de Crupédix et rationnelles

Présentation de la formule Crupédix

La formule de Crupédix s'applique à des bassins versants dont la superficie est supérieure à 10 km².

$$Q_{10} = (P_{10} / 80)^2 \cdot R \cdot A^{0,8}$$

Avec :

P_{10} : Pluie journalière de fréquence décennale en mm, R : Coefficient régional,
 A : Surface de bassin versant en km².

L'évaluation du débit centennal est obtenue à partir du débit décennal de la formule Crupédix en appliquant un coefficient de corrélation : $Q_{100} = b' \cdot Q_{10}$. Jusqu'à 20 km², b' est déterminé en appliquant la formule rationnelle, au-delà, il est déterminé à partir des données provenant des cours d'eau jaugés sur des bassins versants représentatifs à proximité du projet. A défaut, $b' = 2$.

Le coefficient régional R découle d'une analyse des débits de crue estimés par la loi de Gumbel issues des données de stations de jaugeages disponibles à proximité du projet.

Présentation de la Formule de transition

Les deux formules précédemment décrites ne s'appliquent pas à tous les bassins versants. En effet, la formule rationnelle n'est valable que pour de très petits bassins versants, alors que la formule Crupédix s'applique à des bassins versants ruraux de 10 à 100 km². Les limites couramment admises sont les suivantes :

- Pour les bassins versants dont la superficie est inférieure à 1 km², on applique la formule rationnelle,
- Pour les bassins versants dont la superficie est supérieure à 10 km², on applique la formule Crupédix.

En théorie, la formule rationnelle reste valable pour des bassins dont la superficie est comprise entre 1 km² et 10 km². Cependant l'expérience montre que la formule rationnelle appliquée à un bassin versant de superficie 9,9 km² donne un débit très supérieur à celui obtenu par la formule Crupédix pour un bassin de superficie 10,1 km².

Pour supprimer ce hiatus, on adopte une formule de transition pour les bassins versants dont la superficie est comprise entre 1 km² et 10 km².

Le débit décennal/centennal s'écrit alors : $Q_{10/100} = \alpha Q_{10/100R} + \beta Q_{10/100C}$

Avec :

Q_{10R} : débit décennal obtenu par la méthode rationnelle,
 Q_{10C} : débit décennal obtenu par la formule Crupédix.

α varie linéairement de 1 à 0 lorsque la superficie croît de 1 à 10 km² :

$$\alpha = (10 - A) / 9 \quad \text{et} \quad \beta = 1 - \alpha$$

Annexe 4 : Inventaire des données sur le projet de Saint Pol (pour les 3 lignes)

Données	Présence	Observations / Conséquences
Tracé des voies	Oui	Format dwg
Modélisation 3D de la plateforme	Non	Calage altimétrique impossible
Plan de nivellement	Non	
Levé topographique des talus autour de la voie	Oui	Format visuel uniquement - Données considérée comme non fiable avec l'expérience
Topographie SIG	Oui	Base de données en consultation libre
Profil en long de la voie	Oui	Profil des rails
Carte topographiques IGN	Oui	Base de données Géoportail
Liste des ouvrages de traversée sous voie (exutoires potentiels)	Oui	Photos des visites annuelles disponibles
Cadastre	Oui	format dwg
Profil en long de la plateforme	Non	Hypothèse de similitude avec le PL des rails
Données de perméabilité du sol	Non	Nécessité de prise d'hypothèses
Levé topographique / Plan des ouvrages hydrauliques de traversé	Non	Réalisation des jonctions aux exutoires sur la base de photos
Zones de reprise de plateforme	Oui	Evolution au cours du projet
REX du mainteneur vis-à-vis des zones problématiques	Oui	Réception tardive
Implantation et synoptique du drainage existant	Non	Etude basé sur la visite de terrain
Niveau des plus hautes eaux des nappes	Oui	
Plans des réseaux enterrés	Rare	Hypothèses à valider avec les gestionnaires de réseau
Coupes fonctionnelles générales de la voie	Oui	
Levé des passages à niveau	Partiel	Réception tardive

Annexe5 : Programme travaux du projet de St Pol

Annexe5_a : Programme travaux de la ligne Béthune – Saint Pol

Zone	PK	Désordre ouvrage en terre	Travaux prévus	Estimation du coût des travaux
PN 47	45+650 à 46+100		Curage du fossé à gauche	5.5 k€
PN 49 bis au PN 50	46+760 à 47+150		Création fossé file droite et file gauche	38 k€
Zone Gare Lapugnoy	49+450 à 49+600		Démolition fossé béton gauche	4.5 k€
Zone Gare Lapugnoy	49+750 à 49+900		Reprofilage + curage fossé	5 k€
Gare Vis à Marles	50+880 à 51+000		Assainissement du quai par passages d'eau	2 k€
Remblai de Marles-les-Mines	51+400 à 51+700	Inondation	Reprofilage de fossé terre côté gauche Curage du fossé terre Débroussaillage du bac décanteur au PK 51+680 côté gauche	5 k€
Déblai de Camblain Chatelain	56+033 à 56+900	Coulée de boue	-	0 k€
Remblai de Camblain Chatelain	56+900 à 58+050	Déversement piste – érosion talus en remblai	-	0 k€
PN 61	59+856 à 60+020		Curage drainage des 2 côtés	3.3 k€
PN 63 au PN 64	64+680 à 65+430		Reprofilage des fossés des deux côtés accompagné d'un curage des buses	15 k€
Déblai de Brias	66+300 à 70+100	Inondation plateforme et glissement de talus	Aménagement hydraulique -Curage fossé droit du PK 66+777 à 69+775 -Création fossé à gauche en crête (revêtu) avec descentes d'eau -Création fossé à gauche en crête (revêtu) avec descentes d'eau et un fossé en pied -Création de deux bassins d'écrêtement -Au niveau du PRO PK 67+965, buse de contournement de l'OA avec 4 regards	1942 k€ (+ 25.7 k€)
PN 67	69+780		Création caniveau grille	2.7 k€
Remblai de Brias	70+100 à 71+120	Glissement de talus côté gauche	Aménagement hydraulique	0 k€ (repris dans les travaux du déblai de Brias)
Remblai de Saint Michel / Ternoise	71+120 à 72+000	Glissement superficiel de talus côté gauche	-	0 k€

Annexe5_b : Programme travaux de la ligne Saint Pol - Etaples

Zone	PK	Désordre ouvrage en terre	Travaux prévus	Estimation
	73+900 à 74+524		Création fossé terre	32 k€
	74+920 à 74+992		Curage fossé terre Mise en place caniveaux grilles au PN	6.5 k€
	74+992 à 75+610		Reprofilage fossé	6.5 k€
	77+834 à 78+400		Curage fossé	6 k€
	78+952 à 79+050		Création caniveau à grille à droite + buse Curage fossé terre	10 k€
	81+823 à 82+000		Reprofilage fossé terre	2 k€
	83+400 à 84+400		Reprofilage fossé terre	10 k€
	84+870 à 88+240		Curage fossé terre	4 k€

Remblai d'Erin	86+550 à 87+000	Arrachement de talus de remblai côté D	Curage du fossé béton du PK 86+552 à 86+860 Reprofilage du fossé du PK 86+860 à 87+000	15 k€
	88+450		Curage buse	0.5 k€
Remblai de Blangy sur Ternoise	89+600 à 90+430	Inondation de plateforme	-	-
	91+000 à 91+300		Reprofilage fossé terre	3 k€
Déblai de Blingel	91+112 à 91+700	Inondation de plateforme	-	-
Déblai de Rollancourt	93+500 à 93+752	Inondation PN96	Curage fossé terre Création fossé sur 25m	2.5 k€
	93+752 à 94+750		Curage fossé	10 k€
Déblai d'Auchy les Hesdin	95+625 à 96+200	Inondation PN97/98	Reprofilage et revêtement du fossé terre du PK 95+625 à 96+200 Curage de dalot au PK 95+626 (PN97) et PK 96+016 Création d'une traversée sous voie au PN 98 Mise en place caniveau grille au PN 97 Curage des buses Curage caniveau grille PN 98 avec mise en place bordures T2 (50 ml)	360 k€ +4 k€
	97+270 à 97+750		Curage des fossés terre et béton à gauche	5 k€
Déblai de Le Parcq	97+750 à 98+400	Inondation plateforme – coulée de boue	Mise en place de fascines Curage et reprofilage du fossé du Pk 97+780 à 98+180 Mise en place de deux DE02 et remplacement de la buse en entrée de bassin Curage, déboisement et dessouchage du bassin Réfection des ouvrages d'entrée et de sortie des bassins Curage fossé gauche du 98+180 au 98+450	80 k€ + 20 k€
	99+345 à 99+750		Reprofilage fossé gauche du 99+345 au 99+545 Reprofilage fossé droit du 99+545 au 99+750	4 k€
Déblai d'Aubin Saint Vaast	106+387 à 106+600	Inondation plateforme – coulée de boue	Reprofilage du fossé terre sur 400 ml côté gauche Création d'un fossé d'infiltration côté droit Reprofilage du fossé terre du PN 108 au Pk 107+600	72 k€
	108+647		Curage OHT	0.5 k€
Déblai de Maresquel	108+950 à 110+046	Fontis côté droit PK 109+020 (2011) et côté gauche PK 109+660 (2012)	Mise en place de caniveaux à grilles au PN 111 et création d'un fossé d'infiltration file gauche du Pk 109+600 au 109+660 Création d'un fossé terre revêtu du Pk 109+660 à 110+046	210 k€ +10 k€
Déblai de Beaurainville	111+450 à 111+578	Inondation plateforme – coulée de boue	Terrassement et mise en place FBPB couverclé du Pk 11+470 à 11+578 Mise en place d'acco drain au PN Traversée sous voie Mise en place d'un caniveau à grille file gauche avec bordures T2 canalisant les eaux avec rejet dans l'assainissement routier	300 k€ +5 k€
	112+885		Mise en place d'un avaloir sur la chaussée file gauche relié à l'assainissement routier	4 k€
Déblai de Lespinoy	114+641 à 115+100	Inondation plateforme – coulée de boue	Création d'un carrefour revêtu Mise en place FBPB du Pk 114+790 à 114+884 Création d'un OHT	250 k€
	115+592 + 115+700		Curage du fossé file gauche	1.5 k€
	117+942		Caniveau à grille file gauche	3 k€
	122+475		Caniveau à grille file gauche	3 k€
	123+563		Débouchage barbacanes du PRA	1 k€
Déblai d'Attin VS8	124+800 à 125+490	Glissement de talus côté VS	-	-
	125+494		Caniveau à grille file gauche et droite	6 k€
Déblai d'Attin	125+700 à 160+000	Inondation de plateforme – Coulée de boue	-	-
Déblai d'Attin fontis	126+664 à 127+144	Fontis côté droit PK 126+812	Fossé ou bassin de rétention en crête Drainage profond (FBPB et CD) sur 500m	510 k€ + 70 k€

