



VNF – DTBSLA – UTI Loire

PROGRAMME DE RÉÉQUILIBRAGE DU LIT DE LA LOIRE ENTRE LES PONTS-DE-CÉ ET NANTES

Signalisation dynamique fluviale sur le secteur de
Bellevue

Etude de faisabilité

LOT 1 AMÉNAGEMENT DE BELLEVUE

The CAR logo is a red circle with the white text 'CAR' inside. It is located in the bottom right corner of the page.

CAR

Rapport

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_EF-V1

**Direction**

CNR Ingénierie

2 Rue André Bonin, 69316 Lyon CEDEX

PROGRAMME DE RÉÉQUILIBRAGE DU LIT DE LA LOIRE ENTRE LES PONTS-DE-CÉ ET NANTES

Signalisation dynamique fluviale sur le secteur de Bellevue

Etude de faisabilité

Confidentiel

Périmètre	LOT 1 AMÉNAGEMENT DE BELLEVUE
Bénéficiaire	VNF – DTBSLA – UTI Loire
Référence du document	DIMP-I_2025-0971-00_PMV_EF-V1
Nombre de pages	61 pages

Historique du document

Indice	Date	Objet de la révision	Rédacteur*	Vérificateur*	Approbateur*
-V1	8/4/2026	1 ^{ère} version intégrant les remarques de la MOA sur les versions provisoires précédentes	D. Alliau R. Barthelet	C. Wirz S. Cuoq	D. Alliau

*Nom + Visa

Sommaire

1	Contexte du projet	7
1.1.	Le programme global de rééquilibrage du lit de la Loire	7
1.2.	Aménagement de Bellevue	8
1.3.	Dispositions relatives à la navigation	8
1.3.1.	Zone d'interdiction & accès depuis la berge	9
1.3.2.	Chenal de navigation	9
1.3.3.	Règlement Particulier de Police	9
1.3.4.	Signalisation fluviale fixe	10
1.3.5.	Zones d'attente	12
2	Objectifs de l'étude	13
3	Etude hydrodynamique du secteur	14
3.1.	Sources	14
3.1.1.	Modèle 1D global	14
3.1.2.	Modélisation hydrodynamique 2D	14
3.2.	Traitements	14
3.3.	Identification des frontières	16
3.4.	Durée caractéristique d'interdiction de franchissement	18
3.5.	Recherche de méthode de prévision	18
3.6.	Recherche de méthode d'anticipation	20
4	Informations aux navigants pour le franchissement	21
4.1.	Informations d'autorisation et d'interdiction de passage	21
4.2.	Compléments	22
5	Architecture technique	23
5.1.	Affichage local – 1 ^{ère} solution	25
5.2.	Affichage local – 2 ^{ème} solution	28
5.3.	Localisation des lieux d'affichage d'information – solutions 1 et 2	29
5.4.	Affichage distant – information par internet	32
6	Mise en œuvre	35
6.1.	Description générale	35
6.2.	Equipements communs à toutes les solutions	35
6.2.1.	Mesures de niveaux	35
6.2.2.	Centrales d'acquisition	36
6.2.3.	Interfaces et supports télécoms	36
6.3.	Solutions et coûts associés	37
6.3.1.	Solution 1 : PMV grande taille sur ducs d'Albe	37
6.3.2.	Solution 2 : PMV de taille réduite sur ducs d'Albe	40
6.3.3.	Solution 3 : feux et indicateur digital sur ducs d'Albe	44
6.3.4.	Solution 4 : feux et flèches seuls sur ducs d'Albe	48
6.4.	Solution 5 : feux et indicateur digital sur des infrastructures existants	52
6.5.	Variante sur le support télécoms	55
6.6.	Analyse des coûts et comparaison entre les solutions	56
7	Planning	58
8	Points à traiter en phases suivantes	59
9	Annexes	60

Liste des figures

Figure 1 : Opérations du plan Loire IV.	7
Figure 2 - Présentation schématique des ouvrages concernés	8
Figure 3 : Signalisation mise en œuvre (janvier 2026)	11
Figure 4 : Signalisation projetée	11
Figure 5 : Série chronologique fictive de 400 jours (a) et zoom sur un cycle de marée (b).....	15
Figure 6 : Exemple de pas de temps de simulation sans dépassement du seuil (a) avec dépassement de seuil (ici $Y < 1\text{m}$ localement dans le chenal navigable matérialisé en jaune).....	15
Figure 7 : Résultats des calculs de dépassement de seuils	16
Figure 8 : Identification des corrélations entre stations locales A et B par variables étudiées (méthode 1).	16
Figure 9 : Evaluation statistique des durées sous les seuils de la méthode 1.	17
Figure 10 : Identification des corrélations entre stations distantes A et D par variables étudiées (méthode 2).	17
Figure 11 : Evaluation statistique des durées sous les seuils de la méthode 2 (a) et selon (b) un seuil arbitraire à -0.40 m NGF au pont de Bellevue.	17
Figure 12 : Simulation des trois méthodes sur série temporelle de 400 jours.	18
Figure 13 : Marégrammes selon différentes stations (a) et évaluation des temps de retard de l'onde de marée en fonction du débit de Loire (b).....	19
Figure 14 : Evaluation des temps de retard selon 2 paramètres (a) à Basse-Mer et (b) à Pleine-Mer.....	19
Figure 15 : Exemple de détection du temps d'atteinte du seuil sur la base du calcul du gradient local	20
Figure 16 - Définition des lois de commande des feux.....	21
Figure 17 - Schéma de l'architecture technique d'information des navigants	24
Figure 18 - Exemples de messages sur PMV	25
Figure 19 - Exemples de messages sur PMV – taille réduite.....	26
Figure 20 - Extrait du document Cerema [DA1].....	26
Figure 21 - Extrait du document Cerema [DA1].....	27
Figure 22 – Graphique hauteur des caractères = $f(\text{distance, acuité visuelle})$ – extrait du document Certu [DA2]	27
Figure 23 - Photo du pont de Bellevue à environ 50m du pont et exemple taille message sur camion	28
Figure 24 - Exemple de disposition des feux, des panneaux alphanumériques, et des flèches lumineuses selon l'état de navigabilité	29
Figure 25 - Localisation des panneaux amont et aval.....	30
Figure 26 - Quai en rive gauche - Estacade amont	30
Figure 27 - Photo de la voirie sur le pont de Bellevue - côté aval (extrait Google Earth).....	31
Figure 28 - Fixation sur la culée RG du pont – écran 3m x 6m	31
Figure 29 – Duc d'Albe aval Bellevue.....	32
Figure 30 - Exemple de page spécifique barrage - aGHyre	33
Figure 31 - Exemple de page spécifique barrage – aGHyre	33
Figure 32 - Localisation des infrastructures.....	34
Figure 33 - Mise en œuvre de la solution 1 - cf. annexe 6.....	37
Figure 34 - Mise en œuvre de la solution 1 - cf. annexe 3.....	38
Figure 35 -Coût estimatif de la solution 1 - cf. annexe 3	39
Figure 36 - Mise en œuvre de la solution 2 - cf. annexe 6.....	40
Figure 37 - Mise en œuvre de la solution 2 - cf. annexe 3.....	41
Figure 38 – Coût estimatif de la solution 2 - cf. annexe 3.....	42
Figure 39 - Comparaison sur la taille des informations - Bateau type Loire Princesse à 100m de distance – avec panneau 6m x 3,5m en haut et avec panneau 3m x 2m en bas	43
Figure 40 - Mise en œuvre de la solution 3 - cf. annexe 6.....	44
Figure 41 - Evaluation de l'installation nécessaire – sans caméra (site solaris-store.com)	44

Figure 42 - Evaluation de l'installation nécessaire - avec caméra (site solaris-store.com).....	45
Figure 43 - Mise en œuvre de la solution 3 - cf. annexe 3 (nb de panneaux PV non représentatif)	46
Figure 44 – Coût estimatif de la solution 3 - cf. annexe 3.....	47
Figure 45 - Mise en œuvre de la solution 4 - cf. annexe 6.....	48
Figure 46 - Evaluation de l'installation nécessaire – sans caméra (site solaris-store.com)	48
Figure 47 – Schéma électrique PV + batterie (site solaris-store.com)	49
Figure 48 - Mise en œuvre de la solution 4 - cf. annexe 3 (nb de panneaux PV non représentatif)	50
Figure 49 – Coût estimatif de la solution 4 - cf. annexe 3.....	51
Figure 50 - Mise en œuvre de la solution 5 sur le pont de Bellevue à l'aval - cf. annexe 3	53
Figure 51 - Mise en œuvre de la solution 5 sur le quai à l'amont - cf. annexe 3	53
Figure 52 – Coût estimatif de la solution 5 - cf. annexe 3.....	54
Figure 53 - Estimation du coût de pose de fibre lestée entre les 2 sites	55
Figure 54 - Décomposition des coûts pour les cinq solutions	56
Figure 55 - Planning de la phase études et réalisation	58

Abréviations et acronymes

ANSSI	Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information
Centrale d'Acquisition	Interface électronique qui permet d'acquérir des capteurs, et un certain nombre de fonctionnalités complémentaires: enregistrement des
LoRa	Système de transmission de données « Long Range » qui s'appuie sur un support radio.
PMV	Panneau à Message Variable
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Système de Supervision)
Z	Niveau d'eau
Y	Hauteur d'eau = niveau d'eau – niveau fond du lit
Fr	Nombre de Froude

Liste des documents associés

- [DA 1] CEREMA : Signalisation pour la navigation intérieure - https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide_sur_la_signalisation_pour_la_navigation_int%C3%A9rieure.pdf
- [DA 2] CEREMA : CERTU – Les panneaux à messages variables en milieu urbain et péri-urbain. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/14320/les-panneaux-a-messages-variables-en-milieu-urbain-et-periurbain-guide-technique?lg=fr-FR>
- [DA 3] CNR/EGIS - Rapport Projet (PRO) de la solution retenue (C1L) daté du 31 mars 2023 accompagné de la notice hydraulique (LIV18)
- [DA 4] CNR - Modélisation hydraulique 2D : calage hydro-sédimentaire du modèle numérique 2D (LIV6)
- [DA 5] CNR - Modélisation hydraulique 2D : effet hydraulique et hydro-sédimentaires des ouvrages à 10 et 50 ans (LIV7)
- [DA 6] CNR – Modélisation physique : diagnostic sédimentaire sur modèle physique (LIV11)
- [DA 7] CNR – Modélisation physique : effet sédimentaire de l'aménagement sur modèle physique (LIV12)

1 Contexte du projet

1.1. Le programme global de rééquilibrage du lit de la Loire

Le système fluvial ligérien, entre les Ponts-de-Cé et Nantes, est constitué de multiples bras et d'annexes hydrauliques (anciens bras, boires). Il a connu une évolution marquée de sa morphologie dont l'incidence la plus visible est le fort abaissement de la ligne d'eau d'étiage au cours du 20^{ème} siècle. Différentes interventions humaines ont conduit à cette évolution :

- le resserrement systématique du lit au moyen de 700 épis construits entre les Ponts-de-Cé et Nantes et le contrôle des écoulements dans les bras secondaires au moyen de chevrettes, afin de favoriser la navigation dans un chenal unique resserré ;
- le creusement du lit entre Nantes et Ancenis (création du bassin à marée) dans le prolongement des aménagements portuaires réalisés en aval de Nantes. Les années de fortes extractions de matériaux ont représenté en volume près de 10 fois ce que la Loire apportait naturellement ;

Les constats sur l'évolution de la ligne d'eau d'étiage avec un abaissement de 1 à 4 m de l'amont vers l'aval, mais également des incidences de ces évolutions pour les usages et les milieux ont conduit à définir dès le premier plan Loire 1995 – 2000, différentes actions pour agir sur cette ligne d'eau et plus globalement sur le rééquilibrage du fleuve.

Depuis 2022, le **programme du plan Loire IV** a été décliné en **différents travaux** qui répondent à un objectif général de restauration d'un équilibre morphologique du lit mineur et des fonctions écologiques associées, en lien avec ses annexes hydrauliques. Ces travaux s'appuient notamment sur :

- **Une action structurante à Bellevue** assurant la transition entre la Loire estuarienne profonde et fortement incisée et le bief amont devant faire l'objet de travaux de restauration du lit. Les travaux ont consisté à créer une perte de charge pour une large gamme de débit permettant de réduire les pentes hydrauliques amont et favoriser le dépôt des sédiments. L'ouvrage est actuellement en cours de finalisation.
- **des actions de décorsetage du lit** (suppression/raccourcissement d'épis, ouverture de bras secondaires) adaptées aux configurations locales et ordonnancées de façon cohérente afin de favoriser les processus de dépôt dans le bras principal. Les travaux ont été achevés en 2025.

Quatre opérations, réparties sur 3 secteurs, ont constitué le programme d'actions :



Figure 1 : Opérations du plan Loire IV.

1.2. Aménagement de Bellevue

La Maîtrise d'ouvrage opérationnelle pour la mise en œuvre des actions du programme a été confiée à VNF qui a attribué les lots de Maîtrise d'œuvre à différents prestataires. L'action à Bellevue constitue le lot n°1 du programme d'action. Les actions de décorsetage du lit constituent les lots n°2 et 3 du programme d'actions.

Le groupement EGIS – CNR a eu en charge la mission de Maitrise d'œuvre pour le lot 1 de l'opération « Rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes », sous Maitrise d'Ouvrage VNF (marché n° 16 21 I 072.0 du 23/08/2016). Le lot 1 concerne l'aménagement de Bellevue situé vers le PK63 de la Loire.

Le schéma ci-dessous présente la zone des travaux qui s'étend sur plusieurs kilomètres en amont du point de Bellevue.



Figure 2 - Présentation schématique des ouvrages concernés

L'aménagement de Bellevue est en cours de finition, une réception d'ouvrage est prévue pour fin décembre 2025. Par conséquent, les effets hydrauliques de l'ouvrage sont déjà perceptibles.

1.3. Dispositions relatives à la navigation

Dans le cadre de la phase Projet (LIV18), le groupement a émis un certain nombre de recommandations quant à la navigation dans ce secteur morphologiquement modifié par le projet ; déplacement du chenal navigable de Loire entre le PK62 et PK64 GIP vers le Nord (on parlera alors de « chenal Nord »), conséquence de la mise en service de l'ouvrage

principal de l'aménagement (duis).

VNF a mis en œuvre les dispositions décrites ci-après.

