

PROJET 207 - BATEAU ZÉRO ÉMISSION SUR LE LÉMAN

ÉTUDE D'OPPORTUNITÉ / FAISABILITÉ

Rapport final

MobyFly SA
2, Place centrale
CH 1903 COLLONGES
info@mobyfly.com
www.mobyfly.com

Consortium Bateau zéro émission SETP 2050 - P207
Selon tableau ci-dessous (groupe d'accompagnement)

Groupe d'accompagnement

Nom et prénom	Organisation	Fonction / section	Courriel
Sue Putallaz	MobyFly SA	Directrice générale, coordinatrice du projet P207	sue@mobyfly.com
Vincent Pellissier	Etat du Valais	Ingénieur cantonal	Vincent.pellissier@admin.vs.ch
Anne Duroux	Etat du Valais	Collaboratrice scientifique	Anne.duroux@admin.vs.ch
Jean-Charles Lagniaz	Canton de Vaud	Chef de division chez Direction générale de la mobilité et des routes	jean-charles.lagniaz@vd.ch
Salibian-Kolly	Canton de Genève	Secrétaire générale adjointe	karine.Salibian-Kolly@etat.ge.ch
Mathieu Herieau	ABB Marine & Ports	Business Engineer	mathieu.herieau@fr.abb.com
Pierre Blanc	Leclanché SA	Chief Technology & Industrial Officer	pierre.blanc@leclanche.com
Andreas Bergmann	CGN SA	Directeur général	abergmann@cgn.ch
Irwin Gafner	CGN SA	Directeur technique	igafner@cgn.ch
Jean-François Weber	GreenGT SA	CEO	jf.weber@greengt.com
Yves Bach	EDMS SA	Directeur	yves.bach@edms.ch
Flavio Noca	HEPIA EPFL	Professeur, Centre Hydro et Aéro	flavio.noca@hesge.ch
Anders Bringdal	MobyFly SA	Directeur, spécialiste de navigation électrique et à foils	anders@mobyfly.com
Thierry Bujard	MobyFly SA	Architecte naval et ingénieur	thierry@mobyfly.com
François Rouvrais	MobyFly SA	Architecte naval et ingénieur	francois@mobyfly.com
Fabien Fournet	MobyFly SA	Ingénieur mécanique	fabien@mobyfly.com
Olivier Perroud	SIG	Responsable de l'unité Mobilité Prestations Intégrées – Smart City	olivier.perroud@sig-ge.ch
Anthony Girardin	Association Zero Emission Boat	Vice-président de l'association Professeur à l'école d'ingénieurs de Genève, HEPIA	anthony@zeroemissionboat.ch

Mentions légales

Éditeur:

Office fédéral des transports OFT

Programme : Stratégie Énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050)

CH-3003 Berne

Conduite du programme

Tristan Chevroulet, OFT

Numéro de projet: P-207

Source

Accessible gratuitement par Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Seul l'auteur (e) ou les auteurs (es) sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

La présente étude a pour vocation de mettre en perspectives les différents paramètres à prendre en compte dans l'analyse d'opportunité pour passer sur une ligne exploitant des bateaux zéro émission. Le scénario «conventionnel» de cette étude est un scénario théorique permettant de comparer, à périmètre et performance équivalents les variantes hydrogène et batterie, et ne peut être assimilé au scénario qui pourrait être mis en œuvre dans l'hypothèse de la concrétisation d'une ligne conventionnelle sur le périmètre concerné.

Collonges, le 19.11.2021

Contenu

Résumé exécutif en français	5
Sommario esecutivo in italiano	5
Executive summary in english	6
Zusammenfassung	7
Résumé	12
Situation de départ	17
Objectifs du travail	18
Approche adoptée et état des connaissances actuelles	19
CONNAISSANCES ACTUELLES	19
Détermination de la ligne, clientèle potentielle, horaire (WP1)	19
Analyse et modélisation du nombre de passagers potentiels	20
Horaire considéré	21
Analyse des normes et règlements (WP2)	21
Construction du bateau	22
Infrastructure de recharge à quai	23
MÉTHODOLOGIE	24
Définition du cahier des charges	24
Approche du problème d'architecture navale	24
Approche du problème d'alimentations en énergie	24
Approche de l'analyse des coûts	25
Résultats	26
CAHIER DES CHARGES	26
Présentation des éléments principaux	26
Facteurs environnementaux	27
PROPRIÉTÉS DES INFRASTRUCTURES	27
Aménagement des débarcadères	27
Station de charge électrique lente (200-500kVA)	27
Station de charge électrique rapide (2-3 MVA)	28
Station de remplissage hydrogène	29
PROPRIÉTÉS DU BATEAU	30
Sélection de la longueur	30
Puissance en fonction de la vitesse	31
Consommation en fonction de la technologie et du matériau (pour la vitesse définie)	31
Résilience aux conditions météorologiques adverses	32
Dimensions et matériaux retenus	32
Consommation sur Corsier, comparaison	32

Utilisation du bateau à batteries de Corsier sur la ligne N3 (Nyon - Yvoire)	33
ANALYSE FINANCIÈRE	35
CAPEX des solutions	35
Solution à batteries	35
Infrastructures (voir détails annexe)	35
Bateau (voir détails en annexe)	35
Solution à hydrogène	36
Infrastructures (voir détails en annexe)	36
Bateau (voir détails en annexe)	36
Proportion de chacun des composants du prix sur le coût annuel	37
Analyse financière	38
Discussion	40
Importance du temps de transbordement sur la consommation	40
Analyse financière et recommandations pour les opérateurs	40
Émissions de CO2	42
Conclusions et recommandations	43
Liste des symboles et abréviations	45
Références	46
Annexes	47
Annexe 1	48
Annexe 2	49
Annexe 3	49
Annexe 4	51
Annexe 5	52
Annexe 6	53

Résumé exécutif en français

Les voies navigables ont un énorme potentiel pour réduire le trafic et faciliter la mobilité, surtout lorsque la traversée remplace un grand détour par voie terrestre. La CGN propose déjà le transport lacustre sur ses trois lignes de transports publics N1 (Lausanne-Evian), N2 (Lausanne Thonon) et N3 (Nyon-Yvoire). L'extension de cette offre et la décarbonisation de leur flotte sont en accord avec la stratégie énergétique 2050 des transports publics. La localisation et les aspects opérationnels de cette ligne d'étude sont donnés comme base d'un cas d'utilisation par l'opérateur. Dans cette étude de faisabilité, nous prenons ces données comme les utilisateurs potentiels, l'horaire, la distance pour évaluer la faisabilité technique et le coût de ce cas d'usage reliant Bellevue (GE) à Corsier (GE) ou la Belotte (GE). Nous modélisons la clientèle potentielle, mais aussi les questions énergétiques et économiques du navire. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'un catamaran de 30 m avec une capacité de 300 passagers et naviguant à 34 km/h pour la Belotte et 43 km/h pour Corsier présente les meilleures performances énergétiques et économiques. Parmi les quatre scénarios d'approvisionnement en énergie étudiés, deux s'avèrent viables: une

combinaison hybride de pile à combustible à hydrogène et de batterie. La première présente la meilleure rentabilité, avec un excédent de coût de 39 % par rapport à un navire diesel. Cet excédent provient principalement des dépenses d'investissement pour la conception et la construction de la coque en matériaux composites. La solution hydrogène coûte environ 90 % de plus, mais offre une meilleure flexibilité. L'excédent de coût est attribué au coût élevé de l'hydrogène par kWh et au coût élevé du système. L'utilisation d'un système de batterie permet de réduire les émissions de CO₂ liées à l'exploitation d'un facteur 50 (-98 %), tandis que l'utilisation de l'hydrogène réduit les émissions de 60 %. Les systèmes et l'économie du navire sont étroitement liés à la vitesse d'exploitation, et un examen attentif de la fréquence des horaires et du temps d'embarquement en relation avec l'énergie et l'économie peut être très bénéfique pour l'exploitant. En général, le transport sans émissions est techniquement réalisable sur des lignes de 7 km maximum, avec une augmentation modérée des coûts et peu de compromis opérationnels.

Sommario esecutivo in Italiano

Le vie navigabili hanno un enorme potenziale per ridurre il traffico e facilitare la mobilità, soprattutto quando la traversata sostituisce una grande deviazione via terra. La CGN offre già il trasporto fluviale sulle sue tre linee di trasporto pubblico N1 (Losanna-Evian), N2 (Losanna Thonon) e N3 (Nyon-Yvoire). Espandere questa offerta e decarbonizzare la loro flotta è in accordo con la strategia energetica 2050 del trasporto pubblico. L'ubicazione e gli aspetti operativi di questa linea di studio sono dati come base per un caso d'uso da parte dell'operatore. In questo studio di fattibilità, prendiamo questi dati come utenti potenziali, orari, distanza per valutare la fattibilità tecnica e il costo di questo caso d'uso che collega Bellevue (GE) a Corsier (GE) o Belotte (GE). Modelliamo la clientela potenziale, l'energia e l'economia della nave. Abbiamo trovato che un catamarano di 30 metri con una capacità di 300 passeggeri e che naviga a 34 km/h per la Belotte e 43 km/h per Corsier presenta le migliori prestazioni energetiche ed economiche. Tra i quattro scenari di approvvigionamento energetico studiati, due sono stati ritenuti validi: un grande banco di batterie o una combinazione ibrida di celle a

combustibile a idrogeno e batterie. Il primo mostra la migliore economia, con un surplus di costi del 39 % rispetto ad una nave diesel. L'eccedenza proviene principalmente dal CAPEX per la progettazione e la costruzione dello scafo in materiale composito. La soluzione ad idrogeno costa circa il 90 % in più, ma fornisce una migliore flessibilità. Il surplus di costo è attribuito all'alto costo dell'idrogeno per kWh e all'alto costo del sistema. L'uso di un sistema a batteria ha il potenziale di ridurre le emissioni di CO₂ legate alle operazioni di un fattore 50 (-98 %), mentre l'uso dell'idrogeno riduce le emissioni del 60 %. I sistemi e l'economia delle navi sono strettamente collegati alla velocità operativa, e un'attenta considerazione della frequenza dell'orario e del tempo di imbarco in relazione all'energia e all'economia può portare grandi vantaggi all'operatore. In generale, il trasporto a zero emissioni è tecnicamente fattibile su linee fino a 7 km, con un moderato aumento dei costi e pochi compromessi operativi.

Executive summary in English

Waterways have a huge potential in reducing traffic and facilitating mobility, especially when the crossing replaces a large detour by land. The CGN already offers waterway transportation on its three public transport lines N1 (Lausanne-Evian), N2 (Lausanne Thonon) and N3 (Nyon-Yvoire). Expanding this offer and de-carbonating their fleet is in agreement with the 2050 energy strategy of public transportation. The location and operational aspects of this study line are given as the basis of a use case by the operator. In this feasibility study, we take these data like the potential users, the time schedule, distance to evaluate the technical feasibility and cost of this use case connecting Bellevue (GE) to either Corsier (GE) or la Belotte (GE). We model the potential customer base, the vessel's energetics and economics. We found that a 30 m catamaran with a capacity for 300 passengers and sailing at 34 km/h for Belotte and 43 km/h for Corsier present the best energetic and economic performance. Among the four energy supply scenarios studied, two are found to be viable: a large battery bank or a

hybrid hydrogen fuel cell and battery combination. The first displays the best economics, with a surplus cost of 39 % compared to a diesel vessel. The surplus came mainly from CAPEX for the design and composite hull construction. The hydrogen solution costs around 90 % more, but provides better flexibility. The surplus cost is attributed to the high hydrogen cost per kWh and high system cost. Using a battery system has the potential to reduce operations-related CO₂ emissions by a *factor* 50 (-98 %), while using hydrogen reduces emissions by 60 %. The vessel's systems and economics are closely related to the operational speed, and careful consideration on timetable frequency and boarding time in relations with energetics and economics can largely benefit the operator. In general, zero-emission transportation is technically feasible on lines up to 7km, with a moderate increase in costs and few operational compromises.

Zusammenfassung

Ablauf der Durchführbarkeitsstudie



Dieser Bericht präsentiert die Durchführbarkeitsstudie für eine emissionsfreie öffentliche Seeverkehrslinie auf dem Genfersee. Allgemein ausgedrückt, soll er ein Verständnis für die Möglichkeiten und technischen Lösungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Seeverkehr vermitteln.

Zu diesem Zweck hat sich ein Konsortium aus den Verkehrsbehörden der Kantone [Waadt](#), [Wallis](#) und [Genf](#) sowie aus Partnern wie der [Swiss Association for Zero Emission Boat](#), der [CGN](#), [ABB](#), [MobyFly](#), [Leclanché](#), [GreenGT](#), [Hepia](#), [Innokick](#) und [EPFL](#) zusammengeschlossen. Sie haben ihr Fachwissen und ihre Erfahrung zum Nutzen dieser Studie vereint.



technischen und finanziellen Aspekte (TCO) zuständig waren. Die Eingabedaten bezüglich des WP1 basieren auf den von der CGN zur Verfügung gestellten Elementen, insbesondere auf der Marktstudie 6-t und der von der CGN vorgelegten Bedarfsanalyse, aus der hervorgeht, dass die Strecke mit dem höchsten aktuellen und zukünftigen Potenzial am Genfersee diejenige ist, die das rechte Ufer des Genfersees in Bellevue (GE) mit dem linken Ufer in La Belotte (3,4 km) in der Gemeinde Cologny verbinden könnte. Im Verlauf der Analyse wurde die Variante eines Heimathafens in Corsier (4,4 km) hinzugefügt. Die Analysen werden für beide Häfen durchgeführt. Der Passagierstrom wurde durch Analyse der umliegenden Bevölkerungsgebiete und der zu erwartenden Geschäftsreisen modelliert. Es wurde festgestellt, dass der Strom von Pendlern, anderen Motiven und induzierter Nachfrage mehr als 1.700 Personen pro Tag ausmacht. Laut der 6-T-Studie "Potenziale der Seeverbinding Bellevue-Belotte" wird diese Zahl bis 2030 um 30 % steigen.

Die Durchführbarkeitsstudie ist in folgende *WorkPackages (WP)* unterteilt:

1. Identifizierung der Linie und Analyse des Bedarfs
2. Studie über die Normen und Vorschriften für die emissionsfreie Schifffahrt
3. Festlegung der Anforderungen an das Schiff
4. Technische Analyse verschiedener Material-, Antriebs- und Energieversorgungsoptionen sowie der entsprechenden Infrastruktur
5. Analyse der Anschaffungs- und Betriebskosten der Linie

Identifizierung der Linie

Die Durchführbarkeitsstudie für dieses emissionsfreie Transportschiff basiert auf einer Fallstudie einer bestimmten Strecke. Die Auswahl der zu untersuchenden Strecke lag in der Verantwortung der CGN, während die technischen und industriellen Partner für die

Verordnungen

Um die Emissionen des Schiffes zu reduzieren, kann die Energieversorgung durch Batterien oder Wasserstoff erfolgen. Um festzustellen, wie die Schifffahrts- und Schiffbauvorschriften für diese Energiequellen genutzt werden können, wurden alle Schweizer Schifffahrts- und Schiffbauvorschriften und -verordnungen untersucht. Darüber hinaus verweisen diese Regeln auf andere Schweizer Verordnungen (insbesondere für elektrische Anlagen und explosionsgefährdete Bereiche), die ebenfalls untersucht wurden. Es wurde festgestellt, dass die Schweizer Vorschriften das Thema der neuen Energiequellen nur teilweise abdecken und sich auf den Stand der Technik beziehen. Um dies zu kompensieren, wurden ebenfalls die Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften Bureau Veritas und Det Norske Veritas untersucht. Diese Regeln geben genaue Leitlinien für die Anordnung der verschiedenen Elemente im Schiff vor. Sie umfassen auch Sicherheitssysteme und die

erforderliche Redundanz. Daraus wird ersichtlich, dass ein Batteriesystem mindestens redundant sein muss, um die Sicherheit und Seetüchtigkeit bei Ausfall einer Komponente des Systems zu gewährleisten. Darüber hinaus muss ein System zur Überwachung des Betriebszustands der Batterien vorhanden und unter allen Umständen aktiv sein. Schliesslich muss im Batterieraum ein vollautomatisches Feuerlöschsystem installiert werden.

Bei einem Wasserstoffsysteem ist der Standort für die Tanks sehr begrenzt, und sie können realistischweise nur auf dem Dach des Schiffes untergebracht werden. Brennstoffzellen und andere periphere Systeme müssen in einem speziellen feuer- und explosionsgeschützten Raum untergebracht werden und über ein System zur Überwachung der Temperatur und der Gaskonzentration in der Luft verfügen. Dieser Raum sollte so gestaltet sein, dass eine Gasansammlung verhindert wird, und er sollte über eine spezielle Belüftung verfügen. Um sämtliche Öffnungen, aus denen Gas entweichen könnte, müssen Sicherheitszonen mit einem Radius von 3 m eingehalten werden. All diese Regeln schränken die Gestaltungsfreiheit eines Wasserstoffbootes stark ein und erlauben keine maximale Ausnutzung des verfügbaren Platzes an Deck.

Pflichtenheft

Da wir ein gutes Verständnis der geltenden Vorschriften hatten, wurde in Zusammenarbeit mit dem Betreiber CGN ein Pflichtenheft für das Boot erstellt. Der Fahrgaststrom zu Stosszeiten, der gewünschte Halbstundentakt, die Höhe der vorhandenen Pontons und die Wassertiefe waren die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung der gewünschten Eigenschaften des Bootes. Es wurde festgestellt, dass der Betrieb eines 300-Personen-Schiffs die Personalkosten minimieren und gleichzeitig den erwarteten Strom von Pendlern zu Stosszeiten ermöglichen würde. Darüber hinaus wurde die Länge des Bootes auf 40 m, die Betriebsgeschwindigkeit auf 40 km/h begrenzt, um in der Kategorie B zu bleiben, und der Tiefgang auf 1,1 m. Andere Elemente wie die Art der Propeller, die Anforderungen an die Stromversorgung der Hilfssysteme, die Rettungsmittel und die Kommunikationsmittel wurden ebenfalls in

Übereinstimmung mit den Schweizer Vorschriften festgelegt.

Technische Analyse

Nach Festlegung des Pflichtenheftes wurde eine technische Analyse durchgeführt. Für La Belotte wurden drei Bootslängen in Betracht gezogen. Ein 20-Meter-Schiff für den Betrieb von zwei Schiffen für eine höhere Kadenz, ein 30-Meter-Schiff, das 300 Passagiere auf zwei Decks aufnehmen kann, und ein 40-Meter-Schiff, das 300 Passagiere auf einem Deck aufnehmen kann. Neben der Länge wurden zwei Varianten von Materialien für die Struktur (Aluminium vs. Komposit) und vier Varianten von Energiequellen (3 Batterielösungen und 1 Wasserstofflösung) unter nominalen Segelbedingungen und bei schlechtem Wetter untersucht. Dies entspricht einer Gesamtzahl von 72 Szenarien, die bei verschiedenen Betriebsgeschwindigkeiten untersucht wurden, was insgesamt 288 Berechnungspunkte ergibt. Dies gilt nur für die Strecke Bellevue-Belotte.

Die Batterieszenarien sind:

1. Eine grosse Batterie, der den Betrieb mit nur 2 Aufladungen pro Tag ermöglicht
2. Eine kleine Batterie, die bei jeder Überfahrt wieder aufgeladen wird
3. Eine etwas grössere Batterie, die bei jeder Rückfahrt wieder aufgeladen wird

Beachten Sie, dass sich bei Lösung 2 auf jeder Bank eine Schnellladestation befinden muss. Bei der Lösung 3 würde sich eine doppelt so starke Schnellladestation in Bellevue befinden.

Für Wasserstoff wird ein Brennstoffzellensystem mit Pufferbatterien zur Glättung der Ladung in Betracht gezogen. Die Wasserstofftanks würden einmal am Tag gefüllt werden.

Für jede der Varianten werden in einem iterativen Prozess auf der Grundlage eines mathematischen Modells des Bootes die Leistung, der Energieverbrauch und die Gesamtverdrängung des Bootes berechnet. Dieser iterative Prozess berücksichtigt den Einfluss des Systems Batterien/H₂ auf die Verschiebung und damit den Vorwärtsbewegungswiderstand, der den Verbrauch direkt bestimmt. Damit werden die Nichtlinearitäten des Problems berücksichtigt. Das Modell simuliert das Schiff auf einer Überfahrt mit zwei 300 m langen Abschnitten am

Anfang und am Ende, wobei die Geschwindigkeit auf 10 km/h begrenzt ist, und der Rest mit Betriebsgeschwindigkeit. Die Beschleunigungen zwischen den Phasen werden ebenfalls modelliert.