			Achat foncier Création assainissement en crête de déblai Création de descentes d'eau	
Déblai de Beutin	128+000 à 128+700	Inondation OH 128+328	Création d'un bassin ou fossé de rétention Création de fossé revêtu Reprofilage du fossé Curage de la buse jusqu'à l'exutoire	346 k€ + 1 k€
	129+182		Débouchage barbacanes du PRA	1 k€
Déblai de Brexent Enocq	129+280 à 130+370	Coulée de boue – Obstruction de fossé	Réalisation de deux bassins de rétention Réalisation de FBPB Création assainissement en crête de déblai Création de descentes d'eau	735 k€ + 80 k€
Remblai d'Etaples	133+500 à 133+550	Remblai instable PK 133+521	-	-

Annexe5_c : Programme travaux de la ligne Arras – St Pol

Zone	PK	Désordre ouvrage en terre	Travaux prévus	Estimation du coût des travaux
Déblai d'Achicourt	193+280 à 194+820	Ravines importantes et glissement de talus	Curage fossé terre + tapis drainant Curage buse Curage fossé terre	24 k€
	195+650 à 195+900	Remontées boueuses	Fossé infiltration	25 k€
	196+143		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
Remblai de Dainville 1	197+500 à 198+700	Affaissements de pistes + problème de nivellement	Création fossé terre du 197+600 au 197+750	7.5 k€
	200+060		Création fossé terre	10 k€
Remblai de Maroeuil	201+660 à 202+870	Inondations de plateforme et coulées de boue	Curage fossé terre et assainissement Curage AQU 201+823	5 k€ +1 k€
	203+520		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	203+810 à 204+010	Coulées de boue	Création fossé revêtu en crête Création fossé terre en pied Descentes d'eau Bassin d'écêtement	390 k€ 50 k€
	204+250		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	205+113 à 205+911	Inondation et coulées de boue	Mise en place caniveau grille FG + buse PN 90 Création fossé rétention FD Création fossé revêtu en crête + en pied avec descente d'eau FD entre les PN 90 et 91 avec fossé de rétention à l'aval Mise en place caniveau grille FG + OH sous chaussée PN 91 Création fossé revêtu en crête + en pied avec descente d'eau FD entre les PN 91 et 92 Bassin d'écêtement	660 k€ 60 k€
	PN 93	Inondation	Mise en place d'un caniveau grille à gauche et bordures T2 FG	3 k€

	207+840 à 207+900	Remontées boueuses	Curage fossé	0.6 k€
	208+430		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	PN 94	Remontées bouseuses	Mise en place caniveau grille FG Curage des fossés du chemin Enrobée	6.2 k€
	208+918		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	PN 95	Remontées bouseuses	Création fossé + OH sous chaussée	28 k€
	210+073		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	211+057 à 211+280	Remontées bouseuses	Création fossé FD	11 k€
Déblai de Savy Berlette	212+716 à 214+579	Inondations de plateforme	Reprofilage des fossés FD et FG du Pk 213+200 à 214+105 Débroussaillage têtes aqueducs 213+198, 214+105, 214+573 Mise en place caniveau grille PN102	10 k€ + 13 k€
	215+288		Débroussaillage têtes aqueduc	0.2 k€
	PN 103		Curage fossé	0.5 k€
	PN 104		Curage CAF	0.1 k€

Annexe 6 : Détermination des tronçons à étudier/aménager

Légende:

-Tableau entier (sans couleur): Analyse issue de la phase APO intermédiaire

-Bleu: Zone de reprise de plateforme (géotech.) gardées en phase définitive

-Vert: Aménagement hydraulique gardées en phase définitive

- Orange: Zone de reprise de plateforme (géotech.) non conservées en phase définitive

- Rouge: Aménagement hydraulique supprimés en phase définitive

Zone	Tronçon initial								Elargissement pour jonction à un exutoire			
	Pk début	Pk fin	Reprise de plateforme		Type de travaux	Cause	Coté	Linéaire (m)	Pk début	Pk fin	Pk exutoire	Linéaire (m)
			Type de reprise de plateforme	Déblai ou Remblai < 1,5m								
1	73+490	73+570	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	80	73+490	73+536	73+536	46
2	73+900	74+520			Création fossé terre	Programme Travaux	G	620	73+900	74+643	74+643	743
3	74+520	74+620	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme		100				
4	74+762	74+862	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	100	74+762	74+926	74+926	164
5	74+926	74+940			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	14	74+926	75+864		938
6	74+940	75+075	15+30N	Non mais curage				135				
7	75+075	75+200						125				
8	75+200	75+850	15+30N	Non mais curage				650				
9	75+850	75+864						14				
10	76+175	76+225	15+30N	Non mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	50	76+175	76+515		340
11	76+225	76+515						290				
12	76+850	76+950	15+30N	Non				100				
13	77+836	78+350			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	514	77+836	78+412		576
14	78+350	78+412	15+30N	Oui mais curage		62						
15	78+412	78+450	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	38	78+419	78+450	78+419	31
16	78+514	78+781	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	267	78+514	78+609	78+609	95
17									78+609	78+781	78+609	172
18	78+939	79+070			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	131	78+939	79+070		131
19	80+072	80+222	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	150	80+072	80+222	80+222	150
20	80+725	80+775	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	50	80+725	80+785	80+785	60
21	81+090	81+130	15+30N	Non				40				
22	81+828	81+880			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	52	81+828	82+221		393
23	81+880	81+920	15+30N	Oui mais curage				40				
24	81+920	82+221						301				
25	82+580	82+630	15+30N	Non				50				
26	82+894	83+139	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	245	82+816	83+139	82+816	323
27	83+375	83+460			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	85	83+375	84+400		1025
28	83+460	83+530	15+30N	Non mais curage				70				
29	83+530	84+400						870				
30	84+870	86+000			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	1130	84+870	86+545		1675
31	86+000	86+204	15+30N	Non mais curage				204				

32	86+204	86+545						341				
33	86+560	86+998			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	D&G	438	86+560	86+998		438
34	86+998	87+587			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	589	86+998	87+587		589
35	87+600	87+645			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	45	87+600	87+645		45
36	87+645	87+750			Création fossé terre	Jonction entre les curages	G	105	87+645	87+750	87+750	105
37	87+750	88+230			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	480	87+750	88+230		480
38	88+738	88+925	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	187	88+738	88+884	88+884	146
39									88+884	88+965	88+965	81
40	89+308	89+390	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	82	89+308	89+390	89+390	82
41	89+390	89+506	15+30N	Oui mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	116	89+390	89+597		207
42	89+506	89+597	15+50N					91				
43	89+597	89+785	15+50N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	188	89+609	89+785	89+785	176
44	89+785	89+900	15+50N	Oui mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	115	89+785	89+975		190
45	89+900	89+975						75				
46	91+000	91+300			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	300	91+000	91+300		300
47	91+675	91+690	15+30N	Non				15				
48	91+690	91+890	15+30N	Non mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	200	91+690	92+275		585
49	91+890	92+064						174				
50	92+064	92+275	15+30N	Non mais curage				211				
51	93+550	93+700	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	150	92+900	93+150	93+150	250
52							G		93+150	93+700	93+700	550
53	93+700	93+900			oui mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	200	93+700	94+580	
54	93+900	94+580						680				
55	94+870	94+900	15+30N	Non				30				
56	95+513	95+626	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	113	95+513	95+626	95+626	113
57	95+626	96+008			Création fossé	Programme Travaux	D	382	95+626	95+695	95+695	69
58									95+695	96+008	95+695	313
59	96+008	96+170			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	162	96+008	96+170		162

60	97+254	97+745			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	491	97+254	97+745		491
61	97+780	98+460			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	680	97+780	98+460		680
62	99+340	99+545			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	205	99+340	99+545		205
63	99+545	99+750			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	D	205	99+545	99+750		205
64	101+011	101+053			Création fossé	Programme Travaux	D	42	101+011	101+053	101+049	42
65	101+300	101+400	15+50N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	100	101+323	101+400	101+400	77
66	104+105	104+293			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	188	104+105	104+293		188
67	104+293	104+440			Création fossé	Programme Travaux	G	147	104+293	104+440	104+293	147
68	105+120	105+200	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	80	104+951	105+200	104+951	249
69	106+290	106+300			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	10	106+290	106+382		92
70	106+300	106+350	15+30N	Non mais curage				50				
71	106+350	106+382						32				
72	106+390	106+600			Création fossé	Programme Travaux	D	210	106+390	106+600	106+390	210
73	106+613	106+821			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	208	106+613	106+821		208
74	107+590	107+680			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	90	107+590	107+680		90
75	108+900	109+134	15+30N	Oui			G	234	108+900	109+134	108+900	234
76	109+507	109+588			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	81	109+507	109+588		81
77	109+600	109+640	15+30N	Oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	40	109+588	109+763	109+588	175
78	109+763	109+860			Création fossé	Programme Travaux	G	97	109+763	109+860	à déterminer (création de bassin d'écretement)	97
79	109+860	110+046						186	109+860	110+046		186
80	110+700	110+800	15+30N	Non				100				
81	111+490	111+578			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	88	111+490	111+578		88
82	111+585	111+800	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	215	111+586	111+800	111+800	214