1.3.1. Zone d'interdiction & accès depuis la berge

La performance hydraulique, et par extension la performance sédimentaire, reposent sur la création d'une perte de charge (ou dénivelé d'eau) entre l'amont et l'aval du dui, sur une gamme de débit limitée, et à marée basse. Quand ces cas hydrologiques se présentent, une chute d'eau est créée et l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique (vitesse) au **franchissement du dui** et en particulier sur son parement aval. Certaines configurations de débit de Loire et de cote de marée produisent même une zone de transition entre un régime torrentiel et un régime fluvial (appelé ressaut hydraulique), dangereuse pour tous les usagers de la Loire (nageurs, embarcations légères notamment).

Il a été impératif de définir une zone d'interdiction à la navigation, ainsi que de restreindre ou interdire physiquement tout accès depuis la berge, avec des mesures spécifiques d'accompagnement (affichage).

Cf. Règlement Particulier de Police de navigation (RPP) déjà applicable en l'état.

1.3.2. Chenal de navigation

Compte tenu de la sinuosité introduite par la modification de la trajectoire de navigation, de la nécessité de proposer une lecture aisée de la nouvelle trajectoire par les navigants, et enfin d'assurer une cohérence entre toutes les composantes de l'aménagement (protection de berge, rétablissement de ponton pêcheur, etc.), il a été proposé de définir un chenal objectif de navigation. Les hypothèses de construction sont rappelées ici :

- Concaténation des trajectoires de simulations CEREMA pour le Loire Princesse¹ (rapport final de janvier 2019, données SIG du 25 mars 2022), tenant compte de :
 - 80 simulations par des pilotes ;
 - Débit à Montjean/Loire de 115 à 800 m³/s ;
 - Basse Mer -3h à Basse Mer +1h.
- Dimensions limite :
 - Largeur minimale 60 m sans marge de sécurité ;
 - Tirant d'eau 1 m.

1.3.3. Règlement Particulier de Police

La manœuvre est fortement contrainte par la largeur du chenal navigable disponible ainsi que les vitesses du courant, qui évoluent en fonction des heures et coefficients de marée ainsi que du débit. Il y a également un très fort enjeu sur la signalisation dans la zone d'étude et notamment sur la signalisation du chenal navigable. Les simulations du CEREMA ont permis néanmoins de tirer les conclusions suivantes quant aux conditions de franchissement de l'ouvrage :

- Franchissement de l'aménagement pour des débits inférieurs à 350 m³/s entre marée basse moins 3 heures et marée basse

Les conditions hydrauliques pour ces états de marée ne sont pas favorables à un franchissement de l'ouvrage : les vitesses de courant dans le chenal réduit sont importantes, la profondeur d'eau limitée et la largeur du chenal au niveau du seuil très réduite ;

- Le franchissement de l'aménagement à marée basse moins 2 heures n'est pas envisageable car la hauteur d'eau dans le chenal est insuffisante ;
- Les manœuvres montantes sont très délicates : pour franchir le seuil, le navigant est souvent obligé d'utiliser toute la puissance disponible afin de vaincre le courant, ne lui laissant aucune réserve afin de corriger la trajectoire en cas d'erreur de manœuvre ;
- Les manœuvres avalantes sont également délicates : le navigant peut soit se laisser porter par le courant et corriger sa trajectoire avec les *pump-jet*, soit utiliser l'intégralité de ses capacités de propulsion afin d'avoir

¹ Le modèle numérique du convoi poussé de 180 m présente les caractéristiques suivantes : longueur 89 m, largeur 15.3 m, tirant d'eau à pleine charge 0.8 m, propulsion 2 roues à aubes, propulseurs transversaux avant et arrière.

une vitesse positive par rapport au courant (donc une vitesse par rapport au fond très importante) et gagner en manœuvrabilité, mais dans les deux cas il ne dispose d'aucune réserve pour rattraper une erreur de manœuvre.

- Franchissement de l'aménagement à partir de marée basse plus une heure

Les conditions hydrauliques sont favorables à un franchissement de l'ouvrage : la largeur du chenal au niveau du seuil est suffisante pour permettre le passage et le courant remonte en aval ce qui a pour effet de permettre la navigation en utilisant les moteurs dans des gammes de puissance adaptée (afin de garantir la manœuvrabilité du bateau) tout en gardant de la réserve en cas de nécessité.

- Franchissement de l'aménagement pour des débits supérieurs à 600 m³/s
 - Les conditions hydrauliques au niveau de l'ouvrage sont beaucoup plus propices à son franchissement quels que soient les états de marée. En effet, la largeur du chenal minimal est suffisante pour assurer le passage en sécurité du bateau, et les vitesses de courant sont globalement moins importantes ;
 - En cas de forte marée et de vent important, le franchissement de l'ouvrage peut s'avérer délicat à marée basse moins deux heures, lorsque les vitesses de courant sont élevées (entre 1.5 et 2 m/s) et la largeur du chenal, au niveau du seuil, limitée.

La zone de navigation où la section d'écoulement de la Loire est réduite connaît ainsi des vitesses d'écoulement modifiées qui dépendent du débit de la Loire ainsi que des effets de la marée. Dans certains cas de vitesses élevées, la navigation y est difficile. C'est pourquoi une modification des règles de passage dans cette zone a été intégrée au Règlement Particulier de Police (RPP) :

Sur les conditions de franchissement du passage de Bellevue (du PK 637,450 rive gauche au PK 638.000 rive gauche) dépendantes de la marée :

- La navigation est autorisée en rive droite uniquement dans le chenal balisé. A défaut de signalisation dynamique, la navigation est interdite entre 3h avant et 1h30 après la basse mer à Bellevue, pour des débits inférieurs à 600m³/s (à la station de Montjean-sur-Loire) du fait de l'étroitesse du chenal, du mouillage réduit et des forts courants.
- La navigation est interdite entre les PK 637,000 et PK 638,000 en rive gauche (cf plan annexe 3) du fait de la présence d'un ouvrage sous-fluvial en enrochements et de rocher naturel.

Le RPP est déjà applicable en l'état.

1.3.4. Signalisation fluviale fixe

Les panneaux de signalisation fixe sont positionnés (cf. : à l'amont de l'ouvrage : sur une structure de type pieux en amont de l'estacade et sur le pont de Bellevue à l'aval. Les sites A, B, C, D, E et F sont des bouées sur corps-morts avec écho-radar et feux.

Les sites 1, 2, 3, 5, 6, et 7 bordent le chenal Nord, dans sa partie la plus restreinte en largeur.

La signalisation fluviale fixe est déjà opérationnelle.

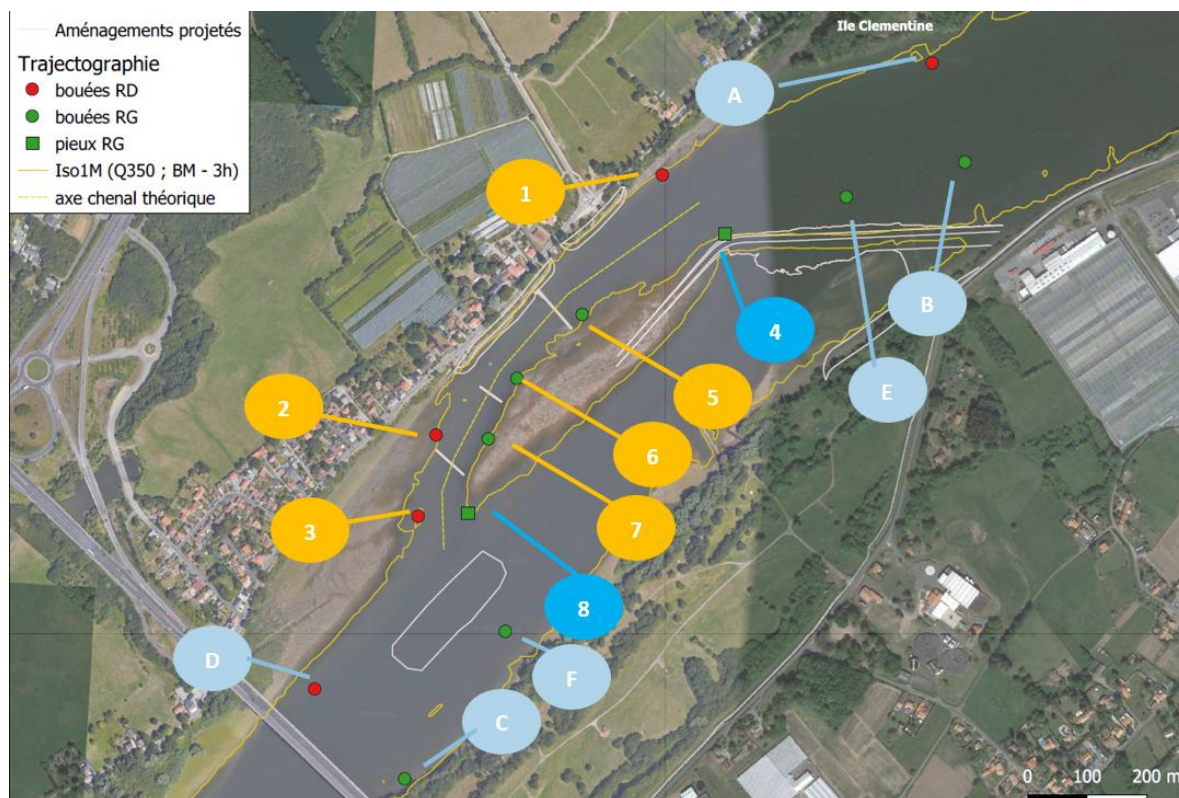


Figure 3 : Signalisation mise en œuvre (janvier 2026)

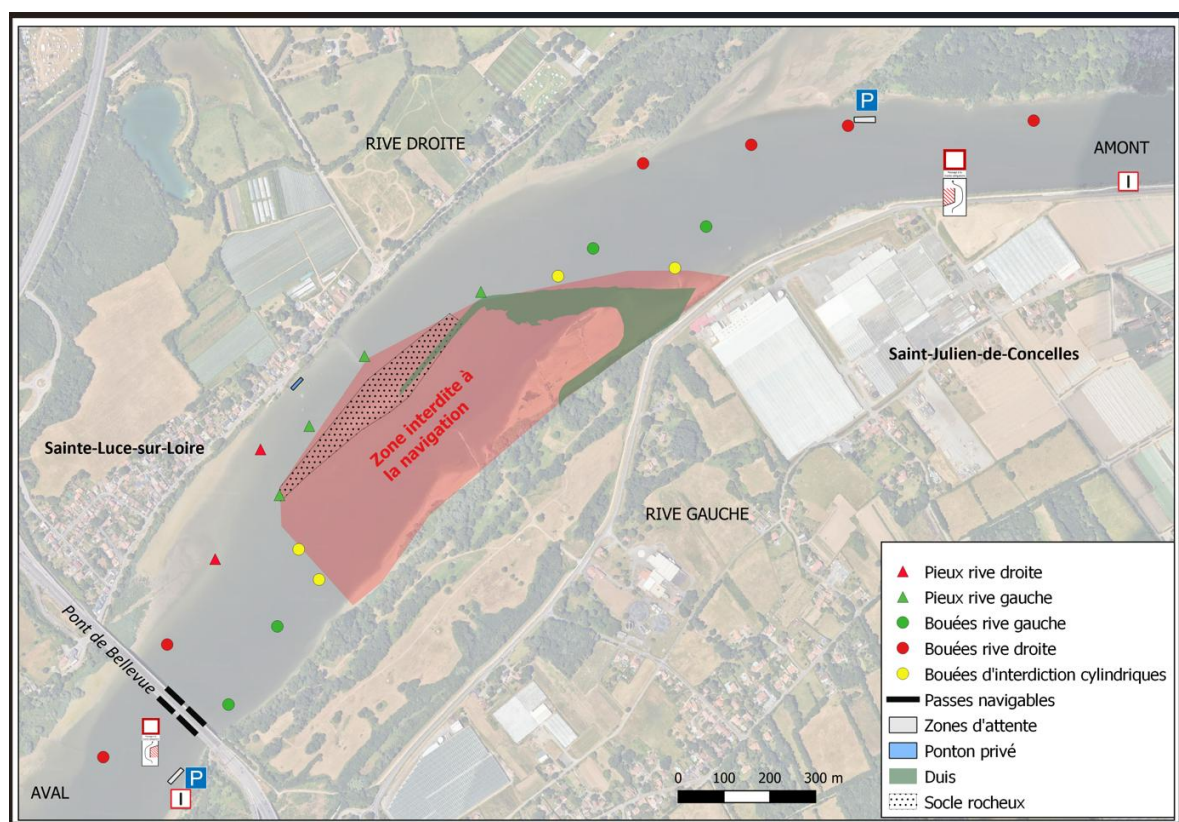


Figure 4 : Signalisation projetée

1.3.5. Zones d'attente

L'étude trajectographique conduite par le CEREMA a montré que le chenal Nord pouvait être défavorable à la navigation sous certaines conditions hydrauliques, sur des durées assez courtes.

Des zones d'attente sont mises en place à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. Elles sont constituées de 4 corps-morts chacune, ce qui permet aux embarcations de longueur inférieure à 20m, de disposer d'une voie d'attente.

Les embarcations de taille supérieure sont autorisées à mouiller l'ancre en bordure de chenal sur 200m en amont et en aval des zones d'attente amont et aval.

2 Objectifs de l'étude

En parallèle des phases travaux engagées depuis l'été 2023 sur le périmètre du lot 1 (Bellevue) et en anticipation de l'achèvement des travaux prévus fin 2025, Voies Navigables de France UTI Loire s'est à nouveau reposé la question en février 2024 de la pertinence et la faisabilité d'installation d'un panneau d'affichage dynamique ou **panneau à messages variables (PMV)**.

L'objectif de cette installation serait d'informer plus précisément les navigants sur la franchissabilité du chenal Nord, en complément du système passif de signalisation décrit au § 1.3.

Les conditions hydrauliques du site de Bellevue ne sont pas liées uniquement à un débit de Loire, mais plutôt à un couple de type débit de Loire/cote de marée (incluant le coefficient de marée). Une solution de **signalisation dynamique** tenant compte de ce couple est complexe à mettre en œuvre, induisant nécessairement de la télétransmission et afficheurs numériques, contrairement à une simple échelle limnimétrique (utile lorsque les conditions de navigation ne dépendent que du débit par exemple).

Suite à discussion entre VNF, HYDRATEC (assistant au maître d'ouvrage) et CNR en mars 2024, il a été décidé d'investiguer cette problématique au travers de compléments d'étude et de calculs hydrodynamiques, à la fois du côté du modèle global 1D (logiciel Hydra par HYDRATEC) et à la fois du côté du modèle local 2D (TELEMAC par CNR). Les principaux résultats sont exposés dans le chapitre 3.