Eine Analyse der Überfahrtszeiten zeigt, dass eine Minute Zeitersparnis beim Fahrgastwechsel einen Betrieb mit 20 % geringerer Geschwindigkeit ermöglicht, was den Energieverbrauch um 45 % senkt. Ausserdem wird eine zu lange Umschlagzeit schnell untragbar, da die Betriebsgeschwindigkeit exponentiell ansteigen muss, um die verlorene Zeit wieder aufzuholen. Dies zeigt, dass zur Aufrechterhaltung des Halbstundentaktes eine Optimierung der Einstiegsinfrastruktur unumgänglich ist.

Die Analyse der Auswirkung der Länge zeigt, dass ein 30 m langes Schiff mit 300 Passagieren einen gleichwertigen Verbrauch pro Passagier hat wie ein 40 m langes Schiff mit 300 Passagieren. Das 20-Meter-Boot weist einen um 80 % höheren Verbrauch pro Passagier auf (95 Passagiere). Für die Linie N4 wurde daher ein 30 m langes Boot gewählt.

Die Analyse der verschiedenen Stromversorgungslösungen zeigt, dass Systeme, die ausschließlich auf Schnellladung basieren, nur begrenzte Vorteile in Bezug auf Masse und Verbrauch bieten, während sie extrem hohe Ladeleistungen (in der Grössenordnung von 2 MW) erfordern. Eine Grossbatterie kann den Betrieb sicherstellen und verfügt über eine Energiereserve für ungünstige Wetterbedingungen und mögliche Ausfälle. Was die Verwendung von Wasserstoff betrifft, so ist die Masse des Systems in der Tat geringer als bei Batterien, und es ist die leichteste Lösung in Bezug auf seine Autonomie. Wenn es jedoch darum geht, Masse und Energie zu sparen, hat die Kompositbauweise das grösste Potenzial. Durch die Reduzierung der Strukturmasse um 40 % wird die Gesamtverschiebung um 23 % und der Verbrauch um 28 % verringert. Dies wirkt sich besonders positiv auf die Batterielösung aus, da die Masse der Batterie um mehr als 4 Tonnen reduziert werden kann. Daher wurde beschlossen, die Kostenanalyse für ein 30 m langes Kompositboot mit den beiden folgenden Optionen für die Energieversorgung fortzusetzen: Grossbatterie oder Wasserstoff.

Auch für die Strecke Bellevue - Corsier wurde eine technische Studie durchgeführt. In diesem Fall wurde nur das in der Kostenanalyse geplante Boot berücksichtigt. Trotz der um 1 km grösseren Entfernung (30 %) möchte der Betreiber den Halbstundentakt beibehalten. Um dies zu erreichen, muss das Schiff mit einer Geschwindigkeit von 43 km/h fahren, was es in eine restriktivere OFT-Kategorie einordnet. Die Erhöhung der Betriebsgeschwindigkeit führt auch zu einem durchschnittlich 96 % höheren Verbrauch im Vergleich zu La Belotte. Bei einer Batterielösung wird das gesamte Volumen der Rümpfe von Batterien genutzt, was einer Gesamtmasse von fast 28 Tonnen entspricht.

Um die Schifffahrt bei allen Wetterbedingungen zu ermöglichen, müssen Deiche zum Schutz vor Wellengang gebaut werden. Um die Umsteigezeit zu optimieren, müssen die Pontons mit einer schwimmenden Verlängerung versehen und die Durchfahrt erweitert werden. In Bellevue sollte auch eine Stromtankstelle (elektrisch oder H2) gebaut werden.

Der Bau des Wellenbrechers scheint technisch machbar zu sein, aber es handelt sich um ein langfristiges Projekt, das eine umfangreiche Planung im Vorfeld erfordert und wahrscheinlich auf Widerstand stossen wird. Die Anpassung der Pontons und die Hinzufügung eines schwimmenden Teils werden den Zugang für Personen mit eingeschränkter Mobilität ermöglichen und die Anlegezeit verkürzen. Allerdings kann der Umbau von Pontons, die manchmal unter Denkmalschutz stehen, auch Schwierigkeiten verursachen. Schliesslich ist der Bau eines Elektrizitätswerks am Bellevue dank des unter der Seestrasse verlaufenden Mittelspannungs- und Hochspannungsnetzes machbar. Die Grösse der Stromtankstelle sollte 45 m² nicht überschreiten. Beim Bau einer Wasserstofftankstelle müssen Zufahrt und Platz für den Lieferwagen und ein mögliches Feuerwehrauto im Falle eines Problems gewährleistet sein. Eine Sicherheitszone rund um den Bahnhof ist ebenfalls erforderlich, was den verfügbaren Platz stark einschränkt.

Um die Möglichkeit des Einsatzes desselben Bootes auf anderen Strecken zu bewerten, wurde das batteriebetriebene Boot auf der Strecke Corsier-Bellevue auf der Linie N3 zwischen Nyon und Yvoire (6,2 km) simuliert. Der Fahrplan sieht 50 Minuten vor, davon 5 Minuten

für das Einsteigen, sodass 20 Minuten für die Überfahrt bleiben. Dadurch kann das Boot mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h fahren und so seinen Verbrauch drastisch senken. Trotz einer um 40 % größeren Entfernung ist der Verbrauch pro Überfahrt um 55 % niedriger. Das bedeutet, dass das Boot eine Reichweite von 22 Überfahrten hat. Die Frage, ob man längere Strecken fahren kann, muss immer mit einer Betriebsgeschwindigkeit gestellt werden. Im Falle des N3 ist eine emissionsfreie Navigation durchaus machbar.

Nachdem die geeignetsten Lösungen definiert waren, wurde eine Analyse der Investitions- und Betriebskosten durchgeführt. Bei den Kapitalkosten wurden der Bau des Schiffes, die Anpassung der Kaianlagen und der Bau der verschiedenen Ladestationen berücksichtigt.

Kostenvoranschlag

Für die Kostenschätzung des Bootes wurden alle Hauptkomponenten aufgelistet und ein Preis ermittelt. Für den Antrieb, die Batterien und das Wasserstoffsystem wurden Angebote von Partnern genutzt. Für die anderen Elemente (Ausgangsdesign, Struktur, Innenausstattung, Sicherheitssysteme) wurde eine Schätzung auf der Grundlage öffentlicher Daten und wissenschaftlicher Veröffentlichungen vorgenommen.

Für die Schätzung der Infrastrukturkosten wurde anhand verschiedener Informationsquellen ermittelt, wie hoch die Kosten für die Entwicklung der Anlegestellen sind. Der Austausch mit [SIG](#) ermöglichte es, den Preis der Stromtankstelle zu schätzen. Für die Wasserstofftankstelle ergab ein Gespräch mit [Carbagas](#) eine Preisspanne.

Die Betriebskosten unterteilen sich in Wartung, Personal, Energie und Verbrauchsmaterial. Die Wartungskosten wurden anhand von Informationen über ein auf dem Luganersee verkehrendes 300-Personen-Schiff geschätzt, die Personalkosten sind in der Jahresbilanz der CGN aufgeführt, der Strompreis wird von SIG veröffentlicht und der Wasserstoffpreis von Carbagas angegeben. Bei den Verbrauchsmaterialien handelt es sich um die Batterien (10 Jahre Lebensdauer) und einigen Brennstoffzellenkomponenten.

Bei den Kapitalkosten (CAPEX) fließt der größte Teil in den Erwerb des Schiffes, wobei der

Hauptteil (50 %) auf den Bau der Struktur und der zugehörigen Werkzeuge entfällt. Es folgen die Innenausstattung (13 %), das Design (12 %) und der Antrieb (11 %). Die Batterien machen nur 9 % der Gesamtkosten aus. Bei Wasserstoff beträgt der Anteil des Systems (Tanks, Wasserstoffzellen und Pufferbatterien) 14 %. Die "Mehrkosten" der emissionsfreien Schifffahrt im Vergleich zum Dieselantrieb belaufen sich daher auf 15 bis 19 % des Gesamtpreises (Antrieb+Energie), da die derzeitigen Kosten des Dieselantriebs in diesem Fall etwa 5 % betragen.

Es ist zu beachten, dass bei dieser Berechnung davon ausgegangen wurde, dass sich die Investitionen in Konzeption und Ausstattung nur bei einem Schiff amortisieren, was den ungünstigsten Fall darstellt.

Schliesslich wurde eine jährliche Finanzbilanz (OPEX) mit den Betriebskosten, dem erwarteten Kundenkreis, einem Fahrpreis pro km ähnlich dem der anderen CGN-Angebote und einer linearen Abschreibung der Investitionen über 30 Jahre berechnet. Daraus ergibt sich, dass in der gegenwärtigen Situation das batteriebetriebene Boot ein Defizit von etwa 400 kCHF und das Wasserstoffboot ein Defizit von 900 kCHF aufweist. Für ein konventionelles Boot wird ein Defizit von 220 kCHF veranschlagt, was insbesondere auf eine durchschnittliche Auslastung von 17 % zurückzuführen ist.

Langfristige Projektionen

Die Situation im Jahr 2030 sieht einen Anstieg der Fahrgastzahlen (39 % Auslastung) vor, was zu einem positiven Saldo von 630 kCHF für Batterien und 270 kCHF für Wasserstoff führt.

Die Verwendung von Wasserstoff ist mit hohen Investitionskosten und Energiekosten pro kWh verbunden, die 2,5 Mal höher sind als bei Strom. Strom kostet 20 % mehr pro mechanischer kWh als der für die Schifffahrt verwendete Diesel, der völlig steuerfrei ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Lösung mit den geringsten CO₂-Emissionen die Verwendung von Batterien ist, welche die Emissionen im Vergleich zu einem herkömmlichen Boot um den Faktor 50 (-98 %) reduzieren. Wasserstoff reduziert die Emissionen nur um 60 %. **Es hat sich gezeigt, dass der Betrieb eines emissionsfreien Bootes auf**

dem Genfersee nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich machbar ist.

Empfehlungen und weitere Massnahmen

Die Studie zeigt, dass die Technik kein Hindernis darstellt, insbesondere bei batteriebetriebenen Booten. Die Technologie ist ausgereift genug, um einsatzfähig zu sein. Die Technologie ist vorhanden. Die wichtigsten Fragen, die zu berücksichtigen sind, betreffen vor allem die Infrastruktur und die Zulassung des Bootes (insbesondere für Wasserstoff). Was die Zulassung von emissionsfreien Booten anbelangt, so haben die Klassifikationsgesellschaften (BV, DNV) in den letzten Jahren Fortschritte in Richtung klarer und anwendbarer Normen gemacht. Der Aufbau auf diesen Normen bietet die Möglichkeit, die Einführung des emissionsfreien Seeverkehrs zu erleichtern.

In diesem Sinne, um von dem Know-how und den Konstruktions- und Zulassungsverfahren zu profitieren, kann es vorteilhafter sein, ein bereits auf dem Markt befindliches Boot von einem der Unternehmen zu wählen, die im Bereich der emissionsfreien Boote tätig sind. Dies ermöglicht nicht nur eine Verringerung der Anschaffungskosten, sondern es kann ebenfalls von allen Upgrades und einem angemessenen Wartungsdienst profitiert werden.

Um effektiv zu sein, muss der Transport auf dem Wasser an das Netz des öffentlichen Verkehrs

und der sanften Mobilität und/oder an Park-and-Ride-Anlagen angeschlossen werden. Die Intervalle sollten so kurz wie möglich sein, um die Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf den integrierten Verkehr auf dem Wasser zu fördern. Das Boot ist energetisch sehr gut aufgestellt, und deshalb wäre es angebracht, die emissionsfreie Mobilität auf dem See deutlich zu erhöhen.

Schliesslich muss das emissionsfreie Schiff so konzipiert sein, dass es sich in die lokale Infrastruktur und die betrieblichen Anforderungen einfügt. Ein gutes Verständnis der lokalen Gegebenheiten und kluge Entscheidungen auf dieser Ebene bergen ein großes Potenzial für Einsparungen bei Energie, Systemkosten und Infrastrukturkosten. Ausserdem müssen die Fristen für die Fertigstellung bedacht werden, gegen die verschiedene Einsprüche und Rechtsmittel eingelegt werden können.

Aus diesem Bericht ergibt sich, dass ein Betreiber, der ein emissionsfreies Transportschiff betreiben möchte, eine detaillierte Studie zur Umsetzung durchführen sollte. Diese Studie hat die wichtigsten Trends aufgezeigt. Darüber hinaus können wichtige technologische und regulatorische Entwicklungen, die in den kommenden Jahren erwartet werden, einige der Daten in diesem Bericht und die damit verbundenen Berechnungen beeinflussen.

Energievergleich zwischen Verkehrsmitteln auf einer Reise* Typ

	Mikro-Hybridfahrzeug Golf 9 eTSI	Elektroauto VW ID3	TPG/SBB pro Fahrgast	Elektrofahrrad 25 km/h maximale Unterstützung	Elektrofahrrad 45 km/h maximale Unterstützung	Emissionsfreies Boot mit 300 Passagieren an Bord	Aluminiumboot Diesel
							
Fahrzeit in Minuten um 8 Uhr	25	25	44	35	20	23	23
Energie (Wh) pro Fahrgast	5854	1490	1813	122	171	196	571
CO2-Emissionen mit Vital vert in Genf (g)	1400	13	16	1.1	1.5	1.8	139
CO2-Emissionen, Mix Suisse oder SBB		191	300	16	22	25	

Annahme: 1 Person pro Auto und Boote mit 300 Passagieren.

*Berechnung basierend auf der Strecke Bellevue-Bellote, Kanton Genf

Wichtigste Quellen:

SBBSchulen_Lehrmittel_Vertiefungslektion_Mobilitaet_D_v3.indd.pdf und SBB-Werkzeug

Résumé

Feuille de route de l'étude de faisabilité



Ce rapport présente l'étude de faisabilité d'une ligne de transport public lacustre zéro émission sur la Lac Léman. Plus globalement, il cherche à amener une compréhension des opportunités et des solutions techniques disponibles pour réduire les émissions de CO₂ dans le transport lacustre.

Pour ce faire, un consortium formé des autorités organisatrices de transport des cantons de [Vaud](#), [Valais](#) et [Genève](#) ainsi que de partenaires tels que l'[association zéro émission boat](#), la [CGN](#), [ABB](#), [MobyFly](#), [Leclanché](#), [GreenGT](#), [Hepia](#), [Innokick](#) et [EPFL](#). Ils ont mis en commun leur



savoir-faire et expertise au profit de cette étude.

L'étude de faisabilité se décompose en *WorkPackages (WP)* comme suit:

1. Identification de la ligne et analyse du besoin
2. Étude des normes et règlements relatifs à la navigation zéro émissions
3. Détermination du cahier des charges pour le navire
4. Analyse technique des différentes options du matériau, système de propulsion et alimentation en énergie ainsi que les infrastructures correspondantes
5. Analyse des coûts d'acquisition et d'exploitation de la ligne

Identification de la ligne

L'étude de faisabilité de ce bateau de transport zéro émission se fait sur la base d'un cas d'étude sur une ligne désignée. Le choix de la ligne sur laquelle le cas d'étude devait porter était du

ressort de la CGN et les partenaires techniques et industriels étant quant à eux responsables des aspects techniques et financiers (TCO). Les données d'entrée concernant le WP1 sont basées sur les éléments remis par la CGN et notamment l'étude de marché 6-t¹ et l'analyse du besoin remis par la CGN² montraient que la ligne présentant le plus fort potentiel actuel et futur sur le Lac Léman est celle qui pourrait relier la rive droite du Léman à Bellevue (GE) à la rive gauche, à la Belotte (3.4 km) sur la commune de Cologny. En cours d'analyse, il a été ajouté la variante d'un port d'attache à Corsier (4.4 km). Les analyses sont faites pour les deux ports. Le flux de passagers a été modélisé en analysant les bassins de population environnants et les déplacements professionnels prévus. Il en ressort que le flux de pendulaires, autres motifs et demande induite représente plus de 1'700 personnes par jour. Ce chiffre est prévu d'augmenter de 30 % d'ici 2030 selon l'étude 6-T "Potentiels la liaison lacustre Bellevue-Belotte".

Réglementation

Afin de réduire les émissions du bateau, l'alimentation énergétique peut se faire par batterie ou avec de l'hydrogène. En vue de déterminer comment les règlements sur la navigation et la construction de bateaux sont utilisables pour ces sources d'énergie, toutes les règles et ordonnances suisses sur la navigation et la construction de bateaux ont été étudiées. En outre, ces règles font références à d'autres ordonnances suisses (notamment pour les installations électriques et les atmosphères explosives) qui ont aussi été étudiées. Il en ressort que les règles suisses ne couvrent que partiellement le sujet des nouvelles sources

¹ Base rapport 6-t "Potentiels de la liaison lacustre Bellevue - La Belotte. Analyses territoriales régionales" du 06 mars 2020

² Rapport "Nouvelle Voie Bleue. La Belotte-Bellevue. Relier les deux rives pour une mobilité optimisée" d'avril 2021

d'énergie, et elles font référence à l'état de l'art. Pour pallier cela, les règles des sociétés de classification Bureau Veritas et Det Norske Veritas ont également été étudiées. Ces règles donnent des directives précises concernant l'emplacement des différents éléments dans le bateau. Elles couvrent aussi les systèmes de sécurité et la redondance requise. Il en ressort que pour un système à batterie, il doit au moins y avoir une redondance permettant d'assurer la sécurité et la navigabilité en cas de défaillance d'un des éléments du système. De plus, un système de surveillance de l'état de fonctionnement des batteries doit être en place et actif en toutes circonstances. Enfin, un système de combat de l'incendie entièrement automatisé doit être installé dans le local des batteries.

En ce qui concerne un système à hydrogène, l'emplacement des réservoirs est très restreint, et ils ne peuvent réalistement se trouver que sur le toit du navire. Concernant les piles à combustible et autres systèmes périphériques, ils doivent se trouver dans un espace spécialement protégé contre l'incendie et les explosions, avec un système de surveillance de la température et de la concentration dans l'air du gaz. Cet espace doit être conçu pour empêcher toute accumulation de gaz et doit avoir une ventilation dédiée. Des zones de sécurité d'un rayon de 3 m doivent être respectées autour de tous les orifices d'où pourrait s'échapper le gaz. Toutes ces règles limitent fortement la liberté de design pour un bateau à hydrogène, et ne permettent pas d'exploiter au maximum la surface de pont disponible.

Cahier des charges

Ayant une bonne compréhension des réglementations en vigueur, un cahier des charges pour le bateau a été défini en collaboration avec l'opérateur, la CGN. Le flux de passagers aux heures de pointe, la cadence désirée à la demi-heure, la hauteur des pontons existants et la profondeur de l'eau ont été les facteurs principaux utilisés pour la détermination des caractéristiques désirées du bateau. Il est ressorti que l'exploitation d'un bateau de 300 passagers permet de minimiser le coût du personnel tout en permettant de faire traverser le flux de pendulaires attendu aux heures de pointe. En outre, la longueur du bateau a été limitée à 40 m, la vitesse opérationnelle à 40 km/h afin de rester dans la catégorie B, le tirant d'eau à 1.1 m.

Les autres éléments comme le type d'hélices, les besoins d'alimentation des systèmes auxiliaires, les moyens de sauvetage et les moyens de communication ont aussi été définis, en accord avec les réglementations suisses.

Analyse technique

Le cahier des charges étant défini, une analyse technique a été menée. Trois longueurs de bateau ont été considérées sur la Belotte. Un 20 m dans l'optique d'opérer deux bateaux pour une cadence plus élevée, un 30 m qui permet d'accueillir 300 passagers sur deux ponts et un 40 m qui permet d'accueillir 300 passagers sur un seul pont. En plus de la longueur, deux variantes de matériaux pour la structure (aluminium vs. composite) et quatre variantes de source d'énergie (3 solutions à batteries et 1 solution hydrogène) ont été étudiées dans des conditions de navigation nominales et par mauvais temps. Cela représente un total de 72 scénarios étudiés à plusieurs vitesses opérationnelles, pour un total de 288 points de calcul. Cela uniquement pour la ligne Bellevue-Belotte.

Les scénarios de batteries sont:

Une grosse batterie qui permet d'opérer avec seulement 2 recharges par jour

Une petite batterie qu'on recharge à chaque traversée

Une batterie un peu plus grande, qu'on recharge à chaque aller-retour

A savoir que pour la solution 2, une station de recharge rapide doit se trouver sur chaque berge. Pour la solution 3, une station de recharge rapide deux fois plus puissante se trouverait à Bellevue.

Pour l'hydrogène, un système de pile à combustible avec des batteries tampon pour lisser la charge est considéré. Les réservoirs d'hydrogène seraient remplis une fois par jour.