83	112+500	112+550	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	50	112+500	112+750	Fossé d'infiltration	250
84	112+650	112+750	15+30N	Non				100				
85	112+843	112+943	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	G	100	112+843	112+885	112+885	42
86									112+885	112+943	112+885	58
87	113+700	114+000	15+30N	non mais curage	Curage / reprofilage	Programme Travaux	G	300	113+700	114+028		328
88	114+000	114+028			Assainissement			28				
89	114+790	114+884			Curage / reprofilage	Programme Travaux	G	94	114+790	114+884		94
90	115+550	115+700	15+30N	oui mais curage	Curage / reprofilage	Programme Travaux	G	150	115+550	115+700		150
91	115+600	115+650	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	50	115+600	115+750	115+700	150
92	115+700	115+750	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	50				
93	116+100	116+442			Création fossé	Programme Travaux	D	342	116+100	116+442	116+442	342
94	118+050	118+166	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	116	118+050	118+166	Fossé d'infiltration	116
95	118+840	118+890	15+30N	non				50				
96	119+500	119+725			Création fossé	Programme Travaux	D	225	119+500	119+725	119+725	225
97	120+752	120+902	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	150	120+752	120+902	Fossé d'infiltration	150
98	121+100	121+300	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	200	121+100	121+120	121+120	20
99								0	121+120	121+300	121+120	180
100	121+500	122+100	15+50N	non				600				
101	123+073	123+250	15+50N	non mais quai				177				
102	123+515	123+568	15+30N	non				53				
103	124+042	124+192	15+50N	non				150				
104	125+300	125+400	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	100	125+300	125+400	Fossé d'infiltration	100
105	126+586	126+657			Curage / reprofilage	Programme Travaux		71	126+586	127+000		414
106	126+657	126+810			Assainissement + Création de fossés en crêtes de déblai			153				
107	126+810	126+930	15+30N	Oui mais curage	Curage / reprofilage		D	120				
108	126+930	127+000			Assainissement			70				
109	127+000	127+100			Création fossé	Programme Travaux		100	127+000	127+140	127+140	140
110	127+100	127+200	15+30N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	100				

111										127+140	127+200		60
112	127+567	127+633	15+50N	Oui mais curage	Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	G	66		127+567	127+633		66
113	127+633	127+683	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	50		127+636	127+645	127+645	9
114	127+645	127+683			Création fossé	Programme Travaux	D	38		127+645	127+683	127+645	38
115	128+000	128+328			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	D	328		128+000	128+600	128+328 (Bassin optionnel puis rejet à un aqueduc)	600
116	128+328				Curage buse	Programme Travaux							
117	128+328	128+600			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux		272					
118	128+600	128+715			Création fossé	Programme Travaux	D	115		128+600	128+715	128+715	115
119	129+091	129+232	15+50N	non				141					
120	129+286	129+348			Curage / reprofilage Assainissement	Programme Travaux	D	62		129+286	130+367		1081
121	129+348	130+190			Curage / reprofilage Assainissement + Création de fossés en crêtes de déblai			842					
122	130+190	130+221	15+30N	oui mais curage				31					
123	130+221	130+323			Curage / reprofilage Assainissement			102					
124	130+323	130+367						44					
125	132+400	132+600	15+30N	non			200						
126	132+800	133+000	15+30N	non			200						
127	133+200	133+406	15+30N	non			206						
128	133+516	133+550	15+50N	non			34						
129	133+550	133+800	15+50N	oui	Drainage longitudinal	Reprise plateforme	D	250		133+550	133+930		380

Annexe 7 : Travaux de drainage longitudinal en phase définitive sur la ligne Saint Pol – Etaples

Pk		Côté	Ouvrage	Q projet (m ³ /s)	Pente (%)	Vitesse (m/s)	Taux de remplissage (%)	Pk exutoire	Type exutoire
Début	Fin								
74+926	75+864	G							Curage / reprofilage assainissement existant
76+175	76+515	G							Curage / reprofilage assainissement existant
77+836	78+412	G							Curage / reprofilage assainissement existant
78+419	78+450	G	FBPB M 60-15 Buse Ø 300	0,017 0.017	0.20 0.20	0,43 0,56	17 44	78+419	Dalot MCIE
78+514	78+609	G	FBPB M 60-15 FT 3/2 50.50 R 45	0,058 0.058	0.20 0.20	0,61 0.58	42 32	78+609	AQU MCIE
78+609	78+781	G	FBPB M 60-15 FT 3/2 50.50 R 45	0,148 0.148	0.22 0.20	0.75 0.75	87 52	78+609	AQU MCIE
78+939	79+070	G							Curage / reprofilage assainissement existant
81+828	82+221	G							Curage / reprofilage assainissement existant
82+816	83+139	D	FT 3/2 50.50 R 45 Buse Ø 600	0.199 0.199	0.20 0.20	0.81 1.05	60 64	82+816	AQU MCIE
83+375	84+400	G							Curage / reprofilage assainissement existant
84+870	86+545	G							Curage / reprofilage assainissement existant
86+560	86+998	D & G							Curage / reprofilage assainissement existant
86+998	87+587	G							Curage / reprofilage assainissement existant
87+600	87+645	G							Curage / reprofilage assainissement existant
91+690	92+275	G							Curage / reprofilage assainissement existant
93+150	93+700	G	FT 3/2 50.50 R 45	0.074	0.20	0.88	28	93+700	Fossé existant
95+513	95+626	G	FBPB M 60-15 Buse Ø 300	0.021 0.021	0.20 0.20	0.46 0.59	20 48	95+626	Assainissement chaussée
95+695		D	Buse Ø 500	0.120	0.20	0.92	63	95+626	Assainissement chaussée après écrêtement
96+008	96+170	G							Curage / reprofilage assainissement existant
97+780	98+460	G							Curage / reprofilage assainissement existant
99+545	99+750	D							Curage / reprofilage assainissement existant
104+293	104+440	G	FBPB M 60-15 Buse Ø 400	0.082 0.082	0.33 0.26	0.73 0.89	49 60	104+293	Dalot MCIE
111+490	111+578	G							Curage / reprofilage assainissement existant
114+790	114+884	G							Curage / reprofilage assainissement existant
115+600	115+750	D	FBPB M 60-15 Buse Ø 400 FBPB M 60-15	0.029 0.072 0.014	0.20 0.20 0.20	0.51 0.60 0.41	25 34 15	115+700	Fossé existant
126+586	127+000	D							Curage / reprofilage assainissement existant

Pk		Côté	Ouvrage	Q projet (m ³ /s)	Pente (%)	Vitesse (m/s)	Taux de remplissage (%)	Pk exutoire	Type exutoire
Début	Fin								
127+000	127+140	D	FT 3/2 150.50 R 45	1.326	0.48	1.73	82	127+140	Réseau d'assainisse ment sous chaussée
			Buse Ø 1000	1.326	0.48	2.33	68		
127+140	127+200	D	FBPB M 60-15	0.112	0.20	0.71	70	127+140	
			Buse Ø 500	0.112	0.20	0.91	60		
127+567	127+633	G	Curage / reprofilage assainissement existant						
127+645	127+683	D	FT 3/2 50.50 R 45	0.007	0.20	0.30	10	127+645	AQU MCIE
			Buse Ø 300	0.007	0.20	0.44	28		

Annexe 8 : Travaux de gestion des OTS en phase définitive sur la ligne Saint Pol - Etapes

Pk		Côté	Ouvrage	Q100 (m ³ /s)	Pente (%)	Vitesse (m/s)	Lame d'eau (m)	Pk exutoire (Descente d'eau)
Début	Fin							
126+586	126+707	D	FT 3/2 50-50 R45	0,683	1.2	2.2	0.32	126+586
126+707	126+807	D	FT 3/2 50-50 R45	0,425	1.5	2.08	0.24	126+707
126+807	126+911	D	FT 3/2 50-50 R45	0,394	1.0	1.73	0.26	126+911
126+911	126+953	D	FT 3/2 50-50 R45	0,375	3.8	2.82	0.17	126+911
126+953	127+050	D	FT 3/2 50-50 R45	0,384	1.7	2.12	0.22	127+050
128+316	128+437	D	FT 3/2 50-50 R45	0,699	4.2	3.47	0.24	128+316
128+437	128+657	D	FT 3/2 50-50 R45	0,307	2.3	2.24	0.18	128+657
129+348	129+504	D	FT 3/2 50-50 R45	0,274	1.0	1.57	0.21	129+348
129+504	129+665	D	FT 3/2 50-50 R45	0,201	1.4	1.67	0.16	129+665
129+665	129+786	D	FT 3/2 50-50 R45	0,286	1.2	1.71	0.21	129+665
129+786	129+995	D	FT 3/2 50-50 R45	0,378	0.5	1.36	0.29	129+786
129+995	130+100	D	FT 3/2 50-50 R45	0,747	2.2	2.79	0.29	130+100
130+100	130+164	D	FT 3/2 50-50 R45	0,712	2.2	2.75	0.28	130+100

130+164	130+221	R45						
		D	FT 3/2 50-50 R45	0,073	5.2	1.92	0.06	130+221

Annexe 9 : Descentes d'eaux associées aux travaux de gestion des OTS en phase définitive sur la ligne Saint Pol - Etaples

Pk	Côté	Q10 (m ³ /s)	Qprojet (m ³ /s)	Hauteur du talus (m)	Typologie
126+586	D	0,288	0,519	<4	Toboggan
126+707	D	0,180	0,323	<4	Toboggan
126+911	D	0,328	0,591	<4	Toboggan
127+050	D	0,174	0,312	<4	Toboggan
128+657	D	0,127	0,229	<4	Toboggan
129+348	D	0,116	0,209	<4	Toboggan
129+665	D	0,222	0,400	<4	Toboggan
129+786	D	0,161	0,291	<4	Toboggan
130+100	D	0,596	1,072	<4	Escalier
130+221	D	0,035	0,063	<4	Grand débit tuile

Annexe 10 : Bassins versants de la zone d'étude (voir fichier joint)