Les chapitres 4 à 8 constituent l'étude de mise en œuvre du système avec panneaux à messages variables. Il présente les solutions techniques envisageables, l'évaluation des coûts ainsi que le planning de réalisation.

3 Etude hydrodynamique du secteur

3.1. Sources

Afin de mener à bien cette étude, différents modèles hydrauliques préexistants ont été utilisés.

3.1.1. Modèle 1D global

Le modèle local 2D décrit dans le paragraphe suivant nécessite un conditionnement des calculs par des résultats de calculs issus du modèle global mis en œuvre par HYDRATEC. Par principe, les calculs 2D imposent donc la réalisation préalable de calculs Hydra, avec les hypothèses suivantes :

- Modèle version Etat projet C1L ;
- Extractions horodatées² :
 - PK58 : $Q(t)$, $Z(t)$
 - Station limnimétrique du pont de Bellevue : $Q(t)$, $Z(t)$
 - Estacade amont d'uis : $Q(t)$, $Z(t)$
 - PK72 : $Q(t)$, $Z(t)$
 - Station de Montjean-sur-Loire : $Q(t)$
- Pas de temps de 15 min environ.

3.1.2. Modélisation hydrodynamique 2D

La prestation CNR a consisté en la réalisation d'une étude hydraulique basée sur 12 simulations hydrodynamiques TELEMAC-2D. La description du modèle est disponible dans [DA 4] et [DA 5]. Le maillage 2D est directement issu de la phase PRO, retouché à la marge sur le chenal Nord (par suppression de deux seuils de fond à la cote -1.4 m NGF) à la demande de VNF. Les simulations sont de type hydrodynamique transitoire, sans transport solide. Comme décrit dans le paragraphe précédent, le conditionnement est effectué en débit au PK72 et en cote au PK58. Les variables hydrauliques sont extraites au pas de temps 15 min.

La prestation a consisté à étudier une gamme de conditions hydrauliques vis-à-vis du passage des navigants par le chenal Nord. A ce jour, la navigation dans la gamme $[800^3-2700^4]$ m³/s à Montjean-sur-Loire ne pose *a priori* pas de problème, et ce quelle que soit le coefficient de marée. En deçà de 800 m³/s à Montjean, les conditions hydrauliques dans le chenal Nord vont varier en fonction de la marée, et cela dépendra du type de bateau. L'enjeu porte donc sur la gamme $[90^5-800]$ m³/s à Montjean-sur-Loire.

La série chronologique simulée repose sur les principes suivants :

- Cycle de marée complet vives eaux – mortes eaux sur 28 jours : cycle lunaire du 06/09/2011 05:40 au 05/10/2011 04:50 (UTC) incluant une étendue de coefficient de marée [31-115] ;
- Régime permanent à paliers croissants sur la Loire (90, 160, 230 m³/s, etc. par incrément de 70 m³/s).

3.2. Traitements

La simulation ainsi réalisée est d'une durée de 400 jours.

² L'horodatage de référence est celui de la station de Montjean-sur-Loire.

³ Seuil déterminé par l'étude trajectographique du CEREMA (essentiellement sur l'étude du Loire Princess).

⁴ La Loire aval passe en Plus Hautes Eaux Navigables (PHEN) à partir de 3.50 m à la station de Montjean-sur-Loire, soit environ 2740 m³/s selon la courbe de tarage.

⁵ Valeur minimale de 92.8 m³/s enregistré en aout 2022 (période 1993-2024).

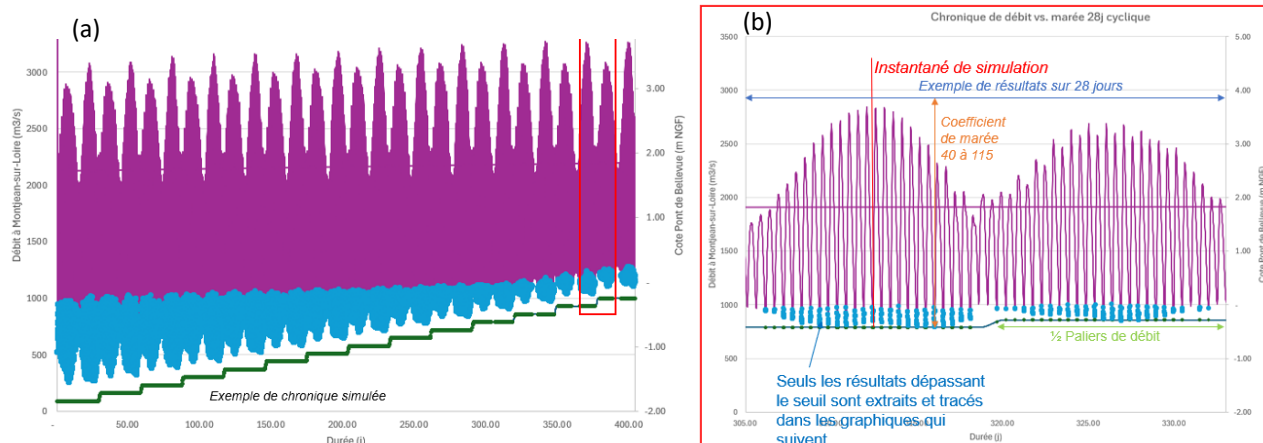


Figure 5 : Série chronologique fictive de 400 jours (a) et zoom sur un cycle de marée (b).

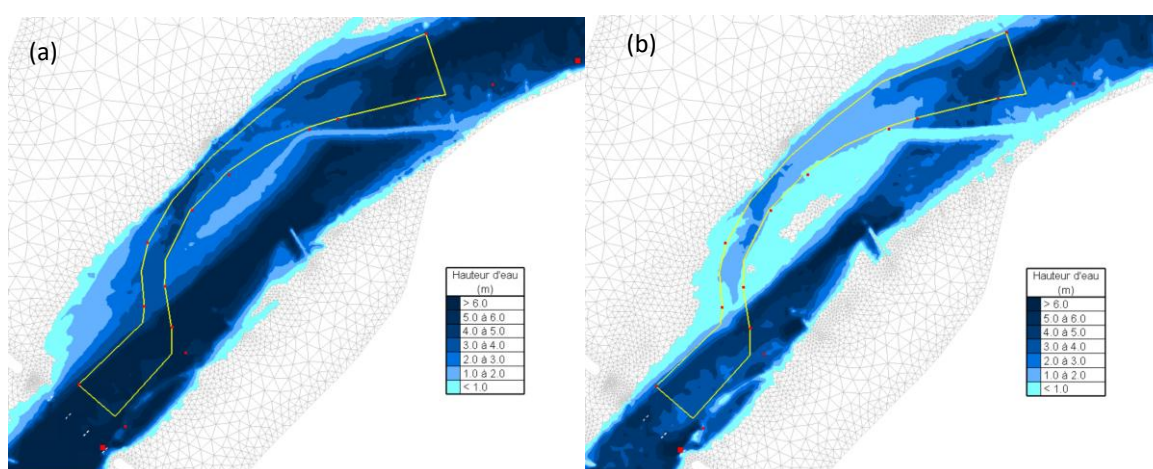


Figure 6 : Exemple de pas de temps de simulation sans dépassement du seuil (a) avec dépassement de seuil (ici $Y < 1\text{m}$ localement dans le chenal navigable matérialisé en jaune)

L'exploitation des 12 calculs a été réalisée sur la base de la grille de critères suivante :

- Secteur d'analyse des résultats 2D borné au chenal navigable tel que défini par VNF, visible sur la Figure 6 ;
- Recherche des scénarios hydrauliques impliquant un ressaut hydraulique dans le chenal Nord (nombre de Froude supérieur à 1) ;
- Recherche des scénarios hydrauliques impliquant un ressaut hydraulique dans le chenal Nord (nombre de Froude supérieur à 0.8, valeur permettant d'assurer un éloignement suffisant à la transition de régime fluvial-torrentiel où Fr est strictement égal à 1) ;
- Recherche des scénarios hydrauliques impliquant une vitesse locale supérieure à 2 m/s dans le chenal Nord ;
- Recherche des scénarios hydrauliques impliquant un tirant d'eau inférieur à 1m dans le chenal Nord ;
- Recherche des scénarios hydrauliques impliquant un tirant d'eau inférieur à 0.8m dans le chenal Nord (valeur à la demande de VNF pour évaluer les marges de manœuvre dans le chenal Nord).

Les Figure 5 et Figure 6 permettent de visualiser les pas de temps de simulation pour lesquels un dépassement de seuil est constaté (points en bleu).

Les résultats sont disponibles sur la Figure 7 ci-après, restitués sous la forme de relation entre la cote au Pont de Bellevue et le débit à la station de Montjean-sur-Loire, ou bien entre la chute et le débit. On notera que le $Fr = 1$ est la dernière contrainte atteinte sur le site, et qu'*a contrario*, le premier seuil atteint concerne $Y = 1\text{ m}$ ou $V > 2\text{ m/s}$. De plus, au-delà de +0.40 m NGF, aucun critère n'est atteint, quelles que soient le débit en Loire. Le § suivant engage une recherche approfondie de relations, en vue d'un déploiement sur site.

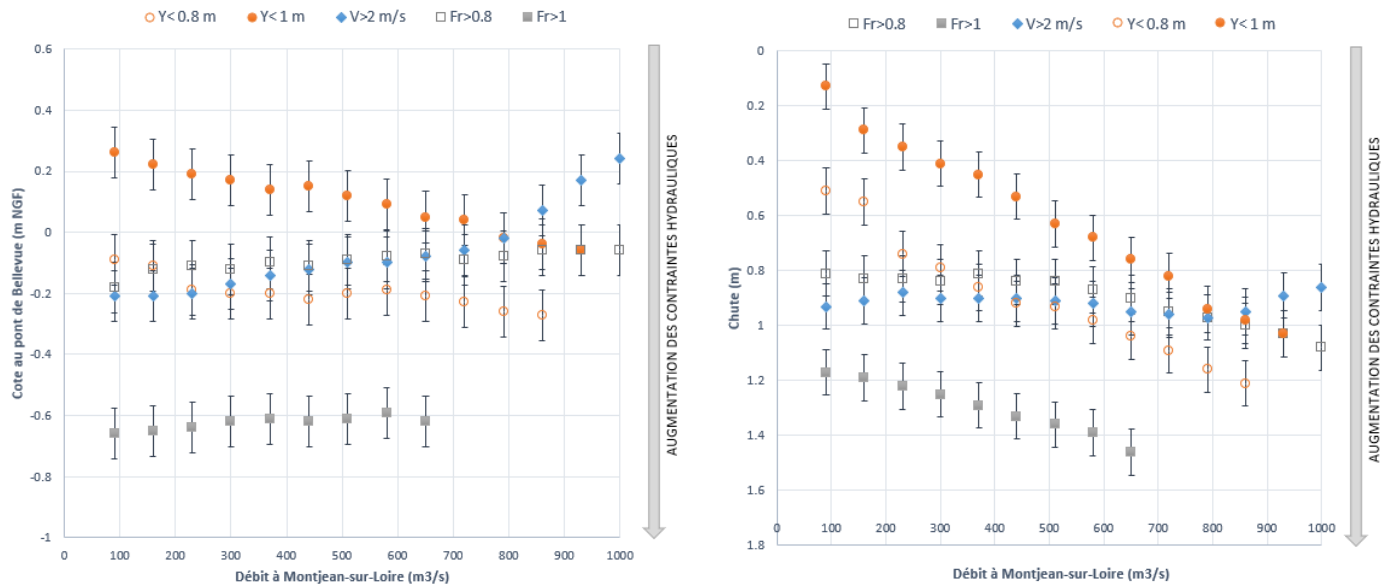


Figure 7 : Résultats des calculs de dépassement de seuils

3.3. Identification des frontières

Une recherche avancée de corrélation a été engagée sur la base de stations probables (ou déjà existantes) :

- Cote d'eau au Pont de Bellevue (aval ouvrage) ;
- Cote d'eau à l'estacade de l'Officière (amont ouvrage) ;
- Chute d'eau entre les 2 stations précédentes ;
- Débit de Loire à Montjean-sur-Loire (non influencé par la marée) ;
- Cote d'eau au Pellerin (non influencé par le débit de Loire).

Notons que cette recherche de corrélations est orientée, des mesures locales (A, B, C) seront privilégiées par rapport à des mesures distantes (D, E).

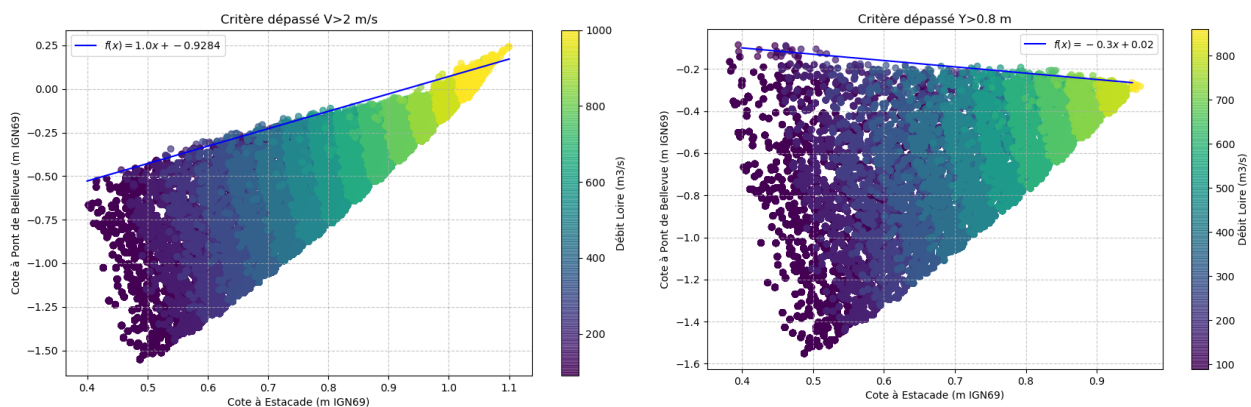


Figure 8 : Identification des corrélations entre stations locales A et B par variables étudiées (méthode 1).

L'union de ces deux critères serait ainsi le suivant (méthode 1) :

- Si $Z_{\text{Bellevue}} < 1.071$. $Z_{\text{Estacade}} - 0.9284$ alors $V > 2 \text{ m/s}$
- Si $Z_{\text{Bellevue}} < -0.3$. $Z_{\text{Estacade}} + 0.02$ alors $Y < 0.8 \text{ m}$

D'un point de vue opérationnel, il est intéressant de noter que cette méthode autorise une indépendance au débit de Loire à Montjean-sur-Loire et de minimiser les durées d'interdiction de passage sur le chenal Nord, par rapport à une approche dégradée proposée à la Figure 11 (b).

