

System-Based Solutions for H2-Fuelled Water Transport in North-West Europe

Livrable : Étude complémentaire sur la motorisation fluviale pour le transport d'ordures ménagères en containers

Informations relatives au document

Numéro de Work Package	WPT2
Titre du Work Package	Definition requirements for uptake of H2 propulsion in water transport in NEW
Numéro de l'activité	4
Titre de l'activité	Development of an action plan for the implementation of a French pilot on the Seine in Paris in 2021-2022
Numéro du livrable	WP T2 4.8
Titre du livrable	Étude complémentaire sur la motorisation fluviale pour le transport d'ordures ménagères en containers
Type de diffusion	Confidentiel
Auteur principal	Lénaïg MELLAZA
Contributeur	Jean-Robert PERROCHES, Patrice DOMENGE
Contrôlé par	Amalric BARTH
Date d'émission	06 avril 2021

Contrôle de version et Historique des modifications

Version	Date	Auteur/Éditeur/Contrôleur	Description/Commentaires
_v01	01.02.2021	Jean-Robert PERROCHES, Patrice DOMMENGÉ/ Lénaïg MELLAZA/ Amalric BARTH	1ere édition
_v02	06.04.2021	Lénaïg MELLAZA / Amalric BARTH	Mise à jour suites aux commentaires : -

Table of Content

Liste des tableaux.....	6
Liste des Figures	6
Liste des Acronymes	7
1 Résumé.....	8
2 Introduction.....	9
3 Hypothèses d'étude	9
3.1 Produits transférés	9
3.1.1 Typologie de produits.....	9
3.1.2 Volumes transférés.....	10
3.2 Hypothèses de trajet fluvial	12
3.2.1 Gabarit fluvial	12
3.2.2 Exutoires.....	12
3.2.3 Plateformes portuaires	13
3.2.4 Horaires d'ouverture des équipements	13
3.2.5 Caractéristiques du trajet fluvial.....	14
3.2.6 Temps de rotation	16
3.3 Schéma logistique fluvial	17
3.3.1 Cas simple - Schéma logistique fluvial.....	17
3.3.2 Cas multiple - Schéma logistique fluvial	18
3.4 Définition des pousseurs	19
3.4.1 Caractéristiques principales	19
3.4.2 Différences entre le pousseur opérant sur les canaux et celui sur la Seine. 20	
4 État des lieux des formes H2.....	21
4.1 État des lieux des formes H2	21
4.2 Préconisation de la forme H2	24
4.2.1 Le stockage du gaz sous pression	24
4.2.2 Le stockage sous forme liquide	25
4.2.3 Le stockage sous forme solide.....	26
4.2.4 Conclusion : choix du mode de stockage pour notre étude.....	28
5 Caractéristiques techniques de la motorisation	29

5.1	Gabarit fluvial	29
5.1.1	Barge	29
5.1.2	Pousseur Saint-Ouen	30
5.1.3	Pousseur Seine	31
5.2	Synthèse et planning de construction	31
6	Contraintes sur le trajet fluvial	33
6.1	Contraintes et risques liées à la motorisation H2	33
6.1.1	Navigation	33
6.1.2	Avitaillement	35
6.2	Synergies avec les projets en cours de développement sur la Seine	39
6.2.1	L'hydrogène vecteur d'énergie	39
6.2.2	Les projets sur l'axe Seine	40
6.3	Adaptation des quais fluviaux à prévoir	41
6.3.1	Zones d'attente	41
6.3.2	Avitaillement	42
7	Analyse réglementaire pour la mise en œuvre de motorisation H2.	46
7.1	Navigation	46
7.1.1	Classification	46
7.1.2	Procès réglementaire	46
7.2	Avitaillement	48
7.2.1	Prescriptions générales sur les stations hydrogène	48
7.2.2	Phase d'avitaillement proprement dite du bateau	49
7.3	Cas type préconisé pour le projet : Implantation d'une station de distribution hydrogène (20m ² – 300 kg/j)	51
7.3.1	Règlementation applicable	51
7.4	Certification de conformité des équipements	53
7.5	Réalisation, installation et exploitation de la station	54
7.5.1	Étude d'implantation	54
7.5.2	Réalisation et installation	55
8	Analyses financières	56
8.1	CAPEX	56
8.1.1	CAPEX cas simple – Un seul exutoire	56
8.1.2	Option : avitaillement dédié au SYCTOM	57
8.1.3	CAPEX cas multiple – 3 exutoires	58

8.2	OPEX	60
8.2.1	OPEX TECHNIQUE POUSSEURS CAS BASE	60
8.2.2	OPEX CAS BASE	61
8.2.3	OPEX TECHNIQUE POUSSEURS CAS MULTIPLE.....	62
8.2.4	OPEX CAS MULTIPLE.....	63
9	Conclusions et Recommandations	63
10	Annexes	65
10.1	Annexe 1 – Cas simple : simulation du schéma logistique	65
10.2	Annexe 2 – Cas multiple : simulation du schéma logistique	67
10.3	Annexe 3 – Liens réglementaires	69

Liste des Tableaux

Tableau 1 – Synthèse des volumes transférés dans le cas simple.....	10
Tableau 2 – Synthèse des volumes transférés dans le cas multiple	11
Tableau 3 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme gazeuse...25	
Tableau 4 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme liquide	26
Tableau 5 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme solide	28
Tableau 6 – Caractéristiques de la station d'avitaillement à créer dans le cas simple (phase initiale de déploiement)	39
Tableau 7 - Caractéristiques des quais fluviaux identifiés sur le Canal de l'Ourcq	45

Liste des Figures

Figure 1 – Conteneur de compaction ampliroll ISO 20' pour le transfert d'OMR	10
Figure 2 – Exemple de convoi poussé	12
Figure 3 - Trajets fluviaux empruntés par les barges dans le bassin parisien (© VNF)	13
Figure 4 – Production d'hydrocarbures à partir de gaz de synthèse (CO + H ₂) (CCS : Carbone Capture & Storage - Fischer Tropsch)	24
Figure 5 : Planning de construction des pousseurs fluviaux	32
Figure 6 : Planning de construction des barges	32
Figure 7 : Zone d'attente potentielle des barges à proximité du quai prévu pour les opérations du SYCTOM	42
Figure 8 – Synthèses des réglementations applicables pour la construction fluviale	48
Figure 9 : Simulation d'une rotation de barge OMR vers Issy-les-Moulineaux	65
Figure 10 : Cas simple : modélisation du transfert fluvial des barges sur une semaine au niveau de chaque exutoire	66
Figure 11 : Simulation d'une rotation de barge OMR vers Saint-Ouen et Ivry-sur-Seine.....	67
Figure 12 : Cas multiple : modélisation du transfert fluvial des barges sur une semaine au niveau de chaque exutoire	68

Liste des Acronymes

AMO	Assistant à la Maîtrise d'Ouvrage
ATEX	ATmosphère EXplosive
BV	Bureau Veritas, organisme de contrôle et de classification des bateaux
CCNR	Commission Centrale pour la Navigation du Rhin
DRCPE	document relatif à la prévention contre les explosions
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIEA	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement
ES-TRIM	Européen Standard- Technical Recommendation Inland Navigation
EVP	Équivalent Vingt Pieds
FC	Fuel Cell (= pile à combustible)
ICPE	Installations Classées Pour l'Environnement
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
LES	Limite Supérieure d'Explosivité
OMR	Ordures Ménagères Résiduelles
PAC	Pile à Combustible
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PPR	Plan de Prévention des Risques
RVBR	Règlement de visite des bateaux du Rhin
TCO	Total Cost of Ownership (= coût total de possession)
VNF	Voies Navigables de France
WP	Work Package

1 Résumé

Dans le cadre du projet H2Ships, l'objectif de la présente mission, inscrite dans le **WPT2 – Defining requirement for uptake of H2 propulsion in water transport in NEW**, était d'étudier les modalités de développement d'une motorisation hydrogène fluviale dans le cadre d'un projet pilote. Le projet pilote sélectionné par le SYCTOM est le transfert par voie fluviale des déchets développé pour la transformation du centre de tri de Romainville/Bobigny, situé sur le canal de l'Ourcq. Dans ce cadre, des ordures ménagères conditionnées en conteneurs seront transférés par voie fluviale à destination de 3 exutoires sur la Seine.

L'objectif de la présente mission a été de définir pour la motorisation H2 :

- Les caractéristiques techniques de la motorisation à mettre en œuvre
- Le cadre réglementaire auquel est soumis la navigation H2
- L'identification des besoins connexes qui garantissent la faisabilité du projet (en termes d'avitaillement notamment)

La définition de la motorisation H2 est basée sur les hypothèses logistiques détaillées dans le cadre d'études antérieures. On retiendra que les besoins en matériels fluvial identifiés pour le projet du SYCTOM sont les suivants :

- 1 à 2 pousseurs de canaux dédiés à la navigation sur le canal de l'Ourcq
- 1 pousseur dédié à la navigation sur la Seine
- 5 à 8 barges

Les besoins sont effectivement amenés à évoluer selon le stade de maturité du projet de Romainville-Bobigny.

Les pousseurs seront propulsés à l'hydrogène, stocké sous forme gazeuse à une pression de 350 bars.

Les besoins estimés pour la consommation de H2 sont basés sur la mise en place d'une station d'avitaillement sur la Seine en sortie de l'écluse de Saint-Denis (à proximité directe du canal de l'Ourcq). Cette hypothèse devra être confirmée par le WP dédié (étude propre à l'avitaillement traitée dans le cadre du WPI2).

Le coût de transport fluvial calculé pour cette étude varie de 13,8€/tonne à 9,5€/tonne selon les volumes transportés et apparaît donc raisonnablement compétitif si on en prend en considération l'intérêt de la décarbonation attachée, comparé à un coût de transport de 11€/tonne pour une motorisation diesel classiques qui utilise une énergie fossile très carbonée.

Les études ultérieures de faisabilité et de constructibilité des barges et des pousseurs devront confirmer cette estimation préliminaire.

2 Introduction

Dans le cadre de sa participation au projet H2Ships, le SYCTOM souhaite étudier le déploiement d'un projet pilote de motorisation hydrogène intégré au projet de transformation de son centre de tri de Romainville-Bobigny. Ce projet consiste à requalifier le centre de traitement des ordures de Romainville-Bobigny et, dans ce cadre, d'organiser le transfert par voie fluviale d'une partie des déchets traités vers les autres exutoires du SYCTOM situés en région parisienne et à proximité directe de la Seine (Saint-Ouen, Issy-les-Moulineaux et Ivry-sur-Seine).

L'étude du schéma logistique fluvial a déjà fait l'objet de précédentes études.

Conformément au cahier des charges « Études complémentaires sur la motorisation fluviale pour le transport d'ordures ménagères en containers », l'objectif de cette mission est donc d'évaluer la faisabilité et les conditions de mise en œuvre d'une propulsion pour un pousseur fluvial utilisant un système pile à combustible et hydrogène, pour les barges de conteneurs d'ordures ménagères transportées dans le cadre du projet de Romainville-Bobigny.

Pour ce faire, trois aspects seront abordés dans cette étude :

- Phase 1 : la détermination des caractéristiques techniques de la motorisation à mettre en œuvre.
- Phase 2 : les impacts induits sur le trajet fluvial et les adaptations à prévoir.
- Phase 3 : les analyses réglementaires et financières associées.

3 Hypothèses d'étude

3.1 Produits transférés

3.1.1 Typologie de produits

Les produits transférés par voie fluviale dans le cadre de cette mission sont des OMR brutes conditionnées en conteneurs ampliroll dont les dimensions extérieures sont similaires à celles de conteneurs ISO 20'.



Figure 1 – Conteneur de compaction ampliroll ISO 20' pour le transfert d'OMR

Le déploiement du projet de Romainville-Bobigny est prévu en deux phases de développement :

- **Phase 1 : Cas simple** avec un 1 seul exutoire desservi (Issy-les-Moulineaux) et 120 600T d'OMR brutes transférées chaque année
- **Phase 2 : Cas multiple** avec 3 exutoires desservis et 290 000T d'OMR brutes transférées chaque année

3.1.2 Volumes transférés

3.1.2.1 Phase 1 – Cas simple

Les volumes transférés dans le cas simple, au démarrage du nouveau centre de traitement de Romainville/Bobigny, sont les suivants :

Tableau 1 – Synthèse des volumes transférés dans le cas simple

	OMR Issy-les-Moulineaux	Unité
Tonnage	120 600	Tonnes
Charge par conteneur	12.92	Tonnes
Trafic annuel (ampliroll)	9 338	EVP
Capacité de la barge	24	EVP
Nombre d'escales annuelles	390	Barges
Nombre d'escales hebdomadaires	7.5	Barges
Nombre d'escales journalières	1.5	Barges
Temps total de la barge à quai (Romainville)	3.2	h
Temps total de la barge à quai (exutoire)	4.8	h

Au maximum 8 barges seront transférées chaque semaine dans le cas simple de Romainville-Bobigny à Issy-les-Moulineaux (soit au maximum 2 barges par jour).

3.1.2.2 Phase 2 – Cas multiple

Si le transfert de déchets mis en place vers Issy-les-Moulineaux est concluant, le SYCTOM envisage, à terme, de développer le transfert par voie fluviale à plus grande échelle. Dans ce cas, le quai d'Issy-les-Moulineaux seul ne pourra pas absorber tout le flux de déchets transférés et les exutoires supplémentaires de Saint-Ouen et Ivry-sur-Seine seront adaptés pour recevoir des déchets par voie fluviale. Les volumes transférés à destination de chaque exutoire seront alors les suivants :

Tableau 2 – Synthèse des volumes transférés dans le cas multiple

	OMR Issy	OMR St- Ouen	OMR Ivry	TOTAL	Unité
Tonnage	150 000	70 000	70 000	290 000	Tonnes
Charge par conteneur	12.92				Tonnes
Trafic annuel (ampliroll)	11 614	5 420	5 420	22 455	EVP
Capacité de la barge	24				EVP
Nombre d'escales annuelles	484	226	226	936	Barges
Nombre d'escales hebdomadaires	9.3	4.4	4.4	18	Barges
Nombre d'escales journalières	1.9	0.9	0.9	4	Barges
Temps total de la barge à quai (Romainville)	3.2				h
Temps total de la barge à quai (exutoire)	4.8	4.4	3.8		h

Au maximum 18 barges par semaine seront transférées par le SYCTOM. De fait, 4 barges par jour maximum seront à expédier de Romainville/Bobigny vers les exutoires selon la décomposition suivante :

- 2 barges à destination d'Issy-les-Moulineaux
- 1 barge à destination de Saint-Ouen
- 1 barge à destination d'Ivry-sur-Seine

3.2 Hypothèses de trajet fluvial

3.2.1 Gabarit fluvial

Le choix du gabarit et la localisation du site imposent la circulation fluviale des barges sur le canal de l'Ourcq à « grand gabarit » uniquement. La seule entrée possible dans le canal se faisant par le canal de Saint-Denis, les automoteurs doivent passer le site de Romainville et remonter jusqu'au bassin de virage des Pavillons-sous-Bois où elles peuvent procéder à leurs manœuvres de demi-tour pour revenir sur site et accoster.

Pour s'affranchir de cette contrainte, le SYCTOM a choisi d'utiliser des convois poussés barges + pousseur. Les pousseurs peuvent manœuvrer la barge en amont ou en aval, cela permet une flexibilité de manœuvre plus importante mais induit des contraintes supplémentaires en termes de linéaire de quai qui doit permettre la manœuvre des pousseurs de deux côtés de chaque barge, soit un espace suffisamment sécuritaire pour manœuvrer un pousseur entre deux barges à quai.



Figure 2 – Exemple de convoi poussé

Au vu des contraintes de navigation sur le canal de l'Ourcq, l'utilisation de barges 24 EVP opérées par de pousseurs a été sélectionnée par le SYCTOM. Cette solution est plus flexible que l'utilisation d'automoteurs au vu du gabarit du canal.

3.2.2 Exutoires

Les déchets seront mis en conteneurs et transbordés sur des barges sur la plateforme fluviale de Romainville/Bobigny. Les barges emprunteront ensuite le canal de l'Ourcq puis la Seine à destination des 3 exutoires du SYCTOM :

Études complémentaires sur la motorisation fluviale pour le transport H2SHIPS

- Saint-Ouen
- Issy-les-Moulineaux
- Ivry-sur-Seine

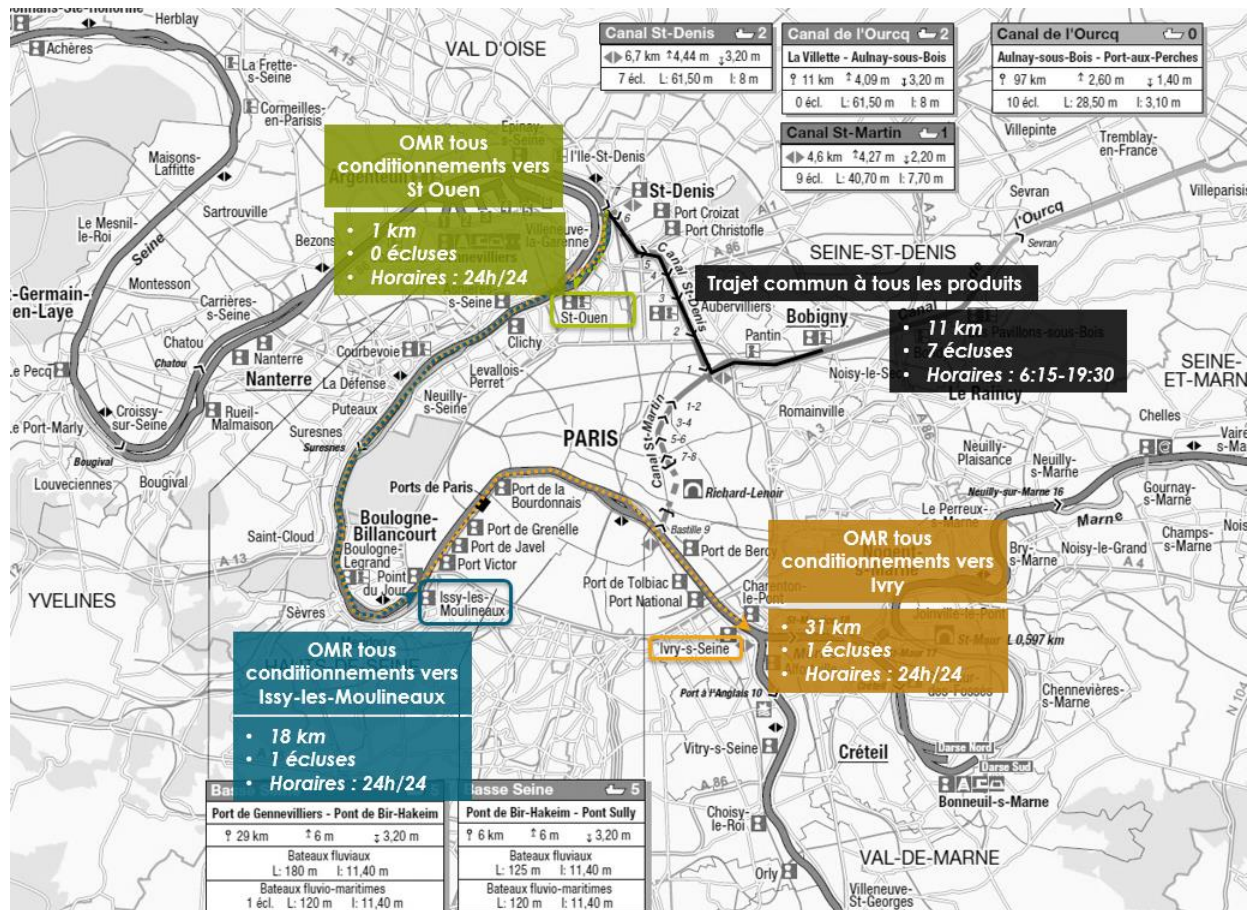


Figure 3 - Trajets fluviaux empruntés par les barges dans le bassin parisien (© VNF)

3.2.3 Plateformes portuaires

Les quais existants devront être adaptés pour permettre le chargement/déchargement des barges. Ces adaptations ont été réfléchies dans le cadre d'études précédentes et ne font pas l'objet du présent rapport. Ces plateformes portuaires seront opérées du lundi au vendredi soit 5 jours par semaine.