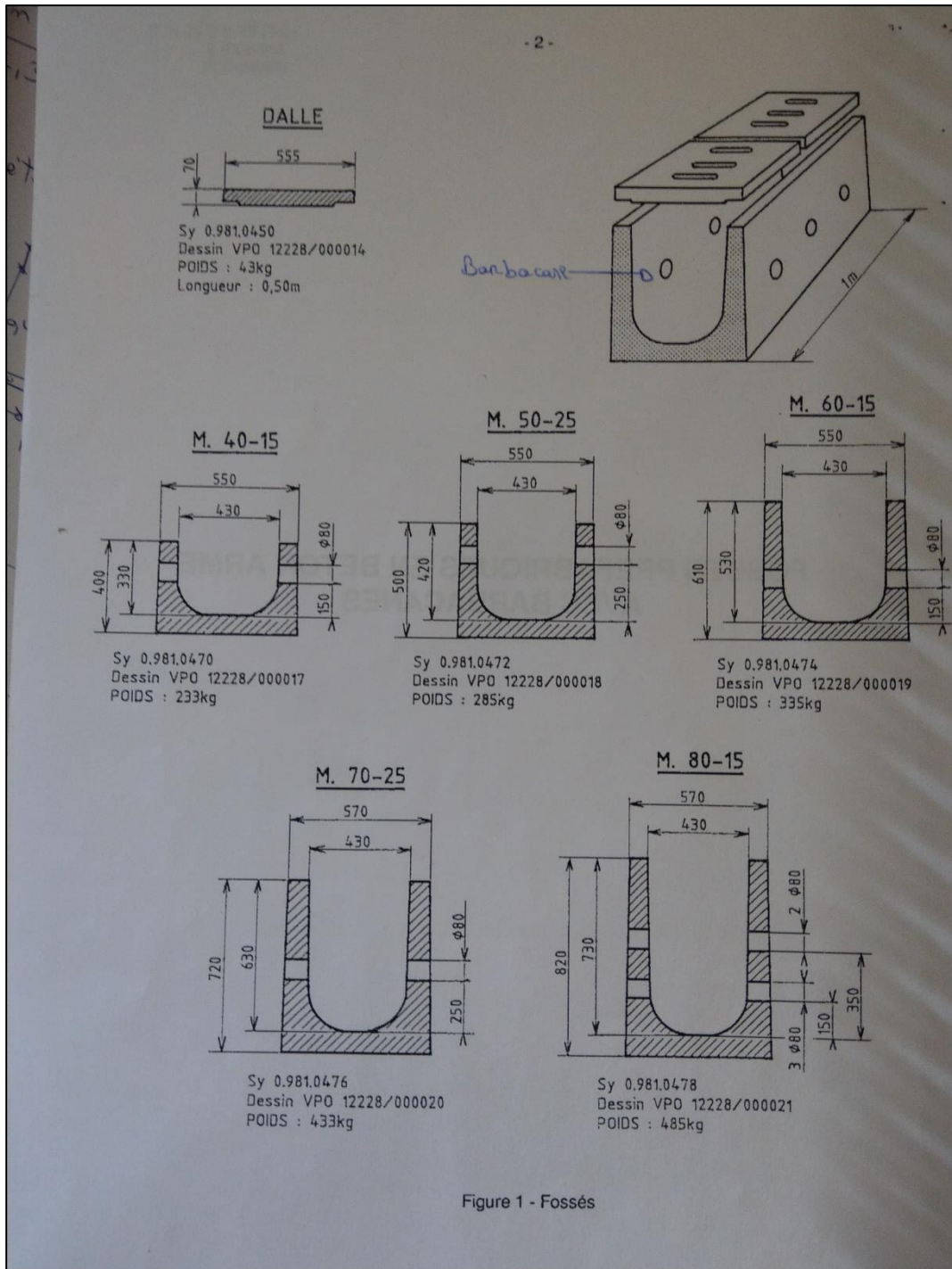
Annexe 11 : Localisation de la station météorologique de référence pour la ligne Saint Pol - Etaples



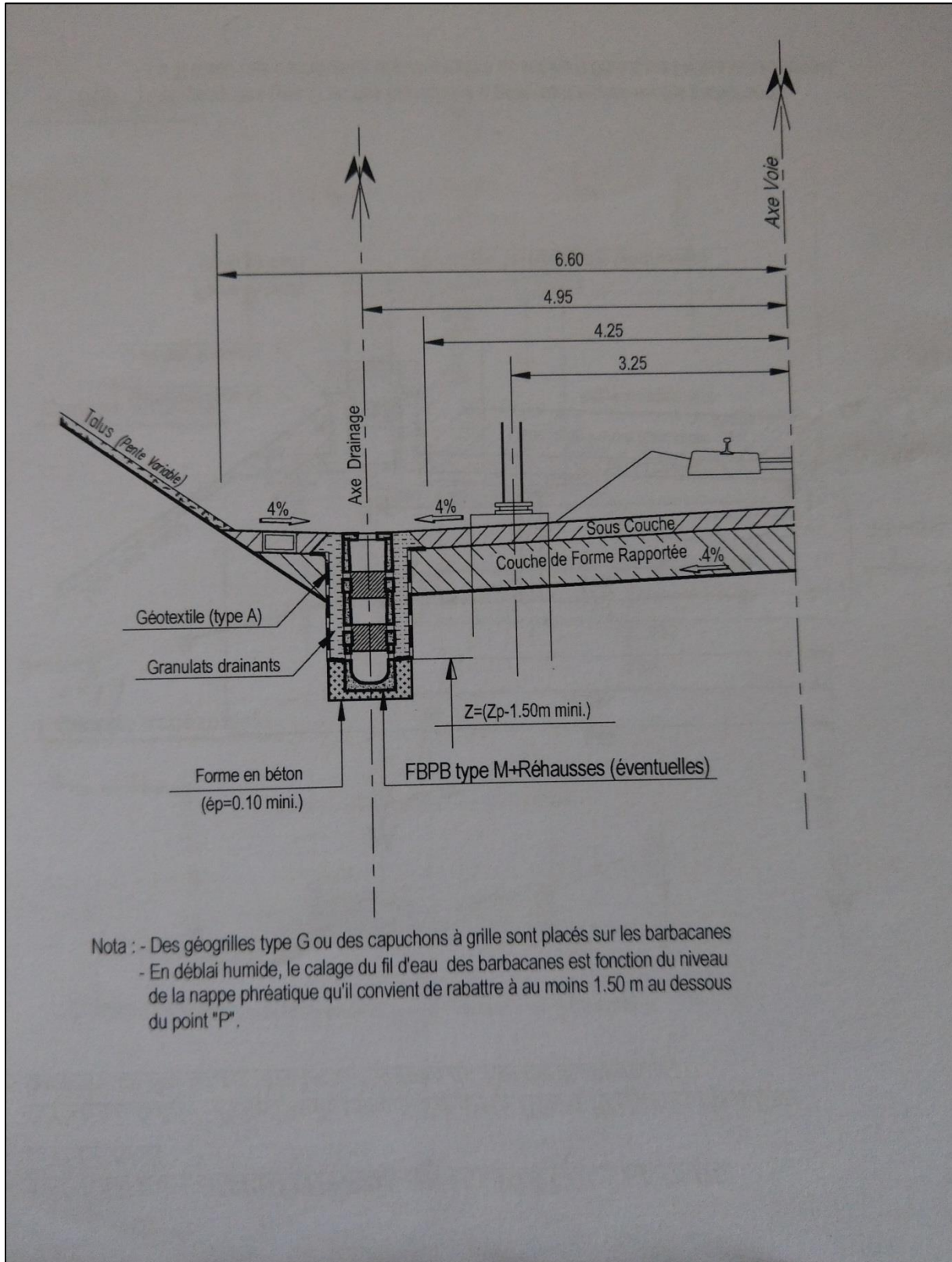
**Annexe 12 : Coefficients de Montana utilisée pour la ligne St Pol–Etaples
(avec $I \text{ (mm/h)} = a \cdot t^{-b}$ avec t en minutes)**

Station		Le Touquet (1951 – 2014)					
		6 à 30 minutes		30 minutes à 6 heures		6 à 24 heures	
Durée de pluie		a	b	a	b	a	b
Période de retour	Coefficient de Montana						
	5 ans	179	0.508	392	0.736	270	0.672
	10 ans	197	0.492	460	0.735	339	0.688
	100 ans	223	0.422	565	0.685	877	0.778

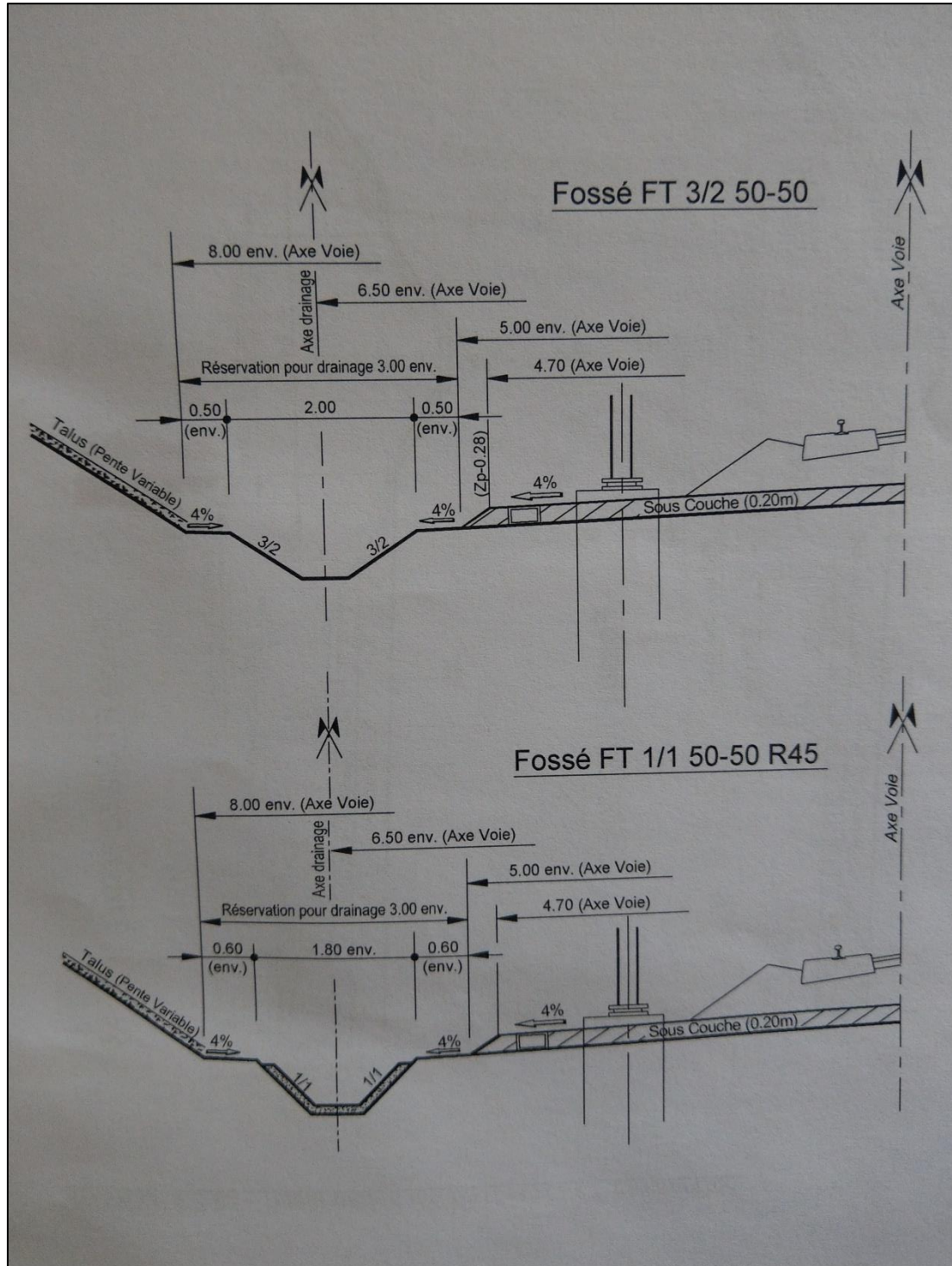
Annexe 13_a: Catalogue des différents Fossés Préfabriqués à Barbacanes utilisables – source SNCF