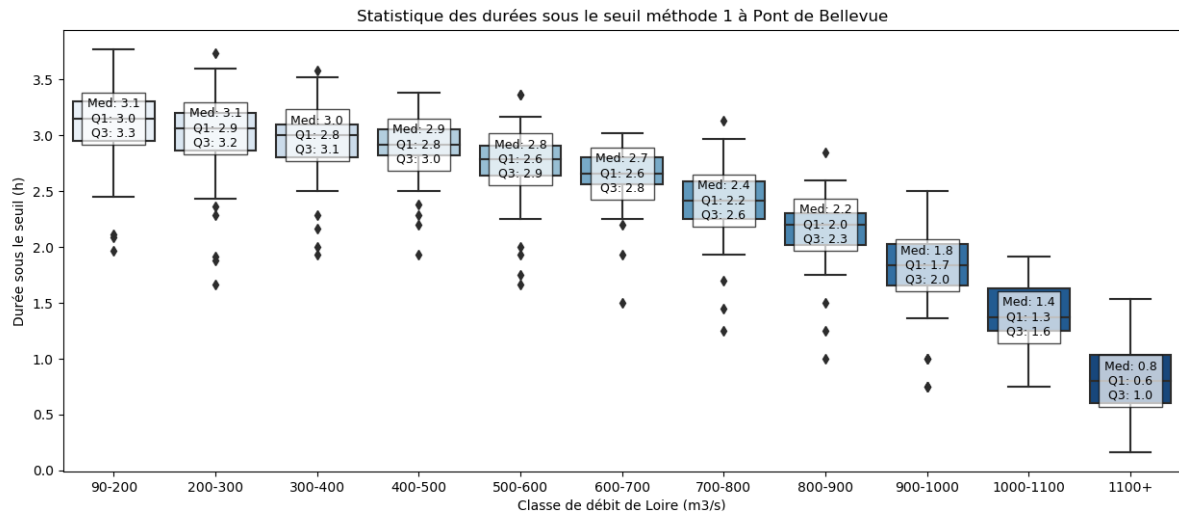


Figure 9 : Evaluation statistique des durées sous les seuils de la méthode 1.

La comparaison de ces durées statistiques avec la Figure 11b (seuil à +0.40 m NGF) est intéressante : entre 500 et 600 m³/s, la méthode 1 permet de réduire de 30 min la durée non franchissable (soit 15%).

Une autre méthode développée en fonction du débit de Loire serait la suivante (méthode 2) :

- Si $Z_{Bellevue} < -0.10$ m NGF jusqu'à 700 m³/s, globalement $Y < 0.8$ m et $V > 2$ m/s
- Puis fonction affine limite $Z = f(Q)$ de 700 à 1000 m³/s

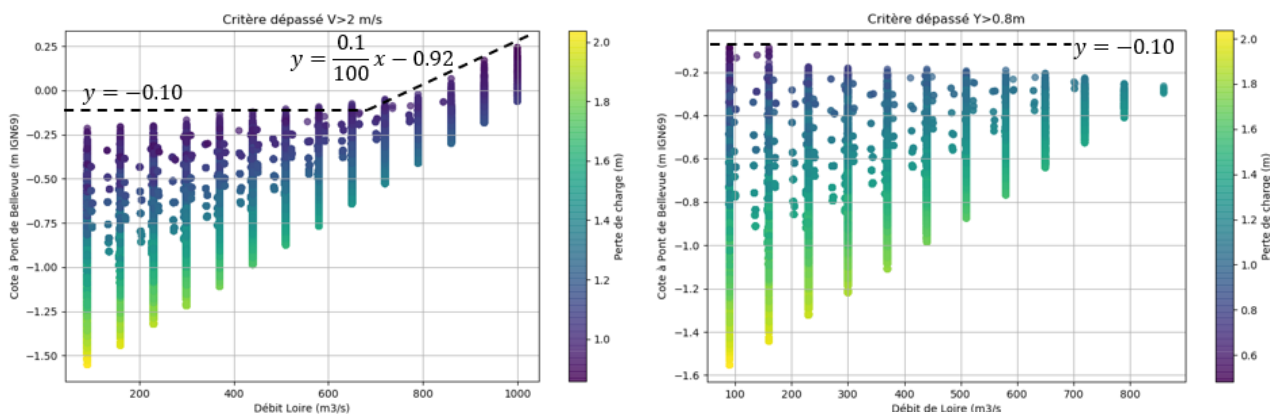


Figure 10 : Identification des corrélations entre stations distantes A et D par variables étudiées (méthode 2).

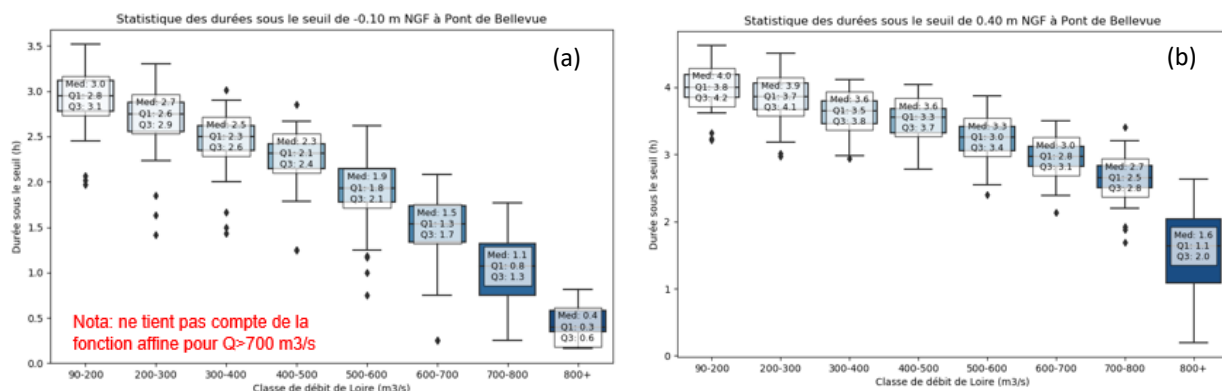


Figure 11 : Evaluation statistique des durées sous les seuils de la méthode 2 (a) et selon (b) un seuil arbitraire à -0.40 m NGF au pont de Bellevue.

Avertissement : le choix des critères est laissé à l'appréciation de VNF. Les résultats présentés ici sont dépourvus de marges, notamment au regard de la vitesse de marnage *in-situ* (estimée en moyenne à 8.3 cm/5min).

3.4. Durée caractéristique d'interdiction de franchissement

L'application des deux méthodes a été réalisée sur la série temporelle de 400 jours et produit les résultats quantitatifs suivants pour un débit inférieur ou égal à $700 \text{ m}^3/\text{s}$:

- Méthode 1 : interdiction de franchissement pour 22% du temps ;
- Méthode 2 : interdiction de franchissement pour 21% du temps ;
- Méthode base (cote +0.40 m NGF à pont de Bellevue) : interdiction de franchissement pour 31 % du temps.

Les méthodes 1 et 2 ne permettent pas une discrimination par la durée d'interdiction de passage sur le chenal Nord, l'avantage revient donc à la méthode locale 1.

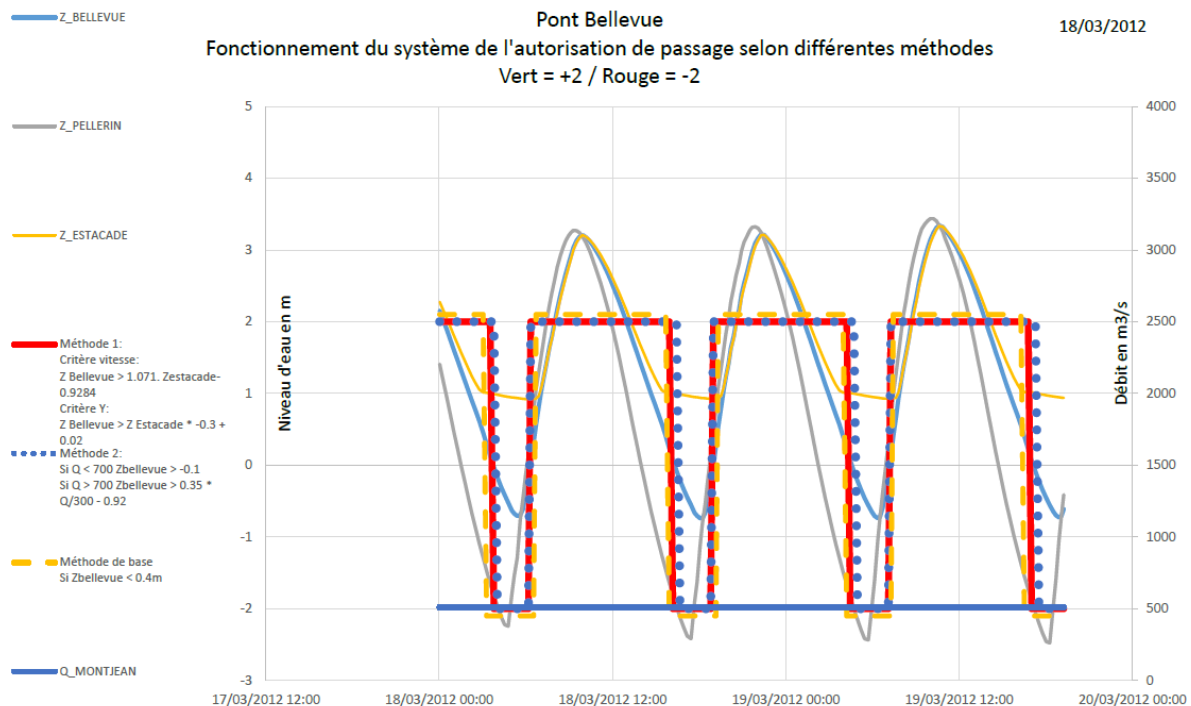


Figure 12 : Simulation des trois méthodes sur série temporelle de 400 jours.

3.5. Recherche de méthode de prévision

La fonction recherchée par la signalisation dynamique est d'autoriser ou non la navigation sur le chenal Nord. Des investigations hydrauliques complémentaires ont été menées afin d'évaluer la faisabilité d'un système de prévision pour des horizons de temps supérieurs à 6h (1 cycle de marée). Des stations de niveaux d'eau existent dans l'estuaire :

- Station du Pellerin (PK38.500 soit 23.3 km en aval du pont de Bellevue). Notons que cette station n'est pas influencée par le débit de Loire.
- Stations de Saint-Nazaire, Pont des Trois Continents, etc.

L'analyse est portée sur la propagation de l'onde de marée depuis l'estuaire vers le pont de Bellevue, station d'intérêt pour la signalisation fluviale. On constate que l'onde sinusoïdale se déforme d'aval vers amont, avec un décalage temporel à marée haute potentiellement différent de la marée basse, comme visible sur la Figure 13 (a). Les causes de déformation du signal sont multiples ; on citera ici la géométrie du fleuve et le débit d'apport par la Loire par exemple.

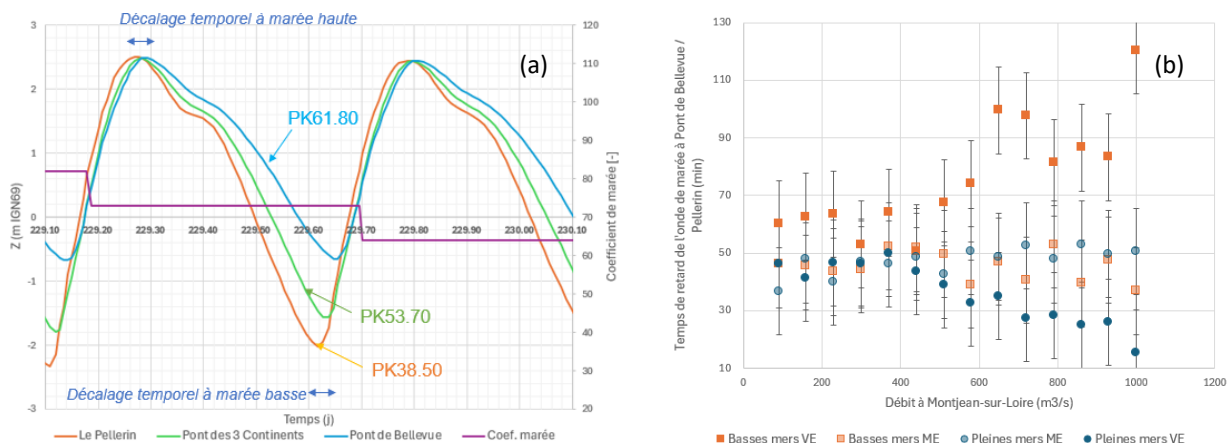


Figure 13 : Marégrammes selon différentes stations (a) et évaluation des temps de retard de l'onde de marée en fonction du débit de Loire (b)

Le SHOM dispose de temps de retard caractéristiques entre Saint-Nazaire et Le Pellerin à Pleine Mer (PM) et Basse Mer (BM), en Vives-Eaux (VE) ou Mortes-Eaux (ME). Ces calculs ne sont pas affectés par le débit de Loire. Aucune relation ou calcul ne semble exister depuis une station aval (Saint-Nazaire ou Le Pellerin) vers le Pont de Bellevue, site impacté rappelons-le par la Loire.

	Pleines mers		Basses mers	
	Vives-Eaux	Mortes-Eaux	Mortes-Eaux	Vives-Eaux
Saint-Nazaire	Référence			
Le Pellerin	+00h40	+00h40	+01h05	+01h55

Tableau 1 : temps de retard caractéristiques entre stations (source : SHOM).

La chronique de 400 jours permet de définir des corrélations entre niveaux d'eau soit en fonction du coefficient de marée soit du débit de Loire, comme visible sur la Figure 13 (b). **L'analyse par encadrement est ici réalisée en premier.** On constate que le temps de retard pourrait être supposé constant en Mortes-Eaux, autour d'une valeur de 40-50 min, avec un écart-type de +/- 13 min. En période de Vives-Eaux, une dépendance au débit de Loire apparaît pouvant potentiellement doubler ce temps moyen en ME. **Ce premier niveau d'analyse ne permet pas une utilisation opérationnelle.**

L'analyse systématique de la chronique de 400 jours permet ensuite de révéler l'amplitude de cette dispersion autour du coefficient de marée, visible sur la Figure 14. Il s'agit ici du second niveau d'analyse.