3.2.4 Horaires d'ouverture des équipements

Si la circulation sur la Seine est autorisée 24h/24, des contraintes horaires doivent être prises en compte pour l'ouverture des différents équipements présents sur le trajet fluvial :

Tableau 6 – Contraintes horaires à prendre en compte sur le trajet fluvial

	Ouverture	Fermeture
Quai Romainville-Bobigny	6h	20h
Écluses Canal de l'Ourcq	6h15	19h30
Quai Saint-Ouen	5h	22h
Quai Issy-les-Moulineaux	6h	20h
Quai Ivry-sur-Seine	6h	20h

Ces contraintes devront être intégrées dans le schéma logistique des barges.

3.2.5 Caractéristiques du trajet fluvial

3.2.5.1 La voie d'eau

Les barges et pousseurs emprunteront deux typologies de voies d'eau différentes :

- Une portion du trajet sera effectuée sur le canal de l'Ourcq (partie à grand gabarit)
- Une portion du trajet sera effectuée sur la Seine

Les caractéristiques propres à chaque voie d'eau sont synthétisées dans le tableau ci-après :

Tableau 7 – Caractéristiques des voies d'eau empruntées par les barges

	Canal de l'Ourcq	Seine
Gestionnaire	Canaux de Paris	VNF
Vitesse maximale autorisée sur la voie d'eau	6 km/h	20 km/h
Horaires d'ouverture des écluses	6h15 – 19h30	24h
Gabarit fluvial	Largeur max. : 8 m Longueur max. : 61,5 m Tirant d'air : 4,09 m Tirant d'eau : 2,60 m	Largeur max : 12 m Longueur max : 160,5 m Tirant d'air : 6 m Tirant d'eau : 4,10 m

Les vitesses maximales et minimales des bateaux en charge sur la Seine sont réglementées par :

- L'arrêté inter-préfectoral n°2014238-0013 portant sur la navigation intérieure sur le réseau fluvial de la ville de Paris.
- Les règlements de police / Police de la navigation intérieure.

Les vitesses considérées pour les trajets fluviaux sont les suivantes :

Tableau 8 – Vitesse réglementaires et vitesse limite sélectionnées

	Vitesse maximale autorisée sur voie d'eau (km/h)	Vitesse limite pour bateau en charge (km/h)	Vitesse limite pour bateau léger (km/h)
Canal de l'Ourcq	6 km/h	5 km/h	6 km/h
Seine	20 km/h	8.5 km/h	12 km/h

Dans la suite de l'étude, on considère que :

- Les barges revenant des exutoires chargées de conteneurs vides circuleront à la vitesse limite pour bateaux légers
- Les barges chargées de conteneurs pleins en provenance circulent à la vitesse limite pour bateau en charge
- Le temps de passage d'une écluse est estimé à 30 min par écluse.

3.2.5.2 Organisation du trajet fluvial

Les caractéristiques du Canal de l'Ourcq et de la Seine étant sensiblement différentes pour la navigation, le schéma logistique sélectionné consiste à utiliser deux pousseurs différents selon les voies d'eau empruntées :

- **Le pousseur « Ourcq »** prendra en charge les barges depuis la plateforme fluviale de Romainville/Bobigny jusqu'après l'écluse de Saint-Denis
- **Le pousseur « Seine »** prendra en charge les barges depuis l'écluse de Saint-Denis jusqu'à l'exutoire.

Ce schéma permettra de plus de constituer des convois poussés sur la Seine dans le cas évolutif et de mutualiser ainsi les trajets.

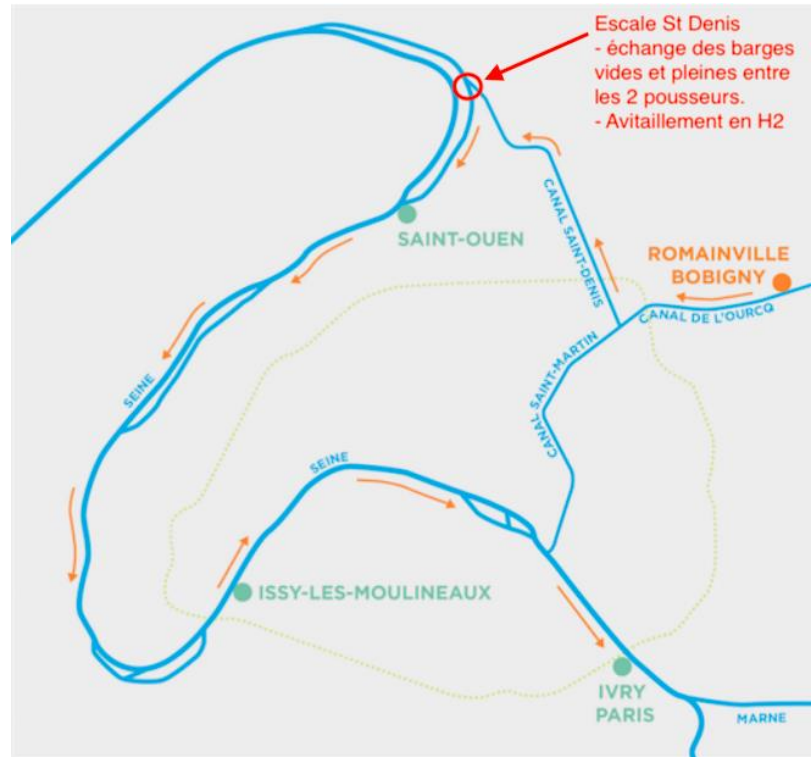


Figure 9 – Carte du trajet fluvial

Une zone de groupage/dégroupage des convois devra être prévue en sortie de l'écluse de Saint-Denis pour que le pousseur de l'Ourcq désaccouple la barge qui sera ensuite reprise par le pousseur de Seine.

Le schéma logistique mis en œuvre sur le projet vise à limiter au maximum les trajets effectués à blanc, c'est à dire le pousseur seul sans barge.

En conséquence, lors de chaque arrêt au niveau d'une plateforme fluviale, le pousseur échangera sa barge pleine ou vide contre une autre barge pleine ou vide pour la ramener dans le sens inverse.

Au vu des caractéristiques des écluses du canal de l'Ourcq, le pousseur de l'Ourcq ne prendra en charge qu'une seule barge. Sur la Seine, des convois poussés d'au maximum 2 barges pourront être prévus pour mutualiser les flux.

3.2.6 Temps de rotation

Les temps de rotation absolus des barges (sans prise en compte des éventuels temps d'attente liés aux contraintes horaires des équipements) ont été préalablement étudiés et aboutissent aux hypothèses de cycle suivants :

- **Romainville / Saint-Ouen / Romainville :** **17h59**
- **Romainville / Issy-les-Moulineaux / Romainville :** **22h08**
- **Romainville / Ivry-sur-Seine / Romainville :** **23h18**

3.3 Schéma logistique fluvial

3.3.1 Cas simple - Schéma logistique fluvial

Pour le cas simple, seul l'exutoire d'Issy-les-Moulineaux sera desservi. Dans ce cadre, le pousseur prendra toujours en charge au maximum une barge.

- Le pousseur de l'Ourcq prendra en charge la barge de Romainville/Bobigny jusqu'à la sortie de l'écluse de Saint-Denis.
- A la sortie de l'écluse, la barge sera reprise par le pousseur de Seine qui l'acheminera jusqu'à Issy-les-Moulineaux.
- Le pousseur de Seine prendra ensuite en charge une barge de conteneurs vides en attente à Issy-les-Moulineaux pour la réacheminer vers le Canal de l'Ourcq
- La barge de vides sera déposée par le pousseur de Seine en amont de l'écluse de Saint-Denis.
- Le pousseur de canal la prendra ensuite en charge pour la réacheminer à Romainville/Bobigny.

Pour estimer la durée de rotation d'une barge, au vu des contraintes horaires d'ouvertures des différents équipements, une simulation du temps de rotation a été effectuée (voir Annexe 1). La durée moyenne de rotation de la barge est de 37h45min en prenant en compte les temps d'attente ; soit un peu plus d'1,5 jour entre le départ et le retour au quai de Bobigny.

Au maximum 2 barges par jour peuvent être chargées au port de Romainville/Bobigny, cela signifie que 3 à 4 barges doivent être prévues pour les opérations fluviales dans le cas simple.

En termes de temps de navigation, les 2 transferts de barges journaliers définissent les besoins suivants pour le pousseur :

- Une rotation du pousseur sur l'Ourcq correspond à 9h45min (aller/retour). Une durée d'occupation de **19h30min** par jour devra être prévue sur une journée pour ce pousseur.
- Une rotation du pousseur sur la Seine correspond à 5h05min de navigation. Pour assurer les deux transferts journaliers, la durée d'occupation du pousseur Seine en navigation est de **10h10min**

Ce schéma logistique suppose que les deux pousseurs prennent toujours en charge une barge (que ce soit pour le trajet aller ou le trajet retour).

Les trajets de pousseurs devront être coordonnés pour qu'aucun trajet ne soit effectué à blanc (le pousseur dépose une barge pleine à Saint-Denis et repart avec une barge vide).

Le schéma logistique mis en place devra donc prévoir qu'une barge soit toujours en attente en sortie de l'écluse de Saint-Denis pour que les deux pousseurs n'aient pas de rupture de charge.

Suite à cette analyse, il est nécessaire de prévoir pour le cas simple :

- **Un pousseur Ourcq dédié à la navigation sur le canal**
- **Un pousseur Seine dédié à la navigation sur la Seine**
- **5 barges (3 barges en opération + 1 barge en attente + 1 barge de secours)**

3.3.2 Cas multiple - Schéma logistique fluvial

Pour le cas multiple, tous les exutoires seront desservis. Au maximum 4 barges/jour seront chargées à Romainville/Bobigny selon la répartition suivante :

- 2 barges vers Issy-les-Moulineaux
- 1 barge vers Saint-Ouen
- 1 barge vers Ivry-sur-Seine

L'exutoire de Saint-Ouen étant situé à proximité directe de l'écluse de Saint-Denis (30 min de navigation), il n'est pas cohérent de prévoir une reprise de la barge à destination de cet exutoire par le pousseur de Seine. La barge à destination de Saint-Ouen sera donc exclusivement gérée par le pousseur Ourcq.

Pour mutualiser les transferts de barge, la barge à destination d'Ivry-sur-Seine sera groupée avec une barge à destination d'Issy-les-Moulineaux. Le pousseur de Seine déposera une barge à Issy-les-Moulineaux puis continuera son trajet vers Ivry-sur-Seine ou il déposera la barge chargée de conteneurs pleins et prendra en charge la barge en attente chargée de conteneurs vides. Sur le chemin du retour, il s'arrêtera de nouveau à Issy-les-Moulineaux pour grouper son convoi avec la barge chargée de conteneurs vides restée en attente à Issy et réacheminera les deux barges vers l'écluse de Saint-Denis.

Enfin, un transfert sur la Seine sera mono-barge avec une barge à destination d'Issy-les-Moulineaux prise en charge par le pousseur de Seine.

Dans le cas multiple, il faut donc prévoir 2 rotations du pousseur Seine :

- Une rotation avec un convoi groupé de 2 barges vers Issy-les-Moulineaux puis Ivry-sur-Seine
- Une rotation avec un convoi d'une seule barge vers Issy les Moulineaux

De même que pour le cas simple, une simulation du temps de rotation des barges vers chacun des exutoires a été effectuée (détail disponible en Annexe 2), les durées moyennes de rotation retenues pour les barges en prenant en compte les temps d'attente sont les suivants :

- Saint-Ouen : 31h 08min
- Issy-les-Moulineaux : 37h 34min
- Ivry-sur-Seine : 40h 48min

Au maximum 4 barges par jour seront chargées/déchargées à Romainville/Bobigny et elles devront chacune alimenter les exutoires. Cette organisation logistique est complexe et elle suppose une organisation fine pour limiter au maximum les temps d'attente.

En termes de temps de navigation (hors temps de manœuvre et temps d'attentes), les 4 transferts de barges journaliers définissent les besoins suivants pour les pousseurs :

- **Ourcq** : 4 rotations/jour sont effectuées sur le canal de l'Ourcq qui correspondent au total à **39h de navigation**.
- **Seine** : 2 rotations/jour sont effectuées sur la Seine :
 - Pour la rotation 1 (Issy-les-Moulineaux puis Ivry-sur-Seine), la durée de navigation totale sur la Seine est de **8h45min**.
 - Pour la rotation 2 (Issy-les-Moulineaux uniquement), la durée de navigation totale sur la Seine est de **5h05min**.
 - Au total, le temps de navigation du pousseur de Seine dans cette configuration est donc de **14h/jour environ**.

On retiendra donc les besoins suivants dans le cas multiple :

- **2 pousseurs Ourcq seront nécessaires pour mener à bien tous les transferts**
- **1 pousseur Seine sera suffisant pour effectuer les deux rotations sur la Seine**
- **3 barges supplémentaires devront être prévues (en plus des 5 barges prévues initialement)**

3.4 Définition des pousseurs

3.4.1 Caractéristiques principales

L'analyse des données de flux aboutit aux conclusions suivantes :

- Les temps de parcours et les conditions de navigation différentes entre le canal et la Seine imposent au minimum 2 pousseurs pour opérer correctement la phase 1.

- 1 pousseur « Ourcq » dédié à la navigation en canal, convoi d'une seule barge de 500 tonnes
- 1 pousseur « Seine » dédié à la navigation sur le Seine, convoi d'une à deux barges (500 à 1000 tonnes)
- Les barges à pousser sont de dimensions adaptées 50x7m (160 tonnes lège, emport maxi 500 tonnes, chargement moyen 420 tonnes)
- Les barges sont ballastées pour le retour des conteneurs vides afin de respecter le tirant d'air (TA) du canal à 4.09m

3.4.2 Différences entre le pousseur opérant sur les canaux et celui sur la Seine.

Les pousseurs opèrent donc toujours pour le voyage « Aller », avec des barges chargées entre :

- 380 et 500 tonnes sur les canaux, vitesse 6km/h
- 380 et 1000 tonnes sur la Seine, vitesse 12km/h

Les pousseurs opèrent toujours pour le voyage « Retour » avec des barges chargées de conteneurs vides en respectant les vitesses autorisées sur les canaux et sur la Seine (6 et 12km/h).

La **navigation sur les canaux** nécessite peu d'énergie : il n'y a pas de courant, les variations climatiques ont peu d'influence (essentiellement les conditions de vent). Le pousseur a donc besoin de puissance instantanée pour effectuer certaines manœuvres, mais consomme peu d'énergie pour sa navigation.

La **navigation sur la Seine** nécessite plus d'énergie : il y a des variations du sens du courant suivant le sens de navigation (montant ou avalant). L'intensité du courant peut de plus varier de faible à fort jusqu'aux conditions de crue à laquelle s'ajoute les conditions de vent. Dans ce cas, le pousseur a besoin de puissance instantanée pour effectuer les manœuvres mais aussi pour naviguer en toutes circonstances, il consomme donc plus d'énergie en navigation qu'un pousseur opérant sur les canaux.

Les deux pousseurs seront donc de conception et de dimensionnement sensiblement différents. Leurs caractéristiques principales sont détaillées dans le §5.1.

4 État des lieux des formes H2

4.1 État des lieux des formes H2

Comme l'électricité, l'hydrogène est principalement un vecteur énergétique et non une énergie en tant que telle, même si quelques sources de production d'hydrogène naturel ont pu être observées. Il est donc produit à partir d'une source d'énergie. Actuellement, pour des raisons économiques, il est issu à 95 % de la transformation d'énergies fossiles (à partir de gaz naturel principalement).

Comme pour l'électricité, dans le cadre de la transition énergétique et pour atteindre une neutralité carbone en 2050, une recherche de production d'énergie décarbonnée, à partir d'énergie renouvelables notamment, est en cours. Dans ce cadre, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est à l'étude. Utilisé à ce jour essentiellement dans la chimie ou le raffinage, l'hydrogène pourrait trouver d'autres applications comme celles de décarboner certains secteurs industriels, d'assurer le stockage de l'électricité ou d'alimenter le secteur des transports.

Les formes d'hydrogène existantes sont :

- Les ressources principales permettant de produire le dihydrogène H₂ sont **l'eau et les hydrocarbures** (le charbon, le pétrole ou le gaz).
- L'hydrogène se trouve également dans les **hydrocarbures qui sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène**. C'est par exemple le cas du méthane constituant principal du gaz naturel, dont la formule est CH₄, l'une des combinaisons les plus simples pour les hydrocarbures.
- L'hydrogène existe aussi **à l'état naturel**. Les premières sources naturelles d'hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 70 et d'autres sources ont plus récemment été identifiées à terre. L'exploitation de l'hydrogène naturel au fond des mers, par très grands fonds et très loin des côtes, n'est pas économique. Plus récemment, des émanations d'hydrogène à terre, plus faciles d'accès, ont été décelées. Néanmoins, l'exploitation de ces formes d'hydrogène n'est pas prévue à l'heure d'aujourd'hui : les connaissances sur l'origine de la formation de cet hydrogène et les recherches sur des techniques de production doivent encore progresser pour que cette source devienne rentable.

A l'heure d'aujourd'hui, il existe 3 techniques de production qui consistent à extraire l'hydrogène de la ressource primaire, soient :

- Le **reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau** est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Le CO₂ émis par ce procédé peut éventuellement être capté, et stocké, pour produire un hydrogène décarboné. En lieu et place du gaz naturel, l'utilisation du bio méthane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire un hydrogène décarboné ;
- La **gazéification** permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H₂ à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂) ou de biomasse ;
- L'hydrogène peut aussi être produit à partir d'eau et d'électricité, c'est **l'électrolyse de l'eau**. L'électrolyseur sépare une molécule d'eau en hydrogène, et en oxygène. Cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3 fois plus chère que le reformage du gaz naturel) et réservée à des usages spécifiques, comme l'électronique, qui requièrent un niveau élevé de pureté.

Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures (pétrole, gaz naturel et charbon), solution la moins coûteuse. Cependant, ce processus est émetteur de CO₂.

Pour produire de l'hydrogène décarboné, deux options s'offrent aux industriels :

- Soit **capter le CO₂ émis lors de la production** par transformation des énergies fossiles, puis le transporter pour le stocker géologiquement,
- Soit le produire via **l'électrolyse de l'eau**, l'électrolyse étant opérée à partir d'une électricité décarbonée fournie par de l'énergie éolienne ou solaire. L'enjeu reste toutefois le coût de ce mode de production, bien plus onéreux à ce jour que celui du reformage.

L'hydrogène pourrait répondre à trois enjeux essentiels de la transition énergétique :

- **Décarboner le secteur industriel** très consommateur en énergie. L'hydrogène aurait dans ce cas deux utilisations : d'une part alimenter en énergie décarbonée les unités industrielles concernées ; d'autre part contribuer à la décarbonation des procédés industriels concernés en substitution des énergies fossiles utilisées actuellement ; c'est le cas par exemple de la fabrication d'acier qui résulte de la réduction des minerais de fer ; cette réduction opérée aujourd'hui via le charbon

pourrait demain l'être en utilisant de l'hydrogène décarboné.

- **Pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables** avec la possibilité de stocker l'hydrogène. L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau, l'électricité étant fournie par une production éolienne ou photovoltaïque, puis stocké selon différents modes de stockage possible (batteries, stockage massif en cavités salines) selon l'usage qu'on veut en faire. Un intérêt de ce stockage est de pouvoir ensuite reconvertir cet hydrogène en électricité, et ainsi d'optimiser la capacité de production électrique à construire et de pallier les intermittences de production des énergies renouvelables éoliennes et solaire, et, enfin, de répondre aux pointes de consommation.

Cela nécessite donc de pouvoir produire de l'hydrogène non carboné. Ceci peut être obtenu soit par la conversion d'énergies fossiles (dont notamment le reformage de gaz naturel) qui peut être décarbonée par captage de CO₂ puis stockage dans le sous-sol de façon pérenne (c'est l'hydrogène bleu), soit par électrolyse, l'électricité étant produite à partir d'énergies renouvelables (il s'agit ici d'hydrogène vert).

L'hydrogène produit par électrolyse peut également être décarboné si l'électricité est d'origine nucléaire. La production d'"hydrogène vert" n'est pas encore une réalité. Une transformation des systèmes énergétiques et du contexte technico-économique seront nécessaires pour y parvenir.

- Et dans l'étude qui nous concerne, il s'agit de **décarboner le secteur des transports**. Les transports électrifiés équipés d'une pile à combustible (PAC) transforment l'hydrogène en électricité et en vapeur d'eau, mais cette solution n'est favorable en terme environnemental que si l'hydrogène est produit à partir de sources décarbonées ; l'hydrogène présente des avantages par rapport aux batteries, en termes d'autonomie, et de temps de recharge.

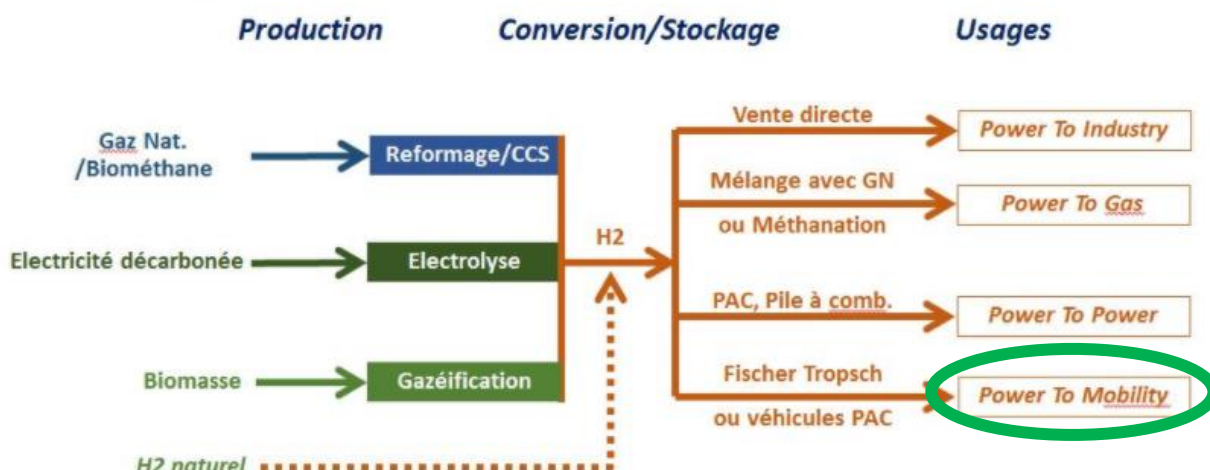


Figure 4 – Production d'hydrocarbures à partir de gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$)
(CCS : Carbone Capture & Storage - Fischer Tropsch)

4.2 Préconisation de la forme H_2

L'hydrogène est considéré comme un des vecteurs d'énergie de l'avenir. Ce gaz, utilisé comme combustible, peut servir de carburant dans diverses applications tout en permettant de répondre à la demande de la société en termes de développement durable. Cela nécessite toutefois que plusieurs verrous technologiques soient surmontés.

Le stockage de l'hydrogène gazeux est l'un de ceux-là.

Il doit offrir d'une part un haut degré de sécurité, et d'autre part des facilités d'usage en termes de densité d'énergie, et de cinétique pour permettre aux piles à combustible de fonctionner dans des conditions techniques acceptables.

Pour que l'hydrogène devienne une solution viable aux problèmes que posent les besoins d'énergie à l'environnement, les procédés de stockage devront donc être sûrs, économiques et adaptés aux diverses possibilités d'utilisation : pour nous la mobilité fluviale.

Aujourd'hui, plusieurs modes de stockage fournissent des potentialités intéressantes mais ils demandent encore de nombreuses recherches avant la réalisation de prototypes réalistes et un développement industriel.

Ces différents modes sont décrits ci-après, en abordant les solutions physiques (compression, liquéfaction) et chimiques (adsorption dans les solides poreux et absorption dans les hydrures chimiques).

4.2.1 Le stockage du gaz sous pression

Le stockage du gaz hydrogène sous pression, (de l'ordre de 200 à 250 bar le plus souvent) généralement stocké dans un réservoir en acier. C'est

une technique éprouvée depuis de nombreuses années et largement répandue de nos jours dans le monde industriel. Toutefois, cette technologie est fortement pénalisée par le poids des bouteilles.

A température ambiante, la capacité volumique est de l'ordre de 14 g/dm^3 sous 200 bar. Compte tenu des problèmes de fragilisation de l'acier induit par l'hydrogène, les parois doivent être suffisamment épaisses et résistantes. Toute augmentation de pression entraîne ainsi un accroissement de la masse de l'enveloppe limitant tout développement futur de cette technique.

La solution innovante pour le stockage sous pression vient aujourd'hui des structures en fibres bobinées, et en résine, qui permettent d'atteindre des pressions de stockage beaucoup plus élevées, tout en réduisant la masse de l'enveloppe.

Actuellement, des pressions de service de 350 bar, et 700 bar sont couramment proposées et les recherches s'orientent vers des pressions encore plus importantes de l'ordre 900 bar à 1200 bar.

Dans ces conditions, des capacités volumiques de l'ordre de 40 g/dm^3 sont obtenues, et des capacités massiques de plus de 10 % pour le système complet sont envisageables.

Les avantages et inconvénients de la technologie sont synthétisés ci-après :

Tableau 3 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme gazeuse

Avantages	Inconvénients
- Technologies maîtrisée - Remplissage du réservoir très rapide	- Faible densité volumique : même comprimé à 700 bars, l'hydrogène ne représente du point de vue énergétique que $4.9+8 \text{ MJ.L.}$ - Forme des réservoirs actuels inadaptée à l'application dans le monde des transports

4.2.2 Le stockage sous forme liquide

Une autre forme de stockage peut être, cette fois-ci, **sous forme liquide**. L'hydrogène se liquéfie en dessous de 20 K (Kelvin) à pression atmosphérique. Dans ces conditions, le liquide est 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante, et selon le type de réservoir cryogénique utilisé, une capacité massique de l'ordre de 6.5 % est obtenue pour le système complet.

Les procédés de liquéfaction du gaz font appel à des techniques assez complexes qui associent apport de froid, et détente adiabatique.

Bien que présentant une bonne capacité volumique de 70 g/dm^3 , le stockage liquide pose un certain nombre de problèmes difficiles à résoudre.

En premier lieu, ce procédé nécessite des réservoirs cryogéniques à très forte isolation thermique ce qui pénalise à la fois le volume, et le poids de ce mode de stockage, et ne permet pas d'empêcher les pertes thermiques inévitables à 20 K. D'autre part, pour des raisons de sécurité évidentes, les réservoirs sont conçus avec une architecture "ouverte" contrôlant une éventuelle montée en pression du système en cas de vaporisation du gaz. Ceci se traduit par des pertes importantes, par évaporation, d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil-off) qui peut atteindre 1% par jour. Ce phénomène n'est pas non plus sans conséquence sur la sécurité pour les systèmes de stockage utilisés en milieux confinés. Enfin, le coût énergétique de la liquéfaction est très important. Il dépend essentiellement de la capacité de production de l'usine de liquéfaction mais peut atteindre 50% du PCI de l'hydrogène ce qui rend ce système de stockage peu rentable sur le plan énergétique.

Les avantages et inconvénients de la technologie sont synthétisés ci-après :

Tableau 4 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme liquide

Avantages	Inconvénients
- Capacité de stockage importante	- Procédé complexe - Pertes importantes lors du stockage - Procédé coûteux avec un rendement faible

4.2.3 Le stockage sous forme solide

La dernière forme de stockage courante est le stockage sous forme **solide**.

De nombreux métaux, alliages et composés intermétalliques ont la propriété de stocker l'hydrogène avec de bonnes propriétés en termes de sécurité, de rendement énergétique, et de stockage à long terme.

Cependant, pour pouvoir répondre aux applications, ils doivent présenter une grande capacité, une bonne réversibilité, et une grande réactivité.

De nombreux composés sont connus pour leurs propriétés d'absorption et sont répertoriés dans la littérature. La plupart d'entre eux sont des composés intermétalliques formés par l'association d'un élément présentant une forte affinité pour l'hydrogène, c'est-à-dire formant un hydrure stable (élément A : alcalin, alcalino-terreux, métal de transition de début de période, terre rare ou actinide), et d'un élément présentant une faible affinité pour l'hydrogène, c'est-à-dire ne formant des hydrures que sous très haute pression (élément B : métal de transition de milieu ou de fin de période).

En plus de la faible capacité massique, un des problèmes associés à l'utilisation des hydrures reste la chaleur liée aux réactions d'absorption et de désorption. Celle-ci représente environ 25% de PCI de l'hydrogène stockée. Pour atteindre une pression de désorption de 1 bar d'hydrogène, des températures supérieures à 300°C sont habituellement nécessaires.

Le stockage de l'hydrogène peut également s'effectuer dans les solides par physisorption à basse température sur des matériaux présentant de grandes surfaces spécifiques. Le phénomène d'adsorption met en jeu de l'hydrogène moléculaire sans dissociation de la molécule de sorte que l'on ne peut pas à proprement parler d'hydrures.

Différentes familles de matériaux peuvent être envisagées pour le stockage de l'hydrogène par adsorption à basse température.

Les avantages, et inconvénients, des différents systèmes se définissent entre autres, par les capacités volumiques de stockage de l'hydrogène sous pression, sous forme liquide, ou absorbé dans un hydrure métallique, et peuvent ainsi être comparées.

Il apparaît clairement que le principal avantage d'un système à hydrure réside dans sa densité volumique de stockage. A cela s'ajoute l'absence de besoin de compression ou de liquéfaction qui résulte en des pertes énergétiques allant typiquement de 10% à 50% de l'énergie spécifique de l'hydrogène, et avec un net avantage au niveau de la sécurité du système.

Aucune perte énergétique n'est théoriquement associée au stockage sur hydrure car on stocke et on déstocke l'hydrogène à la même pression, pourvu que l'hystérèse soit peu importante, ce qui peut être ajusté par substitution. Un autre avantage substantiel est lié à la présence du plateau de pression qui permet qu'une grande quantité d'hydrogène soit stockée et récupérée dans un intervalle très restreint de pression. La valeur de cette pression peut être finement ajustée à une température donnée par une substitution adéquate, ainsi que la pente par un traitement thermique d'homogénéisation. Enfin, les hydrures bénéficient de la possibilité d'une mise en forme mieux adaptée aux applications mobiles que le gaz sous pression ou que l'hydrogène liquide.

En revanche, les hydrures sont pénalisés par leur masse.

Les objectifs fixés autour de 6% massiques semblent très difficiles à atteindre, ne serait-ce que par la contradiction thermodynamique entre des hydrures à grande capacité, et à faible stabilité thermique.

Un autre handicap majeur est lié à la gestion de la chaleur de transformation qui équivaut à environ 25% du PCI. Il faut fournir au système cette chaleur en désorption, et être capable de l'évacuer pendant le remplissage du réservoir.

Au regard de la limitation cinétique de la réaction chimique, et de la valeur limitée du transfert thermique, un stock à hydrure nécessite, en principe, un

temps de remplissage nettement plus important que les deux autres procédés de stockage évoqués.

Enfin, un autre inconvénient des hydrures est la variation de leur volume pendant les cycles de charge et décharge qui peut atteindre 25%. Ceci pose des problèmes de transfert thermique, de limitation de la capacité de stockage effective due à la création de volume libre, et de contraintes mécaniques sur le réservoir.

Les avantages et inconvénients de la technologie sont synthétisés ci-après :

Tableau 5 – Avantages et inconvénient du stockage sous forme solide

Avantages	Inconvénients
- Capacité de stockage importante - Mise en forme plus adapté pour les applications mobiles que le gaz ou l'hydrogène	- Masse importante - Temps de remplissage long - Variation de volume importante pendant les cycles de charge et de décharge

4.2.4 Conclusion : choix du mode de stockage pour notre étude

La possibilité de stocker l'hydrogène rend ce gaz particulièrement attractif par rapport à l'électricité qui est difficilement stockable. Encore faut-il pouvoir le stocker de façon dense et en toute sécurité.

Trois moyens de stocker l'hydrogène ont été présentés qui montrent chacun des avantages et des inconvénients.

Le choix du système n'est probablement pas universel et dépend bien sûr de l'application.

Dans notre cas d'usage que sont les pousseurs équipés d'une chaîne de propulsion électrique/hydrogène, les notions de masse, encombrement, capacité, sécurité, maturité et temps de mise en opération, sont à prendre en compte.

Des choix différents peuvent aussi être faits en fonction de la quantité stockée et du lieu de stockage sur le bateau.

Dans l'état actuel d'avancement du projet, l'ensemble de ces critères a été considérés, et nous a permis de déterminer qu'une solution de **type stockage gazeux hydrogène à une pression de 350 bar** était la solution répondant aux exigences précédemment citées.

Le dernier critère pourrait l'aspect économique, ce point sera abordé ultérieurement dans le rapport.

5 Caractéristiques techniques de la motorisation

5.1 Gabarit fluvial

5.1.1 Barge

Dans le cadre du projet de Romainville/Bobigny, l'évacuation des flux est prévue vers les exutoires du SYCTOM par voie fluviale préférentiellement.

Les dimensions des barges sont contraintes par le canal de l'Ourcq dont le tirant d'air est de 4,09m maximum.

Les barges devant emprunter le canal de l'Ourcq, les caractéristiques retenues pour celles-ci sont les suivantes

- Type : barge + pousseur
- Barge : ballastable permettant le transport de 24 EVP maximum