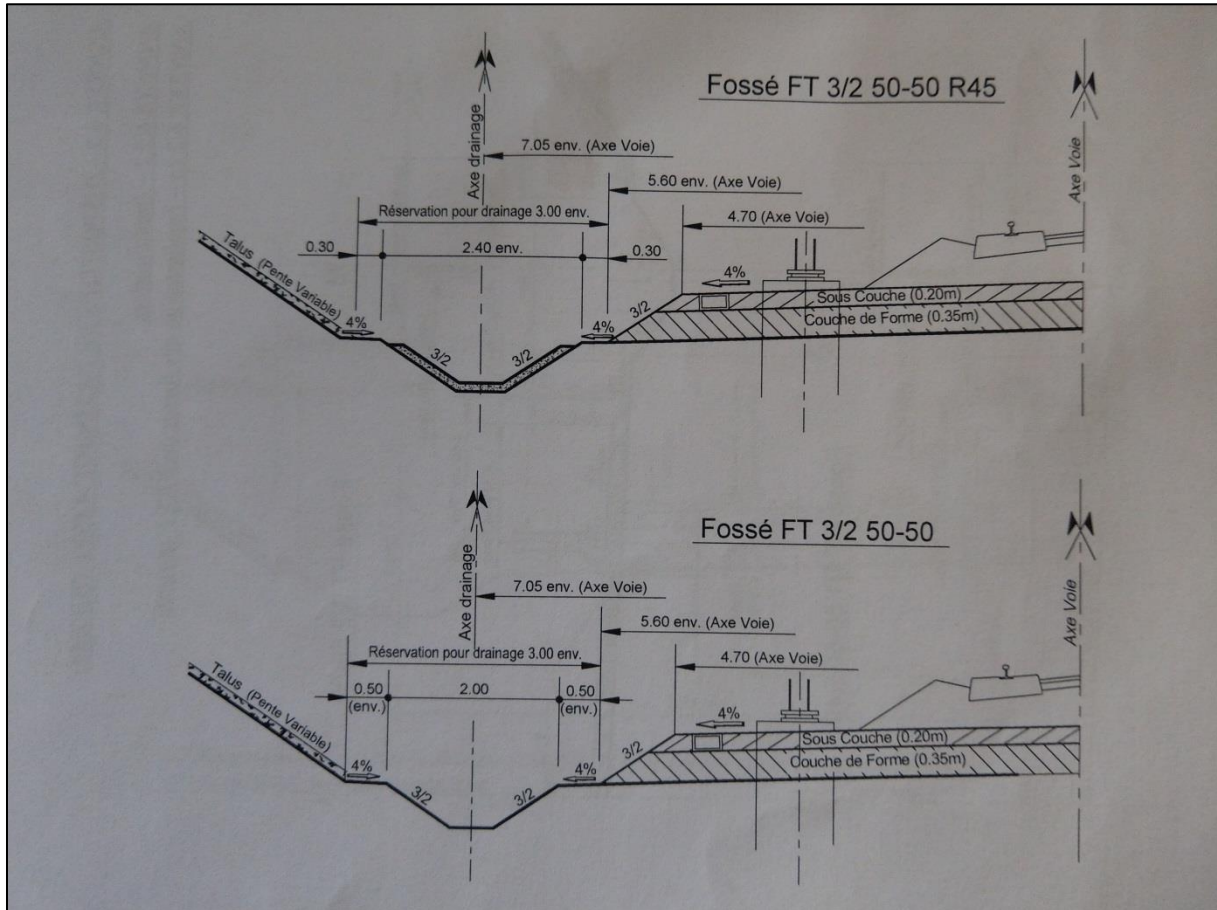
Annexe 13_b: Principe de pose des Fossés Préfabriqués à Barbacanes en pied de déblai (structure avec couche de Forme Rapportée) – Source SNCF



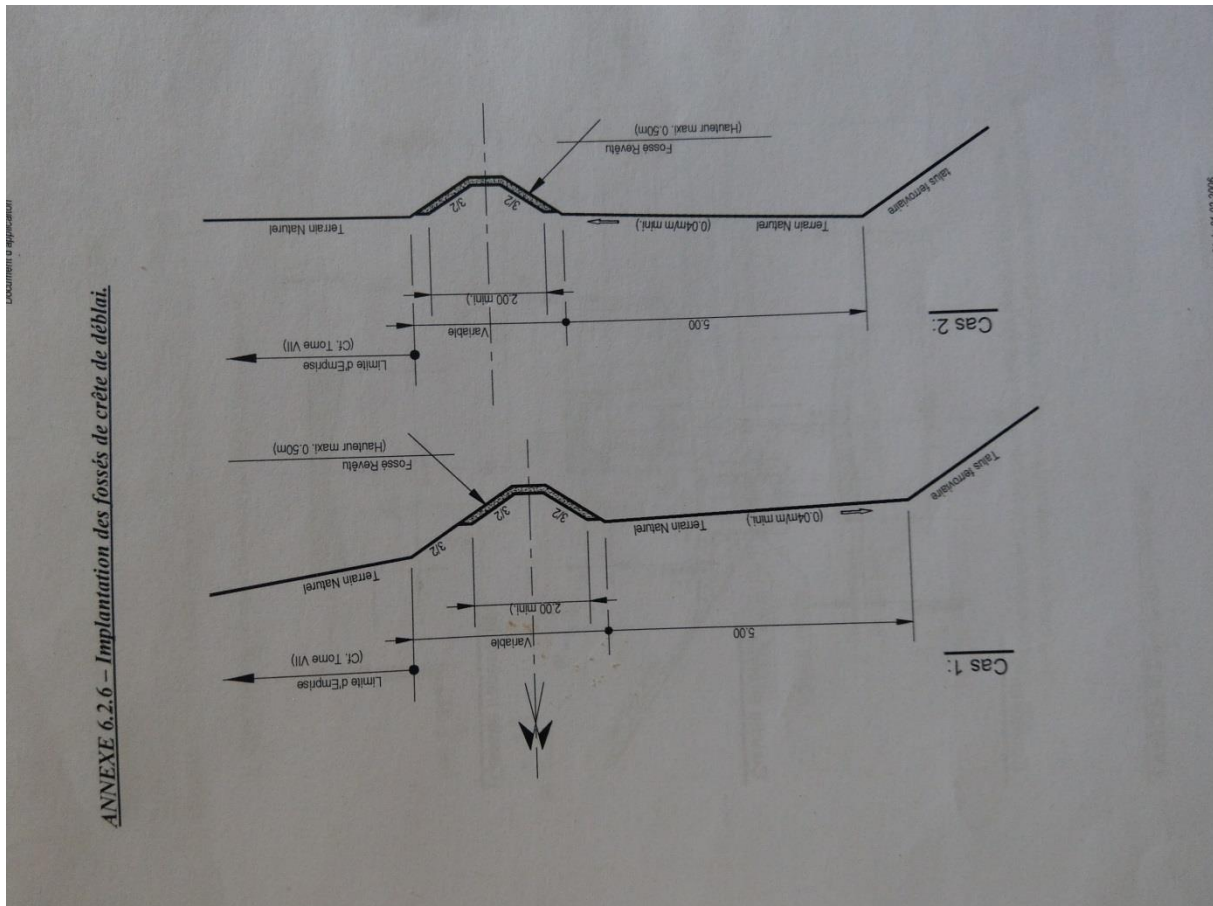
Annexe 14_a: Implantation des Fossés en Terre et Terre revêtue en pied de déblai (structure avec couche de forme normale) – Source SNCF



**Annexe 14_b: Implantation des Fossés en Terre et Terre revêtue en pied de
déblai (structure avec couche de forme rapportée) – Source SNCF**



Annexe 14_c: Implantation des Fossés en Terre et Terre revêtu en crête de déblai – Source SNCF



Annexe 15: Représentation graphique des aménagements sur le tronçon étudié (voir fichiers joints)

Annexe 16: Tableau d'estimation financière des aménagements en crête de déblai de l'APO définitif de la ligne Saint Pol - Etaples

<p>Libellé du projet : Régénération de l'Etoile Ferroviaire de Saint Pol</p> <p>Phase en cours : APO</p> <p>Périmètre du projet (financeur) : SNCF Réseau</p> <p>Spécialité (rubrique métier) : Rubrique 2.1 : Assainissements</p> <p>Nature de dépense : B1 - Travaux réalisés par Entreprises</p> <p>Nom du Détail Estimatif : OT_Hydraulique</p> <p>Arborescence : 308000_Saint Pol Etaples \OT</p>	<p>Lieu/Ligne :</p> <p>Conditions Economiques : 01/01/2017</p> <p>Index d'actualisation : TP01</p> <p>Statut du DE : En cours</p>	<p>Accès</p> <p>Particularités</p> <p>Voies</p> <p>Train Travaux</p> <p>Durée Intervention</p>
<p>Signature du dossier 19b3e02e-3787-41f7-88b7-92cf96984d9c</p>	<p>Signature du DE F28CD8ED-91B1-9A44-91D0-311CCD1B4230</p>	

N° d'article	Référentiel de prix	Désignation des travaux / libellé	Unité d'œuvre	Quantité	Prix unitaire (€)	Prix total (€) hors TVA	Période de travail (en PRO/REA)	Code Arc en ciel
Chapitre								
		<i>Fossés trapézoïdaux revêtus avec aménagements intégrés</i>						
20C 31 080 00	IN 2532	Fossés trapézoïdaux revêtus avec aménagements intégrés : FTR Plafond 50 cm – Profondeur 0 à 60 cm	ml	1720	120,00 €	227 040 €		
		<i>Descentes d'eau</i>						