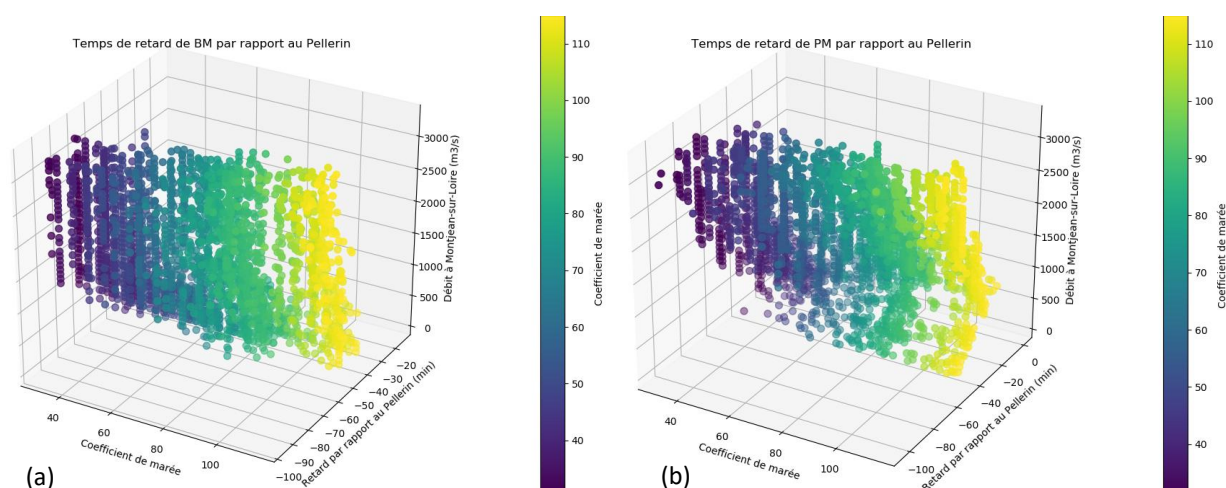


Figure 14 : Evaluation des temps de retard selon 2 paramètres (a) à Basse-Mer et (b) à Pleine-Mer

Il paraît difficile de mettre en œuvre un algorithme de calcul du temps de retard précis sur cette base, autrement dit une **prévision par l'étude du signal de marée aval paraît trop incertaine par utilisation de méthodes analytiques.**

Seul le développement et l'utilisation d'un modèle hydraulique 1D de propagation permettrait d'apprécier précisément les variables hydrauliques au pont de Bellevue, par un forçage en débit à la station de Montjean-sur-Loire et en cote à

la station du Pellerin (périmètre exact du modèle Hydra), en chronique réelle et prévisionnelle. Toutefois, le développement d'un tel outil opérationnel paraît démesuré par rapport à l'objectif ici recherché.

3.6. Recherche de méthode d'anticipation

Nous avons vu précédemment qu'il est difficile de mettre en œuvre des méthodes de prévision des niveaux d'eau par utilisation des stations en aval sur la Loire. Cependant, intrinsèquement, le cycle de marée est périodique et permet d'accéder à l'anticipation de moments particuliers (BM ou PM notamment), c'est-à-dire sur un horizon temporel inférieur à 6h (1 cycle de marée).

A pont de Bellevue, il est ainsi calculé les caractéristiques suivantes :

- A PM, la durée inter-pics est de 12.33 h avec un écart-type de 25.13 min ;
- A BM, la durée inter-pics est de 12.36 h avec un écart-type de 14.42 min.

L'analyse et recherche de la précédente BM ou PM sur la **station locale permet d'anticiper l'heure du prochain BM ou PM avec une incertitude d'environ 15 min**. Cette information pourrait être valorisée par le PMV.

L'analyse du signal de niveau à pont de Bellevue permet également de **calculer un gradient de pente** : indication de flot ou jusant, et également une estimation du temps d'atteinte de la cote seuil considérée. L'étude du gradient permet probablement d'anticiper l'heure de dépassement du seuil, sur un horizon maximum d'1 heure. Cette information pourrait être valorisée par le PMV.

Dans l'exemple illustré suivant, le gradient permet d'estimer un compte à rebours avant dépassement de seuil (de 55 à 9 min, ou bien de 59 à 11 min avant atteinte de la cote -0.10 m NGF sur la Figure 15).

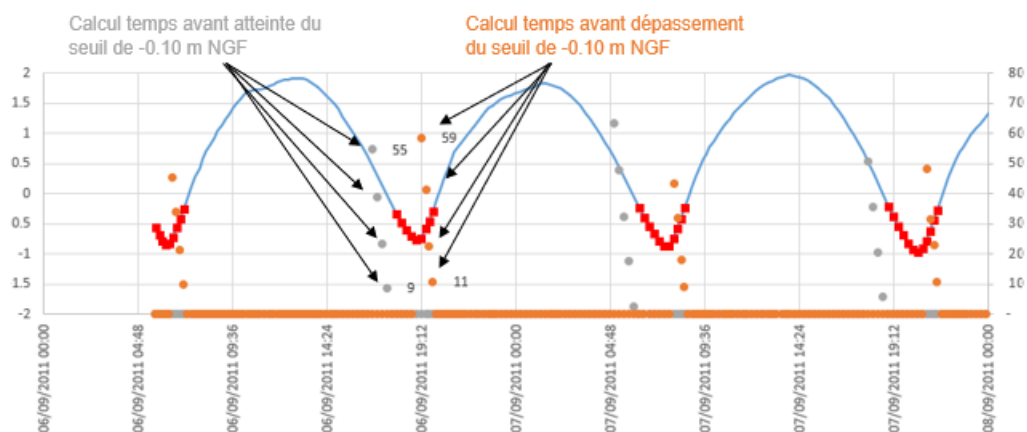


Figure 15 : Exemple de détection du temps d'atteinte du seuil sur la base du calcul du gradient local

4 Informations aux navigants pour le franchissement

4.1. Informations d'autorisation et d'interdiction de passage

Il a été proposé, lors des échanges avec la MOA VNF du projet de diffuser localement une information « temps réel » claire aux navigants, qui est regroupée sous forme de feux à trois couleurs.

- Le feu vert correspond à l'atteinte des conditions du franchissement ;
- Le feu rouge correspond à l'interdiction de franchir l'ouvrage ;
- Le feu orange correspond aux conditions intermédiaires, entre rouge et vert, il signifie que le franchissement de l'aménagement de Bellevue présente des risques.

On peut remarquer que pour les méthodes de définition des frontières décrites plus haut, la frontière garantissant un nombre de Froude supérieur à 0.8 de la méthode 1 peut être simplifiée en :

$Z_{\text{BELLEVUE}} > -0.10\text{m NGF}$, auquel on ajoute 20cm de sécurité soit $Z_{\text{BELLEVUE}} > +0.10\text{m NGF}$.

Or cette frontière est aussi celle de la méthode 2 pour garantir la vitesse $< 2\text{m/s}$ aussi longtemps que le débit de la Loire à Montjean-sur-Loire est inférieur à $600\text{ m}^3/\text{s}$ voire $700\text{ m}^3/\text{s}$. Cela signifie que la méthode 1 intègre de fait la méthode 2 pour les débits de la Loire inférieurs à $600 - 700\text{ m}^3/\text{s}$.

On peut alors simplifier les méthodes 1 et 2 pour en tirer une loi synthétique (cf. graphique ci-dessous - chaque zone de couleur correspond aux commandes du feu de couleur associée). On a ajouté une zone *a priori* hydrauliquement impossible (aucun couple de points n'y a été relevé sur les chroniques de l'étude). Cette zone correspond à des débits intermédiaires $> 1000\text{m}^3/\text{s}$. La discontinuité que l'on remarque entre zone rouge / orange / verte et « zone impossible hydrauliquement » pourra être affinée en phase PRO.

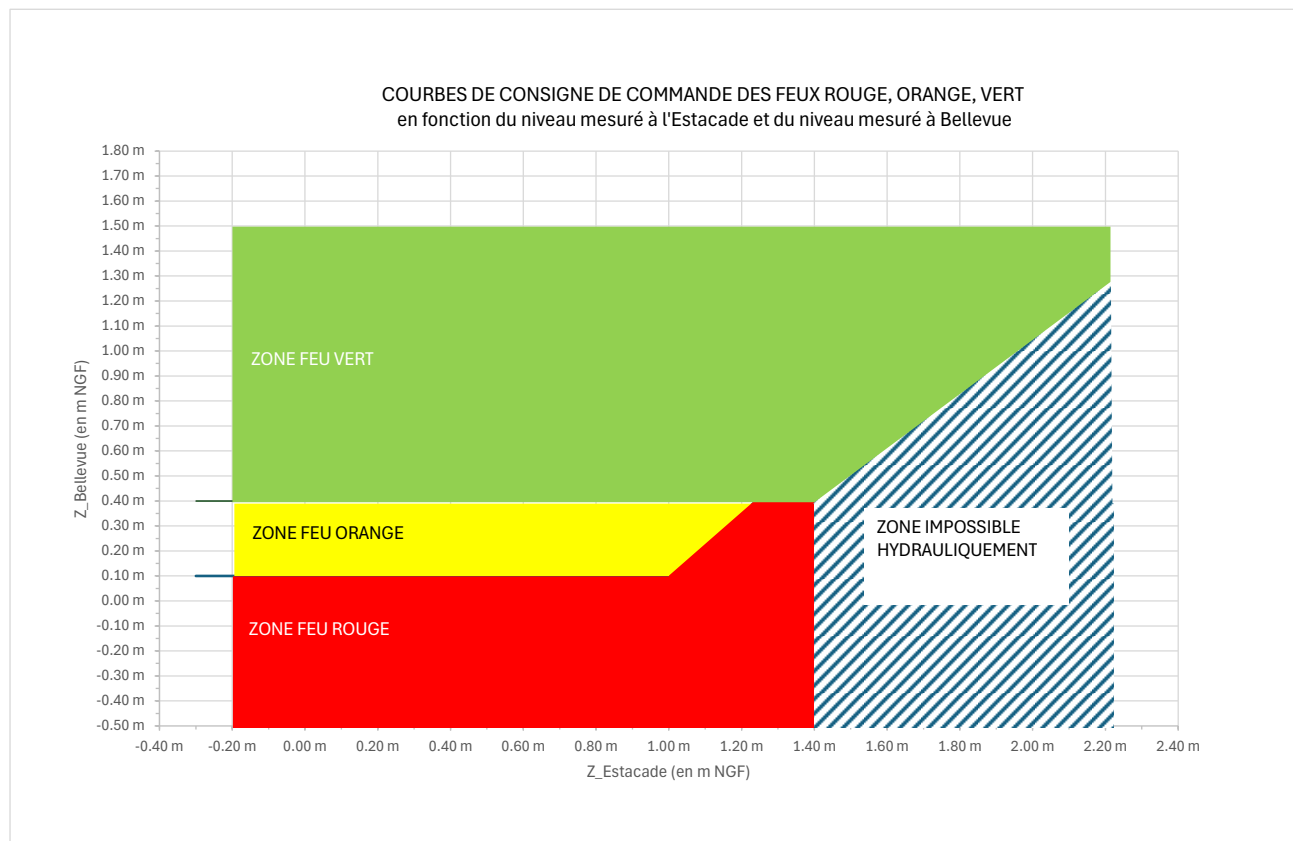


Figure 16 - Définition des lois de commande des feux

- FEU **VERT** :
 - pour $Z_ESTACADE < 1.00\text{m}$: $Z_BELLEVUE > 0.40\text{m NGF}$
 - pour $Z_ESTACADE \geq 1.00\text{m}$, $Z_BELLEVUE > 1.25.Z_ESTACADE - 0.85\text{ m NGF}$
- FEU **ORANGE** : pour valeurs de $Z_BELLEVUE$ entre limites FEU VERT et limites FEU ROUGE
- FEU **ROUGE** :
 - pour $Z_ESTACADE < 1.00\text{m}$: $Z_BELLEVUE < 0.10\text{m NGF}$
 - pour $Z_ESTACADE \geq 1.00\text{m}$, $Z_BELLEVUE \leq 1.25 Z_ESTACADE - 1.15\text{ m NGF}$

En notant que :

- Cette méthode de calcul fait appel à des données locales uniquement
- $Z_ESTACADE \geq 1.00\text{m}$ correspond au débit de la Loire à Montjean-sur-Loire $\geq 700\text{ m}^3/\text{s}$ comme le montre la Figure 8.

4.2. Compléments

A l’affichage des 3 feux, pourraient être ajoutées les informations essentielles suivantes :

- Affichage permanent :
 - Marée montante ou descendante.
- Affichage en alternance ou par défilement :
 - Temps restant disponible avant passage orange / rouge / vert ;
 - Hauteur d’eau minimum disponible dans le chenal.

5 Architecture technique

Pour répondre au besoin d'information des navigants, l'architecture technique proposée (cf. schéma page suivante) permet :

- Une diffusion locale de l'information : ce sont les équipements qui apparaissent en bleu sur le schéma suivant,
- Un stockage centralisé,
- Une collecte des alarmes et un appel aux équipes d'astreinte lorsque nécessaire,
- Une diffusion centralisée de l'information via Internet, en utilisant les serveurs et systèmes préexistant.

Ces différentes fonctionnalités et leur mise en œuvre sont décrites dans la suite du document.