Sur chacune des variantes, un processus itératif basé sur un modèle mathématique du bateau permet de calculer la puissance, l'énergie consommée et le déplacement total du bateau. Ce processus itératif permet de prendre en compte l'influence de la masse de batteries/système H2 sur le déplacement et donc

la résistance à l'avancement, ce qui définit directement la consommation. Ainsi, les non-linéarités du problème sont prises en compte. Le modèle s'occupe de simuler le bateau sur une traversée, avec deux segments de 300 m au début et à la fin où sa vitesse est limitée à 10 km/h, et le reste à vitesse opérationnelle. Les accélérations entre les phases sont aussi modélisées.

Une analyse du temps de traversée montre qu'une économie d'une minute dans le temps de transbordement des passagers permet d'opérer à une vitesse inférieure de 20 %, ce qui diminue la consommation énergétique de 45 %. En outre, un temps de transbordement trop long devient rapidement intenable, car la vitesse opérationnelle doit augmenter exponentiellement pour rattraper le temps perdu. Cela indique que pour maintenir la cadence à la demi-heure, il est impératif d'optimiser les infrastructures d'embarquement.

L'analyse de l'effet de la longueur montre qu'un bateau de 30 m et 300 passagers a une consommation équivalente par passager qu'un bateau de 40 m avec 300 passagers. Le bateau de 20 m montre une consommation par passager 80 % supérieure (95 passagers). Un bateau de 30 m a donc été retenu pour la ligne N4.

L'analyse des différentes solutions d'alimentation en énergie montre que les systèmes uniquement basés sur la charge rapide n'apportent qu'un gain de masse et de consommation limité, tout en demandant des puissances de recharge extrêmement élevées (de l'ordre de 2MW). Une grosse batterie permet d'assurer le service, avec une réserve d'énergie intrinsèque pour assurer la météo adverse et les éventuelles défaillances. En ce qui concerne l'utilisation d'hydrogène, la masse du système est effectivement plus faible que pour les batteries, et c'est la solution la plus légère par rapport à son autonomie. Toutefois, en ce qui concerne le gain de masse et l'économie d'énergie, c'est la construction en composite qui a le plus grand potentiel. En réduisant la masse structurelle de 40 %, on réduit le déplacement total de 23 % et la consommation de 28 %. Cela a un effet particulièrement positif sur la solution à batterie puisque la masse de cette dernière peut être réduite de plus de 4 tonnes. Il a donc été décidé de continuer l'analyse des coûts sur un bateau de 30 m en composite, avec les deux

options d'alimentation d'énergie suivantes: grosse batterie ou hydrogène.

Une étude technique a également été faite pour la ligne Bellevue - Corsier. Dans ce cas, seul le bateau prévu dans l'analyse des coûts a été considéré. Malgré la distance supérieure de 1 km (30 %), l'opérateur désire maintenir la cadence à la demi-heure. Pour respecter cela, le bateau doit opérer à une vitesse de 43 km/h, ce qui le met dans une catégorie OFT plus contraignante. L'augmentation de vitesse opérationnelle engendre aussi une consommation en moyenne 96 % supérieure par rapport à la Belotte. Pour une solution à batteries, le volume des coques est entièrement utilisé par des batteries, pour une masse totale de près de 28 tonnes.

Afin de permettre la navigation par tous temps, il faut construire des digues de protection contre les vagues de bise. Pour optimiser le temps de transbordement il faut adapter les pontons avec une extension flottante et élargir le passage. Il faut aussi construire une station de recharge d'énergie (électrique ou H2) à Bellevue.

La construction de la digue semble techniquement réalisable, mais c'est un projet de longue haleine qui demande beaucoup de planification en amont et qui risque de faire face à des oppositions. L'adaptation des pontons et l'ajout d'une section flottante permettra l'accès des PMR tout en diminuant le temps d'accostage. Toutefois la modification de pontons parfois inscrits au patrimoine peut aussi engendrer des difficultés. Enfin, la construction d'une station électrique à Bellevue est faisable grâce à la présence du réseau moyenne tension et forte puissance sous la route du lac. La taille de la station électrique ne devrait pas dépasser 45 m². Pour réaliser une station hydrogène, il faut assurer l'accès et l'espace de manœuvre du camion de livraison ainsi qu'un éventuel camion de pompiers en cas de problème. Une zone de sécurité est aussi requise autour de la station, ce qui diminue fortement l'espace à disposition.

Afin d'évaluer la possibilité d'exploiter le même bateau sur d'autres lignes, le bateau à batteries de la ligne Corsier-Bellevue a été simulé sur la ligne N3 entre Nyon et Yvoire (6.2 km). La cadence de l'horaire est de 50 minutes, avec 5 minutes pour l'embarquement, ce qui laisse 20 minutes pour la traversée. Cela permet d'opérer le bateau à 25 km/h et donc de réduire

drastiquement sa consommation. En effet, malgré une distance 40 % supérieure, la consommation par traversée est inférieure de 55 %. Ainsi, le bateau a une autonomie de 22 traversées. La question de la navigation sur de plus grandes distances doit toujours être posée avec une vitesse opérationnelle. Dans le cas de la N3, la navigation zéro émission est tout à fait envisageable.

Les solutions les plus adaptées ayant été définies, une analyse des coûts de capitaux et d'opérations a été menée. Pour les coûts capitaux, la construction du bateau, l'adaptation de l'infrastructure à quai et la construction des différentes stations de recharge a été considérée.

Estimation des coûts

Pour l'estimation du coût du bateau, tous les composants principaux ont été listés et un prix déterminé. Pour la propulsion, les batteries, le système à hydrogène, des offres de la part des partenaires ont été utilisées. En ce qui concerne les autres éléments (conception initiale, structure, aménagement intérieur, systèmes de sécurité), une estimation se basant sur des données publiques et des publications scientifiques a été faite.

Pour l'estimation des coûts d'infrastructure, diverses sources d'informations ont permis de déterminer le coût pour aménager les débarcadères. Des échanges avec les [SIG](#) ont permis d'estimer le prix de la station de recharge électrique. Pour la station de remplissage d'hydrogène, une discussion avec [Carbagas](#) a permis d'avoir une fourchette de prix.

En ce qui concerne les coûts opérationnels, ils sont subdivisés en maintenance, personnel, énergie et consommables. La maintenance a été estimée à partir d'informations sur un bateau de 300 passagers opérant sur le lac de Lugano, le coût du personnel est renseigné dans les bilan annuels de la CGN, le prix de l'électricité est publié par les SIG et le prix de l'hydrogène est donné par Carbagas. Les consommables sont les batteries (durée de vie de 10 ans) et certains éléments des piles à combustible.

Concernant les coûts en capital (CAPEX), la plus grande partie va dans l'acquisition du bateau, avec la majorité (50 %) étant la construction de la structure et l'outillage associé. Viennent ensuite l'aménagement intérieur (13 %), la conception (12 %) et la propulsion (11 %). Les batteries ne

représentent que 9% du coût total. Pour l'hydrogène, le système (réservoirs, piles à hydrogène et batteries tampon) représente 14 %. Le "surcoût", par rapport à une propulsion diesel, lié à la navigation zéro émission représente donc entre 15 et 19 % du prix total (propulsion+énergie) car le coût actuel d'une propulsion diesel est de l'ordre de 5 % dans ce cas de figure.

Il est à noter que dans ce calcul, on a considéré que les investissements en conception et en outillage ne seraient amortis que sur un seul bateau, ce qui est le cas le plus défavorable.

Enfin, un bilan financier annuel (OPEX) a été calculé avec les coûts opérationnels, la clientèle prévue, un prix du billet au km similaire aux autres offres CGN et un amortissement linéaire des investissements sur 30 ans. Il en ressort que dans la situation actuelle, le bateau à batteries est déficitaire d'environ 380 kCHF et le bateau hydrogène de 740 kCHF. Il est estimé qu'un bateau conventionnel aurait un déficit de 220 kCHF. Cela est notamment dû à un taux de remplissage moyen de 17%.

Projections à long terme

La situation en 2032 voit une meilleure fréquentation (remplissage de 39 %), ce qui donne un bilan positif de 630 kCHF pour les batteries et 270 kCHF pour l'hydrogène.

L'utilisation d'hydrogène engendre des coûts en capitaux élevés, et un coût énergétique au kWh 2.5 fois supérieur à l'électricité. Cette dernière coûte au kWh mécanique 20 % de plus que le diesel utilisé pour la navigation, qui est lui entièrement libre de taxes.

Pour conclure, la solution qui émet le moins de CO₂ est l'utilisation de batteries, avec une réduction d'un facteur 50 des émissions (-98 %) par rapport à un bateau conventionnel. L'hydrogène ne permet que de réduire de 60% les émissions³. **Il a été montré que l'exploitation d'un bateau zéro émission sur le Léman est non seulement possible techniquement, elle peut l'être économiquement aussi.**

Recommandations et suite

³ A noter que ce calcul n'inclut pas une analyse complète du cycle de vie.

L'étude montre que la technique n'est pas un obstacle, en particulier pour les bateaux à batteries. La technologie est assez mûre pour être opérationnelle. La technologie est existante. Les problématiques majeures qui devront être prises en compte sont surtout du côté des infrastructures et de l'homologation du bateau (en particulier pour l'hydrogène). En ce qui concerne l'homologation de bateaux zéro émission, les sociétés de classification ([BV](#), [DNV](#)) ont progressé, ces dernières années, vers des normes claires et applicables. S'appuyer sur ces normes est une opportunité pour faciliter la mise en service de transport lacustre zéro émission.

En ce sens, afin de bénéficier du savoir-faire et des démarches d'ingénierie et d'homologation, il peut être plus avantageux de choisir un bateau existant sur le marché auprès d'une des entreprises actives dans le bateau zéro émission. Cela permettra non seulement de diminuer le coût d'acquisition, mais également de profiter de toutes les mises à jour (upgrades) et d'un service de maintenance approprié.

Pour être efficace, la mobilité lacustre (waterborne transportation) doit impérativement être connectée au réseau de transport public et de mobilité douce et/ou à des parkings relais.

Les cadences doivent être les plus courtes possibles pour favoriser le transfert du transport individuel motorisé (TIM) vers le transport lacustre intégré. Le bateau est très bien placé en termes énergétique et en conséquence il serait opportun d'augmenter significativement la mobilité lacustre zéro émission.

Enfin, il faut penser le bateau zéro émission dans son intégration avec les infrastructures locales et les exigences opérationnelles. Une bonne compréhension des enjeux locaux et des choix judicieux à ce niveau ont un grand potentiel d'économies en termes d'énergie, de coût des systèmes et de coût des infrastructures. Il faut également penser aux délais de réalisation, qui peuvent être sujets à des oppositions et recours divers.

Suite à ce rapport, lorsqu'un opérateur voudra exploiter un bateau de transport zéro émission, il conviendra de faire une étude de mise en œuvre détaillée. En effet, cette étude a mis en exergue les grandes tendances. Par ailleurs, les progrès technologiques et réglementaires importants prévus dans les années à venir peuvent impacter certaines données de ce rapport ainsi que les calculs inhérents.

Comparaison énergétique entre moyens de transport sur un trajet* type

	Voiture thermique Golf 8 eTSI micro hybride	Voiture électrique VW ID3	TPG / CFF par passager	Vélo électrique 25 km/h assistance maximale	Vélo électrique 45 km/h assistance maximale	Bateau zéro émission 300 passagers à bord	Bateau aluminium Diesel
							
Durée de trajet en min à 8h	25	25	44	35	20	23	23
Energie (Wh) par passager	5854	1490	1813	122	171	196	571
Emissions de CO2 avec Vital vert à Genève (g)	1400	13	16	1.1	1.5	1.8	
Emissions de CO2, mix Suisse ou CFF (g)		191	300	16	22	25	139

Hypothèses: 1 personne par voiture et des bateaux remplis de 300 passagers.
*calcul basé sur le trajet Bellevue-Bellote, Canton de Genève

Sources principales :
SBBSchulen_Lehrmittel_Vertiefungslektion_Mobilitaet_D_v3.indd.pdf et outil CFF.

1. Situation de départ

Les routes autour des lacs sont de plus en plus chargées par le trafic motorisé individuel, alors que nos lacs sont des « infrastructures » naturelles qui peuvent contribuer à délester les routes en connectant les rives par le parcours le plus direct. Aujourd'hui, trois quarts des 10'000 frontaliers travaillant dans le canton de Vaud choisissent de contourner le Léman avec leur véhicule motorisé individuel pour leurs déplacements professionnels. L'attractivité des transports lacustres peut être augmentée si la cadence des horaires, la durée de trajet et le confort sont améliorés de manière significative. Par ailleurs, les passagers sont de plus en plus sensibles à l'empreinte écologique des véhicules y compris pour les bateaux. La technologie actuelle des bateaux Zéro Émission est suffisamment mûre pour remplacer les systèmes de propulsion thermiques actuels, afin d'assurer un transport de passagers à zéro émission.

Pour atteindre l'objectif d'un transport lacustre sans émission de CO₂, deux types de technologies se distinguent : la propulsion par pile à combustible à partir d'hydrogène et la propulsion par moteurs électrique alimenté par batteries (charge à quai).

En ce qui concerne la propulsion par hydrogène, la CGN, en étroite collaboration avec un travail de Master de l'EPFL, a recensé pas moins de 5 projets "Zero Emission Boat" réalisés au cours des 10 dernières années et 8 en cours d'étude au niveau international. Pour n'en mentionner ici qu'un seul, le projet Water-Go-Round sera inauguré en mai 2020. D'une capacité totale d'environ 84 personnes, ce ferry propulsé par pile à combustible et alimenté en hydrogène sera le premier bateau au monde à permettre le transport des passagers sur la baie de San-Francisco avec ce type de technologie.

Concernant le second type de technologie, à savoir les bateaux alimentés par batteries et moteurs électriques, un e-Ferry au Danemark permet le transport de passagers sans générer d'émissions directes de CO₂ (capacité 30 véhicules & 200 passagers). Ce ferry 100 % électrique opère depuis l'été 2019. Il exécute 5 rotations par jour entre deux îles. De ce fait, chaque année, pas moins de 20 000 tonnes de CO₂ sont économisées sur le trajet en comparaison avec un ferry classique.

En Suisse, la maturité technologique couplée à l'intérêt écologique a poussé la Zürichsee-Schiffahrtsgesellschaft à travailler sur un bateau électrique (60 passagers & 20 km/h).

Afin que le **transport de passagers lacustre augmente sa part de marché par rapport aux véhicules particuliers, il faut que la vitesse commerciale, le confort et la capacité à naviguer par mauvais temps** soient très élevés.

Fondée en 1873, la Compagnie Générale de Navigation (CGN) sur le lac Léman a pour ambition de devenir la société de navigation de référence en Suisse pour sa qualité de service aux passagers, sa responsabilité sociétale et environnementale et sa préservation du patrimoine.

Son action se concrétise dans trois missions :

Transport public efficient sur le lac Léman

Développement touristique durable de l'arc lémanique

Sauvegarde de la plus grande flotte "Belle Epoque" du monde

La CGN s'est dotée d'un plan de développement ambitieux dans tous ces segments et investit actuellement massivement dans le renouvellement de son outil industriel, dans la rénovation de sa flotte « Belle Epoque » et dans la construction de nouveaux bateaux destinés au transport public.

Objectif : dans les prochains dix ans, la CGN veut doubler sa contribution **au transfert** modal du trafic frontalier de la voiture individuelle vers la voie lacustre.

De nouveaux bateaux à la pointe

La CGN vient d'attribuer le mandat de construction de deux bateaux de passagers d'une capacité de 700 places chacun. D'un coût unitaire de 28.5 millions de francs, les deux nouveaux bateaux seront fabriqués par le chantier naval suisse Shiptec AG, dont le siège est à Lucerne. Ce choix est le résultat d'un processus d'appel d'offres public international pour lequel des dizaines d'acteurs européens actifs dans la branche ont été sollicités. L'assemblage sera réalisé en intégralité au chantier naval d'Ouchy pendant les années 2021 et 2022. Motorisés d'une technologie hybride parallèle et munis de coques perfectionnées, ces deux nouveaux bateaux permettront une

consommation réduite de plus de 40 % en comparaison des unités conventionnelles actuelles. Ils sont équipés de panneaux solaires sur le toit, pour un apport électrique d'appoint. La possibilité d'une remotorisation ultérieure avec une technologie de type Zéro Émission encore plus favorable à l'environnement a également été considérée. Grâce, notamment, à une coque en aluminium au profil particulièrement élaboré, à des hélices innovantes et à l'utilisation de matériaux composites très légers, ces deux nouvelles unités se situent à la pointe de ce que l'industrie navale produit aujourd'hui, tout en offrant la fiabilité et la simplicité d'exploitation indispensables à des unités appelées à naviguer avec une ponctualité maximale 18 heures par jour pendant 11 mois sur 12.

2. Objectifs du travail

La CGN a décidé d'accomplir la transition énergétique dans les 10 ans qui suivent et de se décarboner à terme. Le projet sert comme "moonshot" et doit aboutir à au moins un prototype de navire pour les futurs besoins de la société, idéalement exploitable sur une de ses lignes de transport public. En l'occurrence, la CGN vise à accompagner l'ouverture d'une nouvelle ligne à proximité de Genève en 2023 avec une révolution technologique.

Les besoins et contraintes opérationnelles des opérateurs seront formalisées, tout comme les différents use case (électrique vs. hydrogène) déployés ou en projets selon les capacités des bateaux et lignes.

Les contraintes légales et sécuritaires en lien avec l'homologation. Les options retenues seront précisées.

Un bilan énergétique et écologique du nouveau bateau sera établi.

Le projet mettra à disposition de la CGN et des collectivités publiques concernées une pré-étude de l'hydrodynamique, de la motorisation et du système de recharge d'énergie pour un bateau zéro émission et des possibilités techniques optimales en fonction des contraintes existantes (environnement et opérations).

Les différents livrables du projet:

- Synthèse sur les besoins, la ligne de référence et son intégration avec les autres mobilités.
- Synthèse sur les différents aspects réglementaires (niveau macro) : lacustre, écologique, électrique.
- Cahier des charges du bateau (rough design).

L'industrie maritime ayant été épargnée jusqu'ici de contraintes environnementales fortes, l'évolution technologique a surtout eu lieu au niveau du transport terrestre. Il est dans l'air du temps qu'il soit imposé à ce secteur de faire les mêmes efforts. Les batteries ayant une densité énergétique moindre, il faut étudier plus en détail les éléments de ces bateaux pour viser à en contenir la masse pour en minimiser CAPEX et OPEX.

- Cahier des charges des infrastructures.
- Rapport sur le pré-dimensionnement d'un bateau.
- Rapport sur le pré-dimensionnement des infrastructures..
- Synthèse de l'estimation des coûts et de l'enveloppe budgétaire.
- Rapport final.
- Argumentaire destiné aux pouvoirs publics.

L'étude de faisabilité de ce projet vise à donner une vision des possibilités et choix techniques envisageables en fonction du contexte réglementaire mais n'inclut pas un pré-projet ni des plans d'exécution du bateau envisagé. En effet, les estimations et analyses sont faites à un niveau macro qui doit permettre de prendre les bonnes décisions et ainsi aboutir rapidement ensuite à une pré-étude et un plan d'exécution.

La description complète des Work Packages (WP) se trouve en annexe de ce document ainsi que le Gantt Chart du projet.

3. Approche adoptée et état des connaissances actuelles

CONNAISSANCES ACTUELLES

Détermination de la ligne, clientèle potentielle, horaire (WP1)

Si l'on exclut les lignes lacustres touristiques, la CGN opère 3 lignes transfrontalières répondant à la définition suisse de ligne du trafic régional :

Ligne	* nombre de passagers transportés	Durée	Nombre de Courses Lu.-Ve.	Nombre de Courses Samedi	Nombre de Courses Dimanche	Longueur de la ligne en KM
N1 - Lausanne à Evian-les-Bains	315'000	35 minutes	15	15	13	12
N2 - Lausanne à Thonon-les-Bain	155'000	30 minutes	14.5	12.5	10.5	19
N3 - Nyon à Yvoire	75'000	20 minutes	23	20	20	7
	545'000					

**Seuls les allers-retours des passagers pendulaires (frontaliers) sont pris en compte, excluant le transport touristique, source : <https://www.cgn.ch/fr/cgn-mobilite#horaires>.*

L'étude de faisabilité de ce bateau de transport zéro émission se fait sur la base d'un cas d'étude sur une ligne désignée. Le choix de la ligne sur laquelle le cas d'étude devait porter était du ressort de la CGN. Les partenaires techniques et industriels étant quant à eux responsables des aspects techniques et financiers (TCO).

Selon les données de la CGN et de ses partenaires / mandataires, si l'ensemble des passagers pendulaires des lignes N1, N2 et N3 choisissaient la route, ce serait près de 1'600 voitures supplémentaires qui rejoindraient chaque jour ouvrable le Canton de Vaud depuis la Haute-Savoie. L'offre existante de la CGN sur les lignes N1, N2 et N3 permet d'éviter 215'000 km en voiture chaque jour, soit près de cinq tours du monde.