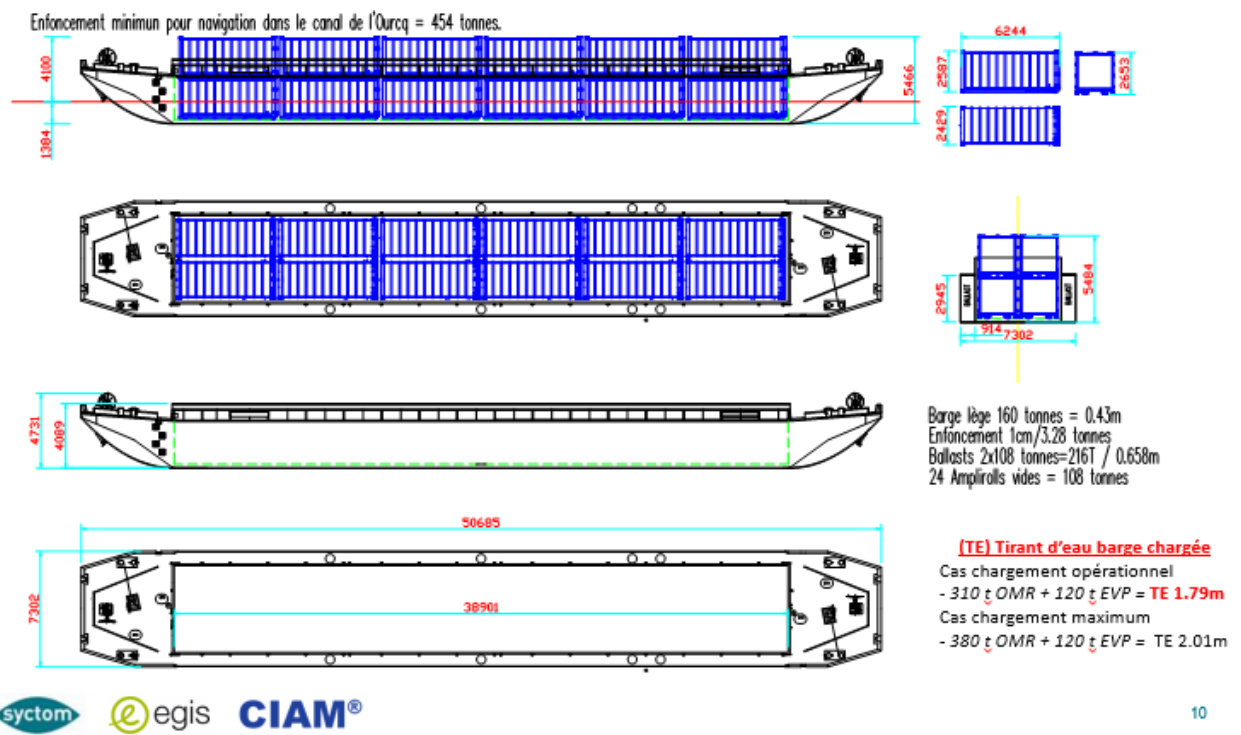


Figure 10 – Plan de la barge

5.1.2 Pousseur Saint-Ouen

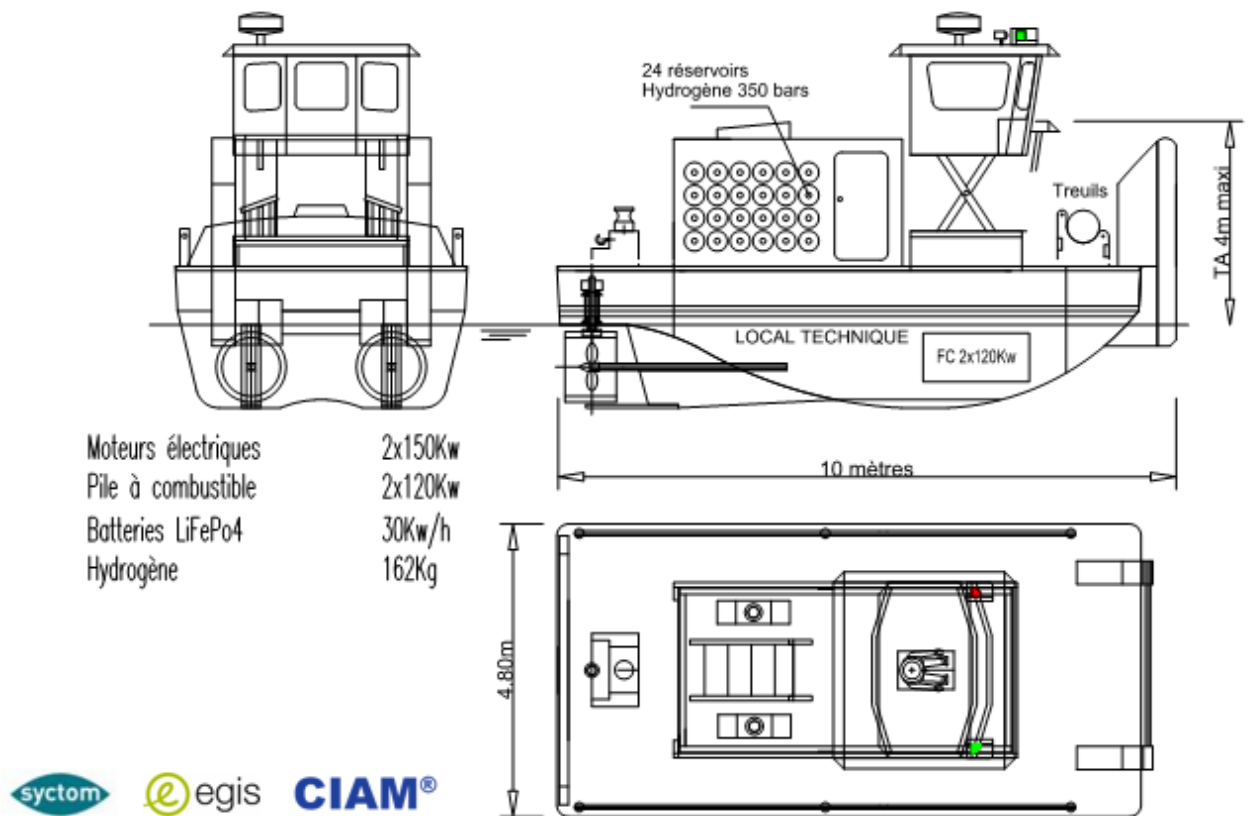


Figure 12 : Plan pousseur de canal

Les caractéristiques retenues pour le pousseur sont les suivantes :

- ☐ Pile à combustible (P nominale) : 2 x 120 kW
- ☐ Besoin journalier : 133 kg H2
- ☐ Stockage H2 : 162 Kg
- ☐ Pression de stockage : 350 bars
- ☐ Nombre de réservoir : 24
- ☐ Énergie H2 embarquée : 5400 kWh
- ☐ Rendement des piles à combustible 0.49
- ☐ Rendement de la chaîne de propulsion 0.47
- ☐ Capacité batterie LiFePo4 30 kWh
- ☐ Boost puissance batterie : 60 kW maxi
- ☐ Consommation H2 horaire : 6.84 kg
- ☐ Puissance moyenne en fonctionnement : 107 kW
- ☐ Puissance maxi en fonctionnement : 300 kW
- ☐ Vitesse nominale de fonctionnement : 6 km/h

5.1.3 Pousseur Seine

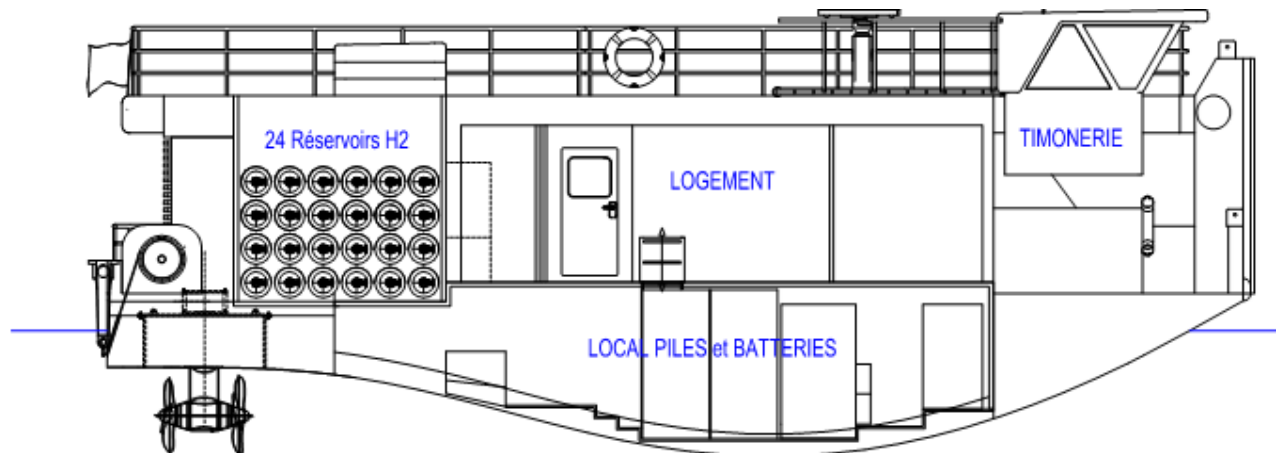


Figure 13 : Plan pousseur de Seine

Les caractéristiques retenues pour le pousseur sont les suivantes :

- ☐ Pile à combustible (P nominale) : 2 x 150 kW
- ☐ Besoin journalier : 153 kg H2
- ☐ Stockage H2 : 162 Kg
- ☐ Pression de stockage : 350 bars
- ☐ Nombre de réservoir : 24
- ☐ Énergie H2 embarquée : 5400 kWh
- ☐ Rendement des piles à combustible : 0.49
- ☐ Rendement de la chaîne de propulsion : 0.47
- ☐ Capacité batterie LiFePo4 : 100 kWh
- ☐ Boost puissance batterie : 200 kW maxi
- ☐ Consommation H2 horaire : 11 kg
- ☐ Puissance moyenne en fonctionnement : 180 kW
- ☐ Puissance maxi en fonctionnement : 500 kW
- ☐ Vitesse nominale de fonctionnement : 12km/h

5.2 Synthèse et planning de construction

Pour permettre au SYCTOM d'anticiper le planning d'acquisition de ces équipements fluviaux et le mettre en cohérence avec le planning de transformation du centre de Romainville-Bobigny, le planning de construction des pousseurs est proposé ci-dessous :

Durée totale de construction pour 2 pousseurs fluviaux avec propulsion
électrique à base de piles à combustible hydrogène = **4 années**

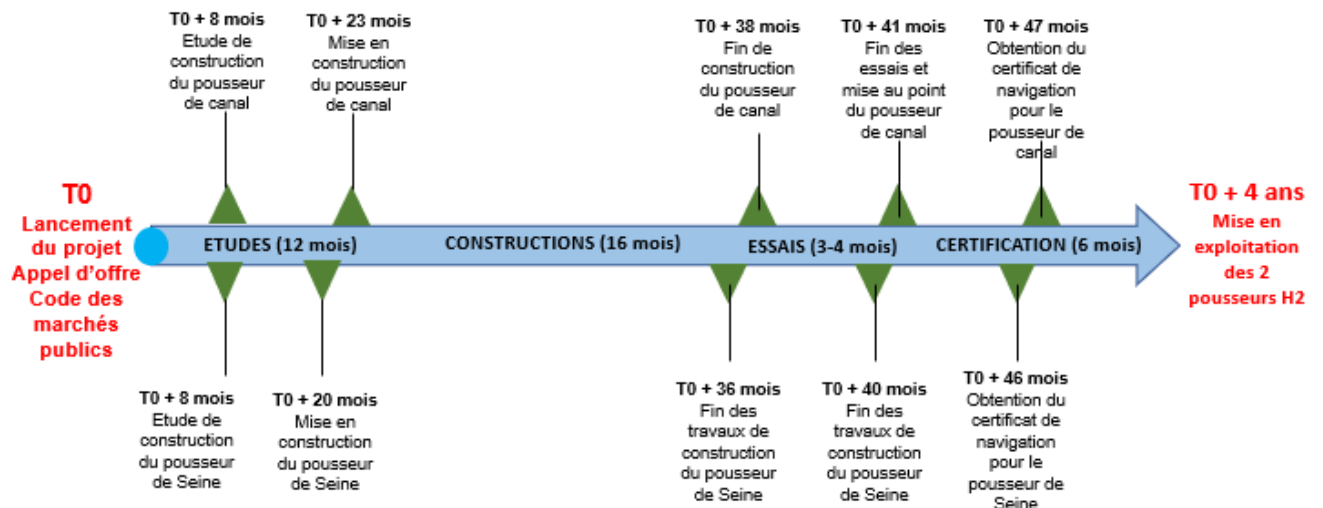


Figure 5 : Planning de construction des pousseurs fluviaux

Durée totale de construction pour 5 barges industrielles 50 x 7 m pour
emport de 24 EVP, adaptées à la navigation sur les canaux = **2 années**

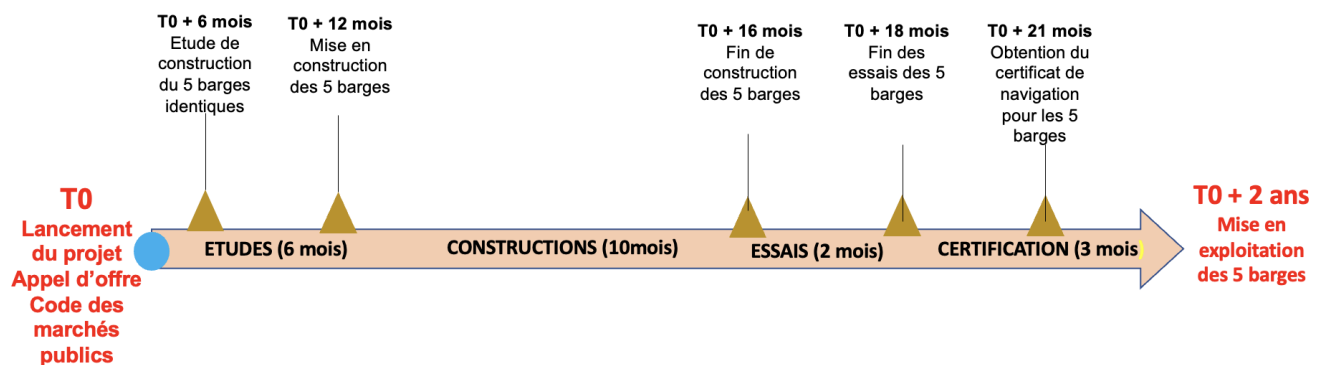


Figure 6 : Planning de construction des barges

La construction des barges peut être effectuée en temps masqué de celle des 2 pousseurs. Ce qui n'augmente pas la durée totale de construction.

6 Contraintes sur le trajet fluvial

6.1 Contraintes et risques liées à la motorisation H2

6.1.1 Navigation

6.1.1.1 Typologie des contraintes

Vis-à-vis des utilisateurs A BORD

La sécurité à bord, tant pour les navigants que pour la navigation repose dès la conception sur les principes fondamentaux suivants :

- Application intégrale des règles dictées par l'ES-TRIN et particulièrement ;
 - Distance de sécurité fond et bordées (B/5) pour l'implantation des systèmes H2 (réservoirs, piles, circuits attenants).
 - Carlingages renforcés, défenses, arrimage mécanique des systèmes pour résister aux chocs et collisions.
 - Suivi et classification du bateau par une société de classe type Bureau Veritas.
- Analyse de risque et solution technique en découlant (détection, valve de sécurité, procédures...)
- Définition et modélisation des zones ATEX : ventilation forcée, détection, alarme...
- Protection et extinction automatique d'incendie, système NOVEC.
- Système de contrôle commande automatiser, automate de sécurité.

- **Analyse de risque**

Pendant la phase de conception, une analyse de risque menée avec toutes les parties prenantes de la construction mais aussi de l'exploitation est menée sous la responsabilité d'une entité réputée dans pour ce type d'exercice. Cette entité peut être le BV Solutions habitué à manager ce type de risque à bord des navires, (GNL par exemple). Cette analyse identifie tous les risques, les causes, les défaillances et permet de définir les moyens ou précautions à mettre en œuvre pour réduire ou supprimer l'effet.

- **ATEX**

La présence d'un gaz inflammable et donc explosible à bord, comme l'est l'hydrogène, impose de définir et de classer les zones où ce gaz peut se disperser ou s'accumuler.

Le classement en zones est utilisé pour déterminer le niveau de sécurité nécessaire pour le matériel installé dans des atmosphères explosives gazeuses (CEI 60079-10). L'objectif du classement en zones d'une installation est double (selon ATEX 1999/92/CE) :

- Préciser les catégories de matériel utilisées dans les zones indiquées, à conditions qu'elles soient adaptées aux gaz, vapeurs ou brouillard et/ou poussières.
- Classer en zones les emplacements dangereux pour éviter les sources d'inflammation et pour effectuer une sélection correcte des matériels électriques et non-électriques. Ces zones seront établies en fonction de la présence d'une atmosphère explosible gazeuse

Vis-à-vis DES AUTRES BATEAUX pendant les phases de navigation

Bien que si par une conception adaptée, la majorité des risques liés à l'hydrogène a une parade intégrée lors de la construction, il n'en reste pas moins qu'en cas de collision avec un autre navire et sous certaines conditions non anticipables et particulièrement aggravantes, la dispersion brutale et rapide d'hydrogène peut avoir comme conséquence une forte explosion et/ou un incendie majeur à bord.

Ce risque n'est pas à totalement exclure.

Un bateau utilisant l'hydrogène comme carburant devrait être facilement identifié par les autres usagers de la voie d'eau. Une signalétique spécifique doit être établie, et pourrait être inscrite dans le règlement général de police (RGP).

6.1.1.2 Contraintes et risques liés à l'utilisation d'hydrogène

Les caractéristiques des mélanges explosifs :

- Une explosion est la « transformation rapide d'un système matériel donnant lieu à une forte émission de gaz, accompagnée d'une émission de chaleur importante ».
- Cette explosion chimique de gaz, s'apparente à une combustion caractérisée par sa violence, et sa soudaineté, qui met en œuvre des réactions chimiques, et des phénomènes dynamiques, créant une expansion rapide des mélanges dans un milieu confiné, ou non.
- L'hydrogène en mélange avec l'air est susceptible d'exploser en s'enflammant sous certaines conditions.
- Une ATmosphère EXplosive (ATEX), est un mélange d'hydrogène avec l'air, dans lequel après que l'inflammation s'est produite, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.
- Les concentrations limites d'inflammabilité constituent les limites du domaine d'explosivité de l'hydrogène (**LIE : 4% - LSE : 75%**)

La température d'auto-inflammation : La température d'auto-inflammation d'un gaz, est la température la plus basse d'une surface chaude

à laquelle, dans des conditions spécifiques, l'inflammation d'une atmosphère explosive peut se produire (400 °C pour l'H₂).

Le point éclair :

- Pour les vapeurs, donc en présence du liquide qui leur donne naissance, le point éclair est déterminé. Ce point est la température minimale à laquelle un mélange de vapeurs, et d'air, peut être enflammé.
- **Dans notre cas, d'usage d'hydrogène gazeux, ce point éclair n'est donc pas applicable** (Définition : vapeur émanant d'un liquide).

6.1.2 Avitaillement

6.1.2.1 Cadre réglementaire

La station d'avitaillement sera une installation classée, couverte par la nomenclature **ICPE 4715 : Hydrogène**. A ce titre, les dispositions suivantes s'appliquent :

- Si la **quantité d'H₂ présente < 100 kg**, il n'y a pas de contrainte administrative
- Si - 100 kg < **quantité présente** < 1000 kg, une déclaration de l'installation devra être prévue.
- Si - 1000 kg > **quantité présente**, une procédure d'autorisation de l'installation devra être effectuée.
- Le dépôt du stockage d'H₂, dédié à la distribution, devra être distant d'au moins 8 mètres :
 - D'un immeuble habité ou occupé par des tiers ;
 - D'un dégagement accessible aux tiers ou d'une voie publique ;
 - D'un bâtiment construit en matériaux combustibles, de tout dépôt de matières combustibles ou comburantes, et de toute activité classée pour risque d'incendie ou d'explosion.
- Cette dernière distance ne sera pas exigible si le dépôt est séparé du bâtiment, du dépôt de matières combustibles ou comburantes ou de l'activité classée par un mur plein sans ouverture, construit en matériaux incombustibles et de caractéristiques coupe-feu deux heures, d'une hauteur minimale de 3 mètres et prolongé du dépôt par un auvent construit en matériaux incombustibles et pare-flamme de degré une heure, d'une largeur minimale de 3 mètres en projection sur un plan horizontal.
- Ce mur devra être prolongé de part et d'autre et du côté du dépôt par des murs de retour sans ouverture, construits en matériaux

incombustibles et coupe-feu de degré une heure d'une hauteur de 3 mètres et d'une largeur de 2 mètres au moins.

- Le dépôt devra être protégé par une enceinte fermée d'une hauteur minimale de 2 mètres totalement ou partiellement grillagée.
- Cette enceinte devra être munie d'une porte au moins, s'ouvrant vers l'extérieur et construite en matériaux incombustibles. Cette porte devra être fermée en dehors des besoins du service et ne pourra être ouverte de l'extérieur que par le préposé responsable à l'aide d'une clef.
- Si l'emplacement du stockage est compris dans le périmètre d'un établissement entièrement clôturé dont l'accès est normalement surveillé, cette clôture peut être supprimée, mais l'emplacement réservé au dépôt doit être délimité. Si la circulation de véhicules est possible aux abords du dépôt, cette délimitation doit être matérialisée au sol (peinture, piquets, etc.).

6.1.2.2 Définition technique de la station

Il n'existe pas à l'heure d'aujourd'hui de référentiel normatif sur les stations d'avitaillement H2 pour les bateaux. Par défaut, les exigences qui s'appliquent sont celles décrites pour les station d'avitaillement H2 pour les véhicules. Les besoins sont rappelés ci-dessous.