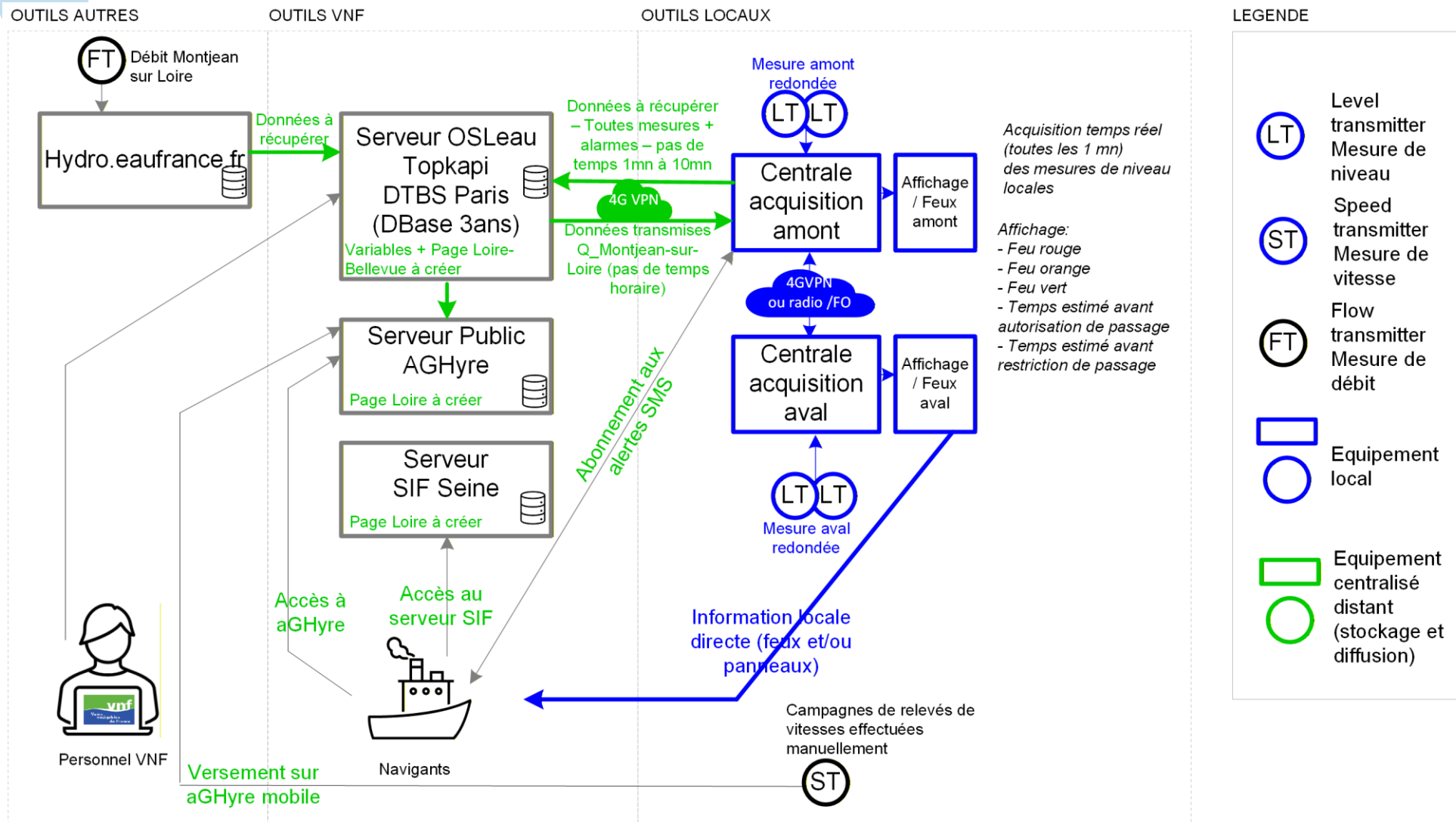


Figure 17 - Schéma de l'architecture technique d'information des navigants

5.1. Affichage local – 1^{ère} solution

Dans une première solution, les informations à diffuser localement sont affichées sur deux panneaux à message variable (PMV), situés l'un à l'amont de l'aménagement de Bellevue, l'autre à l'aval.

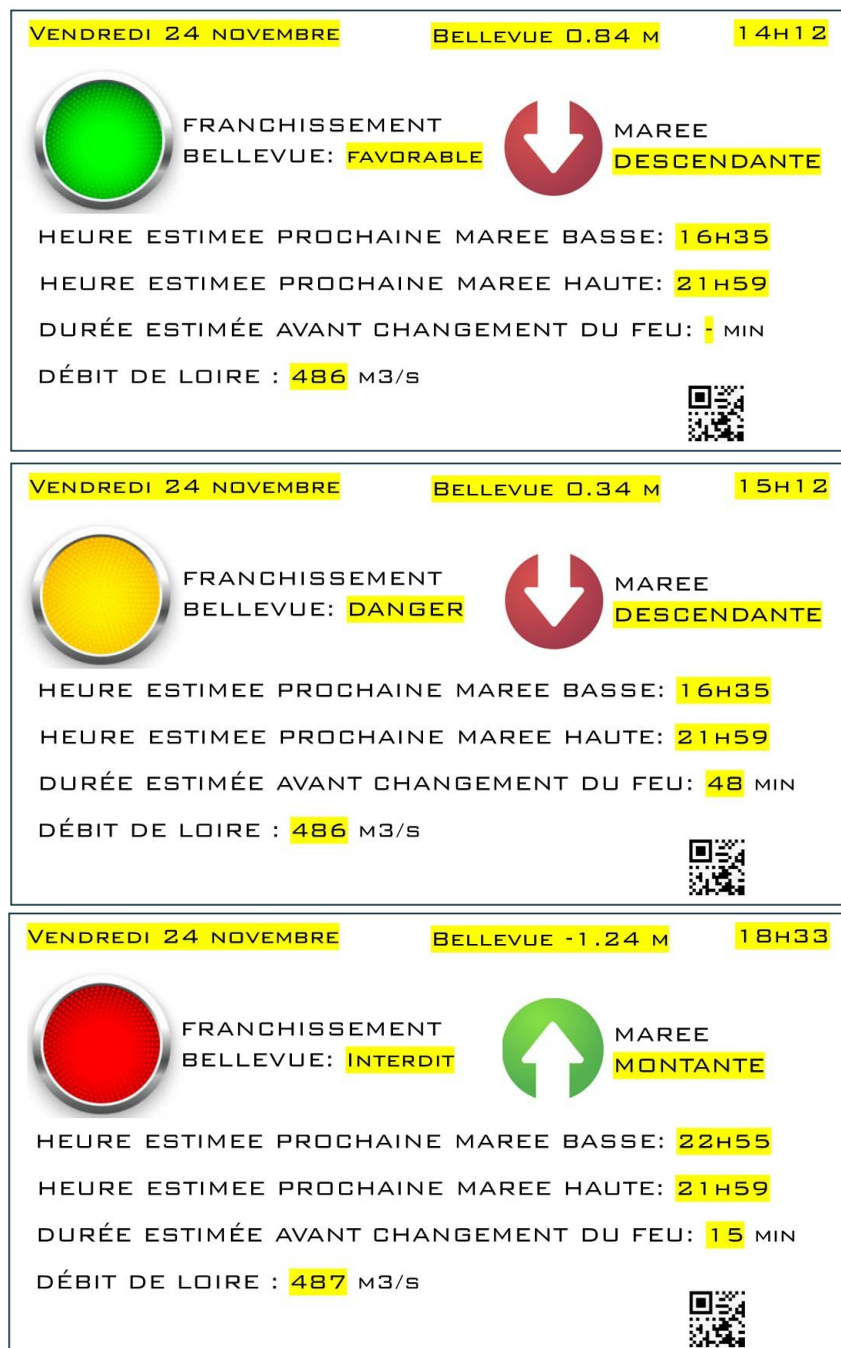


Figure 18 - Exemples de messages sur PMV

La taille des panneaux peut être très grande (cf. plus loin), ce qui augmente les coûts de mise en œuvre. Pour réduire la taille et les coûts, la disposition des informations pourrait être simplifiée de la façon suivante :

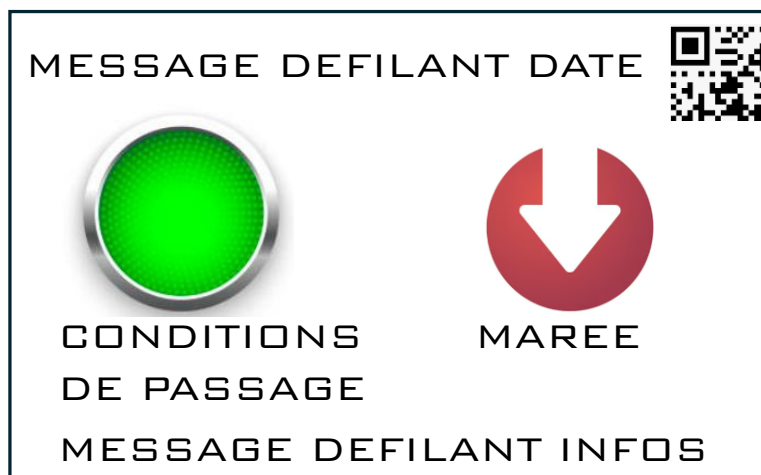


Figure 19 - Exemples de messages sur PMV – taille réduite

Si l'on se réfère au document établi par le CEREMA [DA 1] – annexe 4 §4, il est nécessaire de positionner le panneau en tenant compte :

- Du délai de prise en compte de l'information : pour 2s à 20km/h, cela correspond à 11m.
- De la distance d'arrêt de l'embarcation, supposée 3 fois sa longueur. Pour le Loire Princesse, cela correspond à 270m.
- Le poste de pilotage étant en général à l'arrière il faut ajouter la longueur du bateau.
- De plus, dans le cas présent, il est nécessaire que l'arrêt du bateau intervienne au moins à 200m à l'aval du pont de Bellevue, pour permettre qu'il puisse changer de cap dans de bonnes conditions.
- Soit une distance totale de $11+270+90+200 = 571\text{m}$ pour la prise de connaissance de l'information.

Cette distance est symbolisée par le trait rouge sur l'extrait de Google Earth ci-dessous :



Figure 20 - Extrait du document Cerema [DA1]

Le même document du CEREMA [DA 1] §2.3.2 donne également des indications sur la portée lumineuse des feux de signalisation. Une portée de 1km est recommandée, avec une intensité lumineuse de 900cd.

Si l'on considère que c'est le feu VERT ou ROUGE ou ORANGE qui donne l'information la plus importante conduisant à l'arrêt, ces feux doivent disposer d'une telle luminosité.

A noter que sur les écluses, on place en général des feux LEDs de diamètre 300mm, la puissance lumineuse est comprise entre 1500 et 2000 lumens, soit rapporté à l'optique, environ 1000 à 1600Cd, ce qui répond au besoin.

Le document CEREMA [DA 1] §2.1.2 indique aussi les tailles de panneaux fixes selon la largeur de la voie navigable. On peut considérer celle de la Loire entre 60m et 100m à l'aval du pont de Bellevue. La taille des panneaux à utiliser est alors de la gamme 3, c'est-à-dire pour des panneaux d'autorisation ou d'interdiction une taille de 1500mm x 1500mm.

Largeur de la voie	Gamme préconisée	Carré	Rectangle	Panneaux A.10 D.1 et D.2
<30 m	Gamme 1	700 × 700	700 × 1050	500 × 500
De 30 m à 60 m	Gamme 2	1000 × 1000	1000 × 1500	700 × 700
De 60 m à 170 m	Gamme 3	1500 × 1500	1500 × 2250	1000 × 1000
>170 m	Gamme 4	2000 × 2000	2000 × 3000	1500 × 1500

Figure 21 - Extrait du document Cerema [DA1]

Pour ce qui est des messages écrits, le document [DA 2] du CERTU précise les règles pour les PMV en milieu urbain. Ces prescriptions s'appliquent au milieu routier et non directement à la voie d'eau. Il donne en particulier des prescriptions de taille de caractère en fonction de la vitesse de circulation des véhicules. Ce paramètre ne paraît pas pertinent ici, puisque les vitesses d'approche sont faibles. Cependant, le graphique ci-dessous extrait du document [DA 2] reste adapté pour la voie d'eau. Si l'on considère que le panneau doit être lu pour toute personne ayant une acuité visuelle de l'ordre de 5/10 à 8/10, qui semblent être des valeurs repères citées par le CERTU, et si l'on considère que le bateau peut s'approcher à environ 50m du panneau, la hauteur des caractères doit être de l'ordre de 200 à 300mm de hauteur.

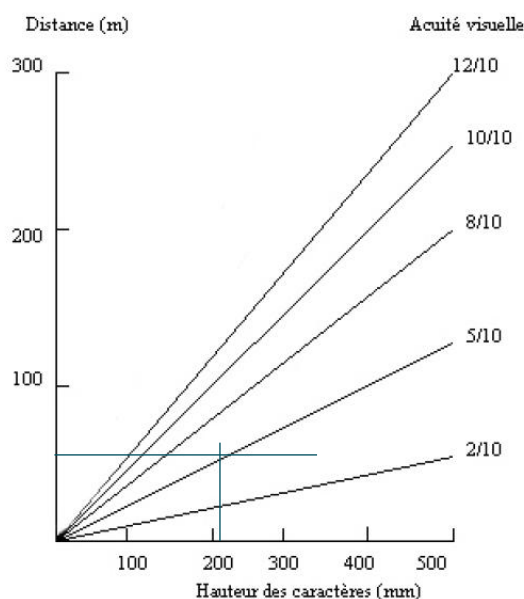


Figure 22 – Graphique hauteur des caractères = $f(\text{distance}, \text{acuité visuelle})$ – extrait du document Certu [DA2]

La photo d'un camion sur le pont de Bellevue montre que la taille envisagée n'est pas incohérente pour être lisible à bonne distance. La distance entre le photographe et la remorque est estimée à 50m. La hauteur de la remorque est d'environ 3m et il est possible d'écrire environ 7 lignes équivalentes, ce qui permet de déduire une hauteur de caractère d'environ 400mm.



Figure 23 - Photo du pont de Bellevue à environ 50m du pont et exemple taille message sur camion

Sur la base de cette approche, avec des caractères de 250mm de hauteur, la hauteur du panneau pour afficher les messages indiqués selon la Figure 18 serait de $14 \times 0.25 = 3.5\text{m}$ de haut et une largeur d'environ 6 à 7m.

En faisant défiler les messages selon la Figure 19, la hauteur du panneau pourrait être réduite à $7 \times 0.25 = 1.75\text{m}$ (arrondi à 2m) et une largeur d'environ 2.6m (arrondie à 3m).

Malgré la présence du panneau PMV, pour garantir une meilleure disponibilité de l'information ainsi qu'une bonne visibilité en cas de brouillard, il est préférable d'ajouter 3 feux : 1 rouge, 1 orange, 1 vert type LED 10W 1500 lumens, diamètre 300mm à côté du panneau. L'information essentielle est fournie même en cas de panne du panneau.

Dans le cas du choix d'une solution 6m x 3,5m, les panneaux de pourraient être constitués :

- Soit d'un écran LED de très grande taille 6m x 3,5m : il sera alors nécessaire de le protéger contre le vandalisme par des supports (dont cadre métallique et verre de protection). Les prix sont très élevés (de l'ordre de 30k€ hors cadre et supports),
- Soit de plusieurs écrans groupés pilotés par un boîtier. Les prix sont un peu plus bas et la maintenance moins coûteuse, puisqu'il est possible de changer une partie de l'écran seulement.

Dans le cas du choix d'une solution en 3m x 2m, le panneau serait fourni en une seule pièce.