Afin de définir la ligne la plus adéquate à ajouter à l'offre existante développée ci-dessus, les 4 principes clés suivants - « les prérequis » ont été les suivants:

1. Une ligne publique utile pour un maximum d'utilisateurs ;
2. Utilisation des infrastructures existantes pour minimiser les investissements ;
3. Embarcadères accessibles de façon fluide et rapide via les transports publics ;

4. Pouvoir effectuer le voyage de bout en bout à vélo.

Sur la base des critères ci-dessus et à l'appui du rapport « Nouvelle voie bleue - Relier les deux rives pour une mobilité optimisée », une nouvelle voie bleue reliant les deux rives du lac à Genève apparaît comme la plus pertinente, et une solution complémentaire au Léman Express pour finaliser la boucle de transports du Grand Genève.

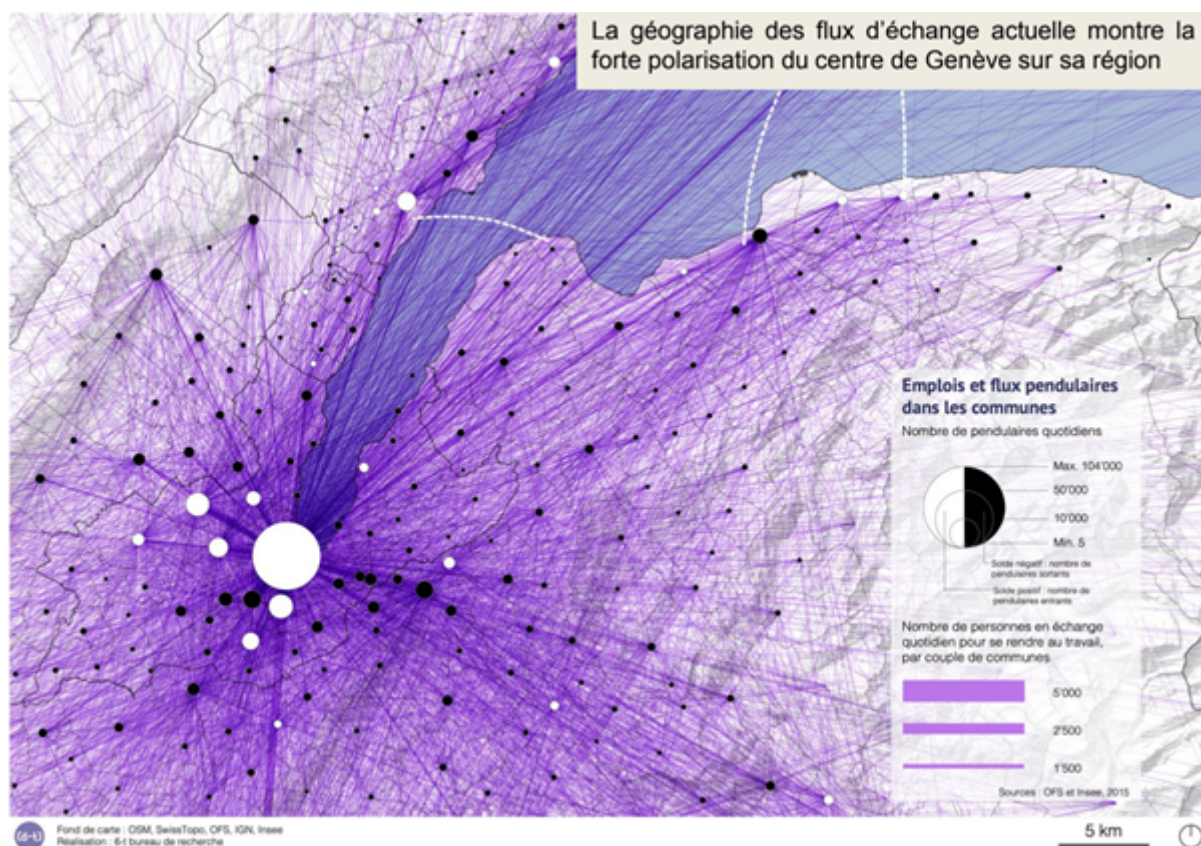
Un groupe projet constitué de divers acteurs publics et privés (Etat de Genève, CGN, experts en mobilité, Lombard Odier) a ainsi étudié cette possibilité pour aboutir à la proposition de ligne suivante qui sert également de cas d'étude pour l'étude de faisabilité du bateau zéro émission :

Une ligne bleue, exploitée par la CGN et accessible à tout public, reliant le port de la Belotte à celui de Bellevue.

Analyse et modélisation du nombre de passagers potentiels

Le *bureau 6-t*, bureau d'études et de recherche spécialisé sur la mobilité et les modes de vie, a étudié pour la CGN, le potentiel de la liaison lacustre Bellevue-Belotte avec des analyses territoriales régionales⁴.

Flux domicile-travail selon le rapport précité.



Selon cette étude de l'agence 6-t, les flux pendulaires totaux entre les deux rives pour le seul motif du travail correspondent aujourd'hui à environ 870 personnes par jour.

Sur la base des projections de population à origine des flux, et des projections d'emplois à destination de ces mêmes flux, ces derniers pourraient croître de manière significative pour atteindre 1'200 personnes, soit une croissance de 30 %.

Les déplacements pendulaires ne représentent qu'une partie du potentiel de la ligne, puisque les gens peuvent être amenés à l'utiliser pour d'autres motifs de déplacements. Parmi les autres motifs, les achats, les services ou encore l'accompagnement et les loisirs sont de forts générateurs de mobilité. La société 6-t évalue le potentiel supplémentaire lié à ces déplacements à environ 690 déplacements possibles aujourd'hui et à environ 900 à l'horizon 2030.

En outre, les observations faites par le passé montrent que dans un contexte dynamique, la demande induite pourrait être «raisonnablement» estimée à au moins 10%.

Au total, nous pouvons constater que le potentiel d'utilisation de cette nouvelle navette lacustre est considérable et qu'elle ouvre la voie à un marché non négligeable à exploiter qui est amené à s'accroître d'ici 2030.

→ Un marché potentiel actuel :

$(860 \text{ pendulaires} + 690 \text{ autres motifs}) \times 1,1 \text{ (demande induite)} = 1\,711 \text{ déplacements par jour ouvré.}$

→ À l'horizon 2030 :

$(1\,205 + 900) \times 1,1 \text{ (demande induite)} = 2\,315 \text{ déplacements par jour ouvré.}$

⁴ Rapport intermédiaire V1-06 mars 2020

Horaires considérés

Les horaires suivants sont envisagés, partant du principe qu'il faut compter 11 minutes de trajet pour une traversée, ce qui laisse 4 minutes pour embarquer les passagers.

Winter, Line N4

N.	Departure	D. time	Arrival	A. time
1	Belotte	06:30	Bellevue	06:41
2	Bellevue	06:45	Belotte	06:56
3	Belotte	07:00	Bellevue	07:11
4	Bellevue	07:15	Belotte	07:26
5	Belotte	07:30	Bellevue	07:41
6	Bellevue	07:45	Belotte	07:56
7	Belotte	08:00	Bellevue	08:11
8	Bellevue	08:15	Belotte	08:26
9	Belotte	08:30	Bellevue	08:41
10	Belotte	11:40	Bellevue	11:51
11	Bellevue	12:25	Belotte	12:36
12	Bellevue	16:45	Belotte	16:56
13	Belotte	17:00	Bellevue	17:11
14	Bellevue	17:15	Belotte	17:26
15	Belotte	17:30	Bellevue	17:41
16	Bellevue	17:45	Belotte	17:56
17	Belotte	18:00	Bellevue	18:11
18	Bellevue	18:15	Belotte	18:26
19	Belotte	18:30	Bellevue	18:41
20	Bellevue	18:45	Belotte	18:56

Analyse des normes et règlements (WP2)

La majorité des normes utiles pour évaluer la faisabilité d'un navire Zéro Émission sur le lac Léman a été étudiée. Il en ressort que la législation Suisse ne couvre que partiellement le sujet, spécialement en ce qui concerne l'utilisation de moteurs électriques, de batteries et d'hydrogène. Toutefois, les textes de loi font appel aux règles de l'art. C'est pourquoi les règles de sociétés de classification comme Bureau Veritas (BV, France) et Det Norske Veritas-Germanischer Lloyds (DVN-GL, Norvège et Allemagne) ainsi que les textes des organismes de normalisation ISO, IEC et NIBT ont également été étudiées. Ces dernières donnent des recommandations concernant les installations électriques, les batteries et les installations à hydrogène. En outre, en fonction de la vitesse opérationnelle, la loi suisse recommande de suivre les règles d'une société de classification pour les aspects structurels et de stabilité de la coque.

L'utilisation de l'ensemble de ces textes a permis de prendre les bonnes décisions de conception lors de l'étude de faisabilité technique. Toutefois, l'ensemble de ces normes est en construction, et le niveau de détail est insuffisant pour s'affranchir

d'une analyse de risque lors de la conception pour les systèmes d'hydrogène et électriques

Le Navire devra être construit conformément aux dispositions légales suivantes, sur la base de la version la plus récente en vigueur :

- **747.201.1** Ordonnance sur la navigation intérieure, ONI
- **747.201.7** Ordonnance sur la construction des bateaux, OCEB
- **747.201.71** DE-OCEB
- **747.201.3** Ordonnance sur les moteurs de bateaux, OMBat
- **747.201.31** DE-OMBat
- **0.747.221.11** Règlement de la navigation sur le Léman
- **151.34** Ordonnance sur les aménagements visant à assurer l'accès des personnes handicapées aux transports publics, OTHand

La liste de réglementations suivante doit être utilisée en cas de mention par les réglementations OCEB, ONI et DE-OCEB, ou pour les éléments non couverts par ces réglementations:

- **ESTI 607**
- **NIN Compact NIBT**
- **IEC 60092**
 - 1. **507** Petits navires
 - 2. **501** Electric propulsion plant
 - 3. **201** Généralités
 - 4. **202** Protection
 - 5. **302** Ensemble d'appareillage basse tension
- 6. **305** batteries d'accumulateurs
- 7. **352** Choix et installation des câbles électriques
- 8. **401** Installation et essais après achèvement

Construction du bateau

Les normes ont été considérées sur les éléments principaux qui contraignent de manière significative la conception (par exemple la position des réservoirs, des conduites, des batteries, etc...). Les éléments moins contraignants (par exemple l'installation de capteurs, installations radio) sont considérés seulement s'ils affectent les coûts.

Le navire devra être construit sur la base de la réglementation de l'Office Fédéral des Transports la plus récente. De fait, la coque, la superstructure du navire ainsi que ses appendices seront conçus en accord avec l'ONI, l'OCEB ainsi que le DE-OCEB. En revanche, ces règles stipulent clairement que le recours à une société de classification est conseillé, notamment pour la conception de la structure du navire ou pour obtenir des critères de stabilité plus détaillés. Afin d'avoir une référence, les normes BV ont été étudiées [1].

En résumé, ces réglementations vont imposer des contraintes structurelles majeures comme l'épaisseur de la coque, la mise en place d'une zone de collision à l'avant du navire ou encore un compartimentage de la coque adéquat. Par ailleurs, afin d'assurer l'accessibilité du navire à tous (PMR), ces normes imposent des dimensions minimales dont il faudra tenir compte. Enfin, pour assurer la sécurité de chacun, ces normes imposent aux navires un équipement permettant l'évacuation du navire, des dispositifs de lutte contre l'incendie et une construction avec des matériaux adéquats.

Pour ce qui est de la sécurité de la propulsion électrique, une étude de la réglementation suisse OMBat ainsi que de la DE-OMBat a été menée. Même si ces règles traitent des moteurs thermiques, elles pourront avoir un impact sur la manière de faire certifier la motorisation électrique. En revanche, pour obtenir des règles plus détaillées concernant les systèmes de

propulsion électrique des navires avec un stockage de l'énergie par batteries ou par pile à hydrogène, la réglementation Suisse impose de se baser sur l'état de l'art.

De fait, une étude des normes du Bureau Veritas NR467-Part C&F traitant des batteries a été menée [2]. La norme DNV-GL Pt.6 Ch.2 sec.1 [3] traite aussi de batteries, et a été utilisée par Leclanché pour les batteries du ferry électrique Danois "Ellen". Cette dernière est très complète et semble la plus adaptée à notre cas. D'autres textes de référence ont aussi été utilisés [4] [5] [6]. En résumé, le système de batteries et la propulsion doivent avoir un niveau de redondance (au moins deux packs séparés), et être dans des locaux sécurisés vis-à-vis des collisions, des émissions de gaz des batteries, de la surchauffe des batteries et du feu [7]. Un monitoring permanent des propriétés (température, état de charge) du pack de batteries est requis, ainsi qu'un système d'extinction incendie automatisé [8].

En ce qui concerne l'utilisation d'hydrogène sur les bateaux de transport des passagers, la réglementation Suisse contient une section spécifique pour les "vecteurs d'énergie spéciaux". Pour les piles à combustible et l'usage d'hydrogène, la norme fait principalement référence aux règles de l'art. C'est pourquoi la norme DNV-GL RU-SHIP pt.6 Ch.2 sec.3 [9] a été étudiée.

Cette norme sur les réservoirs, piles à combustible et systèmes auxiliaires définit les modalités de placement des éléments dans le navire, les exigences d'aération des locaux exposés au gaz et les spécificités des systèmes électriques dans lesdits locaux. Les moyens de surveillance et de sécurité (arrêts d'urgence, fail-safe, etc...) y sont aussi décrits.

En résumé, les réglementations limitent fortement le placement des réservoirs d'hydrogène sur le navire, et forcent à ce que tous les systèmes d'hydrogène soient centralisés dans un espace minimisé. Cela permet d'éviter le surcoût lié à l'installation de conduites qui traverserait le navire, l'étanchéification des pièces exposées au

gaz, la ventilation et les systèmes de surveillance et sécurité correspondants.

Infrastructure de recharge à quai

Pour les installations électriques à quai, la norme NIBT [10] nous donne des instructions pour les systèmes électriques proches d'un plan d'eau, suivant la distance, différents volumes sont définis avec des recommandations pour chacun (type de prise, précautions, protection...). Pour l'installation électrique dans le bateau, la norme NIBT n'est pas applicable, pour cette raison la série de norme IEC 60092 a été étudiée. Les normes IEC offrent des indications sur le réseau de distribution, les transformateurs, les convertisseurs, les batteries, les moteurs électriques et les câbles. Pour tous ces systèmes, des protections appropriées sont apportées. La recharge des batteries par une alimentation à quai est également abordée mais seul le courant alternatif est traité. Les éléments sur les batteries cités ne sont pas destinés à alimenter un bateau 100% électrique d'où l'importance de la norme DNV-GL Pt.6 Ch.2 sec.1. Pour finir la série de norme IEC précise que le navire doit comporter une source d'alimentation de secours mais il n'est pas précisé si les batteries par pack séparés pouvaient être considérées comme telles.

En ce qui concerne l'installation d'une station hydrogène, les normes ISO 19880-1 [11] et ISO/TR 15916 ainsi que des guides européens WP2 HyApproval [12] et IGC Doc 15/06/E [13]

définissent des recommandations sur : Le lieu approprié à une station hydrogène, les distances de sécurité, la protection du site, la configuration de stockage (au sol, enterré, souterrain), les rejets d'hydrogène, le ravitaillement et la protection contre le feu [14] [15]. La norme ISO 19880-1 est la plus complète en regroupant tous les aspects d'une station hydrogène, elle succède à la norme ISO 20100 qui n'a pas été validée en raison des distances de sécurité qu'elle proposait qui ont par la suite été redéfinies par une étude de risque. La norme ISO TR 15916 traite des aspects de sécurité de tout système comportant de l'hydrogène, le champ d'application est plus large mais les indications concernant la sécurité se recoupent avec la norme ISO 19880-1. Du fait que les normes ISO n'indiquent pas de distances de sécurité précises, l'utilisation de guides européens a été nécessaire comme avec le document IGC Doc 15/06/E qui indique des distances de sécurité fixes. Le dernier guide WP2 HyApproval apporte plus de précision sur le stockage d'hydrogène sur un toit (intéressant pour le bateau). Cependant dans tous les textes étudiés, aucune indication n'est précisée par rapport aux stations proches de points d'eau.

Définition du cahier des charges

Les exigences pour le navire sont données par la CGN basées sur leurs connaissances des besoins opérationnels. Un processus de feedback est mis en place entre le cahier des charges et les contraintes techniques liées à la navigation zéro émission. Les exigences données ici sont utilisées pour les premières boucles de conception.

Les prévisions du WP1 suggèrent un flux de passagers de 1700 personnes par jour potentiels actuellement, qui devrait augmenter à plus de 2300 passagers d'ici à 2030. Parmi ceux-ci, plus de 1000 seront des pendulaires, principalement direction Belotte-Bellevue le matin, et en retour le soir. La banque Lombard Odier, dont le siège mondial à Bellevue comptera 2'000 collaborateurs dès 2023, aura 300 passagers qui rejoindront quotidiennement la Bellevue depuis la rive gauche du lac.

Pour cela, la CGN veut une solution capable de faire traverser 900 personnes de gauche à droite en 1h le matin durant les heures de pointe. Ils ont identifié qu'un navire de 300 personnes optimise

leurs coûts opérationnels en termes de personnel de bord et de maintenance.

Dans l'horaire présenté, le temps de traversée est estimé à 11 minutes. Cela suppose qu'on doit pouvoir débarquer et embarquer en moins de 4 minutes.

En outre, il y a deux plages horaires possibles pour la recharge; de 8:45 à 11:40 et de 12:40 à 16:45. En profitant de cela, on peut proposer un bateau avec une autonomie de 10 traversées et un temps de charge approximatif de 6 h (2.5h le matin et 3.5h l'après-midi). Ceci dans un but de minimiser la masse de batteries par rapport à un navire qui aurait une autonomie d'une journée.

Dans l'objectif de minimiser encore la masse de batteries, la possibilité d'une charge rapide ("blow charge") à chaque arrêt a été soulevée (similaire au système TOSA d'ABB développé pour les bus).

Si l'hydrogène est la source principale d'énergie, alors le remplissage des réservoirs se fera une fois par jour.

Approche du problème d'architecture navale

L'étude de faisabilité technique appliquée au navire zéro émission vise à déterminer le scénario de navigation idéal en termes de consommation énergétique, investissements dans les infrastructures et aspects opérationnels.

L'objectif est d'apporter une compréhension quantitative de l'influence des choix techniques en termes de taille de navire, vitesse opérationnelle, source d'énergie, scénario de recharge et matériaux de la coque. L'effet des conditions météorologiques adverses sur la consommation énergétique et le matériel est aussi considéré.

Pour ce faire, une discussion continue entre les partenaires a été menée, et l'architecture globale du système de propulsion Zéro émissions a été déterminée. Les dimensions du bateau ont ensuite été adaptées à la clientèle potentielle et aux besoins en termes d'espace pour intégrer les systèmes. Puis, un devis de poids détaillé a été effectué. Ce dernier est utilisé pour calculer des courbes de résistance en eaux calmes. Avec ces

courbes et un modèle du système de propulsion du navire basé sur des méthodes classiques d'ingénierie maritime [16], de calculs de résistance [17], de dimensionnement d'hélices [18] et de modélisation des systèmes H2 [19], des grandeurs comme la puissance mécanique, la consommation énergétique, la masse de batteries ou la quantité d'hydrogène et le temps de traversée peuvent être calculées. Un processus itératif permet de prendre en compte le poids du stockage d'énergie et de la propulsion dans la performance du bateau. En outre, une estimation de la résistance ajoutée en conditions météorologiques adverses [20] a permis de s'assurer que le bateau pouvait assurer le service tout au long de l'année.

Approche du problème d'alimentations en énergie

Pour effectuer une navigation zéro émission, deux choix sont considérés: des batteries seules, ou un système hybride avec des piles à combustible à hydrogène couplées à un système de batteries servant à lisser la charge.