Les composants de la station d'avitaillement sont décrits ci-après.

- **La station de distribution doit comprendre :**
 - **Un régulateur de débit.** En fonctionnement normal, celui-ci ajuste le débit en aval pour limiter l'élévation de température dans le réservoir du bateau dans le respect des valeurs spécifiées dans les normes applicables aux véhicules à hydrogène (J2601) ;
 - **Une vanne d'isolement à sécurité positive ;**
 - **Une soupape de sécurité ;**
 - **Un détecteur d'hydrogène** dans la borne de distribution et un système de détection de baisse ou montée anormale de pression entraînant l'un et l'autre l'arrêt automatique d'urgence défini.
- **Le flexible de distribution doit être équipé :**
 - **Des raccords spécifiques**, certifiés, compatibles aux pressions de distribution souhaité, permettant le remplissage des réservoirs des navires ;
 - **D'un système anti-arrachement ;**
 - **De dispositifs** permettant la mise en sécurité **en cas d'arrachement** ou d'éclatement du flexible ;
 - D'une **protection contre l'abrasion** et la formation de plis.

- Par conception, lorsque l'opérateur manipule le flexible lors des phases de connexion, et déconnexion, au navire, le flexible n'est plus sous pression.
- Le flexible est installé de façon à ce qu'il ne touche pas le sol lorsqu'il est connecté au navire.
- Le flexible est changé après toute dégradation et préventivement conformément aux préconisations du fournisseur.

- **Le pistolet, ou connecteur de distribution :**

- Est spécifique à un **débit et une pression donnés** et ne peut se connecter qu'à des réceptacles de véhicules homologués pour recevoir ce débit et cette pression ;
- Est équipé d'un **clapet anti-retour** ou d'un dispositif équivalent empêchant l'entrée d'air ;
- Ne peut pas être déconnecté du navire sans dépressurisation préalable et vidange du flexible.
 - IV - L'interface de commande remplissage est compatible avec le zonage ATEX.
 - V - Le débit de l'hydrogène dans la borne de distribution est limité à la valeur précisée à l'article 2.1 du présent arrêté par au moins un dispositif de limitation de débit (orifice calibré ou autre dispositif) et un second dispositif indépendant de limitation de débit ou de détection de la rupture du flexible mettant en sécurité l'installation conformément à l'article 2.8.
- Ces dispositifs doivent être protégés de toute manipulation externe non autorisée.

6.1.2.3 Dispositions spécifiques de la station d'avitaillement hydrogène

L'interface de commande remplissage doit être compatible avec le zonage ATEX.

Le débit de l'hydrogène dans la borne de distribution doit être limité à la valeur précisée par au moins un dispositif de limitation de débit (orifice calibré ou autre dispositif) et un second dispositif indépendant de limitation de débit ou de détection de la rupture du flexible mettant en sécurité l'installation.

Ces dispositifs doivent être protégés de toute manipulation externe non autorisée.

Un dispositif d'arrêt d'urgence général doit être mis en place pour mettre en sécurité l'ensemble de l'installation en toutes circonstances et de façon automatique, notamment :

- En mettant en sécurité l'équipement de production d'hydrogène ;

- En isolant les stockages principaux et intermédiaires d'hydrogène ;
- En arrêtant l'appareil de distribution par fermeture de la vanne d'isolement ;
- En mettant à l'atmosphère l'hydrogène contenu dans le flexible de distribution ;
- En mettant à l'arrêt l'ensemble du circuit électrique, à l'exception des systèmes d'éclairage de secours nécessaires et non susceptibles de provoquer une explosion, du système d'alarme et du système de communication le cas échéant.

Ce dispositif doit pouvoir être déclenché :

- Manuellement, en étant facilement repérable et pouvant être actionné
 - Depuis l'intérieur de l'aire de stockage ;
 - À proximité de la borne de distribution ;
 - Depuis une zone extérieure à l'aire de stockage, en dehors des zones de danger visées, facilement repérable et facilement accessible en toutes circonstances par les services d'intervention.
- Et automatiquement par les détecteurs d'incendie

L'interface de commande remplissage doit inclure les détecteurs suivants :

- Détecteurs d'incendie ;
- Détecteurs d'hydrogène ;
- Détecteurs de chute de pression et de surpression ;
- Détecteur de rupture de flexible.

En cas de déclenchement de l'arrêt d'urgence :

- Une alarme visuelle est activée ;
- Une alarme sonore est activée lors du déclenchement automatique du dispositif d'arrêt d'urgence (par les détecteurs d'incendie, les détecteurs d'hydrogène et les détecteurs de chute de pression et de surpression) ;
- La personne désignée en charge de la surveillance de l'installation est automatiquement informée ;
- La remise en service de l'installation ne peut se faire qu'après constat de l'absence de risque par l'exploitant.
- Dans le cas d'une installation en libre-service sans personnel sur site, un dispositif de communication permet d'alerter immédiatement et de communiquer avec la personne désignée en charge de la surveillance de l'installation, joignable 24 heures sur 24. Ce dispositif est facilement repérable, accessible depuis l'aire de distribution et en dehors des zones de danger visées.

Le remplissage du réservoir du navire doit être :

- Réalisé uniquement par équilibrage de pression d'hydrogène, sans qu'il soit possible de dépasser la pression et la température maximale admissible du réservoir du navire ;
- Précédé d'un test d'étanchéité du flexible ;
- Réalisé uniquement si les résultats de ce contrôle sont satisfaisants.

La pression, et le débit, doivent être mesurés tout au long du remplissage afin d'éviter toute surpression dans le réservoir du navire. Un dispositif permet l'arrêt automatique du remplissage en cas d'anomalie dans un délai inférieur à 5 secondes.

Tableau 6 – Caractéristiques de la station d'avitaillement à créer dans le cas simple (phase initiale de déploiement)

CARACTERISTIQUES DE LA STATION D'AVITAILLEMENT HYDROGENE SYCTOM PHASE 1	Valeurs
Longueurs des pousseurs à avitailler	10 à 15m
Nombre de pousseur à avitailler dans une journée	2
Intervalle de temps minimum entre 2 avitaillements consécutifs	30 min
Hauteur de franc bord des pousseurs	<0.90m
Pression de stockage retenue	350 b
Pression maxi admissible des réservoirs	500 b
Nombre de réservoirs d'hydrogène à bord (montés en grappe)	24
Masse d'hydrogène maxi par avitaillement par pousseur	153 kg
Nombre de jour d'utilisation de la station par semaine	5
Besoin journalier maxi pour le SYCTOM	306 Kg
Consommation moyenne totale par semaine en cycle moyen d'usage	800 kg
Consommation maxi totale par semaine en cycle d'usage tendu	1430 kg
Besoin annuelle pour l'activité SYCTOM phase 1 (mini/maxi)	40/72 tonnes
Stock tampon mini souhaité en station pour éviter un arrêt d'exploitation	600 kg
Nombre de point de remplissage sur le pousseur	1 seul à bâbord
Type de ravitaillement	pistolet normalisé 350b
Liaison entre quai et pousseur	flexible sur bras pendulaire
Temps d'avitaillement (plein journalier)	43 min /SAE J2601
Contrôle du transfert sous pression, température/ pression	Oui/Oui par mesure RFID - SAE J2799
Liaison communicante entre pousseur et station	Oui (CAN BUS)
Station réfrigérée	Oui (-40°C)
Liaison équipotentielle entre pousseur et station	Oui câble + pince de masse

6.2 Synergies avec les projets en cours de développement sur la Seine

6.2.1 L'hydrogène vecteur d'énergie

L'hydrogène est le vecteur d'énergie de demain. Tout le monde s'accorde sur ce principe. En effet, s'il n'est pas présent sous sa forme la plus simple dans la nature (molécule constituée de 2 atomes : H₂), il est l'élément le plus abondant de l'univers représentant 75% en masse et 92% en nombre d'atomes. Mais surtout, son utilisation dans une pile à combustible (FC) est

propre, ne générant que de l'énergie sous forme d'électricité, de chaleur et de l'eau.

Il peut être produit de plusieurs manières (plus ou moins respectueuses de l'environnement), à partir de matières premières très variées, y compris l'eau. Pour mémoire, un kilo d'eau contient 116 grammes d'H₂, il peut donc être produit presque n'importe où. Sa production par électrolyse à partir du réseau électrique est plus ou moins vertueuse suivant l'origine électrique. En France on s'accorde à dire que le kWh électrique génère entre 50 et 80 g de CO₂ suivant le mixte énergétique mis en œuvre (mixte énergétique = nucléaire + hydroélectricité + éolien + solaire + centrale thermique).

Dans le cas de l'éolien seul (électron vert), le kWh électrique produit ne génère que 10g de CO₂, si l'on intègre tout ce que constitue la fabrication, l'utilisation puis le recyclage de l'éolienne.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est une méthode très écologique (décomposition de la molécule d'eau en H₂ et O₂ par circulation d'un courant électrique) pourvu que l'énergie électrique nécessaire soit elle-même produite écologiquement. Le rendement de l'électrolyse est de l'ordre de 55-60% à ce jour. On pense pouvoir atteindre à terme des rendements de l'ordre de 65-70%. Le coût de production d'hydrogène par électrolyse est donc presque exclusivement lié au coût de l'électricité. A ce jour il faut environ 1.7kWh électrique pour produire 1kWh H₂. Ce processus trouve naturellement sa place en association avec les énergies renouvelables (solaire, éolien) en tant que moyen de stockage de l'électricité sous forme d'H₂. C'est le couplage EnR / H₂.

6.2.2 Les projets sur l'axe Seine

L'hydrogène utilisable en tant qu'énergie propre pour la motorisation des bateaux fluviaux sur l'axe Seine, est très sérieusement envisagé depuis cinq ans, et fait l'objet de plusieurs études pour tous les types de bateaux fluviaux mais aussi maritime. Pour n'aborder que les pousseurs sur la Seine, trois projets plus ou moins avancés sont en cours. Ces projets sont portés par CFT, CEMEX et LAFARGE.

Parallèlement, quelques études ont démarré pour tenter de résoudre l'approvisionnement en bord à quai. Dans le cadre du projet européen H2Ships, HAROPA porte ainsi une étude sur la mise en place de zones d'avitaillement sur la Seine.

L'hydrogène apparaît être, pour le moment, la seule énergie propre, et embarquable, qui puisse satisfaire aux besoins de fortes puissances, mais également en termes d'autonomie nécessaire aux bateaux commerciaux.

Les bateaux fluviaux à passagers, Compagnie des Bateaux Mouches (CBM) et Compagnie des Bateaux Parisiens sont en veilles avancées sur une potentielle migration d'une partie de leur flotte vers la solution verte qu'est l'hydrogène. Seule énergie adaptée pour la puissance et l'autonomie de leurs plus gros bateaux, la batterie étant réservée à des usages moins gourmand en énergie. La CBM s'est lancée la première dans la course avec une étude détaillée de leur projet AIREO présentée devant la CCNR à Strasbourg en 2015. Ce projet a reçu les plus vifs encouragements de la part des autorités nationales présentent à cette commission.

Plus globalement, un écosystème hydrogène est en train de voir le jour autour de l'axe Seine. La flotte de taxis Hype, lancé depuis 2014 avec 40 véhicules pile à combustible hydrogène, vise une augmentation du nombre de ses véhicules à 600 taxis pour 2021. La mairie de Paris a de plus annoncé vouloir que 30 000 taxis, c'est à dire la quasi-intégralité de la flotte parisienne, fonctionnent à l'hydrogène d'ici 2030.

Des projets de camion H2 à usage de toupies à béton ou de transport dernier kilomètre, font actuellement le sujet d'études avancées au niveau des grands groupes du BTP et du transport, une approche identique pour les camions bennes à ordures ménagères peut être pertinentes.

Ces usages imposent de ce fait la mise en place d'un réseau de distribution d'hydrogène avec plusieurs points de recharge répartis de part et d'autre de la Seine.

6.3 Adaptation des quais fluviaux à prévoir

6.3.1 Zones d'attente

La formation de convois groupés et l'utilisation de pousseurs différents pour les deux portions du trajet fluvial nécessite de prévoir des zones d'attentes pour les manœuvres de barge. Ces zones d'attente devront être prévues :

- En sortie de l'écluse de Saint-Denis
- A proximité du quai de Port Victor à Issy-les-Moulineaux

6.3.1.1 Écluse de Saint-Denis

La zone d'attente en sortie de l'écluse de Saint-Denis devra idéalement correspondre à la zone d'avitaillement prévue pour les pousseurs, la sortie de l'écluse de Saint-Denis constituant le seul point commun sur le trajet des deux pousseurs. Les zones identifiées sont décrites dans le §6.3.2.1

6.3.1.2 Issy-les-Moulineaux

Le linéaire de quai au niveau du quai d'Issy-les-Moulineaux (Port Victor) est très réduit. Les manœuvres de pousseur qui permettront de désaccoupler les deux barges ne pourront donc pas être prévues sur ce quai.

Le quai à usage partagé du Point du Jour, situé en face du quai de Port Victor peut constituer une bonne option pour effectuer ces manœuvres.



Figure 7 : Zone d'attente potentielle des barges à proximité du quai prévu pour les opérations du SYCTOM

6.3.2 Avitaillement

6.3.2.1 Sur la Seine

Dans le cadre du projet H2Ships, un WP est dédié à l'étude de la mise en œuvre de zones d'avitaillement sur le bassin de la Seine. Cette étude est dirigée par HAROPA. L'objectif de la présente mission n'étant pas de se substituer à cette étude, nous nous sommes rapprochés de HAROPA pour vérifier les zones disponibles en sortie de l'écluse et leur adéquation avec les besoins du projet :



Figure 14 : Analyse des quais fluviaux disponibles pour l'avitaillement H2 et l'échange des pousseurs à proximité de l'écluse de Saint-Denis

L'analyse de la compatibilité des sites identifiés avec le projet est la suivante :

- Le site d'Argenteuil a été écarté car trop éloigné du trajet fluvial.
- Le site d'Epinay-sur-Seine, bien que situé légèrement en aval de l'écluse de Saint-Denis constitue l'option préférentielle puisque sa proximité avec l'écluse de Saint-Denis permettrait d'avitailler les deux pousseurs.
- Dans le cas où ce site ne serait finalement pas sélectionné, les quais de Saint-Ouen et de Saint-Denis pourraient être envisagés pour réaliser l'avitaillement du pousseur de Seine. Ils sont néanmoins trop éloignés de l'écluse de Saint-Denis pour que le pousseur de l'Ourcq se ravitaile sur ces quais. Si ces quais sont in fine sélectionnés, un avitaillement alternatif devra être prévu sur le canal de l'Ourcq.

6.3.2.2 Sur le Canal de l'Ourcq

Pour anticiper les éventuelles difficultés d'avitaillement du pousseur de Canal au niveau de l'écluse de Saint-Denis (si in fine une autre localisation sur l'axe de la Seine est sélectionnée par HAROPA), nous avons analysé la faisabilité d'installer une station d'avitaillement sur l'Ourcq.

A) Station installée sur la plateforme de Romainville/Bobigny

Plusieurs facteurs ne **permettent pas** de valider l'installation d'une station H2 sur la plateforme fluviale :

- **L'ouverture au public du chemin de halage** ne permet pas de respecter les normes de sécurité
- Le **déport important entre la plateforme et le quai** imposent la présence de 2 opérateurs pendant les opérations avitaillement (un à quai et un au niveau de la station)

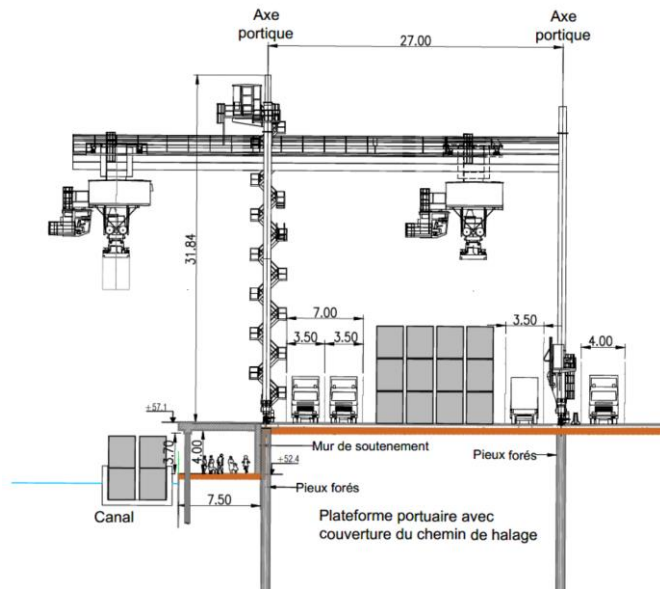


Figure 15 : Coupe transversale plateforme Romainville/Bobigny

- **L'espace disponible** sur la plateforme portuaire ne permet pas d'implanter une station H2 : l'espace disponible est situé à la droite de la plateforme dans la zone où l'accostage des barges est interdit, ce qui n'est pas propice à l'avitaillement H2.

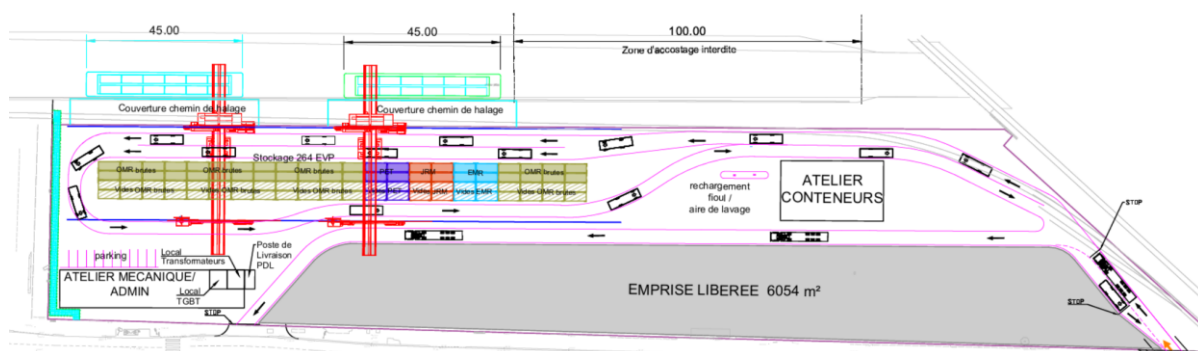


Figure 16 : Vue en plan plateforme Romainville/Bobigny

B) Recherche d'emplacements adaptés

Nous avons étudié les surfaces disponibles à proximité de la plateforme de Romainville/Bobigny. Quatre quais fluviaux sont identifiés comme potentiellement adaptés à recevoir une station d'avitaillement H2.