La mise en œuvre de ces solutions est décrite plus loin au §5.3 et au paragraphe 6.

5.2. Affichage local – 2^{ème} solution

Cette deuxième solution pourrait être constituée par :

- Un ensemble de trois feux fixes : VERT/ JAUNE / ROUGE lumineux,
- D'un indicateur digital (timer) lumineux donnant la durée de l'étape avant l'allumage du feu suivant
- Quatre signaux lumineux « flèche » donnant le sens de l'évolution.

La disposition pourrait être la suivante (elle peut être aussi horizontale) :

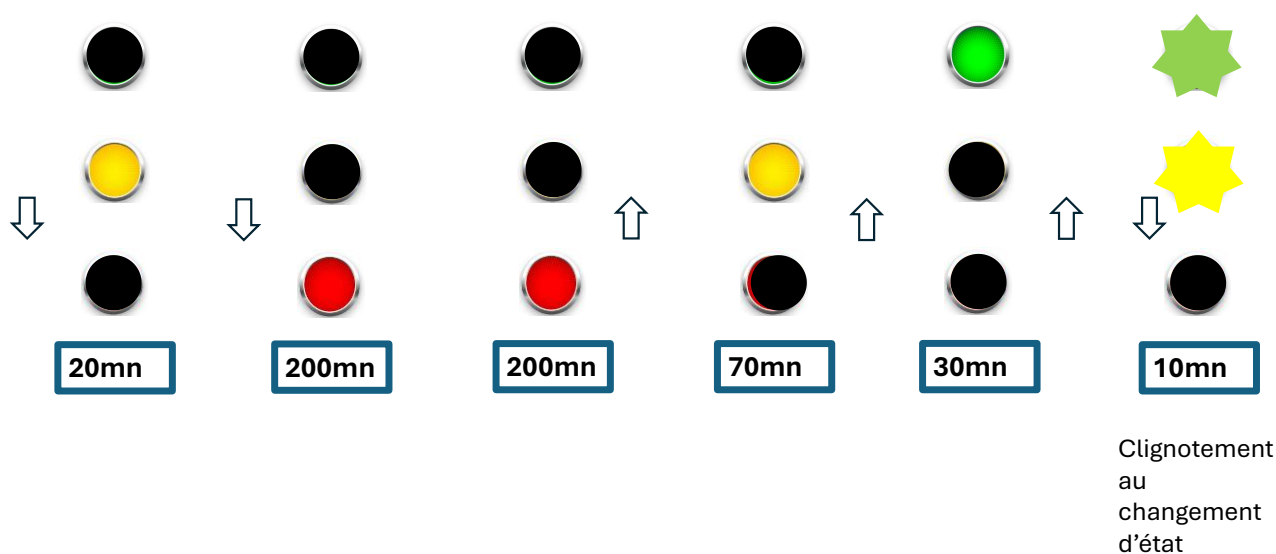


Figure 24 - Exemple de disposition des feux, des panneaux alphanumériques, et des flèches lumineuses selon l'état de navigabilité

5.3. Localisation des lieux d'affichage d'information – solutions 1 et 2

Pour tenir compte des contraintes et exigences sur la luminosité et les distances identifiées dans le paragraphe, il est proposé l'implantation suivante Figure 25 ci-dessous:

- Pour l'amont :

La visite sur site a permis d'identifier un quai en rive gauche, environ 800m à l'amont de la zone de navigation où les vitesses sont modifiées. Cette distance est suffisante pour permettre aux navigants de ralentir et de manœuvrer y compris faire demi-tour.

Le panneau (selon solution 1 ou solution 2) pourrait être fixé soit sur la structure du quai, avec cependant l'inconvénient :

- De gêner potentiellement les engins de chargement, déchargements présents sur site,
- D'être masqués par les embarcations se trouvant à quai,

La solution pourrait alors être d'utiliser le duc d'Albe existant à l'amont immédiat du quai ou d'en implanter un nouveau une vingtaine de mètres plus à l'amont, sur lequel pourrait être fixés le panneau (solution 1 ou solution 2), de sorte qu'il soit possible de tirer les réseaux nécessaires (alimentation, etc.) depuis le quai.

L'accès sur le duc d'Albe pourrait être facilité au moyen d'une passerelle, en sécurisant l'accès via un grillage de et portillon à clé de 2m50 de hauteur.



Figure 25 - Localisation des panneaux amont et aval



Figure 26 - Quai en rive gauche - Estacade amont

- Pour l'aval :

L'information doit être donnée suffisamment à l'aval du pont de sorte que les bateaux disposent de la distance nécessaire pour ralentir, et si besoin de se retourner. Ceci est particulièrement vrai en cas de brouillard.

De plus, le pont routier qui enjambe la Loire est très difficilement accessible sur la voirie du côté aval, et les travaux de mise en place du panneau (solution 1 ou 2) ainsi que la maintenance associée (changement d'écran, de feu, contrôle des câblages, etc.) seront soumis à des contraintes fortes vis-à-vis de la nécessité de neutraliser une voie de passage (cf. Figure 27 ci-dessous).



Figure 27 - Photo de la voirie sur le pont de Bellevue - côté aval (extrait Google Earth)

Deux solutions sont envisageables :

- Une solution où le panneau est fixé sur la culée RG du pont. Cela peut fonctionner à condition qu'un certain nombre de végétaux à proximité soient coupés et que l'entretien soit régulièrement assuré. Le problème du vol et vandalisme se pose également, ainsi que l'obtention de l'accord préalable du gestionnaire routier.

Cette solution présente l'avantage d'un support *a priori* plus simple mais ne répond pas complètement aux exigences de distance et le panneau (ou les feux) seraient relativement excentrés par rapport à la voie d'eau. Elle est donc *a priori* à exclure.



Figure 28 - Fixation sur la culée RG du pont – écran 3m x 6m

- L'autre solution consiste en la mise en œuvre d'un duc d'Albe environ 350m à l'aval rive gauche du pont, permettrait de résoudre ces difficultés. Elle présente l'avantage de permettre un positionnement plus à l'aval du pont, ce qui permettrait aux navigants montant de disposer assez tôt de l'information, pour ralentir et manœuvrer avant la zone plus difficile que constitue le pont et la courbe de trajectoire nécessaire en sortie.

Comme pour le duc d'Albe amont, l'accès au panneau sera facilité par une passerelle. Un accès uniquement fluvial peut être envisagé (à développer en phase PRO). Cet accès devra être protégé contre les risques de vol et de vandalisme.



Figure 29 – Duc d’Albe aval Bellevue

Sur le schéma ci-dessus, le repère jaune indique la position du duc d’Albe envisagée, 350m à l’aval du pont. La pointe rouge indique la distance de perception claire des messages, 50m plus à l’aval. Le trait vert indique la distance de perception claire des feux.

5.4. Affichage distant – information par internet

L’affichage local doit être complété par un stockage de l’information sur des serveurs distants. Ces serveurs permettent aussi de travailler et de rediffuser l’information, parfois de façon plus complète et plus ergonomique.

C’est ce que permettent les liens entre les centrales d’acquisitions locales et des serveurs de la DTBSLA de VNF :

- Les serveurs distants sont pour la plupart préexistants et il conviendra de les modifier. Leur mise en œuvre procède d’une logique différente : c’est au navigant d’aller chercher l’information. Cependant, celle-ci est plus complète et aussi plus lisible.
- Cependant, le formalisme de présentation aux usagers des informations contenues dans ces serveurs distants (par exemple aGHyre) est déjà prédéfini et standardisé. Il n’est donc pas certain de pouvoir de pouvoir développer des interfaces sur mesure. On voit sur les extraits ci-dessous qu’un accès est possible site par site, et offre pour chaque site :
 - Une vue sous forme des courbes des valeurs liées à l’ouvrage (niveaux, débits) : de telles courbes pourraient être affichées pour les niveaux Z_Estacade et Z_Bellevue et pour le débit de Montjean-sur-Loire si celui-ci peut être récupéré,
 - Une vue sous forme de tableau, plus spécifique à l’ouvrage. Les informations propres aux délais d’attente pour le passage du feu à la couleur suivante ou à l’atteinte de la marée basse ou haute pourraient éventuellement y être inscrits de la même façon, si toutefois le format qui semble standardisé accepte des valeurs de durée (secondes, minutes).

Les copies d’écran ci-dessous montrent les possibilités de diffusion d’information qu’offre l’appliquatif aGHyre :



Figure 30 - Exemple de page spécifique barrage - aGHyre

	Ecart dernier bassin et cote aval PaP Chatou	Position clapet 1	Position clapet 2	Position clapet 3	Position vanne aval pap	Test débit surverse Chatou (Q < 350 m3/s) moyenne clapets (Q<350)	Test débit surverse Chatou (Q < 350 m3/s) $\mu = 0,37$	Test débit surverse clapet 1 Chatou (< 350 m3/s)	Test débit surverse clapet 2 Chatou (< 350 m3/s)	Test débit surverse clapet 3 Chatou (< 350 m3/s)
	cm	m NGF	m NGF	m NGF	cm	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
12/11/2025 00:17	20	22.8	22.53	22.54	142	206.449	167.187	42.253	62.873	62.061
11/11/2025 00:17	22	22.8	22.52	22.38	160	228.585	174.266	40.135	61.254	72.877
10/11/2025 00:17	24	22.64	22.36	22.54	174	211.304	183.665	51.081	73.733	58.852
09/11/2025 00:17	20	22.48	22.53	22.37	194	232.377	201.173	65.327	61.254	74.592
08/11/2025 00:17	20	22.32	22.53	22.7	171	178.827	193.14	80.697	62.873	49.571
07/11/2025 00:17	20	22.32	22.53	22.54	190	206.449	205.631	80.697	62.873	62.061

Figure 31 - Exemple de page spécifique barrage – aGHyre

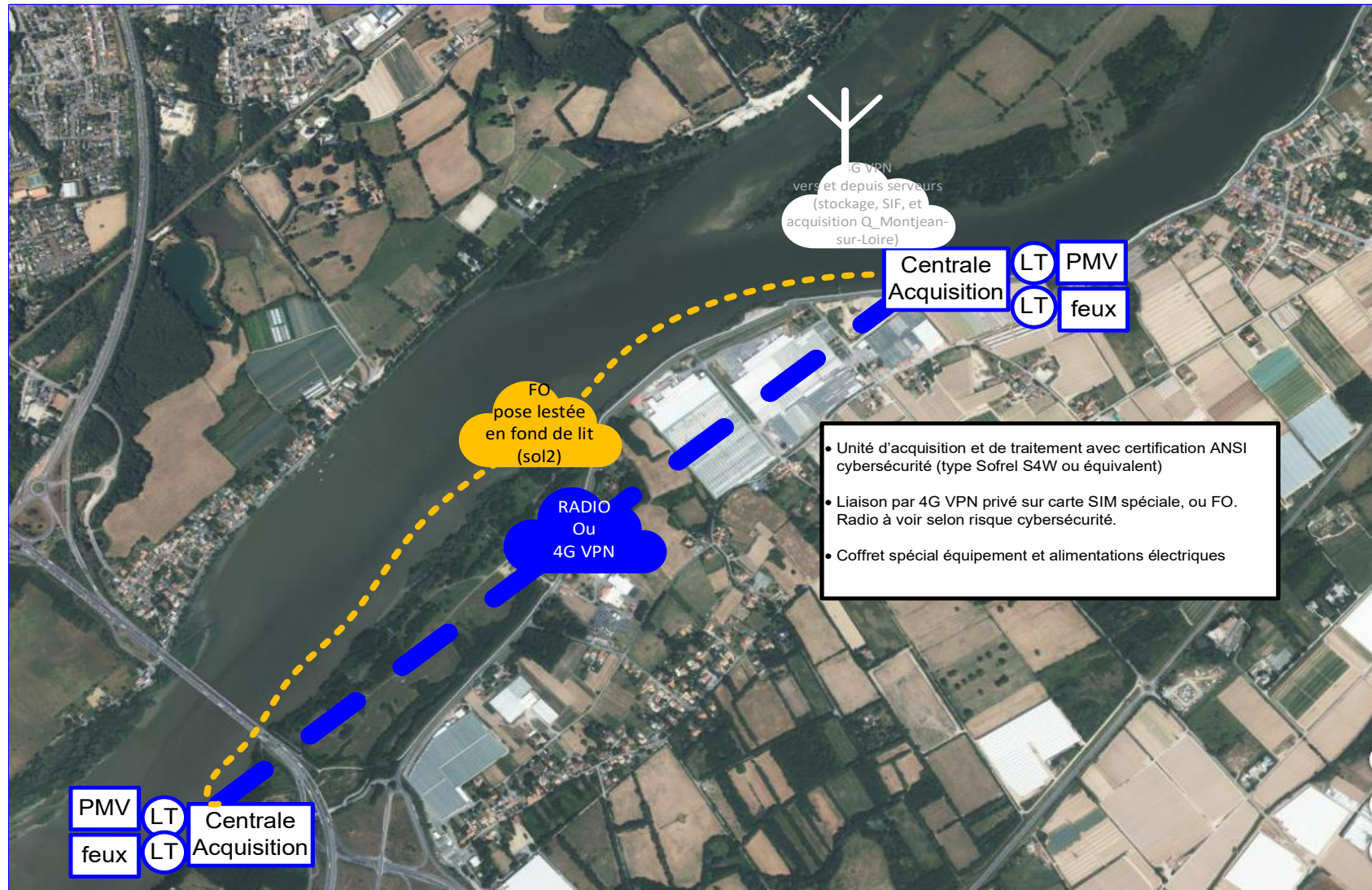


Figure 32 - Localisation des infrastructures

6 Mise en œuvre

6.1. Description générale

Quatre solutions sont proposées dans la mise en œuvre des solutions techniques. Ces quatre solutions constituent des variantes les unes par rapport aux autres de façon à proposer au maître d'ouvrage une fourchette de coûts qui puisse correspondre à son besoin.

Ces solutions sont décrites ci-dessous. Dans une première partie sont décrits les équipements communs à toutes les solutions :

- Les mesures de niveaux,
- Les centrales d'acquisition,
- Les systèmes télécoms,
- Les traitements sur les serveurs distants.

Au paragraphe 6.3 sont présentées quatre solutions qui sont des variantes des choix associés à :

- L'alimentation électrique : par réseau Enedis 230V~ ou par panneau solaire et batterie. Les solutions sont fortement liées à la consommation des équipements et à la facilité ou difficulté d'accéder au réseau Enedis.
- La taille des panneaux PMV. Cette taille conditionne la consommation électrique ainsi que les supports ce qui a des répercussions importantes sur les coûts. Une solution sans PMV est même proposée.