		Descentes d'eau préfabriquées Type DE01 ou DE02						
20C 31 241 00	IN 2532	Descente d'eau grand débit type DE02	ml	15	190,00 €	3 135 €		
		Descentes d'eau coulée en place DE 03 et DE 03 GC						
20C 31 253 00	IN 2532	Largeur 2,00 et 0,40<HB=0,60m	ml	65	3 000,00 €	214 500 €		
		Descentes d'eau coulée en place DE 04 GC						
20C 31 262 00	IN 2532	Largeur 2,50 et 1,20<HB=1,80m	ml	15	5 000,00 €	82 500 €		
		Raccordements Amont descente d'eau						
20C 31 271 00	IN 2532	Raccordement amont de type RA02	u	1	2 000,00 €	2 200 €		
20C 31 273 00	IN 2532	Raccordement Amont DE 03	u	8	2 000,00 €	17 600 €		
20C 31 274 00	IN 2532	Raccordement Amont DE 04	u	1	2 000,00 €	2 200 €		
		Raccordements Aval descente d'eau						
20C 31 281 00	IN 2532	Raccordement amont de type RA05	u	1	2 000,00 €	2 200 €		
20C 31 284 00	IN 2532	Raccordement Aval DE 03	u	8	2 000,00 €	17 600 €		
20C 31 285 00	IN 2532	Raccordement Aval DE 04	u	1	2 000,00 €	2 200 €		
		Aménagements sur bassins existants						
		Bassin 126+680						
PB21-1000	Projets similaires	Surverse enrochée bassin	u	1	1 000,00 €	1 100 €		
		Bassin 97+750						
PB21-1100	Projets similaires	Curage bassin	m2	350	4,50 €	1 733 €		
PB21-1101	Projets similaires	Fourniture et mise en œuvre de géomembrane	m3	350	30,00 €	11 550 €		
PB21-1102	Projets similaires	Fourniture et mise en œuvre de géotextile	m2	350	5,50 €	2 118 €		
PB21-1103	Projets similaires	Fourniture et mise en œuvre nappe d'accrochage de terre végétale	m2	350	13,10 €	5 044 €		
PB21-1104	Projets similaires	Fourniture et mise en œuvre de terre végétale	m3	52,5	32,40 €	1 871 €		

Mission de maîtrise d'œuvre pour la conception de dispositifs
d'assainissement et de drainage d'infrastructures ferroviaires

PB21-1105	Projets similaires	Dispositif d'entrée de bassins type OUV.BAS	u	1	7 000,00 €	7 700 €		
PB21-1106	Projets similaires	Dispositif de sortie de bassins type OUV.BAS	u	1	9 500,00 €	10 450 €		
PB21-1107	Projets similaires	Clôture	ml	90	100,00 €	9 900 €		
PB21-1108	Projets similaires	Portail	u	1	6 000,00 €	6 600 €		
Montant total travaux						629 240 €		
Somme à Valoir (SAV)					10%			

Annexe 17 : Inventaire des données sur le projet de Brétigny

Données	Présence	Observations / Conséquences
Tracé des voies	Oui	Format dwg
Modélisation 3D de la plateforme	Oui	Format dwg
Plan de nivellement	Oui	Format dwg
Levé topographique des talus autour de la voie	Oui	Format dwg
Topographie SIG	Oui	Non nécessaire
Profil en long de la voie	Intégré à la modélisation 3D	
Carte topographiques IGN	Oui	Non nécessaire
Liste des ouvrages de traversée sous voie (exutoires potentiels)	Oui	
Cadastre	Oui	
Profil en long de la plateforme	Intégré à la modélisation 3D	
Données de perméabilité du sol	Non	Non nécessaire
Levé topographique / Plan des ouvrages hydrauliques de traversé	oui	Assainissement routier
Zones de reprise de plateforme	Oui	Création sur ce projet / Intégré à la modélisation 3D
REX du mainteneur vis-à-vis des zones problématiques	Non nécessaire	
Implantation et synoptique du drainage existant	Non nécessaire	
Niveau des plus hautes eaux des nappes	Oui	
Plans des réseaux enterrés	Oui	Assainissement routier
Coupes fonctionnelles générales de la voie	Oui	
Levé des passages à niveau	Absence de passage à niveau	

**Annexe 18_a_ Vue en plan des aménagements du projet hydraulique de
Brétigny _ Planche 1 (voir fichiers joints)**

**Annexe 18_b_ Vue en plan des aménagements du projet hydraulique de
Brétigny _ Planche 2 (voir fichiers joints)**

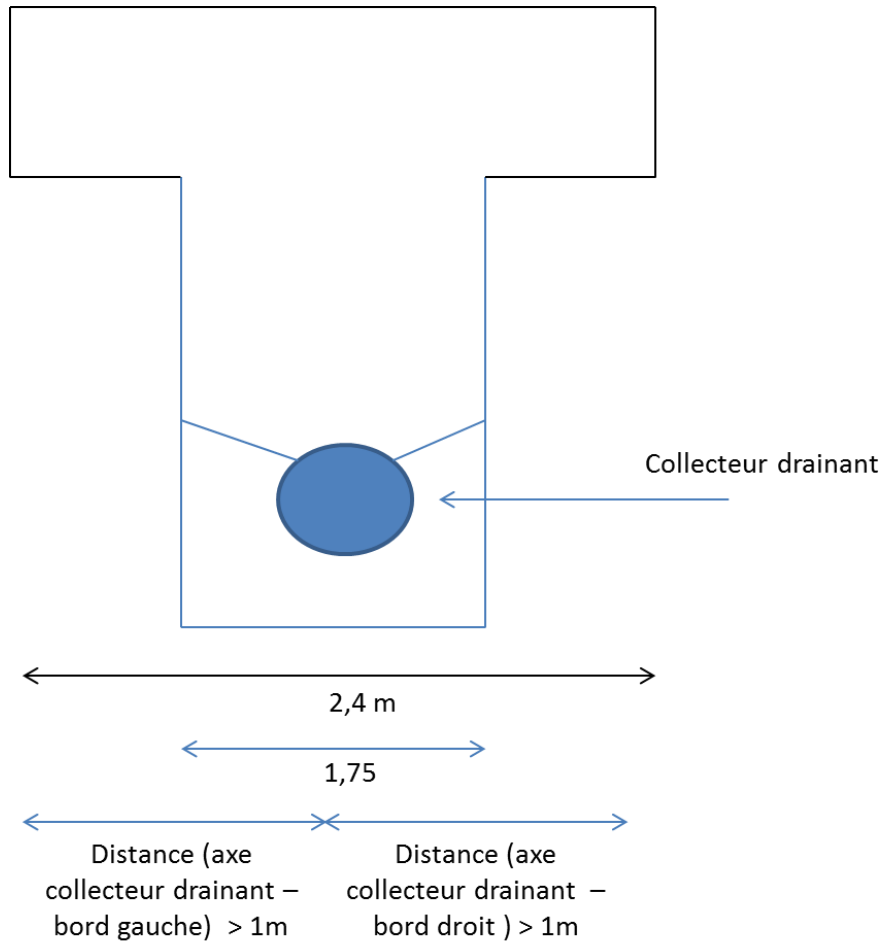
**Annexe 18_c_ Vue en plan des aménagements du projet hydraulique de
Brétigny _ Planche 3 (voir fichiers joints)**

**Annexe 18_d_ Vue en plan des aménagements du projet hydraulique de
Brétigny _ Planche 4 (voir fichiers joints)**

**Annexe 18_e_ Vue en plan des aménagements du projet hydraulique de
Brétigny _ Planche 4 avec quais (voir fichiers joints)**

**Annexe 19 : Implantation en plan du drainage dans la zone Banane (voir
fichiers joints)**

Annexe 20 : Schématisation d'une coupe de quais avec collecteur drainant intégré



Annexe 21 : Bassins versants de la zone Banane (voir fichiers joints)

Annexe 22 : Aperçu de l'outil Calcul-O – Application au calcul du collecteur drainant Quai 1&2

Caractéristiques de la plateforme													Caractéristiques du drainage longitudinale					
Pk	Zp	Dévers		Pk amont	Z amont	Pk aval	Z aval	Longueu r (m)	Pente longitudinale	Largeur de l/2 plateforme	Type de structure	Profil terrasseme nt (ou période de retour)	Ouvrage singulier	Type d'ouvrage	Strickler	Largeur (m)	Ci/0 associé	Ci projet associé
+0	2,075		En toit	+0	2,075244	+10	2,004244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+10	2,004		En toit	+10	2,004244	+20	1,933244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+20	1,933		En toit	+20	1,933244	+30	1,862244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+30	1,862		En toit	+30	1,862244	+40	1,791244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+40	1,791		En toit	+40	1,791244	+40	1,791206	0,0054	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+40	1,791		En toit	+40	1,791206	+50	1,720244	9,9946	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+50	1,72		En toit	+50	1,720244	+60	1,649244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+60	1,649		En toit	+60	1,649244	+70	1,578244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+70	1,578		En toit	+70	1,578244	+78	1,524114	7,624	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+78	1,524		En toit	+78	1,524114	+80	1,507244	2,376	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+80	1,507		En toit	+80	1,507244	+90	1,436244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+90	1,436		En toit	+90	1,436244	+100	1,365244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+100	1,365		En toit	+100	1,365244	+110	1,294244	10	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5
+110	1,294		En toit	+110	1,294244	+116	1,251066	6,0814	0,71%	4	Granulaire	10 ans	Non	CD.300	100	2	0,5	0,5

Pk	Résultats								Plateforme ferroviaire					
	Hydrologie			Qprojet		Résultats			Plateforme ferroviaire					
	Surface impluvium (m ²)	Cr retenue	temps de concentration (min)	Période de retour (ans)	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	% remplissage	Surface (m ²)	Cr10	Cr projet retenu	vitesse d'écoulement (m/s)	tc10	tprojet
+0	163,51368	0,84	6	10 ans	0,004	0,742921	0,042067702	14%	60	0,73	0,73	0,742921016	0,22	0,22
+10	327,02736	0,84	6	10 ans	0,008	0,886461	0,056208227	19%	60	0,73	0,73	0,886460656	0,19	0,19
+20	490,54104	0,84	6	10 ans	0,011	0,986503	0,06733309	22%	60	0,73	0,73	0,986502705	0,17	0,17
+30	654,05472	0,84	6	10 ans	0,015	1,067335	0,077184453	26%	60	0,73	0,73	1,067335185	0,16	0,16
+40	757,6008	0,85	6	10 ans	0,018	1,100331	0,081451403	27%	0,0324	0,73	0,73	1,10033097	0,00	0,00
+40	931,055975	0,85	6	10 ans	0,022	1,176306	0,0918808	31%	59,9676	0,73	0,73	1,176305762	0,14	0,14
+50	1104,54355	0,85	6	10 ans	0,026	1,238481	0,101120889	34%	60	0,73	0,73	1,238481044	0,13	0,13
+60	1278,031125	0,85	6	10 ans	0,030	1,294022	0,11	37%	60	0,73	0,73	1,294022426	0,13	0,13
+70	1437,2627	0,85	6	10 ans	0,034	1,333017	0,116640637	39%	45,744	0,73	0,73	1,333016511	0,10	0,10
+78	1545,01672	0,86	6	10 ans	0,037	1,35963	0,12139163	40%	14,256	0,73	0,73	1,359630288	0,03	0,03
+80	1698,51474	0,86	6	10 ans	0,040	1,392631	0,127559729	43%	60	0,73	0,73	1,39263109	0,12	0,12
+90	1852,01276	0,85	6	10 ans	0,044	1,423003	0,133541713	45%	60	0,73	0,73	1,423003342	0,12	0,12
+100	2005,51078	0,85	6	10 ans	0,047	1,451357	0,139428199	46%	60	0,73	0,73	1,451356905	0,11	0,11
+110	2135,4972	0,85	6	10 ans	0,050	1,474689	0,144522468	48%	36,4884	0,73	0,73	1,474688718	0,07	0,07