- Pavillon-sous-bois
- Bondy (Décathlon)
- Bondy (Conforama)
- Pantin (Paris-plage)

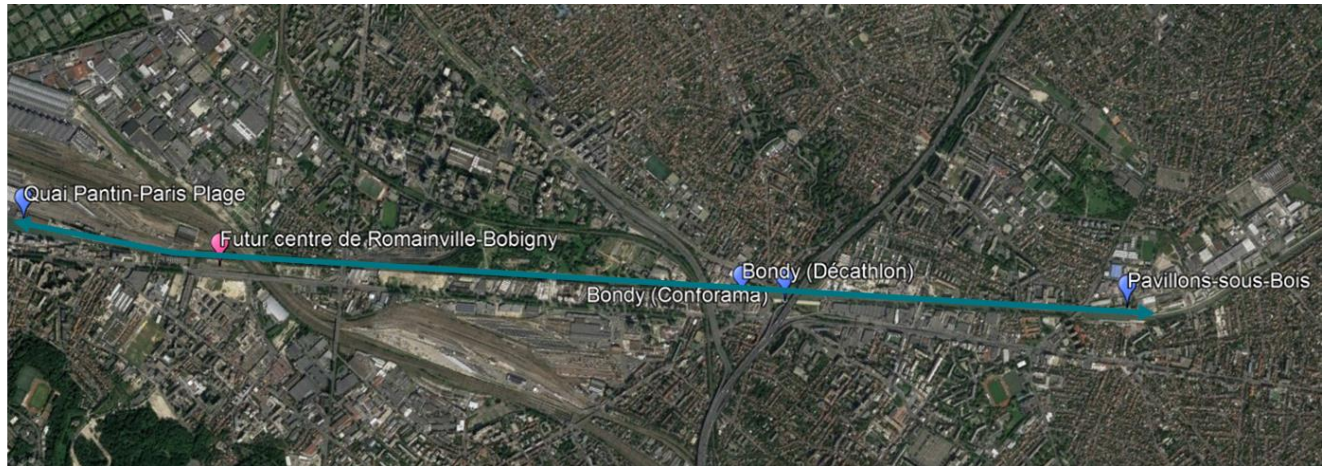


Figure 17 : Quais fluviaux potentiels identifiés sur le canal de l'Ourcq

Tableau 7 - Caractéristiques des quais fluviaux identifiés sur le Canal de l'Ourcq

	Pavillons-sous-Bois	Bondy (Décathlon)	Bondy (Conforama)	Pantin Paris-Plage
Distance à plateforme Romainville	5.4 km	2.85 km	2.6 km	1.05 km
Accessibilité camion	Aisée	Possible mais circulation	Possible mais circulation	Contraint (impasse)
Accessibilité public	Ouvert au public (fermeture temporaire possible)	Ouvert au public	Fermeture du site possible	Ouvert (piéton + cyclistes)

Le site de Pantin Paris-Plage étant le seul situé sur le trajet fluvial de la barge, nous recommandons l'étude de ce site si un avitaillement H2 doit être réfléchi sur le canal de l'Ourcq.

7 Analyse réglementaire pour la mise en œuvre de motorisation H2.

7.1 Navigation

7.1.1 Classification

Il n'est pas d'usage de faire classer les pousseurs fluviaux par un organisme de classification comme le Bureau Veritas (BV).

Dans le cadre d'une construction innovante, comme pourraient l'être ces pousseurs, et comme à l'heure de la rédaction de ce rapport, aucune réglementation fluviale (ou maritime) ne décrit correctement, et totalement, ce que doit être une telle étude.

La collaboration avec une société de classification est obligatoire pour faire aboutir favorablement ce projet, et ainsi obtenir, à terme, une certification pour naviguer, de type Certificat de l'Union.

Le BV a publié un ensemble de préconisations pour la mise en œuvre et l'utilisation d'hydrogène à bord des navires.

Le pousseur devra être classé, par le Bureau Veritas, ou un autre organisme équivalent.

7.1.2 Procès réglementaire

Les principales actions des différents intervenants dans le processus réglementaire sont les suivantes :

- **Objectif** : délivrance du permis de navigation par l'autorité du pavillon **DRIEA** (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement).
- Les **règles de construction applicables pour les bateaux fluviaux** sont les suivantes:
 - **Conformité Arrêté du 5 novembre 2018** relatif aux prescriptions techniques de sécurité applicables aux bateaux de marchandises, aux bateaux à passagers et aux engins flottants naviguant ou stationnant sur les eaux intérieures

- **RVBR pour les bateaux de fret ou à passagers** relevant de ces zones de navigation et des dimension exposées à l'article 1.02 « champs d'application »
- **Conformité à l'ES-TRIN** (European Standard laying down Technical Requirement for Inland Navigation), **désormais c'est l'ES-TRIN qui constitue le corpus technique de la RVBR** (Règlement de Visite des Bateaux du Rhin) **en tant que texte de référence article 1.03 de la RVBR, c'est donc juridiquement la RVBR qui s'applique).**
- Le pousseur hydrogène étant un projet innovant non couvert par les précédentes règles de construction, **les conséquences de « L'Alternative Design » sur le cadre réglementaire** sont les suivantes :
 - Dans la RVBR, il existe une non-conformité des installation machines utilisant des combustibles avec un point éclair inférieur à 55°C. Mais l'innovation est toujours permise sous « Alternative Design ». Néanmoins, elle nécessite la compétence d'une société de classification non réclamée habituellement pour les constructions fluviales conventionnelles utilisant du gazole.
 - De fait, une **démarche d'homologation des sociétés de classification sous la supervision des autorités du pavillon et de la CCNR** (Commission Centrale pour la Navigation du Rhin) devra être prévue pour les pousseurs.
 - **En tant que « navire spécial » la délivrance du titre de navigation sera restreinte pour une zone de navigation définie** mais qui peut être étendue (ex. : Romainville – Bobigny, Seine aval ou Seine amont, etc.)
- Le **rôle de la société de classification** sera le suivant :
 - Suivi de la construction, vérification continue de la conformité à la classe et à la RVBR (ES-TRIN) avec échanges sur les recommandations de la CCNR.
- **Les autorités compétentes DRIEA** : délivrent à l'issue de la construction, le certificat de l'union autorisant l'utilisation du pousseur en navigation.

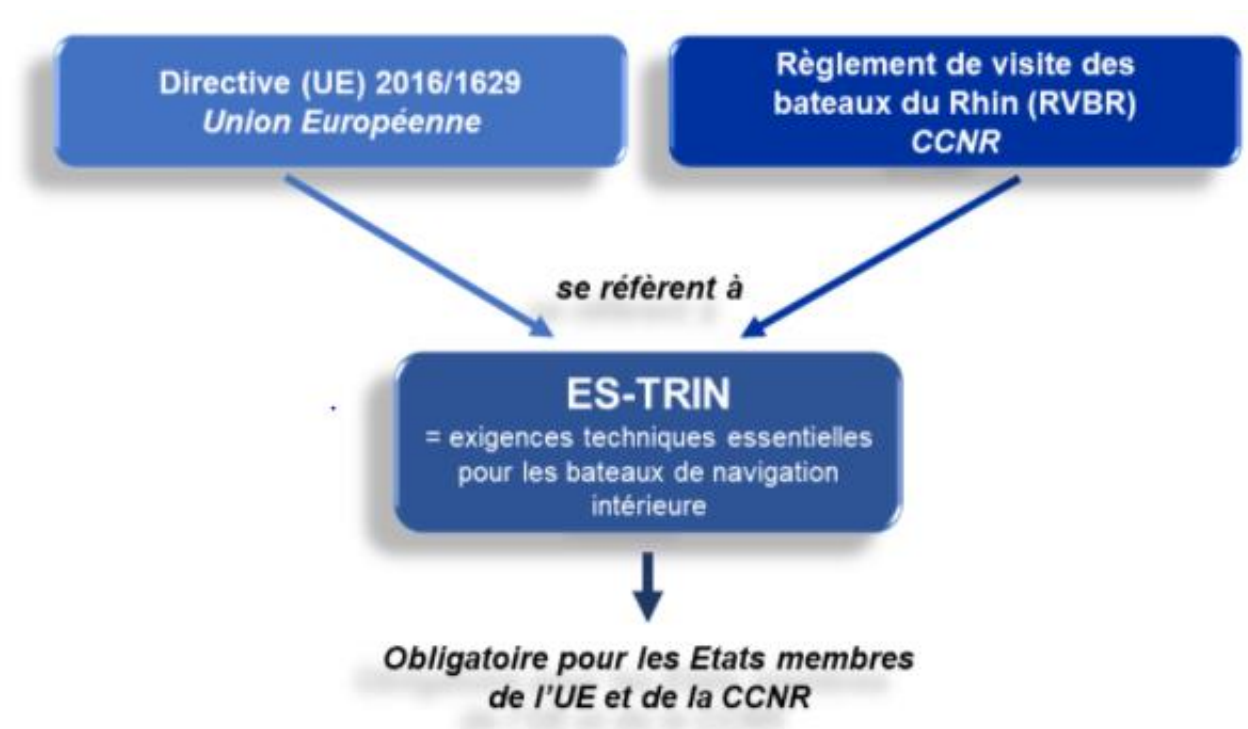


Figure 8 – Synthèses des réglementations applicables pour la construction fluviale

7.2 Avitaillement

7.2.1 Prescriptions générales sur les stations hydrogène

Il n'existe pas à l'heure d'aujourd'hui de référentiel normatif sur les stations d'avitaillement H2 pour les bateaux. Par défaut, les exigences qui s'appliquent sont celles décrites pour les stations d'avitaillement H2 pour les véhicules. Les besoins sont rappelés ci-dessous.

Deux textes de même date ont introduit une réglementation des stations hydrogène. Le décret n° 2018-900 du 22 octobre 2018 a créé une rubrique 1416 « Stockage ou emploi d'hydrogène » dans la nomenclature des installations classées (ICPE – décrit dans la phase 2).

L'arrêté du 22 octobre 2018 prévoit la réglementation applicable depuis le 1er janvier 2019. L'arrêté vise les stations, ouvertes ou non au public, qui produisent plus de 2 kg d'hydrogène par jour et où l'hydrogène est transféré dans les réservoirs de véhicules. Le texte fixe les règles relatives à la mise en conformité des stations à hydrogène, à l'exploitation des installations, à la sécurité, et à la gestion de l'eau, des déchets, et du bruit.

L'arrêté du 22 octobre 2018 est plus explicitement relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 1416 (station de distribution d'hydrogène gazeux) de la nomenclature des installations classées et modifiant l'arrêté du 26 novembre 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations mettant en œuvre l'hydrogène gazeux dans une installation classée pour la protection de l'environnement pour alimenter des « produits » à hydrogène gazeux lorsque la quantité d'hydrogène présente au sein de l'établissement relève du régime de la déclaration pour la rubrique n° 4715 et modifiant l'arrêté du 4 août 2014 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 4802.

7.2.2 Phase d'avitaillement proprement dite du bateau

La NR 529 (Gas Fuelled Ships) expose les différents points de vigilances devant être considérés sur le bateau et identifie les documents à produire relatifs à ces exigences.

La NI547 (Risk Based Qualification of New Technology Methodological Guidelines), s'applique aux installations de systèmes de piles à combustible dans les navires utilisant un gaz comme carburant et l'oxygène de l'air ambiant comme oxydant. Le gaz peut être stocké dans un gaz comprimé état ou état liquide.

Et enfin, le risque d'explosion doit également être identifié par la définition de zones à risques (**zonage ATEX**), afin d'évaluer le risque, et ainsi définir et formaliser des mesures adaptées.

7.2.2.1 Composants de la station hydrogène

Une station de recharge hydrogène se compose de trois éléments : une aire de stockage de l'hydrogène, une zone de compression et de stockage tampon, et un espace de distribution.

➤ Aire de stockage

A l'heure actuelle, en France, l'hydrogène est produit de manière centralisée sur moins d'une dizaine de site. Pour sa distribution sur les lieux d'usage, l'hydrogène est stocké à basse pression (200 bars) dans des bouteilles ou tube trailers et transporté par camion. Dans la majorité des cas, l'approvisionnement des stations en hydrogène s'effectue par cadres de bouteilles entreposés sur le site.

Pour certaines stations, l'hydrogène est produit sur place au moyen d'un électrolyseur, par électrolyse de l'eau.

➤ **Zone de compression et de stockage tampon**

Les différents modèles de véhicules hydrogène disponibles sur le marché sont équipés de réservoirs d'hydrogène de 350 ou 700 bars. Les stations de recharge doivent donc être en mesure de distribuer l'hydrogène à 350 bars et/ou 700 bars. L'hydrogène livré à 200 bars est pour cela monté en pression par un compresseur puis stocké dans des bouteilles appelées "buffer".

➤ **Espace de distribution**

L'espace de distribution est équipé d'un flexible, d'un pistolet et d'un écran de contrôle. Dans certains cas, le véhicule devra être raccordé à la terre, ensuite, l'opération consiste à raccorder le pistolet au véhicule. Une fois le raccordement effectué, le remplissage du réservoir est géré par l'automate de la station.

Pour effectuer le remplissage, l'opérateur connecte puis verrouille le pistolet de la station sur le réservoir du véhicule avant de lancer la procédure de remplissage.

C'est l'automate de la station qui gère la vitesse de remplissage selon les protocoles de la norme SAE J2601. Ces protocoles de remplissage ont été définis afin de contrôler les phénomènes physiques liés au transfert rapide de gaz sous pression (échauffement du gaz susceptible d'endommager le liner interne du réservoir).

Pendant le remplissage, la pile est à l'arrêt. Le remplissage s'arrête automatiquement et un signal indique à l'opérateur qu'il peut déverrouiller la vanne. Plusieurs niveaux de stockage au niveau de la station sont prévus dont les pressions vont en augmentant :

- Un premier stockage basse pression (quelques dizaines de bar) : correspond à 1 ou 2 jours de consommation en vue de gérer les aléas éventuels de la production et garantir le service
- Un deuxième stockage moyenne pression (typiquement 420 bars) : pression intermédiaire La gestion de cette chaîne de compression doit permettre de garantir que de l'hydrogène sera toujours disponible au niveau de la station et que celle-ci pourra assurer la recharge de plusieurs véhicules successifs en respectant des délais de remplissage, spécifiés dans le cahier des charges de la station.

7.2.2.2 Optimisation logistique au cas par cas

Il n'y a pas de chaîne d'approvisionnement « type » pour l'hydrogène.

Pour chaque situation, la détermination de la chaîne depuis la production de l'hydrogène jusqu'à sa consommation dépend du contexte et de l'environnement.

Les choix résulteront d'une analyse d'optimisation globale tenant compte de paramètres à la fois logistiques, techniques et économiques.

Une analyse de TCO (Total Cost of Ownership, ou coût total de possession) permet de déterminer, selon les objectifs de rentabilité visés sur une durée choisie, quel est le modèle à privilégier et les moyens financiers à mettre en œuvre (CAPEX, OPEX).

L'aspect réglementaire est également à prendre en compte, puisqu'il peut influencer les délais et coûts de réalisation (ICPE4715).

7.3 Cas type préconisé pour le projet : Implantation d'une station de distribution hydrogène (20m² – 300 kg/j)

7.3.1 Règlementation applicable

Plusieurs réglementations sont à prendre en compte pour l'implantation d'une station de distribution d'hydrogène :

- Le respect des règles locales de construction ;
- L'application des règles de sécurité liées à la présence d'hydrogène sur le site ;
- La certification de conformité des équipements de la station et du service rendu aux véhicules.

7.3.1.1 Règles locales de construction

L'installation d'une station nécessite un permis de construire et des aménagements de génie civil tels que :

- Une zone bitumée stabilisée ou des plots béton pour déployer la station ;
- Des accès par rapport à la voirie si le terrain n'est pas aménagé au préalable ;
- Éventuellement un grillage ou des murs lorsque la partie stockage nécessite d'être isolée du public.

Tous ces éléments requièrent un permis de construire.

Le PLU peut également imposer des aménagements supplémentaires particuliers

7.3.1.2 Règles de sécurité liées à l'hydrogène

Les stations de recharge en hydrogène font partie des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

À ce titre, elles sont concernées par plusieurs rubriques spécifiques :

- Rubrique 4715 pour le stockage ;
- Rubrique 1416 spécifique aux stations de distribution d'hydrogène gazeux.

Le respect de la réglementation précédemment citée impose :

- Des distances de sécurité entre la station et les limites de propriété variables en fonction de la quantité stockée et/ou des débits de fuite maximum. Ces distances peuvent être réduites si une paroi répondant à des contraintes spécifiques est installée ;
- Des distances de sécurité entre la station et les autres énergie stockées ou distribuées sur site (ex. essence ou électricité) ;
- Selon la quantité stockée, la réalisation d'une déclaration ou l'obtention d'une autorisation auprès de la DREAL : en l'état actuel de la réglementation, le stockage de plus d'une tonne d'hydrogène requiert une autorisation ;
- La mise en place d'éléments de sécurité tels que :
 - des détecteurs à hydrogène et incendie dans les locaux fermés ;
 - un évent (canal d'aération) de dégazage ;
 - au moins un accès pour permettre à tout moment l'intervention des services d'incendie et de secours.

Il convient pour chaque projet de se rapprocher de la DREAL locale pour une première présentation générale expliquant le projet d'implantation, avec :

- Un plan de masse ;
- Le mode d'approvisionnement de la station et l'éventuelle capacité de production sur site par électrolyse, en précisant les quantités d'eau qui seront consommées ;
- Les quantités stockées sur place ;
- Les types d'usages concernés par le site de distribution ;
- Les perspectives éventuelles de développement du site.

En fonction de cette présentation, la DREAL indiquera si une procédure ICPE de simple déclaration ou d'autorisation devra être engagée.

Il faut avoir à l'esprit qu'outre la réglementation spécifique en vigueur pour les installations hydrogène, la DREAL prendra en compte les facteurs locaux

spécifiques, notamment du point de vue de l'impact environnemental, et des diverses installations et activités existant déjà dans le périmètre de proximité.

Le site doit comporter un certain nombre d'éléments de sécurité (signalétique, gestion éventuelle des accès, caméras) et de communication (alarmes, indicateur de fonctionnement ou d'arrêt d'urgence...). Des moyens de surveillance des alarmes et une maintenance doivent être mis en place.

Cette liste ne contient que les principales recommandations et il est obligatoire pour l'installateur et l'exploitant de se référer aux décrets en vigueur disponibles sur le site de la DREAL.

Enfin un plan de prévention des risques (PPR) peut conduire à appliquer d'autres règles (urbanisme, environnement).

7.4 Certification de conformité des équipements

Les fabricants d'équipements doivent démontrer qu'ils disposent du marquage CE conformément à :

- La Directive européenne DESP 2014/68/UE concernant les équipements sous pression (DESP), pour les équipements fixes.
- La Directive européenne 2010/35/EU relative au transport de matière dangereuses et équipements sous pression, pour les équipements mobiles.
- La Directive machine 2006/42/CE.