Dans le cas de l'utilisation de batteries uniquement, un pack capable d'alimenter le bateau pour la moitié de l'horaire (10 traversées) et rechargé pendant les creux de l'horaire a été dimensionné en se basant sur les systèmes de Leclanché [21] [22]. La station de recharge doit s'adapter à la consommation du navire. Pour cela, une évaluation des besoins techniques du système de recharge a été réalisée. Dans le futur, la solution à batteries pourrait se voir dotée d'une technologie de recharge rapide permettant de réduire les creux dans l'horaire à 30 minutes afin d'exploiter plus intensément la ligne. La solution type "TOSA", avec des batteries de faible capacité et forte puissance [23], rechargées à chaque aller-retour a aussi été

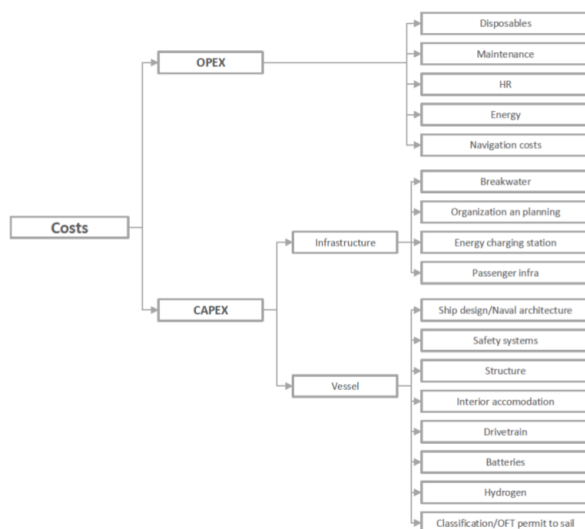
considérée, mais elle s'est avérée peu avantageuse en termes de gain de masse, et potentiellement coûteuse en infrastructures.

Si l'hydrogène est utilisé, les réservoirs sont dimensionnés pour permettre de les remplir une seule fois par jour (le matin ou le soir). Les piles à combustibles sont dimensionnées selon les produits [EODev](#) [24]. Les besoins techniques de la station de remplissage à hydrogène ont aussi été étudiés.

L'entier des systèmes électriques sera géré par un Onboard Microgrid d'ABB [25]. Ce système permet de connecter de manière modulable et sécurisée tous les systèmes d'alimentation d'énergie (batteries, piles à combustible, station de recharge électrique) et la propulsion.

Approche de l'analyse des coûts

La figure montre les coûts considérés dans l'étude.



Lorsque cela est possible, une demande de devis est effectuée chez un fournisseur ou un membre du consortium. Dans le cas contraire, des estimations à partir de données publiquement disponibles ont été effectuées. Les sources pour ces données font partie des catégories suivantes:

1. Catalogues fournisseurs, webshops, etc.
2. Publications scientifiques ou gouvernementales, whitepapers, etc.
3. Rapports annuels d'exercices, rapports nationaux sur le financement de projets.

Dans la troisième catégorie, une source précieuse est le compte-rendu des coûts de rénovation du bateau "Vevey" de la CGN, effectué en 2012⁵. Afin d'exploiter ces données, une interpolation basée sur la surface du pont principal a été effectuée.

Pour chaque centre de coût présenté dans la figure, les éléments constitutants sont listés, la source de données est présentée et les hypothèses sont détaillées.

On considère que le navire fait 20 traversées par jour (selon horaire du WP1) et qu'il opère 320 jours par an, ce qui fait un total de 6400 traversées/an. La durée d'exploitation prévue est de 30 ans.

⁵ [Exposé des motifs et projet de décret accordant au Conseil d'Etat un crédit d'investissement de CHF 3'000'000.- pour financer une partie des travaux de rénovation du bateau historique « Italie » de la société CGN Belle Epoque SA, à Ouchy-Lausanne - VD.CH](#)

4. Résultats

CAHIER DES CHARGES

Présentation des éléments principaux

Le tableau présente les caractéristiques principales indispensables pour le navire.

Caractéristique	Exigence	Commentaire
Nombre de passagers	300	en dessus de 300, 3 membres d'équipage sont requis, contre 2 jusqu'à 300.
Répartition 1ère/2è classes	20% 1ère, 80% 2ème	Répartition standard CGN
Longueur	$25\text{ m} < L < 40\text{ m}$	
Largeur	$B < 16\text{ m}$	
Tirant d'eau	$T < 1.1$ or $T < 1.6$	En cours d'étude des deux options. Idéalement 1.1m, mais si pas possible, jusqu'à 1.6m.
Franc-bord	$1.4\text{ m} < F < 1.6\text{ m}$	
Déplacement léger, faible, pleine charge	Δ	En cours d'analyse. L'objectif sera de minimiser la masse du navire.
Surface du pont	$< 400\text{ m}^2$	
Caractéristiques des réservoirs principaux (eau potable, huile, etc...)	Au moins 1 jours d'opération	
Nombre de vélos	$10 < N < 40$	Solution modulaire pour les vélos
Accès handicapés	Sur le pont principal	
Nombre de toilettes	1	Accessible handicapés
Temps de débarquement-embarquement	$< 5\text{ min}$	Pour accommoder l'horaire demandé
Durée de service	30 ans pour le navire	8/9 ans pour les batteries

Les dimensions principales sont définies par l'infrastructure à quai, la hauteur des quais, la profondeur d'eau disponible et les besoins opérationnels.

L'étude du WP1 ayant identifié la possibilité d'emmener des vélos à bord comme essentielle, un objectif élevé de 40 vélos a été posé. L'accès aux personnes souffrant de handicap devra être possible sur tout le pont principal.

Facteurs environnementaux

Les processus météorologiques étant uniquement quantifiables en termes de probabilité, les fréquences données correspondent à un intervalle de temps dans lequel les conditions mentionnées ont 100% de chances d'arriver. Ces facteurs

environnementaux sont utilisés pour calculer la résistance mécanique de la coque ainsi que l'augmentation de la résistance à l'avancement (et donc la puissance) lors de navigation par mauvais temps.

Caractéristique	Exigence	Commentaire
Hauteur de vague significative	1.2 m (chaque année) 1.9 m (chaque 10 ans)	
Période de vague	4 s (chaque année) 5.1 s (chaque 10 ans)	
Longueur de vague	20 m (chaque année) 41 m (chaque 10 ans)	
Température de l'eau	$5^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$	
Température de l'air	$-20^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$	

PROPRIÉTÉS DES INFRASTRUCTURES

Aménagement des débarcadères

Afin d'estimer le temps nécessaire pour embarquer les passagers, on suppose que l'embarquement se fait en files de passagers écartés de 0.5 m les uns des autres. Dans une telle file, les personnes se déplacent à une vitesse approximative de 0.5 m/s. Cela implique 1 passager par file et par seconde.

Pour un navire de 300 passagers et un temps d'embarquement de 4 minutes, 3 files sont nécessaires. Avec 2 files, le temps est de 5 minutes.

Le quai fait environ 2m de large à Bellevue, et 1.6m de large à la belotte (mesuré sur Google Maps). Selon les prescriptions de l'OTHAND du Règlement de Navigation sur le Léman, la largeur de passage pour une chaise roulante est d'au moins 0.8m à l'intérieur du navire et 1.2m sur les débarcadères. Des aménagements seront nécessaires.

Le temps de manœuvre, entre le moment où le navire se trouve à quelques mètres du quai et le moment où le navire est amarré et prêt pour l'embarquement des passagers, est déterminant dans le choix de la vitesse opérationnelle. Ce temps de manœuvre est estimé par les capitaines de la CGN (séance du 11 février 2021) à 5 minutes avec les méthodes d'accostage et les pontons actuels. Ce temps élevé a pour conséquence de requérir une vitesse opérationnelle particulièrement élevée (90 km/h en pointe) pour maintenir la cadence à 15 minutes. En conséquence, il apparaît que la manœuvrabilité du bateau et des aménagements adéquats afin de réduire ces durées sont indispensables à la viabilité du projet. En ce sens, l'utilisation de pontons flottants pour faciliter la mise à niveau du bateau et des quais est recommandée. L'accès des PMR en sera également facilité.

Station de charge électrique lente (200-500kVA)

Si la puissance est inférieure à 250kVA, l'alimentation se fera par un simple courant triphasé 400 V pris sur le réseau électrique disponible. Contrairement à la recharge rapide, il

n'y a pas de contrainte de distance, de plus l'installation électrique en bout de quai peut être faite par les SIG en tant que maître d'œuvre. Les coûts vont être fonction de la puissance

demandée, notamment pour la participation de taxe de raccordement et la finance de branchement.

Pour ces puissances, il est possible d'être en basse tension ou alors en moyenne tension, à savoir que le seuil pour passer de la basse tension (BT) à la moyenne tension (MT) est de 500 kVA. En BT, l'évaluation de la technique d'alimentation dépend de la position et des infrastructures locales. La BT peut poser des problèmes de section de câble sur des distances élevées.

La MT est une option intéressante sur l'aspect financier, il est possible de payer pour 500 kVA pour être en MT mais ne pas forcément les consommer. Cette opération devient intéressante au-delà des 300 kVA de puissance. Cependant pour la MT un poste de transformation doit être installé. Un poste MT mesure environ 20 m² avec une hauteur de 1.7 m. Il est possible de l'enterrer

mais les coûts devront être multipliés par 3 (environ 500kCHF). Pour un poste MT 18 kV l'installation peut prendre environ 1 an dans de bonnes conditions.

Être propriétaire du poste devient financièrement intéressant à partir d'une certaine puissance consommée.

Il faut également prendre en compte les frais de génie civil et de raccordement électrique. Si le raccordement est fait sur une parcelle privée, alors le gestionnaire de réseau de distribution (SIG) finance les travaux sur le du domaine public. Dans le cas contraire, si la parcelle est publique les coûts sont intégralement à la charge du client.

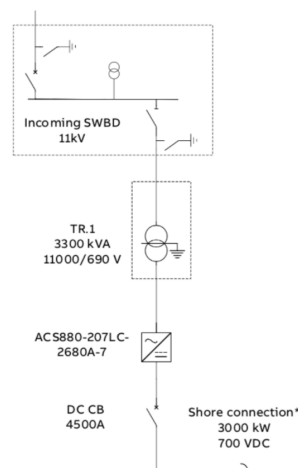
Pour le connecteur de recharge, ABB propose des produits dédiés directement à ce type d'installation.

Station de charge électrique rapide (2-3 MVA)

Afin de diminuer le temps de charge, on peut construire une station de charge rapide avec une puissance plus élevée. Dans ce cas, un poste MT d'au moins 45 m² doit être construit. Un poste 18kV intègre des transformateurs 1000 kVA (standard SIG) ou 1250 kVA ou 1600 kVA à la demande du client. En cas de panne la maintenance se complique, les SIG ne pouvant fournir que des transformateurs de 1000 kVA dans un délai court.

Le 18 kV est transformé en 690 VAC puis redressé en 700VDC. Enfin, le courant continu est injecté directement dans les batteries sans étage de transformation dans le bateau.

ABB propose un **système pour la charge rapide** en se connectant directement au niveau MT, présenté ici.



Il faut aussi trouver un connecteur étant capable de passer la puissance tout en étant rapide à la connexion. Un système robotisé est envisageable.

Le système doit être placé sur la terre ferme. Une distance de 50 mètres est admissible entre le système et le navire. Cette distance peut être élevée jusqu'à 100 mètres mais des adaptations du système doivent être potentiellement prévues pour atteindre une telle longueur.

Pour rappel les longueurs de pontons sont :

- Pour La Belotte : 106 mètres
- Pour Bellevue : 55 mètres

Avec le système de charge rapide, le redresseur de courant AC/DC se trouve à terre, contrairement au système de charge lente ou celui-ci se trouve dans le bateau (intégré dans le Onboard Microgrid).

D'après la NIBT, le degré de protection minimum pour la prise électrique devra être IPX4 (pour 230V) (V.Barcellini, 2019).

Station de remplissage hydrogène

Les informations concernant les installations hydrogènes ont été prises dans les normes [12].

Une étude de risque est nécessaire pour déterminer les distances de sécurité propre à l'installation hydrogène, mais une première approche est de considérer la distance recommandée de 8 m pour les lieux de rassemblements et les constructions en bois. Les distances indiquées peuvent être réduites par la mise en place de protection contre l'incendie, comme par exemple l'utilisation de barrières coupe-feu, la construction de bâtiments en matériaux incombustibles, une gestion contrôlée des rejet d'hydrogènes, une maîtrise de la surpression d'hydrogène en cas d'incendie .

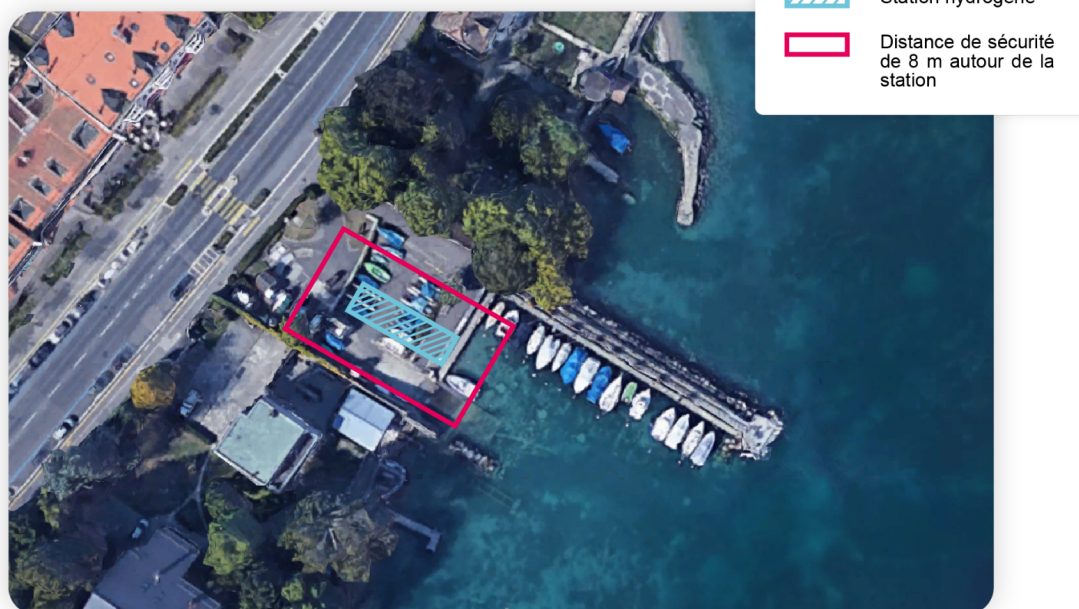
L'emplacement proposé pour la station hydrogène à Bellevue semble suffisamment éloigné des bâtiments pour assurer une distance de sécurité de 8 m. Encore une fois, dans cette configuration, la zone de sécurité risque d'être traversée par les gens empruntant le quai de plus un parking sera potentiellement dans les délimitations. Des aménagements sont possibles pour réduire les distances de sécurité.

Le site étant proche d'une route et potentiellement soumis à une forte fréquentation de personnes passant à proximité, des précautions doivent être prises contre les manipulations non autorisées, à l'instar de clôtures. La distance minimale entre la clôture et toute installation doit être de 0,8 m pour permettre le libre accès à l'enceinte et la sortie de celle-ci. La hauteur de la clôture doit être d'au moins 2m.

Le Règlement d'application de la loi sur la prévention des sinistres [15] exige que la station d'hydrogène soit accessible par les services du feu.

La législation genevoise indique que l'accès pour les services du feu doit mesurer au moins 4 m de large pour les chaussées en virage avec un rayon intérieur de plus de 13 m ce qui est notre cas.

De plus, il est exigé qu'une place de travail de 5 m de largeur et 12 m de longueur soit disponible pour les services incendies en cas d'intervention sur la station hydrogène. L'intégration de cette place de travail en bord de rive reste à définir.



Carbagas, entreprise du groupe Air Liquide et fournisseur de solutions hydrogène en Suisse, propose un approvisionnement par camion, avec une remorque ("trailer") de bonbonnes d'hydrogène à 300 bars. La remorque est déposée par le camion et récupérée lorsqu'elle est vide. Elle sert donc de réservoir à quai.

Pour remplir le bateau, on peut soit transférer l'hydrogène par équilibrage des pressions, soit recompresser l'hydrogène avec un compresseur faisant partie de la station de remplissage.

- La *première solution* est peu coûteuse, simple de mise en œuvre et permet un remplissage en 30 minutes. Toutefois, la

pression dans les réservoirs du navire est limitée à environ 200 bars. Cela implique des réservoirs plus volumineux et donc plus lourds.

- La *seconde solution* nécessite un investissement plus important, et le temps

de remplissage sera de l'ordre de quelques heures. Elle permettrait toutefois de stocker l'hydrogène à 350 bars sur le bateau, offrant une densité énergétique plus importante.

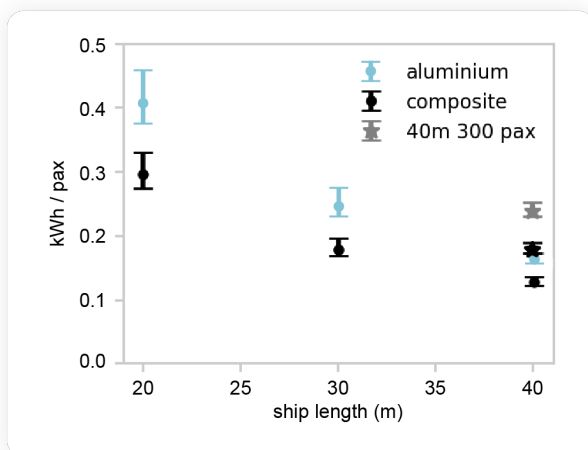
PROPRIÉTÉS DU BATEAU

Sélection de la longueur

Afin de mettre en perspective les possibilités pour acheminer la même quantité de passagers par heure tout en proposant un horaire différent, des calculs ont été faits pour les concepts de navires suivants

Longueur	Nombre de passagers
20	95
30	300
40	300
40	500

Avec une consommation énergétique par passagers présentée



On observe que la consommation par passager diminue avec l'augmentation de la longueur du navire. Toutefois, si on limite le navire de 40 m à 300 passagers, la consommation est similaire à celle du navire de 30 m.

Si l'on se base sur la consommation énergétique par passager pour un aller, ainsi que sur les contraintes liées à la réglementation, le navire de 40 m restreint à 300 passagers (avec un unique pont) et celui de 30m (avec deux ponts) sont ceux qui présentent la consommation par passager pour un aller la plus basse.

Ce sont donc potentiellement les navires les plus intéressants au vu des vitesses imposées et des scénarios de recharges.

En revanche, une étude de coût de construction des bateaux et de coût à l'opération doit corroborer cette conclusion et pourrait permettre de faire un choix entre ces deux longueurs de 30 m et 40 m.

De plus le navire de 40 m restreint à 300 passagers permettra de transporter 40 vélos tandis que le navire de 30 m permettra de transporter 20 vélos. Cela peut également être un critère de choix selon le besoin. La logistique pour la construction d'un navire de 40 m est cependant plus contraignante et les quais accueillant le navire devront être adaptés à sa taille. Des critères internes à la CGN comme la potentielle utilisation du bateau sur d'autres lignes permettront de trancher entre ces longueurs retenues.

Pour ce qui est du navire de 20 m, il n'apparaît pas extrêmement avantageux du point de vue de la consommation énergétique par passager sur un aller de ligne N4. Cependant, sa longueur étant moins encombrante et sa capacité en passager étant moindre, il peut être intéressant dans le cas où les débarcadères ne seraient pas adaptés à un navire de 30 m ou 40 m (p.ex. modifications impossibles) et dans le cas où l'on voudrait augmenter la fréquence de rotations des navires avec une fiche horaire présentant un timing plus serré. On pourrait alors penser à deux bateaux en rotation sur la ligne N4 au lieu d'un seul. De plus, le temps d'embarquement sur un petit bateau est réduit ce qui est un avantage pour un bateau-bus.

Finalement, l'option identifiée comme satisfaisant au mieux le cahier des charges du WP3 est le navire de 30 m.

Puissance en fonction de la vitesse

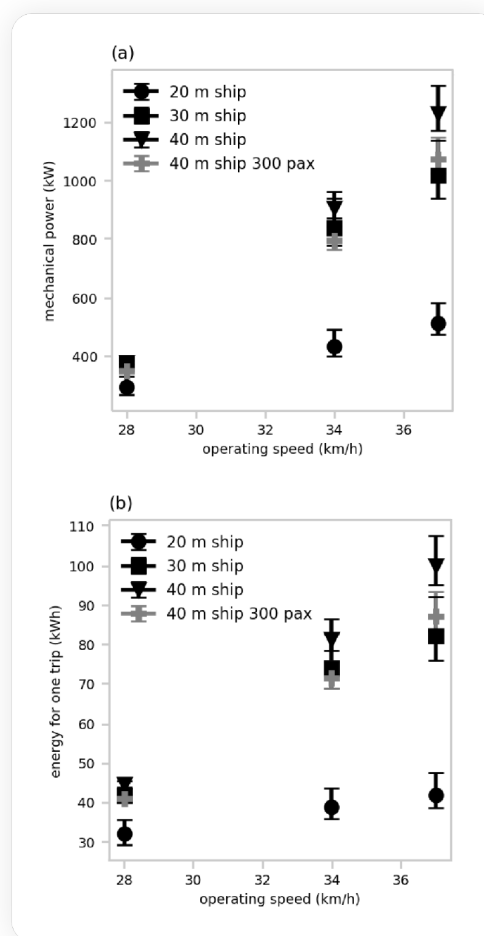
Bien que le cahier des charges définit une vitesse opérationnelle de 34 km/h, il est intéressant de mettre en perspective la puissance et l'énergie nécessaires pour différentes vitesses opérationnelles (Figure 9).