P _k	Caractéristiques										
	Talus			Modèle ou E _V laminaire			E _V F hors E _V N ponctuel				
	Surface (m ²)	C _{r10}	C _{r projet retenu}	Surface (m ²)	C _{r10}	C _{r projet}	Surface (m ²)	C _{r10}	C _{r projet retenu}	t _{c10}	t _{c projet}
+0	0		0,00	103,51368	0,90568664	0,91	163,51368	0,84	0,84	0,22	0,22
+10	0		0,00	103,51368	0,90568664	0,91	327,02736	0,84	0,84	0,41	0,41
+20	0		0,00	103,51368	0,90568664	0,91	490,54104	0,84	0,84	0,58	0,58
+30	0		0,00	103,51368	0,90568664	0,91	654,05472	0,84	0,84	0,74	0,74
+40	0		0,00	103,51368	0,90568664	0,91	757,6008	0,85	0,85	0,74	0,74
+40	0		0,00	113,487575	0,918567352	0,92	931,055975	0,85	0,85	0,88	0,88
+50	0		0,00	113,487575	0,918567352	0,92	1104,54355	0,85	0,85	1,01	1,01
+60	0		0,00	113,487575	0,918567352	0,92	1278,031125	0,85	0,85	1,14	1,14
+70	0		0,00	113,487575	0,918567352	0,92	1437,2627	0,85	0,85	1,24	1,24
+78	0		0,00	93,49802	0,916836282	0,92	1545,01672	0,86	0,86	1,27	1,27
+80	0		0,00	93,49802	0,916836282	0,92	1698,51474	0,86	0,86	1,39	1,39
+90	0		0,00	93,49802	0,916836282	0,92	1852,01276	0,85	0,85	1,50	1,50
+100	0		0,00	93,49802	0,916836282	0,92	2005,51078	0,85	0,85	1,62	1,62
+110	0		0,00	93,49802	0,916836282	0,92	2135,4972	0,85	0,85	1,69	1,69

Mission de maîtrise d'œuvre pour la conception de dispositifs
d'assainissement et de drainage d'infrastructures ferroviaires

Fk	EY global										
	Stat (m ²)	Cr10	Cr projet retenu	tc cumulé10 brut (min)	tc cumulé projet brut (min)	tc cumulé10 (min)	tc cumulé projet (min)	Q10 (hors EY/N)	Qprojet (hors EY/N)	tc retenu10 (min)	tc retenu projet (min)
+0	163,51368	0,84	0,84	3,22	3,22	6,00	6,00	0,00	0,00	6,00	6,00
+10	327,02736	0,84	0,84	3,41	3,41	6,00	6,00	0,01	0,01	6,00	6,00
+20	490,54104	0,84	0,84	3,58	3,58	6,00	6,00	0,01	0,01	6,00	6,00
+30	654,05472	0,84	0,84	3,74	3,74	6,00	6,00	0,02	0,02	6,00	6,00
+40	757,6008	0,85	0,85	3,74	3,74	6,00	6,00	0,02	0,02	6,00	6,00
+40	931,055975	0,85	0,85	3,88	3,88	6,00	6,00	0,02	0,02	6,00	6,00
+50	1104,54355	0,85	0,85	4,01	4,01	6,00	6,00	0,03	0,03	6,00	6,00
+60	1278,031125	0,85	0,85	4,14	4,14	6,00	6,00	0,03	0,03	6,00	6,00
+70	1437,2627	0,85	0,85	4,24	4,24	6,00	6,00	0,03	0,03	6,00	6,00
+78	1545,01672	0,86	0,86	4,27	4,27	6,00	6,00	0,04	0,04	6,00	6,00
+80	1698,51474	0,86	0,86	4,39	4,39	6,00	6,00	0,04	0,04	6,00	6,00
+90	1852,01276	0,85	0,85	4,50	4,50	6,00	6,00	0,04	0,04	6,00	6,00
+100	2005,51078	0,85	0,85	4,62	4,62	6,00	6,00	0,05	0,05	6,00	6,00
+110	2135,4972	0,85	0,85	4,69	4,69	6,00	6,00	0,05	0,05	6,00	6,00

Pk	Calculs et outils de contrôle										PT	Période de retour	Vitesse d'écoulement théorique	Nombre de lignes	
	Contrôle		H _{max} (m)	Réseau parallèle	Q'	t _p	Montana retenu		redc	Froude				Surface E _{VN}	Coefficient de Montana à retenir
	Q _{spécifique} (l/s/ha)	Q _{calculé} (m ³ /s)					a	b							
+0	233	0,004	0,3	1	0,004	6,00	229,38	0,466		1,156468339	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+10	233	0,008	0,3	1	0,008	6,00	229,38	0,466		1,193781974	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+20	233	0,012	0,3	1	0,011	6,00	229,38	0,466		1,213806625	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+30	233	0,015	0,3	1	0,015	6,00	229,38	0,466		1,22659561	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+40	235	0,017	0,3	1	0,018	6,00	229,38	0,466		1,230947547	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+40	235	0,022	0,3	1	0,022	6,00	229,38	0,466		1,239005794	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+50	236	0,026	0,3	1	0,026	6,00	229,38	0,466		1,243467448	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+60	236	0,030	0,3	1	0,030	6,00	229,38	0,466		1,245692807	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+70	236	0,034	0,3	1	0,034	6,00	229,38	0,466		1,246166536	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+78	237	0,036	0,3	1	0,037	6,00	229,38	0,466		1,245925161	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+80	237	0,040	0,3	1	0,040	6,00	229,38	0,466		1,244929588	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+90	236	0,043	0,3	1	0,044	6,00	229,38	0,466		1,243262817	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+100	236	0,047	0,3	1	0,047	6,00	229,38	0,466		1,24097894	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1
+110	236	0,050	0,3	1	0,050	6,00	229,38	0,466		1,238506154	inférieur à 10 ans	2	8,426149773	0	1

Annexe 23_a : Tableaux récapitulatifs du dimensionnement de la zone Banane Quai 2

Par rapport au début du tronçon		Pente	Type d'ouvrage	Période de dimensionnement	Débit de projet (m3/s)	Résultats			Injection de débit (m3/s)	
Début (m)	Fin (m)					Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	Taux de remplissage (%)	m3/s	Provenance
0	40,0	0,71%	CD.300	10 ans	0,018	1,100	0,081	27,15%	0	-
40,0	77,6	0,71%	CD.300	10 ans	0,034	1,333	0,117	38,88%	0	-
77,6	116,1	0,71%	CD.300	10 ans	0,050	1,475	0,145	48,17%	0	-
116,1	152,8	0,71%	CD.300	10 ans	0,066	1,582	0,172	57,32%	0	-
152,8	190,8	0,71%	CD.300	10 ans	0,083	1,658	0,200	66,63%	0	-
190,8	234,0	0,71%	CD.400	10 ans	0,103	1,770	0,189	47,18%	0	-
234,0	283,1	0,71%	CD.400	10 ans	0,122	1,834	0,205	51,22%	0	-
283,1	292,3	0,71%	Buse .500	1,8*10 ans	0,219	1,799	0,296	59,18%	0	-

Annexe 23_b : Tableaux récapitulatifs du dimensionnement de la zone Banane Quai 4

Par rapport au début du tronçon		Pente	Type d'ouvrage	Période de dimensionnement	Débit de projet (m3/s)	Résultats			Injection de débit (m3/s)	
Début (m)	Fin (m)					Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	Taux de remplissage (%)	m3/s	Provenance
0	34,5	0,82%	CD.300	10 ans	0,006	0,885	0,050	16,57%		
34,5	65,2	0,82%	CD.300	10 ans	0,012	1,051	0,066	22,10%		
65,2	99,6	0,82%	CD.300	10 ans	0,020	1,195	0,083	27,68%		
99,6	137,6	0,82%	CD.300	10 ans	0,032	1,368	0,107	35,51%		
137,6	175,2	0,82%	CD.300	10 ans	0,039	1,456	0,121	40,18%		

175,2	209,7	0,82%	CD.300	10 ans	0,045	1,511	0,130	43,36%		
209,7	278,4	0,82%	CD.300	10 ans	0,056	1,594	0,146	48,83%		
278,4	323,9	0,82%	CD.400	10 ans	0,192	2,159	0,266	66,57%	0,122	Q10 du quai 1+2
323,9486	329,1663	0,82%	Buse .500	1,8*10 ans	0,248	1,956	0,307	61,30%		

Annexe 23_c et d : Tableaux récapitulatifs du dimensionnement de la zone Banane Quai 5 et FBPB2

Par rapport au début du tronçon		Pente	Type d'ouvrage	Période de dimensionnement	Débit de projet (m3/s)	Résultats			Injection de débit (m3/s)	
Début (m)	Fin (m)					Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	Taux de remplissage (%)	m3/s	Provenance
0	30,5	0,82%	CD.300	10 ans	0,011	1,035	0,065	21,55%		
30,5	59,4	0,82%	CD.300	10 ans	0,022	1,244	0,089	29,74%		
59,4	98,6	0,82%	CD.300	10 ans	0,037	1,443	0,118	39,46%		
98,6	149,8	0,82%	CD.300	10 ans	0,053	1,579	0,143	47,76%		
149,8	194,9	0,82%	CD.300	10 ans	0,069	1,684	0,168	55,90%		
194,9	210,6	0,82%	CD.500	10 ans	0,269	2,371	0,280	56,10%	0,192	Q10 du quai 1+2+3+4
210,6	220,7	0,87%	Buse .500	1,8*10 ans	0,330	2,111	0,372	74,35%		