Les fabricants d'équipements doivent également donner la définition du zonage ATEX (Atmosphère Explosive) de la station qui va permettre de construire le document relatif à la prévention contre les explosions (DRCPE), document à faire certifier par un bureau de contrôle. Selon le type de véhicules ravitaillés, les équipements doivent respecter les normes de remplissage SAEJ suivantes :

- 2601 pour les véhicules légers. Cette norme distingue les remplissages 350 bar et 700 bars ;
- 2601/T40 classiquement pour les véhicules 700 bar : cela inclut un refroidissement de l'hydrogène à -20°C pour accélérer le temps de remplissage ;
- 2601-2 pour le remplissage des véhicules lourds à 350 bars avec un débit plus important que pour les véhicules légers.

Ces normes SAEJ correspondent à un référentiel normatif pour les véhicules terrestres. En l'absence d'une norme spécifique pour les barges, c'est celle-ci qui s'applique aussi pour le transport fluvial.

7.5 Réalisation, installation et exploitation de la station

7.5.1 Étude d'implantation

L'étude d'implantation détaillée peut être réalisée en amont de la consultation, potentiellement avec l'aide de bureaux d'études spécialisés, ou en aval en partenariat avec le fournisseur de la station.

L'étude visa à définir les éléments suivants :

- Empreinte au sol de la future station et des interactions avec l'environnement (distance aux limites de propriété, interactions avec les autres activités sur le site, interactions potentielles avec le passage de véhicules et de piétons...) ;
- Empreinte au sol éventuelle pour de futurs équipements (ex. ajout d'un électrolyseur pour une production d'hydrogène sur site, augmentation de taille de la station pour répondre à la croissance de la demande, mise en place de recharge d'autres énergies sur le site...) ;
- Emplacement final sur la parcelle en fonction des contraintes d'accès, de voisinage, de sécurité et réglementaires (voir ICPE) ;
- Accès des fournisseurs (H2 livré), des clients, et zones de manœuvre. À noter que le PLU local peut imposer des circulations particulières de la logistique hydrogène ;
- Procédure d'intervention des services de sécurité (SDIS) en cas de besoin ;
- Besoin en génie civil :
 - Pour les accès et les manœuvres sur site
 - Pour la station :
 - Dalle de béton si éléments séparés, ou simples plots dans le cas de stations containerisées ;
 - Plots de sécurité anticollision avec les véhicules ;
 - Murs éventuels ;
 - Grillage éventuel ;
 - Auvent.
- Besoins en électricité (par exemple haute tension si électrolyse sur site ou tension normale si juste pour éclairage et alimentation des automates), évaluation du besoin éventuel d'un poste électrique dédié ;
- Cartographie : zone d'installation, localisation des équipements et caractéristiques des raccordements, réseau incendie, équipements

annexes (déminéraliseur, poste transformateur/redresseur), zonage ATEX.

7.5.2 Réalisation et installation

Cette phase comprend la construction sur site, l'installation et la mise en service de la station. Si le maître d'ouvrage n'a pas de compétences techniques idoines ou s'il souhaite déléguer le suivi de la réalisation de la station, il peut être pertinent de choisir un assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO).

L'AMO a pour mission d'aider le maître d'ouvrage à définir, piloter et exploiter le projet. Il a un rôle de conseil et/ou d'assistance, et de proposition, le décideur restant le maître d'ouvrage.

- Les grandes étapes de la réalisation comprennent :
- Les travaux de génie civil ;
- Les travaux de raccordements et la mise en place des contrats d'approvisionnement dédiés ;
- La livraison de la station déjà montée (pour les plus petites) ou son montage sur site ;
- La mise en place des équipements de sécurité et la signalétique ;
- La mise en service de la station (réalisée par le fournisseur) ;
- La visite finale du site avec les services de sécurité (SDIS) ;
- La réception de la station avec un remplissage témoin de véhicule.

Le fournisseur de la station doit autant que faire se peut réaliser le maximum de tests de validation hors site, c'est à-dire avant expédition et installation.

De la même façon que pour les rôles et responsabilités doivent être clairement définis pour la phase de réalisation entre les différentes prestataires (génie civil, station, raccordements...).

Le maître d'ouvrage doit nommer un responsable de projet en charge de coordonner l'ensemble des parties et des sujets. Les restrictions éventuelles d'accès ou de jours ouvrables doivent être prises en compte dans le calcul du délai de réalisation.

Le fournisseur de la station doit suivre attentivement l'avancée des travaux afin de vérifier que le génie civil, les raccordements et les intrants correspondent bien aux besoins de ses équipements.

La réalisation du site et l'installation de la station doivent être planifiés au maximum en parallèle afin d'éviter des délais très importants entre les tâches. Si les travaux empêchent le bon déroulement d'une activité économique préexistante sur le site, il peut être utile de prévoir des compensations financières pour éviter un conflit risquant d'entraîner des retards.

8 Analyses financières

8.1 CAPEX

8.1.1 CAPEX cas simple – Un seul exutoire

8.1.1.1 Flotte

1. ESTIMATION COUT D'ACQUISITION FLOTTE FLUVIALE SYCTOM		CAS BASE (Phase 1)	
N°	désignation	Cout HT	durée
1	Etude détaillée de construction		20 mois
	définition de construction du pousseur 10m destiné à naviguer sur les canaux	175 000 €	
	définition de construction du pousseur 15m destiné à naviguer sur la Seine	225 000 €	
	définition des parties communes (mutualisation conception des systèmes FC H2 Li mot)	290 000 €	
	définition de construction d'une barge à conteneur	80 000 €	
	Sous total Etudes	770 000 €	
2	Construction du pousseur 10m destiné à naviguer sur les canaux (N°1)		18 mois
	coque et superstructure	900 000 €	
	timonerie élévatrice	175 000 €	
	système batterie 60kWh Boost Lithium et chargeurs	49 000 €	
	motorisation électrique et contrôle commande	180 000 €	
	divers équipements techniques et appareils	135 000 €	
	piles à combustible 2x120kW et systèmes associés	350 000,00 €	
	avitaillement, stockage 24 réservoirs H2 et distribution	200 000,00 €	
	homologation du pousseur 10m en version H2	75 000,00 €	
	Sous total Pousseur 10m canaux (N°1)	2 064 000,00 €	
3	Construction du pousseur 15m destiné à naviguer sur la Seine		18 mois
	coque et superstructure, logement	1 100 000 €	
	timonerie élévatrice	200 000 €	
	système batterie 100kWh Boost Lithium et chargeurs	95 000 €	
	motorisation électrique et contrôle commande	230 000 €	
	divers équipements techniques et appareils	155 000 €	
	piles à combustible 2x150kW et systèmes associés	435 000,00 €	
	avitaillement, stockage 24 réservoirs H2 et distribution	200 000,00 €	
	homologation du pousseur 15m en version H2	75 000,00 €	
	Sous total Pousseur 15m Seine	2 490 000,00 €	
4	Construction de 5 barges à conteneurs		24 mois
	coque	680 000 €	
	équipements techniques (pompes, treuils, etc)	150 000 €	
	certificat navigation	15 000 €	
	sous total 1 barge	845 000 €	
	Sous total 5 barges identiques fabriquées en même temps	4 225 000,00 €	
	TOTAL ACQUISITION FLOTTE Cas Base	9 549 000,00 €	

8.1.1.2 Infrastructure

2. COUT D'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES TERRESTRES		CAS SIMPLE	
N°	désignation	Cout HT	durée
1	Etude détaillée		20 mois
	<i>Etudes (AVP-PRO-DCE)</i>	568 500 €	
	<i>Etude d'impact environnementale, de faisabilité et d'ingénierie</i>	1 000 000 €	
	<i>Supervision des travaux (DET/VISA/AOR)</i>	227 400 €	
	Sous total Etudes	1 795 900 €	
2	Construction d'une station d'avitaillement H2 en sortie de l'écluse de Saint-Denis		18 mois
	<i>AOT sur le domaine fluvial</i>	20 000 €	
	<i>Station d'avitaillement</i>	1 800 000 €	
	<i>Travaux de génie civil et d'aménagements (dalle béton, clorure, mur pare feu etc)</i>	100 000 €	
	Sous total avitaillement Seine	1 920 000,00 €	
3	Adaption du quai Port Victor pour la réception de déchets fluviaux (voir étude spécifique)		10 mois
	<i>CAPEX adaptation du quai + équipement</i>	781 000 €	
	Sous total adaptation quais	781 000,00 €	
4	Investissement connexes		10 mois
	<i>Installation bornes eau/élec 63A à 125 A sur chaque plateforme portuaire (3 au total)</i>	15 000 €	
	<i>Raccordement aux réseaux AEP et électricité terrestres (forfait)</i>	75 000 €	
	<i>Installation d'un duc d'albe (port Victor)</i>	50 000 €	
	<i>Installation d'un bollard complémentaire (port Victor)</i>	1 500 €	
	Sous total Investissements connexes	141 500,00 €	
	TOTAL ADAPTATION DES INFRASTRUCUTRES TERRESTRES	4 638 400,00 €	

8.1.2 Option : avitaillement dédié au SYCTOM

OPTION - INFRASTRUCTURE TERRESTRES COMPLEMENTAIRES		CAS DE BASE	
N°	désignation	Cout HT	durée Jours
3	Construction d'une station d'avitaillement H2 dédiée au SYCTOM		18 mois
	<i>AOT sur le domaine fluvial</i>	20 000 €	
	<i>Etude d'impact environnementale, de faisabilité et d'ingénierie</i>	750 000 €	
	<i>Station d'avitaillement</i>	1 800 000 €	
	<i>Travaux de génie civil (dalle)</i>	20 000 €	
	Sous total station avitaillement dédiée	2 590 000,00 €	

8.1.3 CAPEX cas multiple – 3 exutoires

8.1.3.1 Flotte

1. ESTIMATION COUT D'ACQUISITION FLOTTE FLUVIALE SYCTOM		CAS MULTIPLE (Phase 2)	
N°	désignation	Cout HT	durée
1	Reprise d'étude détaillée de construction		8 mois
	<i>reprise plans construction du pousseur 10m destiné à naviguer sur les canaux</i>	80 000 €	
	<i>reprise étude des parties communes (vérification évolution des systèmes FC H2 Li mot)</i>	100 000 €	
	<i>reprise dossier construction barge</i>	30 000 €	
	Sous total Etudes	210 000 €	
2	Construction du pousseur 10m destiné à naviguer sur les canaux (N°2)		12 mois
	<i>coque et superstructure</i>	900 000 €	
	<i>timonerie élévatrice</i>	175 000 €	
	<i>système batterie 60kWh Boost Lithium et chargeurs</i>	49 000 €	
	<i>motorisation électrique et contrôle commande</i>	180 000 €	
	<i>divers équipements techniques et appareils</i>	135 000 €	
	<i>piles à combustible 2x120kW et systèmes associés</i>	350 000 €	
	<i>avitaillement, stockage 24 réservoirs H2 et distribution</i>	200 000 €	
	<i>homologation du pousseur en version H2</i>	75 000 €	
	Sous total Pousseur 10m canaux (N°1)	2 064 000 €	
3	Construction de 3 barges à conteneurs		24 mois
	<i>coque</i>	680 000 €	
	<i>équipements techniques (pompes, treuils, etc)</i>	150 000 €	
	<i>homologation</i>	15 000 €	
	<i>sous total 1 barge</i>	845 000 €	
	Sous total 3 barge identiques fabriquées en même temps	2 535 000 €	
	TOTAL ACQUISITION CAS EXUTOIRES MULTIPLES	4 809 000 €	

8.1.3.2 Infrastructure

2. ESTIMATION COUT D'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES TERRESTRES		CAS MULTIPLE (Phase 2)	
N°	désignation	Cout HT	durée
1	Etude détaillée		20 mois
	<i>Etudes (AVP-PRO-DCE)</i>	961 000 €	
	<i>Supervision des travaux (DET/VISA/AOR)</i>	384 400 €	
	Sous total Etudes	1 345 400 €	
2	Construction d'une station d'avitaillement H2 en sortie de l'écluse de Saint-Denis		
	<i>AOT sur le domaine fluvial</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Stockage</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Stockage tampon</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Système de distribution</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Homologation station ?</i>	NA (inclus cas simple)	
	Sous total avitaillement Seine	0 €	
3	Construction d'une station d'avitaillement H2 au niveau du quai de Romainville-Bobigny		
	<i>Stockage</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Stockage tampon</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Système de distribution</i>	NA (inclus cas simple)	
	<i>Homologation station ?</i>	NA (inclus cas simple)	
	Sous total avitaillement Romainville-Bobigny	0 €	
4	Adaptation quai exutoires pour la réception de déchets fluviaux (voir étude spécifique)		18 mois
	<i>CAPEX adaptation du quai + équipement Saint-Ouen</i>	2 062 000 €	
	<i>CAPEX adaptation du quai + équipement Ivry-sur-Seine</i>	2 683 000 €	
	Sous total adaptation quais	4 745 000 €	
5	Investissement connexes		3 mois
	<i>Installation bornes eau/élec 63A à 125 A sur chaque plateforme portuaire (2)</i>	10 000 €	
	<i>Raccordement aux réseaux AEP et électricité terrestres (forfait)</i>	50 000 €	
	Sous total Investissements connexes	60 000 €	
	TOTAL ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES TERRESTRES	6 150 400 €	

8.2 OPEX

8.2.1 OPEX TECHNIQUE POUSSEURS CAS BASE

COUTS EXPLOITATION TECHNIQUE ANNUELLE 2 POUSSEURS CAS DE BASE					
Energie (hydrogène)	Heure utilisation annuelle	Conso kg horaire	total conso Kg H2	Prix du kg d'H2	Cout annuel
Pousseur Seine	2 682	10,94	29 341	8 €	234 729 €
Pousseur canal N°1	5 148	6,84	35 212	8 €	281 699 €
sous total cout énergie hydrogène		7 830	64 553		516 427 €
Maintenance pousseur Seine (2682h/an)	base	Cout	fréquence annuelle	Remarques	Cout annuel
durée de vie pile à combustible	20 000	282 750 €	0,13	provision	37 917 €
contrôle des réservoirs	10 ans	24 000 €	0,10	provision	2 400 €
maintenance courante	1/mois	2 500 €	12,00		30 000 €
révision	1/an	15 000 €	1,00		15 000 €
arrêt technique et grosse maintenance	1/7ans	200 000 €	0,14	provision	28 571 €
suivi de la classe par BV	0.5/an	5 000 €	0,50		2 500 €
assurance et garantie coque et machine	1/an	35 000 €	1,00		35 000 €
sous total maintenance pousseur Seine					113 888 €
Maintenance pousseur canal N°1 (5148h/an)	base	Cout	fréquence annuelle	Remarques	Cout annuel
durée de vie pile à combustible	20 000	227 500 €	0,26	provision	58 559 €
contrôle des réservoirs	10 ans	24 000 €	0,10	provision	2 400 €
maintenance courante	1/mois	2 500 €	12,00		30 000 €
révision	1/an	15 000 €	1,00		15 000 €
arrêt technique et grosse maintenance	1/7ans	200 000 €	0,14	provision	28 571 €
suivi de la classe par BV	0.5/an	5 000 €	0,50		2 500 €
assurance et garantie coque et machine	1/an	35 000 €	1,00		35 000 €
sous total maintenance pousseur canal					134 530 €
Note: les coûts d'exploitation liés à la ou les stations d'avitaillement ne sont pas intégrés dans cet OPEX, ceux-ci sont normalement portés par l'opérateur externe en charge de la station, et incorporés dans le prix du kilogramme d'hydrogène.					
Total cout direct d'exploitation technique annuelle des 2 pousseurs					764 845 €

8.2.2 OPEX CAS BASE

OPEX ANNUEL CAS BASE (Phase 1)				
	valeur	durée	cout annuel	Observations
amortissement 2 pousseurs + 5 barges	9 549 000 €	25	381 960 €	
carburant H2	516 427 €	1	516 427 €	
maintenance	248 418 €	1	248 418 €	
Main d'œuvre, heure d'équipage 2 per	43,00 €	12000	516 000 €	6 équipages de 2 par
cout total annuel			1 662 805 €	semaine + 1.5 équipage
OMR transportées	9300EVP	120600	13,79 €	la tonne

8.2.3 OPEX TECHNIQUE POUSSEURS CAS MULTIPLE

COUTS EXPLOITATION TECHNIQUE ANNUELLE 3 POUSSEURS CAS MULTIPLE					
Energie (hydrogène)	Heure utilisation annuelle	Conso kg horaire	total conso Kg H2	Prix du kg d'H2	Cout annuel
Pousseur Seine	3 755	10,94	41 080	8 €	328 638 €
Pousseur canal N°1	5 148	6,84	35 212	8 €	281 699 €
Pousseur canal N°2	5 148	6,84	35 212	8 €	281 699 €
sous total cout énergie hydrogène	8 903		76 292		892 035 €
Maintenance pousseur Seine (3755h/an)	base	Cout	fréquence annuelle	Remarques	Cout annuel
durée de vie pile à combustible	20 000	282 750 €	0,19	provision	53 086 €
contrôle des réservoirs	10 ans	24 000 €	0,10	provision	2 400 €
maintenance courante	1/mois	2 500 €	12,00		30 000 €
révision	1/an	15 000 €	1,00		15 000 €
arrêt technique et grosse maintenance	1/7ans	200 000 €	0,14	provision	28 571 €
suivi de la classe par BV	0.5/an	5 000 €	0,50		2 500 €
assurance et garantie coque et machine	1/an	35 000 €	1,00		35 000 €
sous total maintenance pousseur Seine					129 058 €
Maintenance pousseur canal N°1 (5148h/an)	base	Cout	fréquence annuelle	Remarques	Cout annuel
durée de vie pile à combustible	20 000	227 500 €	0,26	provision	58 559 €
contrôle des réservoirs	10 ans	24 000 €	0,10	provision	2 400 €
maintenance courante	1/mois	2 500 €	12,00		30 000 €
révision	1/an	15 000 €	1,00		15 000 €
arrêt technique et grosse maintenance	1/7ans	200 000 €	0,14	provision	28 571 €
suivi de la classe par BV	0.5/an	5 000 €	0,50		2 500 €
assurance et garantie coque et machine	1/an	35 000 €	1,00		35 000 €
sous total maintenance pousseur canal					134 530 €
Maintenance pousseur canal N°2 (5148h/an)	base	Cout	fréquence annuelle	Remarques	Cout annuel
durée de vie pile à combustible	20 000	227 500 €	0,26	provision	58 559 €
contrôle des réservoirs	10 ans	24 000 €	0,10	provision	2 400 €
maintenance courante	1/mois	2 500 €	12,00		30 000 €
révision	1/an	15 000 €	1,00		15 000 €
arrêt technique et grosse maintenance	1/7ans	200 000 €	0,14	provision	28 571 €
suivi de la classe par BV	0.5/an	5 000 €	0,50		2 500 €
assurance et garantie coque et machine	1/an	35 000 €	1,00		35 000 €
sous total maintenance pousseur canal					134 530 €
Note: les coûts d'exploitation liés à la ou les stations d'avitaillement ne sont pas intégrés dans cet OPEX, ceux-ci sont normalement portés par l'opérateur externe en charge de la station, et incorporés dans le prix du kilogramme d'hydrogène.					
Total cout direct d'exploitation technique annuelle des 3 pousseurs					1 290 152 €

8.2.4 OPEX CAS MULTIPLE

OPEX ANNUEL CAS MULTIPLE (Phase 2)				
	valeur	durée	cout annuel	Observations
amortissement 3 pousseurs + 8 barges	14 358 000 €	25	574 320 €	
carburant H2	892 035 €	1	892 035 €	
maintenance	398 118 €	1	398 118 €	
Main d'œuvre, heure d'équipage 2 per	43,00 €	20800	894 400 €	10 équipages de 2 par
cout total annuel			2 758 872 €	semaine + 3 équipage sup
OMR transportées	22500EVP	290000	9,51 €	la tonne

9 Conclusions et Recommandations

Cette étude préliminaire tend à confirmer la faisabilité de mise en place une motorisation hydrogène pour le projet de transfert d'OMR par voie fluviale pour le SYCTOM. Dans ce cadre, des pousseurs et des barges spécifiques devront être prévus pour les opérations fluviales mais, au vu des taux d'occupations importants de ces équipements pour les transferts du SYCTOM, cet investissement paraît cohérent.