Cela permet d'évaluer les économies possibles en minimisant le temps à quai. Pour rappel, *une économie de temps d'une minute à quai (manœuvres ou débarquement-embarquement) permet de passer la vitesse opérationnelle de 34 km/h à 28 km/h.*

On observe que de diminuer la vitesse de 34 km/h à 28 km/h permet de réduire de 55 % la puissance et de 44 % la consommation énergétique.

Toutefois, n'ayant pas de certitudes qu'il sera possible de diminuer le temps d'embarquement, la vitesse de 34 km/h est maintenue pour la suite.

Figure 9 Puissance mécanique (a) et énergie pour une traversée (b) en fonction de la vitesse pour les 4 scénarios de navires considérés. Les barres d'erreur correspondent à la plage possible en fonction du choix de la source d'énergie.



Consommation en fonction de la technologie et du matériau (pour la vitesse définie):

En construisant la coque et les éléments structurels en composite, on peut réduire fortement la masse de ceux-ci. Plusieurs études montrent un potentiel de diminution de 40 % [26] [27] [28] [29] [30].

Afin d'estimer l'effet d'une construction en composite, nous avons réduit la masse structurelle du navire de 40 % et maintenu les autres éléments du devis de masse. Comme

pour la version en aluminium, un processus itératif a permis de déterminer la masse du système de propulsion.

Les besoins en puissance et en énergie sont présentés sur la Figure 12. **Une construction en fibres de carbone permet une diminution de 28 % de la puissance et de la consommation.**

Ce gain se reportera directement sur les CAPEX et OPEX pour la propulsion.

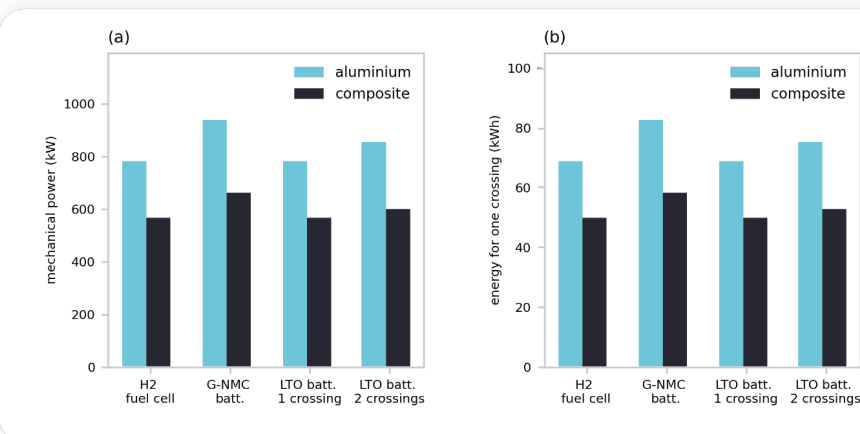


Figure 12: Influence du matériaux sur la puissance (a) et la consommation énergétique (b) pour tous les scénarios d'un navire de 30m à 34 km/h.

R sili nce aux conditions météorologiques adverses

La présence de vagues et le vent de face augmentent la résistance à l’avancement et donc la consommation énergétique. Cet effet est illustré sur la Figure 13.

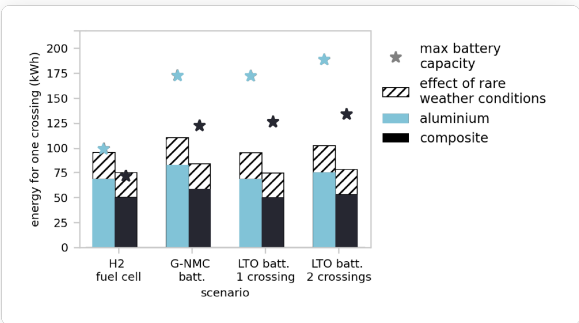


Figure 13: Effet des conditions météorologiques adverses sur la consommation énergétique pour une traversée. Navire de 30 m à 34 km/h.

Les conditions rares augmentent la consommation de 46% en moyenne. Le surdimensionnement des batteries nécessaire pour assurer leur durée de vie leur donne une capacité « en réserve » suffisante pour assurer la traversée dans ces conditions.

Il est vrai que l'utilisation des batteries sur une plus grande plage de leur capacité réduit leur durée de vie. Mais considérant la faible fréquence des conditions météo mentionnées, l'effet global sur la durée de vie sera marginal.

Dimensions et matériaux retenus

Le navire identifié comme correspondant le mieux aux exigences de la ligne N4 est un catamaran de 300 passagers, sur deux ponts. Il mesure 30m de long et 10.7m de large. La vitesse de croisière est définie par l'exigence d'une cadence à la demi-heure ce qui aboutit à 43 km/h pour rejoindre Corsier depuis Bellevue, ou 34 km/h pour la Belotte. Le bateau doit effectuer 10 allers-retours dans une journée. La construction de la structure privilégiée est en matériaux composites, majoritairement en fibres de carbone afin de réduire le poids et la traînée du bateau. En ce qui concerne la propulsion, deux types de stockage d'énergie sont considérés : des batteries ou des réservoirs d'hydrogène qui sont alors combinés à des piles à combustible hydrogène pour la production d'électricité. La gestion de l'énergie interfaçant tous les systèmes électriques de la chaîne de propulsion est pilotée par un système centralisé.

Consommation sur Corsier, comparaison

La puissance nécessaire est en moyenne 60 % supérieure à la ligne de Belotte. En ce qui concerne la consommation énergétique par passagers, elle est de 100 % supérieure. Si on calcule la consommation par passagers-km (kWh/pax/km), l'augmentation moyenne est de 48 %.

Batterie		
Tableau 1: Comparaison des grandeurs caractéristiques entre Bellevue-Belotte et Bellevue-Corsier pour le navire de 30m fonctionnant avec des batteries.		
	Bellevue-Belotte	Bellevue-Corsier
Distance (km)	3.4	4.4
Vitesse (km/h)	34	43
Puissance (kW)	860	1300
Consommation (kWh)	58.7	121
Consommation (kWh/pax)	0.20	0.40
Consommation (kWh/pax/km)	0.060	0.091
Capacité de la batterie (MWh)	1.23	2.53
Masse d'énergie (T)	14.5	28

H2

Tableau 2: Comparaison des grandeurs caractéristiques entre Bellevue-Belotte et Bellevue-Corsier pour le navire de 30m fonctionnant à l'hydrogène

	Bellevue-Belotte	Bellevue-Corsier
Distance (km)	3.4	4.4
Vitesse (km/h)	34	43
Puissance (kW)	740	1000
Consommation (kWh)	50.6	93.8
Consommation (kWh/pax)	3.00	5.58
Consommation (kWh/pax/km)	0.17	0.31
Capacité de la batterie (MWh)	0.05	0.07
Consommation H2 journalière (kg H2)	60.2	112
Masse d'énergie (T)	8	11

Utilisation du bateau à batteries de Corsier sur la ligne N3 (Nyon - Yvoire)

Afin d'évaluer si le bateau considéré dans cette étude était confiné au Petit Lac, ou s'il pouvait être utilisé sur d'autres lignes de la CGN, une simulation du bateau à batteries dimensionné pour Corsier et exploité sur la ligne N3 a été effectuée. Cette traversée fait 6.2 km.

Le bateau considéré est donc un 30 m en composite, avec une propulsion entièrement batteries d'une capacité totale de 2.53 MWh. L'horaire d'hiver de la N3 est pris comme référence, puisqu'il est assuré par un unique bateau. L'horaire d'été est desservi par plusieurs bateaux, une analyse approfondie serait donc requise.

La cadence est de 50 minutes, avec 5 minutes d'embarquement. Le temps de traversée prévu par l'horaire est donc de 20 minutes. En appliquant les mêmes hypothèses sur les temps de manœuvre, on a à disposition 18 minutes pour la traversée. Il y a un total de 26 traversées dans la journée.

On note plusieurs pauses dans cet horaire, qui totalisent 3h35 :

1. 09:00 - 09:55
2. 10:45 - 11:35
3. 12:45 - 13:25

4. 14:15 - 15:25

De plus, le plus grand nombre de traversées d'affilée (12) se fait le soir.

HORAIRE HIVER 15.12.2019-09.04.2020 / 26.10.2020-12.12.2020			
YVOIRE → NYON		NYON → YVOIRE	
⌚	06h10 , 06h30	⌚	06h35 , 06h55
⌚	07h00 , 07h20	⌚	07h25 , 07h45
⌚	07h50 , 08h10	⌚	08h15 , 08h35
⌚	08h40 , 09h00	⌚	09h55 , 10h15
⌚	10h25 , 10h45	⌚	11h35 , 11h55
⌚	11h55 , 12h15	⌚	12h25 , 12h45
⌚	13h25 , 13h45	⌚	13h55 , 14h15
⌚	15h25 , 15h45	⌚	15h55 , 16h15
⌚	16h20 , 16h40	⌚	16h50 , 17h10
⌚	17h15 , 17h35	⌚	17h45 , 18h05
⌚	18h10 , 18h30	⌚	18h35 , 18h55
⌚	19h00 , 19h20	⌚	19h25 , 19h45
⌚	19h50 , 20h10	⌚	20h20 , 20h40

Figure 8: Horaire d'hiver de la ligne N3 CGN (Nyon-Yvoire). On note plusieurs pauses dans l'horaire.

Une vitesse de 25 km/h permet d'effectuer la traversée en 17.5 minutes. Le bateau de Corsier a été simulé sur la distance de 6.2 km avec une vitesse de 25 km/h. Les grandeurs principales sont présentées dans le tableau.

	N3
Distance (km)	6.2
Vitesse (km/h)	25
Puissance (kW)	215
Consommation (kWh)	54.7
Consommation (kWh/pax)	0.18
Consommation (kWh/pax/km)	0.029
Capacité de la batterie (MWh)	2.53
Masse d'énergie (T)	28

Tableau 3: Grandeurs principales pour un bateau à batteries sur la ligne N3.

La cadence à 50 minutes actuellement en vigueur sur la N3 permet d'avoir une vitesse de croisière significativement plus faible sur la N3 que sur la N4 à destination de Corsier. Cela a des conséquences positives sur la puissance nécessaire et donc la consommation

énergétique. Tellement que malgré la distance 40 % supérieure, la consommation par traversée est inférieure de 55 % !

Avec la batterie dimensionnée pour Bellevue-Corsier, le bateau peut effectuer 22 traversées entre les recharges. Il peut donc assurer le service de la N3.

Étant donné que l'autonomie est de 22 traversées, il faut recharger l'équivalent de 4 traversées (219 kWh) lors d'une des pauses dans l'horaire. L'heure entre 14:15 et 15:25 est idéale. La puissance de recharge minimale serait de 220 kW. Ce sont donc les mêmes infrastructures que pour la N4.

Afin de minimiser le coût en capital de la batterie, on pourrait considérer de réduire sa capacité et d'exploiter au mieux les autres plages de recharge potentielle qui se trouvent dans l'horaire.

ANALYSE FINANCIÈRE

→ CAPEX des solutions

Solution à batteries

Les investissements en termes d'infrastructure et d'acquisition du bateau à batteries sont présentés ici, selon les deux variantes Bellevue - Corsier et Bellevue - La Belotte. Il faut noter que la plupart des éléments sont communs avec le bateau à hydrogène.

Infrastructures (*voir détails annexe*)

Infrastructure	Bellevue-Corsier	Bellevue-Belotte
Breakwater	CHF 700'000	CHF 350'000
Organization and planning	CHF 478'200	CHF 408'200
Passenger infra	CHF 1'148'000	CHF 1'148'000
Charging station	CHF 331'975	CHF 331'975
Total	CHF 2'658'175	CHF 2'238'175

Bateau (*voir détails annexe*)

Vessel	Bellevue-Corsier	Bellevue-Belotte
Ship design / naval architecture	CHF 1'597'940	CHF 1'597'940
Molds	CHF 2'176'930	CHF 2'176'930
Subtotal	CHF 3'774'870	CHF 3'774'870
Structure	CHF 4'587'410	CHF 4'587'410
Drivetrain	CHF 1'519'758	CHF 1'391'782
Batteries	CHF 1'196'690	CHF 671'300
Interior accomodation	CHF 1'791'672	CHF 1'791'672
Safety systems	CHF 538'778	CHF 538'778
Classification / OFT permit to sail	CHF 9'500	CHF 9'500
Subtotal	CHF 9'643'809	CHF 8'990'443
Total	CHF 13'418'679	CHF 12'765'313

Solution à hydrogène

Les investissements en termes d'infrastructure et d'acquisition du bateau à hydrogène sont présentés ici.

Infrastructures (voir détails en annexe)

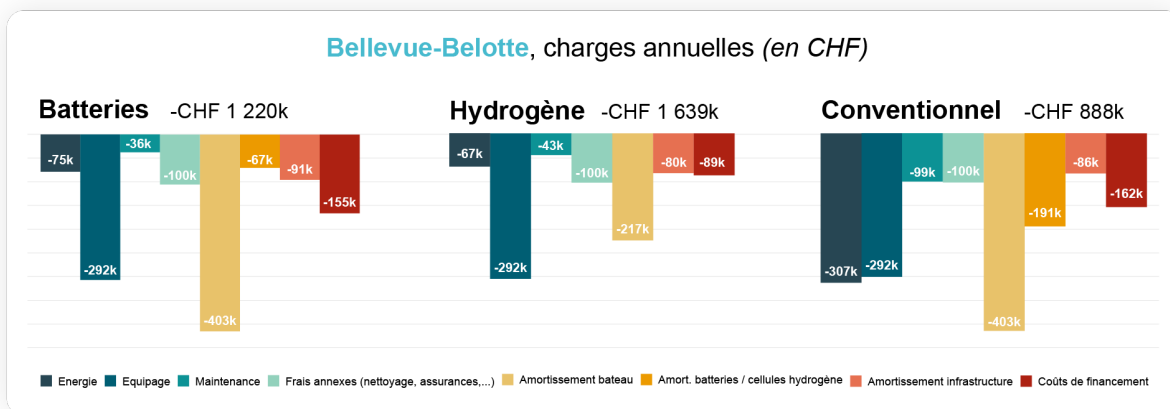
Infrastructure	Bellevue-Corsier	Bellevue-Belotte
Breakwater	CHF 700'000	CHF 350'000
Organization and planning	CHF 478'200	CHF 408'200
Passenger infra	CHF 1'148'000	CHF 1'148'000
H2 station	CHF 160'000	CHF 160'000
Total	CHF 2'486'200	CHF 2'066'200

Bateau (voir détails en annexe)

Vessel	Bellevue-Corsier	Bellevue-Belotte
Ship design / naval architecture	CHF 1'597'940	CHF 1'597'940
Molds	CHF 2'176'930	CHF 2'176'930
Subtotal	CHF 3'774'870	CHF 3'774'870
Structure	CHF 4'587'410	CHF 4'587'410
Drivetrain	CHF 1'519'758	CHF 1'391'782
Fuel Cell systems	CHF 2'035'980	CHF 1'527'086
Interior accomodation	CHF 1'791'672	CHF 1'791'672
Safety systems	CHF 538'778	CHF 538'778
Classification / OFT permit to sail	CHF 9'500	CHF 9'500
Subtotal	CHF 10'483'099	CHF 9'846'229
Total	CHF 14'257'969	CHF 13'621'099

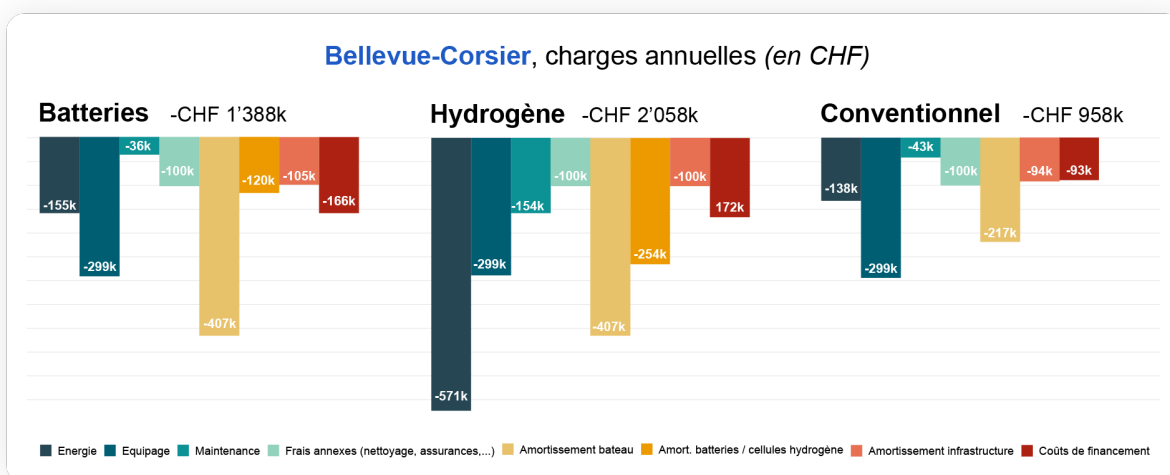
Proportion de chacun des composants du prix sur le coût annuel

Les principaux centres de coûts sont les ressources humaines, la maintenance et l'amortissement du bateau. Concernant ce dernier point, les chiffres présentés ci-après incluent l'hypothèse qu'un seul bateau est fabriqué. Ainsi, la conception et les moules pour les pièces en composites ne sont amortis que sur une seule unité.



On voit que pour la solution à batteries, le coût énergétique est compétitif avec un bateau conventionnel, et les coûts liés au système (amortissement batteries et station de recharge) ne représentent que 78 kCHF annuellement.

En ce qui concerne la solution à hydrogène, elle est péjorée par un coût de l'énergie plus élevé, et un amortissement du système de piles à combustible plus important.



Pour la destination de Corsier, l'augmentation de la vitesse opérationnelle et de la distance se répercute directement sur le coût de l'énergie.

En outre, la solution à batteries requiert une capacité plus élevée, et donc un amortissement en conséquence.

Les calculs ont également été faits dans le cas de l'amortissement des coûts de conception et de moules pour les pièces composites sur 10 bateaux. Les charges d'exploitations s'en trouvent réduites de 10 à 15%. L'écart des charges entre les bateaux zéro émission et le bateau thermique s'en trouve alors réduit.

Analyse financière

Les chiffres-clés sont présentés ci-après pour l'itinéraire Bellevue-Belotte initialement envisagé, en situation actuelle (le détail des chiffres figure en *annexe 6*).

Route	Bellevue-Belotte		
Type	Batteries	Hydrogène	Conventionnel
Distance (kilomètres)	3.40	3.40	3.40
Nombre de places	300	300	300
Nombre de places vélos	40	40	40
Clientèle potentielle par navette	51	51	43
Taux de remplissage moyen	17%	17%	14%
Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	11.60
Produits totaux pour une rotation	251	251	209
Charges totales pour une rotation	-370	-481	-278
Résultat net sur une rotation	-119	-230	-68
Résultat annuel CHF	-380'603	-737'529	-219'021
Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-888'290

Les calculs ont également été adaptés à une variante sur Corsier. Les modifications de coûts tiennent aux contraintes opérationnelles et techniques qui renchérissent tant le coût d'investissement que le coût d'exploitation de la navette. Le prix a été adapté au kilomètre supplémentaire. Les autres hypothèses sont restées identiques, sans qu'il soit par ailleurs démontré que la zone de chalandise ne subisse pas une variation.

Route	Bellevue-Corsier		
Type	Batteries	Hydrogène	Conventionnel
Distance (kilomètres)	4.40	4.40	4.40
Nombre de places	300	300	300
Nombre de places vélos	40	40	40
Clientèle potentielle par navette	51	51	43
Taux de remplissage moyen	17%	17%	14%
Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	15.00	15.00	15.00
Produits totaux pour une rotation	321	321	267
Charges totales pour une rotation	-422	-643	-308
Résultat net sur une rotation	-102	-323	-41
Résultat annuel CHF	-326'039	-1'032'040	-129'728
Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'351'767	-2'057'768	-984'501

Le changement d'itinéraire réduit le déficit d'exploitation de la ligne pour les variantes à batterie et du bateau conventionnel. Cela est dû au coût plus élevé du billet combiné à un faible coût de l'énergie et de son utilisation. Pour l'hydrogène, le coût de l'énergie élevé engendre un déficit plus important pour la variante Bellevue-Corsier.

En fonction des prévisions de développement de la zone de chalandise, l'étude du cabinet t-6 tablait sur une croissance de la clientèle potentielle de plus de 30%. L'évolution des mentalités face aux émissions permet par ailleurs de considérer un taux de pénétration plus élevé du mode de transport lacustre, qui passerait à 50%. Les 2 itinéraires pour les 2 variantes de navettes zéro émission ont été recalculés sur ces bases, toutes choses égales par ailleurs (il est considéré par hypothèse simplificatrice que toute augmentation de coût serait compensée par une augmentation du prix).