Par rapport au début du tronçon		Pente	Type d'ouvrage	Période de dimensionnement	Débit de projet (m3/s)	Résultats			Injection de débit (m3/s)	
Début (m)	Fin (m)					Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	Taux de remplissage (%)	m3/s	Provenance
0	42,1	0,20%	FBPB M.80-15	10 ans	0,017	0,434	0,097	13,79%	-	-

Annexe 23_e : Tableaux récapitulatifs du dimensionnement de la zone Banane FBPB1

Par rapport au début du tronçon		Pente	Type d'ouvrage	Période de dimensionnement	Débit de projet (m ³ /s)	Résultats			Injection de débit (m ³ /s)	
Début (m)	Fin (m)					Vitesse (m/s)	Hauteur d'eau (m)	Taux de remplissage (%)	m ³ /s	Provenance
0	87,7	0,20%	FBPB M.40-15	10 ans	0,027	0,498	0,133	44,33%	-	-
87,7	136,3	0,20%	FBPB M.50-25	10 ans	0,039	0,549	0,172	42,96%	-	-
136,3	188,4	0,20%	FBPB M.50-25	10 ans	0,055	0,601	0,225	56,25%	-	-
188,4	253,0	0,20%	FBPB M.60-15	10 ans	0,097	0,681	0,355	71,04%	-	-
253,0	316,7	0,20%	FBPB M.60-15	10 ans	0,129	0,717	0,447	89,45%	-	-
316,7	346,3	0,20%	FBPB M.70-25	10 ans	0,144	0,731	0,490	81,72%	-	-
346,3	384,7	0,20%	FBPB M.80-15	10 ans	0,168	0,749	0,560	79,98%	-	-
384,7	437,5	0,20%	Buse .800	1,8 x 10 ans	0,296	1,211	0,391	48,85%	-	-
437,5	439,5	0,40%	Buse .800	1,8 x 10 ans	0,582	1,854	0,479	59,87%	-	-

Annexe 24 : Résultats graphiques du calage altimétrique des 3 lignes de collecteur drainant (voir fichiers joint en annexe)

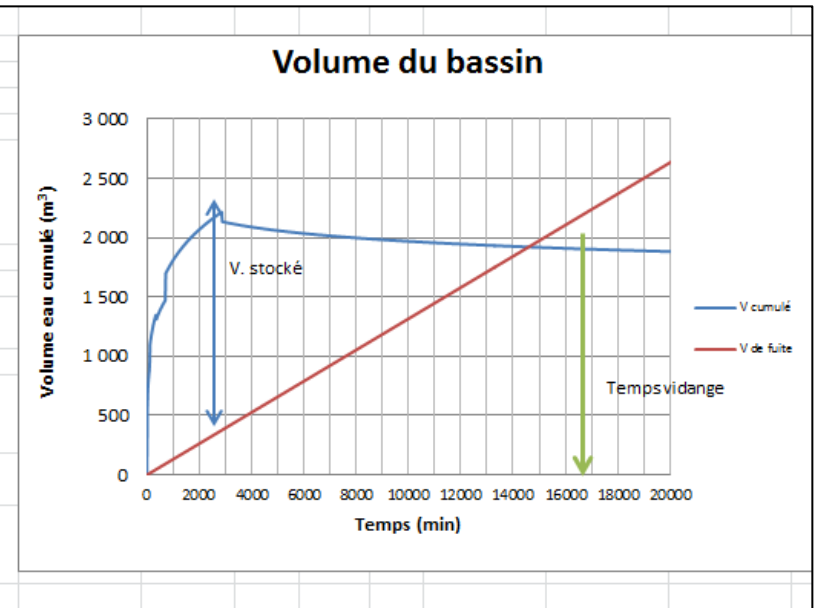
Annexe 25 : Résultats graphiques du calage altimétrique du FBPB 1 (voir fichiers joint en annexe)

Annexe 26 : Coefficient de Montana à Brétigny

COEFFICIENTS DE MONTANA													
Temps d'averse	Station météo	5 ans		10 ans		20 ans		30 ans		50 ans		100ans	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
6 min < t ≤ 30 min	Brétigny	202.80	0.483	229.38	0.466	254.70	0.448	271.26	0.441	290.64	0.430	312.36	0.410
30 min < t ≤ 180min	Brétigny	516.48	0.768	625.02	0.773	739.92	0.776	805.98	0.776	888.60	0.774	1014.66	0.774
180 min < t ≤ 6 h	Orly	645.12	0.785	799.26	0.793	968.16	0.800	1064.46	0.801	1197.24	0.804	1383.12	0.806
6h < t ≤ 12h	Orly	582.24	0.775	750.36	0.790	943.08	0.803	1075.86	0.811	1260.66	0.820	1535.66	0.830
12h < t ≤ 48h	Brétigny	452.10	0.75	628.74	0.771	848.82	0.788	998.46	0.795	1207.32	0.802	1517.04	0.807
48h < t ≤ 192h	Brétigny	167.76	0.627	355.56	0.701	873.84	0.794	1587.3	0.856	3524.76	0.940	11396.7	1.065

Annexe 27 : Aperçu de la fiche de calcul de dimensionnement du volume du bassin

METHODE DES PLUIES						
Projet Bassin	Banane	Hypothèse 1 l/s/ha	* Selon l'instruction technique, ajouter 20 % au volume calculé			
Coefficient de Montana (Paris-Montsouris)	Période de retour 100 ans		Coefficient de sécurité	1	dt: pas de temps en min	20
a	312,36	1014,66	1383,12	1535,66	1517,04	11396,70
b	-0,41	-0,774	-0,806	-0,83	-0,807	-1,065
t	6 < t < 30 min	30 min ≤ t < 2h	2h ≤ t < 6h	6h ≤ t < 12 h	12h ≤ t < 48 h	48h ≤ t < 192h
Surface active en m ²	18 858		Débit de fuite en m ³ /s	0,0022	Volume utile calculé du bassin (m ³)	1 839
					Volume retenu (m ³) *	2 207
					Temps de vidange (heures)	243
			l/s	2,19372202		



Annexe 28 et 29 : Vue en plan et de profils du bassin Banane (voir fichiers joints en annexe)

Annexe 30 : Résultats du dimensionnement du Bassin Banane

	Volume utile (m ³)	Longueur équipement (m)	Surface Pompage (m ²)	Volume confinement (m ³)	Surface dessableur (m ²)
Dimensions imposées	2 207	-	6,25	14,9	15
Dimensions retenues	2241	6	15	39,6	15

Annexe 31 : Comparatif des données d'entrée

Données	Présence (St Pol)	Présence (Brétigny)
Tracé des voies	Oui	Oui
Modélisation 3D de la plateforme	Non	Oui
Plan de nivellement	Non	Oui
Levé topographique des talus autour de la voie	Oui	Oui
Topographie SIG	Oui	Oui
Profil en long de la voie	Oui	Intégré à la modélisation 3D
Carte topographiques IGN	Oui	Oui
Liste des ouvrages de traversée sous voie (exutoires potentiels)	Oui	Oui
Cadastre	Oui	Oui
Profil en long de la plateforme	Non	Intégré à la modélisation 3D
Données de perméabilité du sol	Non	Non
Levé topographique / Plan des ouvrages hydrauliques de traversé	Non	Oui
Zones de reprise de plateforme	Oui	Oui
REX du mainteneur vis-à-vis des zones problématiques	Oui	Non nécessaire
Implantation et synoptique du drainage existant	Non	Non nécessaire (création)
Niveau des plus hautes eaux des nappes	Oui	Oui
Plans des réseaux enterrés	Rare	Oui
Coupes fonctionnelles générales de la voie	Oui	Oui
Levé des passages à niveau	Partiel	Absence de passage à niveaux

BIBLIOGRAPHIE

Réseau Ferré de France & SNCF – Direction Générale Déléguée Exploitation, 2006, 'IN 3278 – Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie Génie Civil – Tome I - LGV « Voyageurs » Caractéristiques générales', *Publication de la SNCF*.
< Lien internet non disponible >

Réseau Ferré de France & SNCF – Direction Générale Déléguée Exploitation, 2006, 'IN 3278 – IN 3278 - Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie Génie Civil – Tome II – LGV « Voyageurs » - Ouvrages en Terre', *Publication de la SNCF*.
< Lien internet non disponible >

Réseau Ferré de France & SNCF – Direction Générale Déléguée Exploitation, 2006, 'IN 3278 – Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie Génie Civil – Tome III - LGV « Voyageurs » Hydraulique et Drainage', *Publication de la SNCF*.
< Lien internet disponible >

Réseau Ferré de France & SNCF – Direction de l'Équipement et de l'Aménagement, 1996, 'IN 0259 – Notice Générale pour la conception, la réalisation et l'entretien des ouvrages de drainage et d'écoulement', *Publication de la SNCF*.
< Lien internet disponible >

NAM TRINH, 2011, 'Comportement hydromécanique de matériaux constitutifs de plateformes ferroviaires anciennes', *Thèse doctorale de l'Université PARIS EST*.
< [Lien internet](#) >

NEHAOUA, 2013, 'Cours de chemin de fer : Dimensionnement des structures d'assise', *Cours d'Université*.
< [Lien internet](#) >

LAMALLE, Date de publication inconnue, 'Cours d'exploitation des chemins de fer', *Cours d'Université*.
< [Lien internet](#) >

KABOUR, 2013, 'Optimisation du calage du drainage profond des plateformes ferroviaires', *Mémoire de stage des universités Mines ParisTech / Agro Paris Tech / UPMC*.
< [Lien internet](#) >

MONIER, juin 2018, 'Un affaissement fait dérailler le RER B', *Publication d'ESSONE INFO*.
< [Lien internet](#) >

Site WEB de l'Aménagement du Nœud Ferroviaire de Brétigny, *SNCF RESEAU*.
< [Lien internet](#) >

VAZQUEZ & DUFRESNE, 2016, 'Hydraulique à surface libre', *Publication de l'ENGEES / I CUBE*.
< [Lien internet](#) >

LISTE DES ABREVIATIONS

AVP : Avant-Projet
APO : Phase intermédiaire entre l'AVP et le **PRO**
CD : Collecteur drainant
FBBP : Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes
FBBP : Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes
FT : Fossé Terre
FTR : Fossé Terre Revêtu
OHT : Ouvrage Hydraulique de Traversée
LC : Ligne Classique
LGV : Ligne à Grande Vitesse
MOA : Maître d'Ouvrage
MOE : Maître d'Œuvre
OTS : Ouvrage en Terre sensible
Pk : Point kilométrique
PRO : Projet
PST : Partie Supérieure de Terrassement
REX : Retour d'Expérience
SNCF : Projet

GLOSSAIRE