Les besoins en matériel fluvial évalués pour assurer les besoins du SYCTOM sont les suivants :

- 1 à 2 pousseurs de canal pour les transferts sur le canal de l'Ourcq
- 1 pousseur Seine pour les transferts sur la Seine
- 5 à 8 barges ballastables

Les pousseurs seront propulsés à l'hydrogène gazeux comprimé à 350 bars.

Les coûts de transport par voie fluviale sont évalués entre 14€/tonne transférée dans le cas simple et 9,5€/tonne transférée dans le cas multiple. Ces coûts, comparés à ceux d'un transfert par motorisation diesel de 11€/tonne, évalués dans le cadre d'une étude précédente, apparaissent raisonnables et confirment que, dans un futur proche, la motorisation H2 sera compétitive par rapport à une motorisation diesel de plus en plus contrôlée. En effet, il faut garder en mémoire que l'étude a été réalisé à un instant t avec une estimation du coût d'hydrogène de 8€/kg d'H2 qui sera sans doute amené à diminuer dans les années à venir tandis que le coût de la motorisation diesel sera lui amené à augmenter (raréfaction de la ressource, mise en place d'écotaxe...).

Cette première étude devra néanmoins être fiabilisé et mise à jour une fois que les sites préférentiels d'implantation de la station d'avitaillement sur la

Seine auront été identifiés par le Work Package dédié. De même, les caractéristiques des pousseurs seront peut-être amenées à évoluer selon le type de stockage et d'avitaillement choisi. L'avitaillement et la motorisation étant intrinsèquement liés, les modifications d'hypothèses par rapport à la présente étude nécessiteront une mise à jour.

Une étude de faisabilité et de constructibilité des pousseurs devra ensuite être effectuée pour aller plus loin dans le projet. En parallèle, les études relatives aux schéma logistique devront être poursuivies, en concertation avec HAROPA, pour identifier les zones d'attente et les aménagements des quais exutoires.

10 Annexes

10.1 Annexe 1 – Cas simple : simulation du schéma logistique

Pour estimer la durée de rotation d'une barge, au vu des contraintes horaires d'ouvertures des différents équipements, une simulation du temps de rotation a été effectuée :

Issy-les-Moulineaux		1/1															
Passage jour suivant		Lundi															
Démarrage chargement	Hp	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
Romainville/Bobigny																	
OMR brutes	Barge	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Chargement barge	01:30																
Trajet Ourcq	04:45																
Issy-les-Moulineaux																	
Arrivée Barge Issy-les-Moulineaux	02:40																
Barge à quai Issy-les-Moulineaux	04:48																
Retour Romainville/Bobigny																	
Trajet fluvial retour	Selon site																
Trajet Ourcq	04:15																
Déchargement vides	01:45																
Nombre de jours (si dépassement de 24h)																	
Durée totale de la rotation																	

Figure 9 : Simulation d'une rotation de barge OMR vers Issy-les-Moulineaux

La durée moyenne de rotation de la barge est donc de 37h45min en prenant en compte les temps d'attente ; soit un peu plus d'1,5 jour entre le départ et le retour au quai de Bobigny.

La durée moyenne de rotation de la barge est donc de 37h45min en prenant en compte les temps d'attente ; soit un peu plus d'1,5 jour entre le départ et le retour au quai de Bobigny.

Le trajet de la barge sur le réseau fluvial intégrant les différents temps d'attente liés au chargements/déchargement des barges et aux horaires d'ouverture/fermeture des équipements est modélisé sur une semaine ci-après :

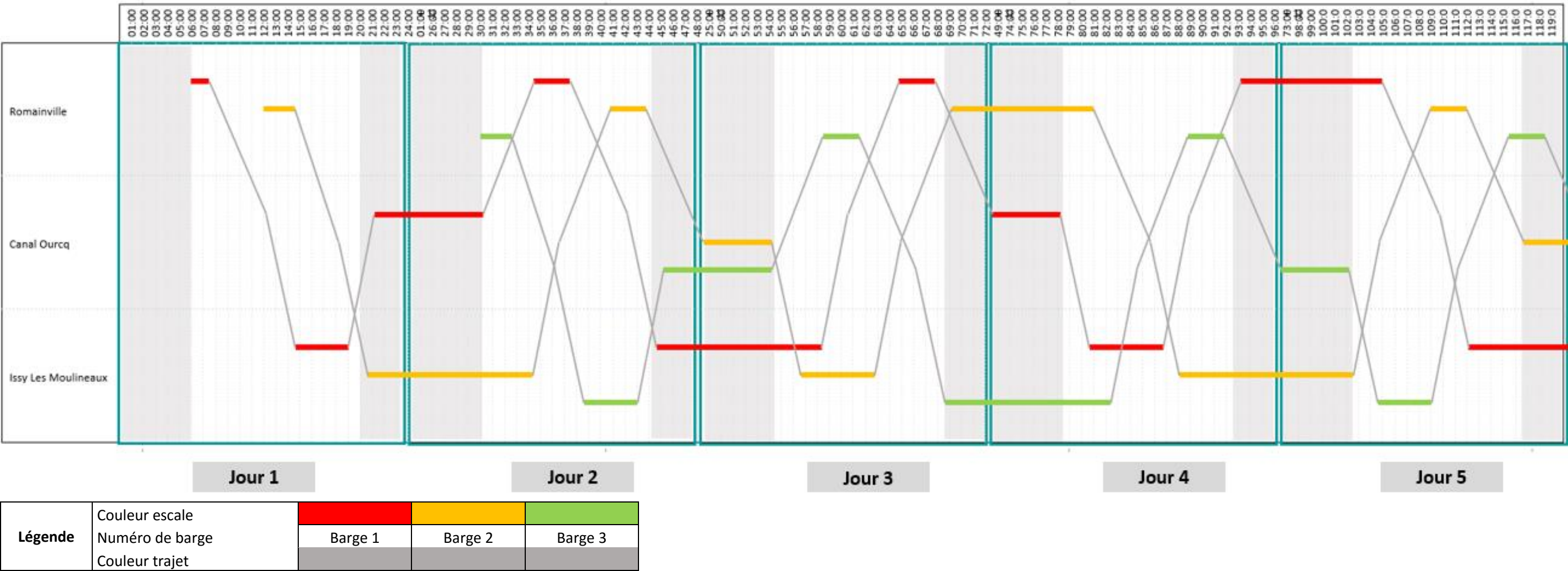


Figure 10 : Cas simple : modélisation du transfert fluvial des barges sur une semaine au niveau de chaque exutoire

Sachant qu’au maximum 2 barges par jour doivent être chargées au port de Romainville/Bobigny, cela signifie que 3 à 4 barges doivent être prévues pour les opérations fluviales dans le cas simple.

10.2 Annexe 2 – Cas multiple : simulation du schéma logistique

De même que pour le cas simple, une simulation du temps de rotation des barges vers chacun des exutoires a été effectuée :

St-Ouen		1/1													
Passage jour suivant		Lundi													
Démarrage chargement	Hp	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Romainville/Bobigny															
OMR brutes	Barge	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Chargement barge	01:30	12:15 07:30	13:15 08:30	14:15 09:30	15:15 10:30	16:15 11:30	17:15 12:30	18:15 13:30	19:15 14:30	20:15 15:30	01:00 16:30	02:00 17:30	03:00 18:30	04:00 19:30	05:00 20:30
Trajet Ourcq	04:45	12:15 07:30	13:15 08:30	14:15 09:30	15:15 10:30	16:15 11:30	17:15 12:30	18:15 13:30	19:15 14:30	20:15 15:30	01:00 16:30	02:00 17:30	03:00 18:30	04:00 19:30	05:00 20:30
St-Ouen															
Arrivée Barge St-Ouen	00:45	17:24 13:00	18:24 14:00	19:24 15:00	20:24 16:00	21:24 17:00	22:24 18:00	23:24 19:00	00:24 20:00	01:24 21:00	02:24 22:00	03:24 23:00	04:24 00:00	05:24 01:00	06:24 02:00
Barge à quai St-Ouen	04:24	17:24 13:00	18:24 14:00	19:24 15:00	20:24 16:00	21:24 17:00	22:24 18:00	23:24 19:00	00:24 20:00	01:24 21:00	02:24 22:00	03:24 23:00	04:24 00:00	05:24 01:00	06:24 02:00
Retour Romainville/Bobigny															
Trajet fluvial retour	00:35	17:44 13:19	18:44 14:19	19:44 15:19	20:44 16:19	21:44 17:19	22:44 18:19	23:44 19:19	00:44 20:19	01:44 21:19	02:44 22:19	03:44 23:19	04:44 00:19	05:44 01:19	06:44 02:19
Trajet Ourcq	04:15	17:44 13:19	18:44 14:19	19:44 15:19	20:44 16:19	21:44 17:19	22:44 18:19	23:44 19:19	00:44 20:19	01:44 21:19	02:44 22:19	03:44 23:19	04:44 00:19	05:44 01:19	06:44 02:19
Déchargement vides	01:45	19:44 15:19	20:44 16:19	21:44 17:19	22:44 18:19	23:44 19:19	00:44 20:19	01:44 21:19	02:44 22:19	03:44 23:19	04:44 00:19	05:44 01:19	06:44 02:19	07:44 03:19	08:44 04:19
Nombre de jours (si dépassement de 24h)		24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00
Durée totale de la rotation		27:44	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29	28:29

Ivry-sur-Seine		1/1													
Passage jour suivant		Lundi													
Démarrage chargement	Hp	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Romainville/Bobigny															
OMR brutes	Barge	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Chargement barge	01:30	12:15 07:30	13:15 08:30	14:15 09:30	15:15 10:30	16:15 11:30	17:15 12:30	18:15 13:30	19:15 14:30	20:15 15:30	01:00 16:30	02:00 17:30	03:00 18:30	04:00 19:30	05:00 20:30
Trajet Ourcq	04:45	12:15 07:30	13:15 08:30	14:15 09:30	15:15 10:30	16:15 11:30	17:15 12:30	18:15 13:30	19:15 14:30	20:15 15:30	01:00 16:30	02:00 17:30	03:00 18:30	04:00 19:30	05:00 20:30
Ivry-sur-Seine															
Arrivée Barge Ivry-sur-Seine	03:45	19:48 16:00	20:48 17:00	21:48 18:00	22:48 19:00	23:48 20:00	00:48 21:00	01:48 22:00	02:48 23:00	03:48 00:00	04:48 01:00	05:48 02:00	06:48 03:00	07:48 04:00	08:48 05:00
Barge à quai Ivry-sur-Seine	03:48	19:48 16:00	20:48 17:00	21:48 18:00	22:48 19:00	23:48 20:00	00:48 21:00	01:48 22:00	02:48 23:00	03:48 00:00	04:48 01:00	05:48 02:00	06:48 03:00	07:48 04:00	08:48 05:00
Retour Romainville/Bobigny															
Trajet fluvial retour	03:30	19:48 16:00	20:48 17:00	21:48 18:00	22:48 19:00	23:48 20:00	00:48 21:00	01:48 22:00	02:48 23:00	03:48 00:00	04:48 01:00	05:48 02:00	06:48 03:00	07:48 04:00	08:48 05:00
Trajet Ourcq	04:15	19:48 16:00	20:48 17:00	21:48 18:00	22:48 19:00	23:48 20:00	00:48 21:00	01:48 22:00	02:48 23:00	03:48 00:00	04:48 01:00	05:48 02:00	06:48 03:00	07:48 04:00	08:48 05:00
Déchargement vides	01:45	21:48 18:00	22:48 19:00	23:48 20:00	00:48 21:00	01:48 22:00	02:48 23:00	03:48 00:00	04:48 01:00	05:48 02:00	06:48 03:00	07:48 04:00	08:48 05:00	09:48 06:00	10:48 07:00
Nombre de jours (si dépassement de 24h)		24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00
Durée totale de la rotation		33:48	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33	34:33

Figure 11 : Simulation d'une rotation de barge OMR vers Saint-Ouen et Ivry-sur-Seine

Les durées moyennes de rotation retenues pour les barges en prenant en compte les temps d'attente sont donc les suivantes :

- Saint-Ouen : 31h 08min
- Issy-les-Moulineaux : 37h 34min
- Ivry-sur-Seine : 40h 48min

Au maximum 4 barges par jour seront chargées/déchargées à Romainville/Bobigny et elles devront chacune alimenter les exutoires. Cette organisation logistique est complexe et elle suppose une organisation fine pour limiter au maximum les temps d'attente.

Pour vérifier les potentielles interférences entre les différents convois et les temps d'attentes induits au niveau de chaque quai, le Consultant a effectué une simulation des trajets fluviaux des barges sur une semaine à destination de chaque exutoire en prenant en compte les différentes contraintes identifiées.

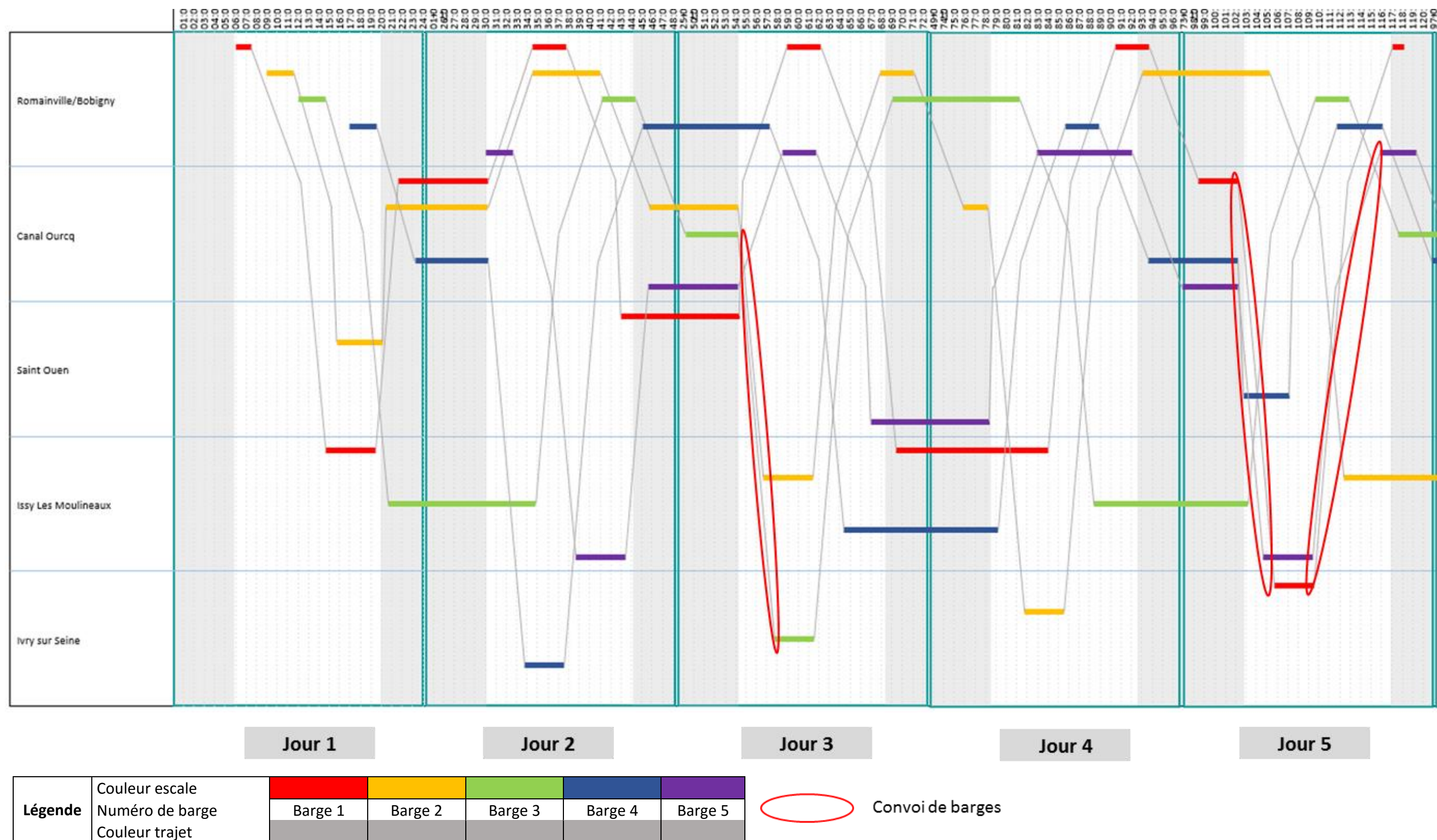


Figure 12 : Cas multiple : modélisation du transfert fluvial des barges sur une semaine au niveau de chaque exutoire

10.3 Annexe 3 – Liens réglementaires

<u>SAE J 2990/1 Juin 2016</u>	Gaseous Hydrogen and Fuel Cell Vehicle First and Second Responder Recommended Practice
<u>SAE J 2600 Octobre 2015</u>	Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices
<u>SAE J 2601 Décembre 2016</u>	Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles / Note: Revision A
<u>Directive 2008/68/CE</u>	Concernant le transport intérieur des marchandises dangereuses.
<u>Directive ATEX - Directive 1999/92/CE</u>	Concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives
<u>RÈGLEMENT (CE) no 79/2009</u>	Concernant la réception par type des véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène
<u>NR566</u>	Hull arrangement, stability, and systems for ships less than 500 GT
<u>NR529</u>	Gas fuelled ships
<u>NI547</u>	Guidelines for fuel cell systems onboard commercial ships
<u>NR320</u>	Certification scheme of materials and equipment for the classification of marine units
<u>NI525</u>	Risk-based qualification of new technology - methodological guidelines
<u>NR266</u>	Requirements for survey of materials and equipment for the classification of ships and offshore units
<u>NR467</u>	RULES FOR THE CLASSIFICATION OF STEEL SHIPS
<u>NR217</u>	Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels
<u>2018-900</u>	du 22 octobre 2018 a créé une rubrique 1416 « Stockage ou emploi d'hydrogène » dans la nomenclature des installations classées (ICPE – décrit dans la phase 2).