Au bénéfice d'une bien meilleure fréquentation, les bateaux présentent un bilan financier positif.

SITUATION 2032				
Route	Bellevue-Belotte		Bellevue-Corsier	
Type	Batteries	Hydrogène	Batteries	Hydrogène
Distance (kilomètres)	3.40	3.40	4.40	4.40
Nombre de places	300	300	300	300
Nombre de places vélos	40	40	40	40
Clientèle potentielle par navette	116	116	116	116
Taux de remplissage moyen	39%	39%	39%	39%
Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	15.00	15.00
Produits totaux pour une rotation	567	567	724	724
Charges totales pour une rotation	-370	-481	-422	-643
Résultat net sur une rotation	197	85	301	81
Résultat annuel CHF	629'778	272'852	964'393	258'392
Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-1'351'767	-2'057'768

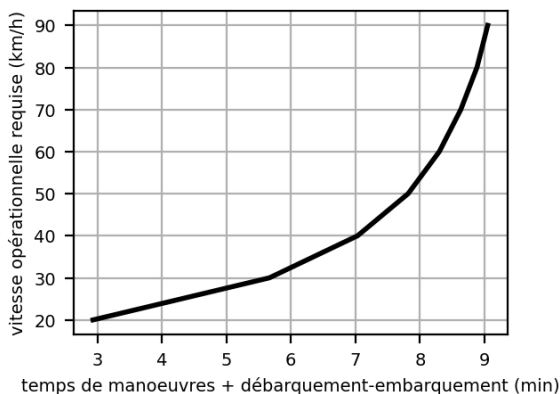
5. Discussion

Importance du temps de transbordement sur la consommation

Un aller-retour de 30 min pour la coordination avec les TPG implique un trajet de 15 min. Sur ces 15 min, il y a un temps incompressible de 4 min de traversée de la zone légale des 300 m du rivage. Cela laisse 11 min pour faire les manœuvres, embarquer, débarquer et faire le trajet à haute vitesse (accélérations et décélérations comprises). Les calculs ont été faits avec les hypothèses transmises par la CGN en novembre que le cumul des temps de manœuvre et de descente et montée des passagers est de 3,7 min. Il reste alors 7,3 min pour parcourir les presque 3 km de trajet à haute vitesse soit une vitesse de pointe de 25 km/h.

L'étude faite sur le temps d'embarquement en fonction des infrastructures a poussé l'équipe projet à considérer 4mn pour débarquer et embarquer 300 passagers. Le temps de manœuvre a aussi été revu à hauteur de 2 min au cumul des deux rives. Il reste alors environ 5 min pour parcourir environ 3 km soit 34 km/h de vitesse de pointe. Mi février, les capitaines qui collaborent au projet ont suggéré un temps global de manœuvres de 5mn. Cela réduirait la durée à la vitesse de croisière à 2 min pour parcourir presque 3 km soit une vitesse de pointe supérieure à 90 km/h. Cela n'est pas réaliste en l'état actuel.

Le temps mis en approche et à quai impacte donc fortement la vitesse nécessaire pour tenir la cadence comme l'illustre le graphique ci-dessous.



Cela se répercute également sur la consommation énergétique, la quantité de batteries ou d'hydrogène à bord et la puissance des moteurs et de la recharge à quai. Ces aspects ont des retombées

économiques sur le coût d'achat et les coûts d'exploitation. A titre d'exemple, une augmentation de la vitesse de 28 km/h à 34 km/h se traduit par une augmentation de 80% de l'énergie consommée (coût d'exploitation) et donc à stocker à bord (masse et coût des batteries).

Les études du bateau visent à l'optimisation énergétique et donc à l'autonomie ainsi qu'aux coûts. Toutefois, **il sera impératif d'adapter les infrastructures pour réduire le temps de transfert des passagers compte tenu de son fort impact sur la consommation énergétique du bateau et donc de son autonomie et prix.**

Du côté du bateau, le fait d'avoir un moteur sur chaque coque et que ceux-ci pivotent permettra de réduire le temps de manœuvre par rapport à des bateaux sans ce type d'équipement. Du côté ponton, un élargissement des quais est nécessaire afin d'augmenter le nombre de files en parallèle pour réduire la longueur de celles-ci.

Si les infrastructures de la Ligne N4 ne pouvaient pas être adaptées ou qu'il faille changer pour un port plus éloigné, nous suggérons d'évaluer un bateau à hydrofoils plutôt qu'archimédien afin de garder la cadence souhaitée avec une optimisation de l'énergie consommée à haute vitesse ainsi qu'un plus grand confort pour les passagers.

Analyse financière et recommandations pour les opérateurs

A l'issue de cette étude économique, il ressort plusieurs points dignes d'intérêt :

- Le choix du port sur la rive gauche en maintenant l'horaire impacte aussi bien le CAPEX avec une augmentation de 80% du coût du système de batteries que de l'OPEX avec une augmentation de la consommation électrique de 100% pour chaque traversée si celle-ci s'effectue entre Bellevue et Corsier plutôt qu'entre Bellevue et la Belotte.
- La comparaison entre le système de stockage à batteries et le système de stockage à hydrogène révèle un coût environ doublé des systèmes à hydrogène par rapport aux systèmes à batteries alors que l'architecture électrique est quasi inchangée grâce à la souplesse du système

mis au point par ABB. Du point de vue opérationnel, le coût de la consommation énergétique est environ le triple. L'hydrogène utilisé pour les piles à combustible de Carbagas est produit par électrolyse de l'eau pour être suffisamment pur. Cet hydrogène est ensuite compressé pour être stocké dans les réservoirs de transport et à bord du bateau. Il est recombéné à l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité et de l'eau. Ces différentes étapes induisent une consommation énergétique supérieure qui se retrouve dans la facture énergétique avec un coût environ trois fois supérieur à celui des bateaux à batteries. Il est également important d'évoquer la durée de vie des batteries qui est estimée par Leclanché à 16 000 cycles soit 25 ans dans les conditions définies dans le projet : plage de charge limitée à 20 % - 80 %, 2 recharges par jour, 320 jours par an. Leclanché les garantit 10 ans. Il faudra donc changer les batteries au cours de la durée de vie du bateau estimée à 30 ans. Toutes les études convergent pour une baisse de prix de ces éléments d'au moins 30% d'ici 10 ans, le coût de remplacement sera inférieur au coût d'achat initial. Du côté des systèmes à hydrogène, les filtres à air protégeant les piles à hydrogène des impuretés et les durites devront être régulièrement remplacés suivant les préconisations des constructeurs. La durée de vie des piles à hydrogène est évaluée entre 15 000 et 30 000 h suivant les différentes sources soit environ 10 à 20 ans d'exploitation. Là encore de fortes baisses de prix sont attendues dans les années à venir. Au niveau des infrastructures terrestres, elles sont complètement évaluées pour la recharge lente des batteries. Pour le plein d'hydrogène, cela reste encore à déterminer. Le dernier point à aborder pour la comparaison entre les systèmes de stockage d'énergie à batteries et à hydrogène concerne la quantité d'énergie stockable à bord du bateau. En effet, le bateau dimensionné pour Bellevue-Corsier ne peut pas évoluer pour faire plus de rotations dans sa variante à batteries car les batteries occupent déjà tout l'espace disponible dans les coques. La solution proposée consiste à faire des recharges rapides supplémentaires à

chaque arrêt à Bellevue avec une puissance de 2 MVA évaluée avec les SIG. Cette solution permettrait une augmentation de l'autonomie de 30 % environ moyennant des aménagements conséquents (hors du cadre de l'étude) et au détriment de la durée de vie des batteries. La variante à hydrogène apporte bien plus de souplesse car si l'autonomie doit être augmentée, il suffira d'ajouter des réservoirs.

- La coque qui a été dimensionnée en fibres composites, majoritairement en carbone, est le poste de coût principal du bateau. Les coûts sont estimés avec une marge d'erreur assez importante car une étude détaillée de plusieurs mois serait nécessaire pour la réduire, principalement sur les coûts de main-d'œuvre. Ceux-ci dépendant du taux horaire et du volume d'heures : on ne peut comparer le coût d'un bateau unitaire fabriqué chez un spécialiste de haute précision comme Décision avec un bateau fait en série dans un pays avec un coût de main-d'œuvre moindre.
- Le coût global des différentes variantes de bateaux est estimé entre 12 MCHF et 15 MCHF soit 40 à 50 kCHF par passager, conception et moules pour la réalisation de la coque qui peuvent être amortis sur plusieurs bateaux. Si trois bateaux devaient être réalisés, le coût des bateaux oscillerait entre 10 et 12 MCHF soit 33 kCHF à 40 kCHF par passager. Ces chiffres sont à mettre en regard :
 - du MS Cirrus du chantier naval Shiptec : catamaran diesel de 300 passagers et une vitesse de croisière de seulement 31 km/h : 6,5 MCHF soit 22 kCHF par passager
 - du Naviexpress du chantier naval Shiptec pour la CGN : monocoque faiblement hybridé de 700 passagers et une vitesse de croisière de 33 km/h : 32 MCHF pour un seul bateau, coûts de conception inclus soit 45 kCHF par passager, 28 MCHF hors coûts de conception, soit 40 kCHF par passager.

Pour ce qui est de l'analyse financière globale entre les bateaux zéro émission étudiés et un bateau diesel comparable en termes de dimensions et de capacité en passagers, il a été

considéré le bateau MS Cirrus précédemment cité.

Il en ressort que si le coût d'acquisition d'un bateau zéro émission fait sur mesure additionné des infrastructures spécifiques est de l'ordre du double d'un bateau diesel existant, il apparaît que le surcoût d'exploitation annuel engendré par l'usage d'un bateau zéro émission est actuellement estimé à 39% pour un bateau à batteries sur la ligne Bellevue-Corsier et à 90 % pour le bateau à hydrogène sur Bellevue-Belotte. Il est à noter que le carburant pour les moteurs Diesel n'est pas pleinement taxé pour la CGN.

En effet, actuellement, les entreprises de transport concessionnaires de la Confédération bénéficient d'allègements fiscaux sur l'impôt sur les huiles minérales. Toutefois, cela fait actuellement débat. Dans l'hypothèse où cette exonération est supprimée, l'impact sur le coût d'exploitation sur la ligne conventionnelle (thermique) en sera affecté.

Selon cette étude, le bilan financier serait déficitaire en 2023, mais il pourrait être bénéficiaire en 2030 en raison d'une augmentation de la fréquentation induisant un meilleur taux de remplissage des bateaux. Ce résultat pourrait suggérer de commencer l'exploitation à la demi-heure avec des bateaux de 150 passagers environ avant de doubler la cadence (au quart d'heure) avec un deuxième bateau identique quand la demande sera suffisante.

Par ailleurs, afin d'améliorer ce bilan, il conviendrait également d'envisager l'achat d'un bateau zéro émission plutôt que d'en faire un sur-mesure afin de ne pas supporter le coût de conception et fabrication sur un seul bateau ou d'en faire plusieurs pour amortir le coût sur plusieurs unités.

Émissions de CO2

Par rapport aux bateaux actuels de la CGN et au bateau conventionnel servant de référence, les émissions de CO₂ pourraient être divisées par environ 50, avec jusqu'à 540 tonnes d'émission de CO₂ en moins par an sur la base des émissions de CO₂ du contrat Vitale Bleu des SIG

		Bellevue-Belotte			Bellevue-Corsier		
	unité	Batterie	H2	Conventionnel	Batterie	H2	Conventionnel
Pax	-	51	51	43	51	51	43
Annual emission	T	5	125	267	10	232	550
Individual emissions	gCO2/pax (GE)	14	382	969	29	711	1998
Equivalent emissions	gCO2/pax/km (GE)	4.2	112	285	6.7	162	454

6. Conclusions et recommandations

L'étude montre que la technique n'est pas un obstacle, en particulier pour les bateaux à batteries. La technologie est assez mûre pour être opérationnelle. La technologie est existante. Les problématiques majeures qui devront être prises en compte sont surtout du côté des infrastructures et de l'homologation du bateau (en particulier pour l'hydrogène). En ce qui concerne l'homologation de bateaux zéro émission, les sociétés de classification ([BV](#), [DNV](#)) ont progressé, ces dernières années, vers des normes claires et applicables. S'appuyer sur ces normes est une opportunité pour faciliter la mise en service de transport lacustre zéro émission.

En ce sens, afin de bénéficier du savoir-faire et des démarches d'ingénierie et d'homologation, il peut être plus avantageux de choisir un bateau existant sur le marché auprès d'une des entreprises actives dans le bateau zéro émission. Cela permettra non seulement de diminuer le coût d'acquisition, mais également de profiter de toutes les mises à jour (upgrades) et d'un service de maintenance approprié.

Pour être efficace, la mobilité lacustre (waterborne transportation) doit impérativement être connectée au réseau de transport public et de mobilité douce et/ou à des parkings relais. Les cadences doivent être les plus courtes possibles pour favoriser le transfert du transport individuel motorisé (TIM) vers le transport lacustre intégré.

Enfin, il faut penser le bateau zéro émission dans son intégration avec les infrastructures locales et les exigences opérationnelles. Une bonne compréhension des enjeux locaux et des choix judicieux à ce niveau ont un grand potentiel d'économies en termes d'énergie, de coût des systèmes et de coût des infrastructures. Il faut également penser aux délais de réalisation, qui peuvent être sujets à des oppositions et recours divers.

Suite à ce rapport, lorsqu'un opérateur voudra exploiter un bateau de transport zéro émission, il conviendra de faire une étude de mise en œuvre détaillée. En effet, cette étude a mis en exergue les grandes tendances. Par ailleurs, les progrès technologiques et réglementaires importants prévus dans les années à venir peuvent impacter

certaines données de ce rapport ainsi que les calculs inhérents.

Concernant plus particulièrement les lignes étudiées dans le cadre de cette étude, il apparaît qu'un choix judicieux de la cadence, une optimisation du temps de transbordement des passagers et une planification extensive des travaux sur les infrastructures sont primordiaux pour que ces lignes puissent se faire. Pour cela, les débarcadères⁶ devront être adaptés à l'accueil de passagers selon les normes fédérales de transport public⁷. En outre, l'utilisation de batteries comme source d'énergie se présente comme la solution technique la plus simple tout en permettant le service souhaité par l'opérateur. Le site de Bellevue se prête bien à l'installation d'une station de recharge électrique. Le coût annuel du bateau à batteries est marginalement plus élevé qu'un bateau conventionnel, mais permettrait d'exploiter la ligne de manière bénéficiaire à l'horizon 2030. En outre, elle permettrait une réduction de 99.8% des émissions de CO₂. L'opérateur pourrait également bénéficier du [programme de réduction des émissions](#) de la Confédération.

⁶ Le débarcadère doit être capable de pouvoir accueillir 3 files de passagers. La législation genevoise exige que les chemins d'accès soient d'une largeur de 1,2m, par conséquent pour accueillir 3 files de passagers le débarcadère doit avoir une largeur minimum de 3,6 m (Législation, Règlement concernant l'accessibilité des constructions et installations diverses L 5 05.06, 2020). Si une rampe d'accès est nécessaire pour faire monter les Personnes à Mobilité Réduite (PMR) à bord du navire, celle-ci doit avoir une largeur de 1,2m et la pente de la rampe ne doit pas dépasser 6%.

L'utilisation d'un débarcadère flottant permettrait de faciliter l'accès aux PMR. Solution plébiscitée car il est de plus en plus difficile pour le personnel de bord d'aider les passagers avec chaise roulante compte tenu du fait que ces dernières sont de plus en plus électriques et donc très lourdes à porter.

⁷ Pour la zone d'attente, des sièges doivent être mis à disposition, en plus d'un abribus, qui protège des intempéries. Un éclairage, l'horaire de bus, une poubelle ainsi qu'un distributeur de billets font partie de l'équipement d'un arrêt (B.P.A., 2017).

ABRÉVIATIONS, RÉFÉRENCES ET ANNEXES

Liste des symboles et abréviations

TCO : Total Cost of Ownership
CO2 : abréviation chimique du gaz carbonique
PMR: Personne à Mobilité Réduite
OFT: Office Fédéral des Transports
H2: Hydrogène
m: mètre
Km: kilomètre
km/h = Kilomètre par heure
WP: Work Package
OPEX : OPerational EXpenditure
CAPEX : CApiital EXpenditure
TCO : total cost of ownership
BT : Basse tension
MT : Moyenne tension
V : volt
kV : kilovolt
kVA : kilovoltampère
CHF : franc suisse
kCHF : milliers de francs suisses
MCHF : million de francs suisses
VAC : Tension alternative en Volt
VDC : Tension continu en Volt
AC/DC : courant alternatif/courant continu
Pax : passager
TIM : transport individuel motorisé

Références

[1]	Bureau Veritas, <i>NR396 Rules for the Classification of High Speed Crafts</i> , 2002.
[2]	Bureau Veritas, <i>NR217 Rules for the Classification of Inland Vessels</i> , 2019.
[3]	DNV-GL, <i>RU SHIP Part 6 Chapter 2 Section 1 Electrical Energy Storage</i> , 2020.
[4]	DNV-GL, <i>DNVGL-CP-0418 CLASS PROGRAMME Lithium-ion batteries</i> , 2018.
[5]	Bureau Veritas, <i>NI547 Guidelines for Fuel Cell Systems Onboard Commercial Ships</i> , 2009.
[6]	Bureau Veritas, <i>NR467 Pt F, Ch 11, Sec 21 Battery Systems</i> , 2020.
[7]	DNV-GL, <i>Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression</i> , 2019.
[8]	DNV-GL, <i>RU SHIP Pt4, Ch8 Electrical installations</i> , 2017.
[9]	DNV-GL, <i>RU SHIP Part 6 Chapter 2 Section 3 Fuel Cell Installations</i> , 2020.
[10]	P. B. V.Barcellini, <i>NIN COMPACT NIBT</i> , Electrosuisse, 2019.
[11]	I.S.O., <i>ISO 19880-1 Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements</i> , 2020.
[12]	"WP2 HyApproval – Handbook for Hydrogen Refuelling Station Approval," in <i>HyApproval WP2 Under leadership of AIR LIQUIDE – DTA (AL DTA</i> , 2008.
[13]	E.I.G.A., <i>GASEOUS HYDROGEN STATIONS IGC Doc 15/06/E</i> , EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISB, 2006.
[14]	Législation, <i>Règlement concernant l'accessibilité des constructions et installations diverses L 5 05.06</i> , Genève, 2020.
[15]	Législation, <i>Règlement d'application de la loi sur la prévention des sinistres, l'organisation et l'intervention des sapeurs-pompiers F 4 05.01</i> , Genève, 1990.
[16]	A. F. Molland, <i>Maritime Engineering Handbook</i> , Elsevier, 2008.
[17]	A. F. Molland, S. R. Turnock und D. A. Hudson, <i>Ship Resistance and Propulsion</i> , Cambridge University Press, 2011.
[18]	J. Carlton, <i>Marine Propellers and Propulsion (2nd edition)</i> , Elsevier, 2007.
[19]	J. W. Pratt und L. E. Klebanoff, «Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry,» Sandia National Laboratories, 2016.
[20]	Y. A. Isin, <i>Théorie du Navire Vol. II (Résistance et Propulsion)</i> , Academia.edu, 2010.
[21]	Leclanché, <i>Marine Rack System (MRS)</i> , Leclanché, 2020.
[22]	Leclanché, <i>Energy M2 Modules (G-NMC)</i> , Leclanché, 2020.
[23]	Leclanché, <i>Power M2 Modules (LTO)</i> , Leclanché, 2020.
[24]	Energy Observer Developments, «Fiche Produit Range Extender Hydrogène,» 2020. [Online]. Available: http://energy-observer-developments.com/app/uploads/eodev-ficheproduit-rexh2-vDEF-BD.pdf .
[25]	ABB Marine, «Onboard Microgrid,» 2021. [Online]. Available: https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/electric-solutions/onboard-microgrid .
[26]	J. H. Schmidt and J. Watson, <i>Eco Island Ferry Comparative LCA of island ferry with carbon fibre composite based and steel based structures</i> , Denmark: Aalborg Universitet, 2014.
[27]	B. E. Tawfik, <i>Use of Composites as Alternative Materials in Ship Structures</i> , Master of Science in Naval Architecture, 2016.
[28]	A. Hedlund-Åström, <i>A HIGH-SPEED CRAFT WITH COMPOSITE HULL</i> , KTH Royal Institute of Technology, 2008.
[29]	S.-E. Hellbratt, <i>Time for light weight composite materials to enter the merchant shipbuilding</i> .
[30]	T. Hertzberg, <i>LASS, Lightweight Construction Applications at Sea</i> , Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden, 2009.
[31]	Federal Office for the Environment FOEN, «Léman,» 2020. [Online]. Available: https://swisslakes.net/#845122,5891739,9,45,2,83,0,0,1 .
[32]	M. Kane, «Meet The World's Fastest Electric Ferry With A Massive 2 MWh Battery,» 10 June 2020. [Online]. Available: https://insideevs.com/news/428001/world-fastest-all-electric-rygerelektra-ferry/ .

Annexes

Annexe 1

Rapport de l'Association Zéro Émission Boat Suisse

Annexe 2

Organigramme du projet et groupes de travail

Annexe 3

Objectifs du projet et Organisation (GANTT Chart)

Annexe 4

Vue d'ensemble des travaux: Lois, normes et règles de classification

Annexe 5

Analyse financière, CAPEX des solutions

Annexe 6

Analyse financière, Situation actuelle et Situation 2032

ANNEXE 1 - [Rapport de l'Association Zéro Émission Boat Suisse](#)

ANNEXE 2 - Organigramme du projet et groupes de travail



ANNEXE 3 - Objectifs du projet et Organisation (GANTT Chart)

WP 1 Établissement du besoin : identification de la ligne de référence, analyse et modélisation du nombre de passagers potentiels en fonction du temps de transport, de la fréquence et de la capacité des bateaux. Intégration de cette ligne remodelée au sein des transports préexistants. Estimation du transfert modal. Rédaction d'une synthèse.

WP 2 Aspects réglementaires :

- Liés au bateau en lui-même : lacustre/maritime générale liée au transport de passagers, réglementation propre au Léman (transfrontalier F & CH), réglementation portuaire, réglementation liée à l'usage de batteries de forte capacité et tension élevée sur des bateaux de transports de passagers (ESTI), usage de réservoirs d'hydrogène sur un bateau de transport de passagers. Rédaction d'une synthèse.
- Communs à la navigation lacustre suisse et propres au Léman : vitesses autorisées, secours aux personnes, autonomie... Rédaction d'une synthèse.
- Liés aux infrastructures et à l'environnement : Champ des possibles des modifications physiques des quais, réglementation quant aux infrastructures pour la production, stockage, recharge d'hydrogène, réglementation quant aux infrastructures pour la production, stockage, recharge de batteries haute tension, hauteur maximale des vagues générées. Mettre les grandes lignes des besoins/ contraintes légales pour les infrastructures. Rédaction d'une synthèse.

WP 3 Cahiers des charges : sur la base des WP 1 et WP 2, rédaction des cahiers des charges :

- du bateau : nombre de passagers, vitesse commerciale, vitesse d'approche, durée maximale d'embarquement / débarquement, autonomie minimale des différents équipements, durée à quai, nombre de rotations consécutives, hauteur maximale des vagues générées, outils de gestion de flotte et d'optimisation de la consommation.
- des infrastructures portuaires, des infrastructures modales.

WP 4 Etude de faisabilité technique : sur la base des cahiers des charges, un bateau et les infrastructures à son bon fonctionnement sont pré-dimensionnés : dimensions, déplacement du navire, traînée afin d'estimer les besoins en énergie, système de stockage et d'approvisionnement en énergie, système de propulsion, systèmes de gestion de flotte et d'optimisation de la consommation. Rédaction de deux synthèses.

WP 5 Etude des coûts : Sur la base de l'étude de faisabilité technique, estimation des coûts : de conception complète du projet, de réalisation/fabrication des différents éléments (bateau, infrastructures...), de coûts d'exploitation. Rédaction d'une synthèse.

WP 6 Dissémination, communication :

Rédaction d'un rapport reprenant les principales lignes du projet : ligne concernée, intégration dans la modalité préexistante, éléments modaux et réglementaires à respecter et à faire évoluer pour la pleine réalisation du projet, impacts de la réalisation du projet sur le report modal, sur les gains énergétiques et les diminutions des émissions de CO₂.

Rédaction d'un argumentaire permettant de décrire ce nouveau type de mobilité aux pouvoirs publics : communication objective du potentiel, des avantages et inconvénients, les obstacles pratiques et légaux au développement ainsi que l'éventuelle place dans le système des transports dans la région concernée et éventuellement ailleurs qu'en Suisse.

WP 7 Gestion de projet: La chronologie de ces différents Work Packages est reprise ci-après sous forme graphique pour plus de clarté.

Gantt Chart du projet		Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 Etablissement du besoin													
1.1 Analyses des lignes à haut potentiel													
1.2 Analyse, modélisation du nombre de passagers potentiels													
1.3 Temps de transport													
1.4 Fréquence													
1.5 Capacité des bateaux													
1.6 Intégration et reports modaux													
2 Aspects réglementaires													
2.01 Réglementation générale liée au transport de passagers													
2.02 Réglementation liée à l'usage de batteries de forte capacité et tension élevée													
2.03 Usage de réservoirs d'hydrogène sur un bateau de transport de passagers													
2.11 Réglementation lacustre générale													
2.12 Réglementation lacustre lémanique													
2.21 Réglementations liées aux débarcadères													
2.22 Réglementations électriques													
2.23 Réglementations liées à l'hydrogène													
3 Cahiers des charges													
3.01 Nombre de passagers, dimensions maximales													
3.02 Vitesses, autonomie énergétique, nombre de rotations consécutives													
3.03 Hauteur maximale des vagues générées													
3.04 Gestion de flotte													
3.11 Infrastructures portuaires													
3.12 Infrastructures modales													
4 Etude de faisabilité technique													
4.01 Dimensions, forme du bateau et matériaux possibles													
4.02 Calculs de masse													
4.03 Calculs de traînée													
4.04 Etude de la propulsion													
4.05 Stockage d'énergie embarqué à bord du bateau													
4.06 Optimisation énergétique, trajectoire automatisée (autopilot)													
4.07 Gestion de flotte par l'usage du Cloud													
4.11 Infrastructures, en particulier, système de transfert d'énergie à quai.													
5 Etude des coûts													
5.1 Estimation du coût de la conception complète d'un bateau respectant le cahier des charges													
5.2 Estimation des coûts de fabrication du bateau pré-dimensionné													
5.3 Estimation des coûts des infrastructures													
5.4 Estimation des coûts d'exploitation													
6 Dissémination, communication													
6.1 Rédaction des rapports publics													
6.2 Présentations aux autorités concernées et opérateurs des résultats préliminaires													
6.3 Rédaction des présentations pour les séminaires et forum professionnels													
7 Gestion de projet													

ANNEXE 4 - Vue d'ensemble des travaux: Lois, normes et règles de classification

Applicable	
Incomplet	
Adapté	

Domaine technique à homologuer	Element	Norme	Evaluation	
Système passagers et équipage	Poste de pilotage, moyens de manoeuvre	ONI, OCEB, DE-OCEB		
	Moyens d'évacuation	V NR396, DE-OCEB		
	Gilets de sauvetage	V NR396, DE-OCEB		
	Moyens de sauvetage collectifs (radeaux de sauvetage)	V NR396, DE-OCEB		
Coque	Structure (aluminium ou composite)	BV NR396		
	Stabilité	DE-OCEB, ONI Pas de mention des catamarans		
		BV NR396		
Installation électrique	Distribution de puissance	OIBT, NIBT		
		IEC 60092		
	Batterie	DE-OCEB		
		DNV-GL RU-SHIP Pt6Ch2sec1, Pt4Ch8		
	Moteurs électriques	DE-OCEB (fait référence à une société de classification)		
		NV-GL RU-SHIP Pt4Ch8sec5, sec12		
Installation H ₂	Pile à combustible	DE-OCEB Pt2		
		DNV-GL RU-SHIP Pt6Ch2sect3		
	Conduites et systèmes auxiliaires	DNV-GL RU-SHIP Pt6Ch2sect3, sec5		
		BV NI547		
	Réservoirs d'hydrogène	DE-OCEB Pt2		
		DNV-GL RU-SHIP Pt6Ch2sect3, sec5		
		Pt5Ch7		
	Station de ravitaillement	ISO 19880-1 (Incomplet pour les distances de sécurité, nécessite simulation)		
		ISO/TR 15916		
		IGC Doc 15/06/E (applicable en cours de vérification)		
		WP2 HyApproval (applicable en cours de vérification)		
Système de sécurité	Epuisement	DE-OCEB		
	Installation Radio & Radar	ONI		
	Prévention incendie	DE-OCEB (incomplet pour les feux de batterie)		
	Prévention explosions	OSPEX		
		ATEX		

ANNEXE 5 - Analyse financière, CAPEX des solutions

Bateau pour itinéraire Bellevue-Belotte

Battery		H2		Battery		H2	
Infrastructure	Cost	Infrastructure	Cost	Vessel	Cost	Vessel	Cost
Breakwater	350'000	Breakwater	350'000	Ship design/ naval architecture	1'597'940	Ship design/ naval architecture	1'597'940
Organization and planning	408'200	Organization an planning	408'200	Molds	2'176'930	Molds	2'176'930
Passenger infra	1'148'000	Passenger infra	1'148'000	Subtotal	3'774'870	Subtotal	3'774'870
Charging station	331'975	H2 station	160'000	Structure	4'587'410	Structure	4'587'410
				Drivetrain	1'391'782	Drivetrain	1'391'782
				Batteries	671'300	Fuel Cell systems	1'527'086
				Interior accomodation	1'791'672	Interior accomodation	1'791'672
				Safety systems	538'778	Safety systems	538'778
				Classification/OFT permit to sail	9'500	Classification/OFT permit to sail	9'500
				Subtotal	8'990'443	Subtotal	9'846'229
Total		2'238'175	2'066'200	12'765'313		13'621'099	

Bateau pour itinéraire Bellevue-Corsier

Battery		H2		Battery		H2	
Infrastructure	Cost	Infrastructure	Cost	Vessel	Cost	Vessel	Cost
Breakwater	700'000	Breakwater	700'000	Ship design/ naval architecture	1'597'940	Ship design/ naval architecture	1'597'940
Organization and planning	478'200	Organization an planning	478'200	Molds	2'176'930	Molds	2'176'930
Passenger infra	1'148'000	Passenger infra	1'148'000	Subtotal	3'774'870	Subtotal	3'774'870
Charging station	331'975	H2 station	160'000	Structure	4'587'410	Structure	4'587'410
				Drivetrain	1'519'758	Drivetrain	1'519'758
				Batteries	1'196'690	Fuel Cell systems	2'035'980
				Interior accomodation	1'791'672	Interior accomodation	1'791'672
				Safety systems	538'778	Safety systems	538'778
				Classification/OFT permit to sail	9'500	Classification/OFT permit to sail	9'500
				Subtotal	9'643'809	Subtotal	10'483'099
Total		2'658'175	2'486'200	13'418'679		14'257'969	

ANNEXE 6 - Analyse financière, Situation actuelle et Situation 2032

Situation courante							Situation 2032				
Route	Bellevue-Belotte			Bellevue-Corsier			Route	Bellevue-Belotte		Bellevue-Corsier	
Type	Batteries	Hydrogène	Conventionn	Batteries	Hydrogène	Conventionn	Type	Batteries	Hydrogène	Batteries	Hydrogène
Synthèse des Informations de base							Synthèse des Informations de base				
Distance (kilomètres)	3.40	3.40	3.40	4.40	4.40	4.40	Distance (kilomètres)	3.40	3.40	4.40	4.40
Temps de parcours (minutes)	11	11	11	11	11	11	Temps de parcours (minutes)	11	11	11	11
Temps de rotation (minutes)	30	30	30	30	30	30	Temps de rotation (minutes)	30	30	30	30
Vitesse (km/h)	34	34	34	43	43	43	Vitesse (km/h)	34	34	43	43
Nombre de rotations quotidiennes (aller-retour)	10	10	10	10	10	10	Nombre de rotations quotidiennes (aller-retour)	10	10	10	10
Nombre de jours d'exploitation annuels	320	320	320	320	320	320	Nombre de jours d'exploitation annuels	320	320	320	320
Nombre de places	300	300	300	300	300	300	Nombre de places	300	300	300	300
Nombre de places vélos	40	40	40	40	40	40	Nombre de places vélos	40	40	40	40
Coût d'investissement du bateau	12'765'313	13'621'099	6'500'000	13'418'679	14'257'969	6'500'000	Coût d'investissement du bateau	12'765'313	13'621'099	13'418'679	14'257'969
- dont frais d'études / moules composite	3'774'870	3'774'870		3'774'870	3'774'870		- dont frais d'études / moules composite	3'774'870	3'774'870	3'774'870	3'774'870
- dont batteries / cellules hydrogène	6'71'300	1'527'086	0	1'196'690	2'035'980	0	- dont batteries / cellules hydrogène	6'71'300	1'527'086	1'196'690	2'035'980
Coût d'investissement infrastructure	2'238'175	2'066'200	1'906'200	2'658'175	2'486'200	2'328'200	Coût d'investissement infrastructure	2'238'175	2'066'200	2'658'175	2'486'200
Coûts autres aménagements / billetterie / contrôle d'accès	500'000	500'000	500'000	500'000	500'000	500'000	Coûts autres aménagements / billetterie / contrôle d'accès	500'000	500'000	500'000	500'000
Coût moyen du capital	2%	2%	2%	2%	2%	2%	Coût moyen du capital	2%	2%	2%	2%
Durée de service du bateau (ans)	30	30	30	30	30	30	Durée de service du bateau (ans)	30	30	30	30
Durée de vie des batteries / piles à hydrogène (ans)	10	8		10	8		Durée de vie des batteries / piles à hydrogène (ans)	10	8	10	8
Consommation énergétique par rotation (kWh, kgH2, litres)	117	6.0	29	242	11.2	59	Consommation énergétique par rotation (kWh, kgH2, litres)	117	6	242	11
Dépérdition	5%	0%	0%	5%	0%	0%	Dépérdition	5%	0%	5%	0%
Coût énergie (CHF/kWh, kgH2 ou litre)	0.19	16.00	0.73	0.19	16.00	0.73	Coût énergie (CHF/kWh, kgH2 ou litre)	0.19	16.00	0.19	16.00
Equipage	2	2	2	2	2	2	Equipage	2	2	2	2
Coût équipage au kilomètre (CHF)	13.42	13.42	13.42	10.61	10.61	10.61	Coût équipage au kilomètre (CHF)	13.42	13.42	10.61	10.61
Coût maintenance			43'200		153'720	43'200	Coût maintenance				153'720
Nettoyage et désinfection annuel	50'000	50'000	50'000	50'000	50'000	50'000	Nettoyage et désinfection annuel	50'000	50'000	50'000	50'000
Coût assurance annuelle	20'000	20'000	20'000	20'000	20'000	20'000	Coût assurance annuelle	20'000	20'000	20'000	20'000
Coût immatriculation annuelle	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	Coût immatriculation annuelle	5'000	5'000	5'000	5'000
Taxes portuaires annuelles et autres taxes	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	5'000	Taxes portuaires annuelles et autres taxes	5'000	5'000	5'000	5'000
Autres frais exploitation annuels (radiocommunication ...)	20'000	20'000	20'000	20'000	20'000	20'000	Autres frais exploitation annuels (radiocommunication ...)	20'000	20'000	20'000	20'000

Clientèle							Clientèle				
Flux pendulaires journaliers	860	860	860	860	860	860	Flux pendulaires journaliers	1'200	1'200	1'200	1'200
Autres déplacements journaliers	690	690	690	690	690	690	Autres déplacements journaliers	900	900	900	900
Demande induite	10%	10%	10%	10%	10%	10%	Demande induite	10%	10%	10%	10%
Total déplacements pendulaires	1'705	1'705	1'705	1'705	1'705	1'705	Total déplacements pendulaires	2'310	2'310	2'310	2'310
Taux de pénétration navette lacustre	30%	30%	25%	30%	30%	25%	Taux de pénétration navette lacustre	50%	50%	50%	50%
Clientèle potentielle	512	512	426	512	512	426	Clientèle potentielle	1'155	1'155	1'155	1'155
Clientèle potentielle par navette	51	51	43	51	51	43	Clientèle potentielle par navette	116	116	116	116
Taux de remplissage moyen	17%	17%	14%	17%	17%	14%	Taux de remplissage moyen	39%	39%	39%	39%
Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	11.60	15.00	15.00	15.00	Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	15.00	15.00
Yield ratio	40%	40%	40%	40%	40%	40%	Yield ratio	40%	40%	40%	40%
Prix réel par trajet aller-retour	4.64	4.64	4.64	6.00	6.00	6.00	Prix réel par trajet aller-retour	4.64	4.64	6.00	6.00
Supplément transport vélo	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	Supplément transport vélo	2.00	2.00	2.00	2.00

Charges & produits par rotation							Charges & produits par rotation				
Recette transports PAX	237	237	198	307	307	256	Recette transports PAX	536	536	693	693
Recette transport vélos	14	14	11	14	14	11	Recette transport vélos	31	31	31	31
Redistribution AG / demi-tarif	0	0	0	0	0	0	Redistribution AG / demi-tarif	0	0	0	0
Subvention	0	0	0	0	0	0	Subvention	0	0	0	0
Total produits	251	251	209	321	321	267	Total produits	567	567	724	724
Energie	-23	-96	-21	-48	-179	-43	Energie	-23	-96	-48	-179
Equipage	-91	-91	-91	-93	-93	-93	Equipage	-91	-91	-93	-93
Maintenance	0	0	-14	0	-48	-14	Maintenance	0	0	0	-48
Nettoyage et désinfection	-16	-16	-16	-16	-16	-16	Nettoyage et désinfection	-16	-16	-16	-16
Assurance	-6	-6	-6	-6	-6	-6	Assurance	-6	-6	-6	-6
Immatriculation	-2	-2	-2	-2	-2	-2	Immatriculation	-2	-2	-2	-2
Taxes	-2	-2	-2	-2	-2	-2	Taxes	-2	-2	-2	-2
Autres frais	-6	-6	-6	-6	-6	-6	Autres frais	-6	-6	-6	-6
Total charges directes	-146	-219	-157	-173	-351	-181	Total charges directes	-146	-219	-173	-351
Amortissement bateau	-126	-126	-68	-127	-127	-68	Amortissement bateau	-126	-126	-127	-127
Amortissement batteries / cellules hydrogène	-21	-60		-37	-80		Amortissement batteries / cellules hydrogène	-21	-60	-37	-80
Amortissement infrastructure	-29	-27	-25	-33	-31	-29	Amortissement infrastructure	-29	-27	-33	-31
Coûts de financement	-48	-51	-28	-52	-54	-29	Coûts de financement	-48	-51	-52	-54
Total charges	-370	-481	-278	-422	-643	-308	Total charges	-370	-481	-422	-643
Résultat net sur une rotation	-119	-230	-68	-102	-323	-41	Résultat net sur une rotation	197	85	301	81

Résultat annuel CHF	-380'603	-737'529	-219'021	-326'039	-1'032'040	-129'728	Résultat annuel CHF	629'778	272'852	964'393	258'392
----------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------------	-----------------	----------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-888'290	-1'351'767	-2'057'768	-984'501	Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-1'351'767	-2'057'768
--	-------------------	-------------------	-----------------	-------------------	-------------------	-----------------	--	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Synthèse							Synthèse				
Route	Bellevue-Belotte			Bellevue-Corsier			Route	Bellevue-Belotte		Bellevue-Corsier	
Type	Batteries	Hydrogène	Conventionn	Batteries	Hydrogène	Conventionn	Type	Batteries	Hydrogène	Batteries	Hydrogène
Distance (kilomètres)	3.40	3.40	3.40	4.40	4.40	4.40	Distance (kilomètres)	3.40	3.40	4.40	4.40
Nombre de places	300	300	300	300	300	300	Nombre de places	300	300	300	300
Nombre de places vélos	40	40	40	40	40	40	Nombre de places vélos	40	40	40	40
Clientèle potentielle par navette	51	51	43	51	51	43	Clientèle potentielle par navette	116	116	116	116
Taux de remplissage moyen	17%	17%	14%	17%	17%	14%	Taux de remplissage moyen	39%	39%	39%	39%
Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	11.60	15.00	15.00	15.00	Prix affiché du trajet aller-retour adulte plein tarif	11.60	11.60	15.00	15.00
Produits totaux pour une rotation	251	251	209	321	321	267	Produits totaux pour une rotation	567	567	724	724
Charges totales pour une rotation	-370	-481	-278	-422	-643	-308	Charges totales pour une rotation	-370	-481	-422	-643
Résultat net sur une rotation	-119	-230	-68	-102	-323	-41	Résultat net sur une rotation	197	85	301	81
Résultat annuel CHF	-380'603	-737'529	-219'021	-326'039	-1'032'040	-129'728	Résultat annuel CHF	629'778	272'852	964'393	258'392
Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-888'290	-1'351'767	-2'057'768	-984'501	Coût d'exploitation annuel estimé CHF	-1'183'726	-1'540'652	-1'351'767	-2'057'768