Au paragraphe 6.4 est proposée une variante sur le support télécoms qui peut s'appliquer aux quatre solutions précédemment décrites.

6.2. Equipements communs à toutes les solutions

6.2.1. Mesures de niveaux

Les mesures de niveau pour le système amont seraient placées au même endroit que les PMV. Pour la mesure aval, elles pourraient être placées sur les supports des PMV ou sur le pont de Bellevue (un capteur existe déjà sur ce pont).

Les capteurs pourraient être soit de technologie radar, soit de technologie sonde de pression. Il est prévu de placer deux capteurs par point de mesure, c'est-à-dire :

- Deux capteurs Estacade,
- Deux capteurs Bellevue.

Le modèle numérique utilisé pour la modélisation est basé sur une valeur toutes les 10mn à 15mn.

Dans la réalité, pour tenir compte des vaguelettes et oscillations rapides, un filtrage sera nécessaire, ce qui suppose une acquisition avec une périodicité de l'ordre de 1mn, pour réaliser les calculs au pas de 10mn.

Les mesures de niveau pourraient être des capteurs radars ou des sondes de pression. VNF ne souhaite pas de redondance de technologie, et préfère au contraire mutualiser les pièces de rechange, c'est pourquoi deux capteurs radars sont préconisés.

Ils seront mis en œuvre avec une liaison filaire jusqu'à la centrale d'acquisition, avec une liaison 4-20mA sur paire blindée, câble torsadé blindé. Le câble sera protégé dans une gaine métallique type Capri avec une fixation soigneusement effectuée de la gaine.

Des protections mécaniques seront installées autour des capteurs de sorte qu'ils ne subissent pas de dégâts dus à des chocs. Une précaution sera portée sur la sécurité d'accès aux paramètres du capteur. En particulier, on vérifiera qu'il n'est pas possible de modifier son paramétrage via Bluetooth (soit en déconnectant l'interface Bluetooth, soit par une sécurisation acceptable par VNF).

Le capteur sera monté sur un support dont les plans de fabrication auront été établis sur Autocad, les matériaux seront traités contre la corrosion en suivant les prescriptions ACQPA pour protection marine C5Mm et Im2.

6.2.2. Centrales d'acquisition

Il est prévu une centrale d'acquisition par site de mesure : une à l'Estacade amont, une à l'aval du pont de Bellevue.

Chaque centrale doit répondre aux besoins propres du projet, ainsi qu'à des exigences générales, dont :

- La certification ANSI pour la cybersécurité (imposée par VNF).
- La capacité d'acquisition de plusieurs mesures simultanément en parallèle avec des fréquences d'acquisition de l'ordre de la seconde à la minute,
- La capacité à effectuer les calculs prévus sur ces mesures :
 - Filtrage temporel réglable,
 - Calcul de gradient (sur variable brute et sur variable filtrée),
 - Calcul de fonctions affines sur les variables,
- La capacité à stocker les données :
 - Stockage nécessaire pour les calculs de gradient,
 - Stockage sur plusieurs heures voire plusieurs,
- La capacité à piloter les panneaux PMV en transmettant (par liaison câblée locales) :
 - Les valeurs analogiques,
 - Les commandes d'affichage de pages différentes : page feu vert, page feu orange, page feu rouge,
- La capacité à piloter des sorties TOR « tout ou rien » pour commander les feux (rouge / orange / vert) et les flèches symbolisant le sens de la marée.
- La capacité à communiquer simultanément sur plusieurs supports différents (cf. ci-dessous) en particulier sur infrastructure radio via modem, sur 4G et sur IP. La communication IP peut être utilisée pour les liens entre centrales amont et aval mais aussi avec un PC interface qui gère l'écran PMV.
- La capacité à se mettre à l'heure automatiquement (via réseau 4G ou autre solution).
- La capacité à traiter des défauts, dont ceux internes au système (incluant les défauts de communication) et la capacité à générer des alarmes vers les équipes d'astreinte lorsque des dysfonctionnements interviennent.

Les centrales d'acquisition de marque Sofrel et Paratronic sont très utilisées chez VNF mais d'autres marques sont également envisageables. Il est important que les centrales mises en œuvre respectent toutes les exigences décrites ci-avant.

6.2.3. Interfaces et supports télécoms

Le système fonctionne avec les deux centrales d'acquisition, celle de l'Estacade, celle de Bellevue. Les échanges entre ces deux équipements sont importants puisque la mise en œuvre du feu VERT est conditionnée par une connaissance à la fois de Z_Estacade et de Z_Bellevue.

C'est pourquoi une solution de communication redondée est envisagée :

- Une liaison (appelée « bond ») est effectuée par support radio dans la gamme de fréquence des 869MHz. Un test a été effectué entre le pont de Bellevue et l'Estacade amont en novembre 2025 (cf. Annexe 5). L'emplacement du panneau d'affichage Bellevue étant plus à l'aval que le pont, il sera nécessaire de mettre en œuvre deux bonds, l'un de l'estacade vers le pont et l'autre du pont vers l'aval.
- Un autre lien est créé par liaison 4G VPN. Cette liaison emprunte le réseau d'un opérateur, ce n'est donc pas un lien complètement local et indépendant, cependant, il est sécurisé par un VPN propre à VNF.

Une variante est également proposée au chapitre §6.4 avec la mise en œuvre d'un support à fibre optique entre la centrale amont et la centrale aval.

6.3. Solutions et coûts associés

Ce paragraphe présente les solutions techniques et un bilan des coûts associés. Une analyse plus détaillée des coûts et une comparaison entre les solutions est proposée au paragraphe §6.6.

6.3.1. Solution 1 : PMV grande taille sur ducs d'Albe

Dans cette première solution, l'affichage est assuré par un panneau à message variable de type PMV de dimensions 6mx3,5m. En complément, des feux tricolores sont mis en œuvre. L'ensemble est monté sur un duc d'Albe, selon le schéma Figure 34 ci-dessous. La consommation électrique d'un tel panneau varie entre 150W et 250W/m². Une valeur moyenne de 200W/m² est prise pour le dimensionnement électrique, soit pour 21m² une puissance requise de 4200W.

Les modalités d'alimentation sont alors examinées :

- Soit par panneau solaire PV + Batterie de stockage
- Soit par alimentation électrique depuis le réseau public basse tension BT.

Le dimensionnement électrique ci-dessous montre que la puissance nécessaire est très élevée : 4375W et 105000 Wh par jour. Il n'existe alors pas de solution simple d'une alimentation par panneau PV + batterie. C'est pourquoi une solution avec caméra est envisagée. Cette caméra permet de détecter l'approche des bateaux et assure alors l'alimentation du panneau.

L'effet de cette caméra est positif à deux titres :

- Elle réduit considérablement la consommation journalière, permettant de diminuer l'infrastructure PV
- Elle réduit la pollution lumineuse la nuit

Elle présente cependant plusieurs défauts :

- La fiabilité de détection des bateaux n'est pas de 100%, il faut donc conserver le fonctionnement des feux (rouge/ orange / vert) en dehors de la condition donnée par la caméra.
- Elle ajoute une (petite) consommation à l'ensemble.
- Surtout, elle ne permet pas de mettre en œuvre une solution réaliste avec des panneaux PV. L'annexe 6 montre qu'il faudrait alors 38 panneaux de 400Wc associée à une grande capacité de batterie (5x 22,9kWh + 1x27,5kWh). Cela signifie donc que la seule solution est une alimentation électrique depuis le réseau public BT.

	sans caméra		avec caméra	
Bilan de puissance	Nb d'heures		Nb d'heures	
Panneau PMV LED	4200	24	4200	2
Feu LED	10	24	10	24
Capteur	5	24	5	24
Centrale acquisition	50	24	50	24
PC	100	24	100	24
Radio	10	24	10	24
Caméra			20	24
Puiss.W Conso Wh/j	4375 W	105000 Wh	4395 W	13080 Wh

Figure 33 - Mise en œuvre de la solution 1 - cf. annexe 6

La seule solution d'alimentation est donc celle depuis le réseau Enedis Basse Tension. Sur la base des cartes fournies par Enedis pour identifier les réseaux BT, il apparaît que :

- Le réseau BT est très proche de l'Estacade, ce qui rend les coûts assez faibles
- Le réseau BT à l'aval du pont de Bellevue n'est pas identifié à proximité du lieu envisagé, ce qui peut entraîner une extension du réseau HTA (haute tension 20kV) pour fournir la connexion basse tension souhaitée.

Sur la base de ces identifications, le chiffrage de cette solution est alors le suivant (cf. tableau ci-dessous et annexe 6).

Le montant total est estimé à 477k€ HT.

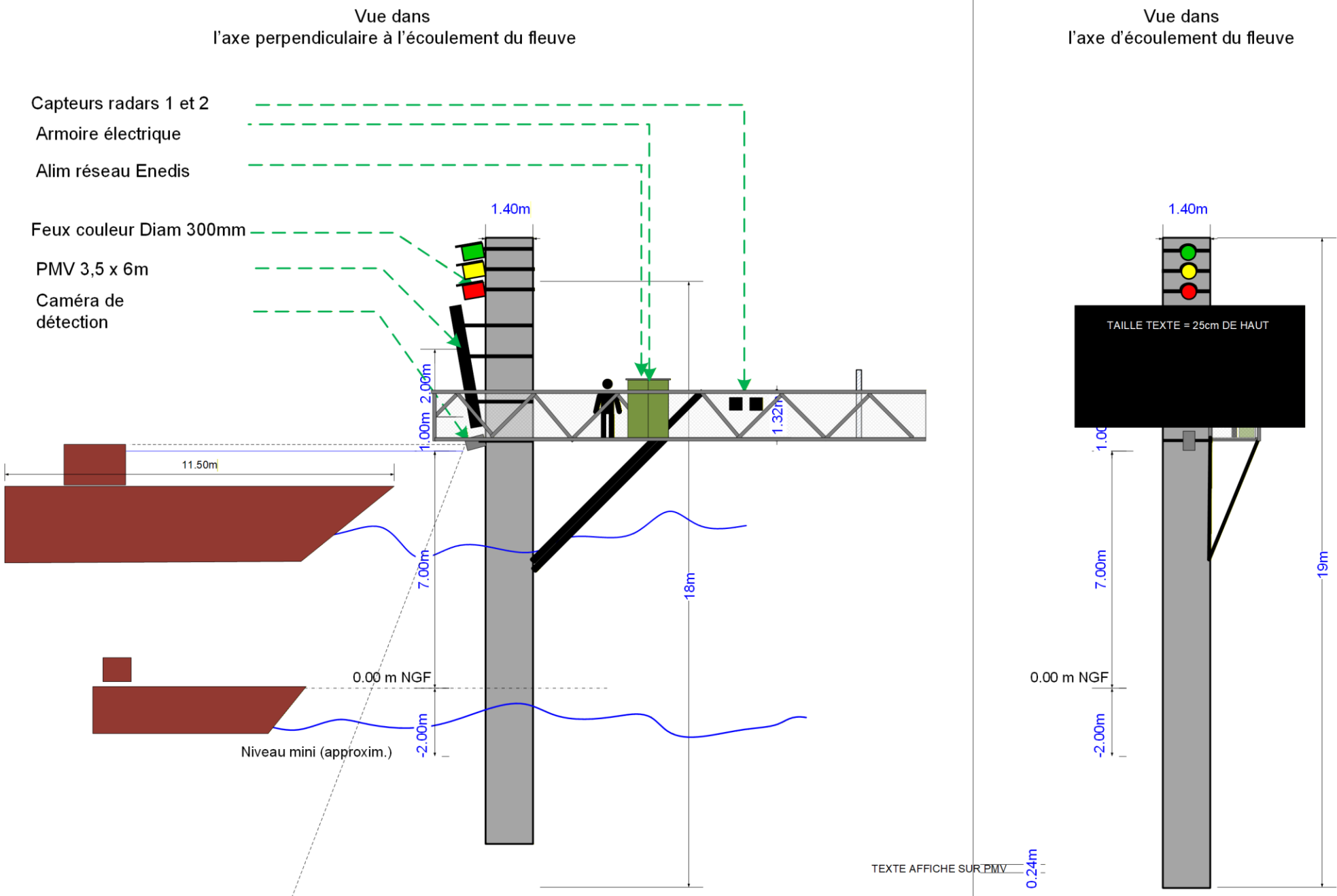


Figure 34 - Mise en œuvre de la solution 1 - cf. annexe 3

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT	
Bellevue	1	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment	Enedis	forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €	
			Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	50	4 140.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension HTA		forfait avec réfaction 40%	5 509.80 €	1	5 509.80 €	
			Coût Enedis	Coût variable HTA		par m de liaison avec réfaction 40%	139.80 €	380	53 124.00 €	
	Total 1								66 153.00 €	
	2	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	Inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €	
	Total 2								9 550.00 €	
	3	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €	
	Total 3								5 180.00 €	
	4	Affichage	Ecran PMV		LED MASTER 600x350cm	unité	28 000.00 €	1	28 000.00 €	
			Support métallique écran P	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre ant	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	21	27 527.50 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	21	5 250.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	0	0.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalnt	unité	2 500.00 €	0	0.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	Total 4								63 777.50 €	
	5	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €	
			Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €	
	Total 5								6 117.20 €	
	6	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès et supports		unité	30 000.00 €	1	30 000.00 €	
	Total 6								95 000.00 €	
	7	Etude / Installation /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 7								9 175.00 €	
Estacade	8	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment		forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €	
			Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	200	16 560.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension HTA		forfait avec réfaction 40%	5 509.80 €	0	0.00 €	
			Coût Enedis	Coût variable HTA		par m de liaison avec réfaction 40%	139.80 €	0	0.00 €	
	Total 8								19 939.20 €	
	9	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €	
	Total 9								9 550.00 €	
	10	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €	
	otal 10								5 180.00 €	
	11	Affichage	Ecran PMV		LED MASTER 600x350cm	unité	28 000.00 €	1	28 000.00 €	
			Support métallique écran P	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre ant	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	21	27 527.50 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	21	5 250.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	0	0.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalnt	unité	2 500.00 €	0	0.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	otal 11								63 777.50 €	
	12	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €	
			Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €	
	otal 12								6 117.20 €	
	13	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès		unité	20 000.00 €	1	20 000.00 €	
	otal 13								85 000.00 €	
	14	Etude / Installation /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 14								9 175.00 €	
DTBSL	15	Dév solution Internet	Développement Applicatif	Estimation des coûts de développement d'une interface Systèmes à définir		taux horaire	85.00 €	280	23 800.00 €	
Total 15									23 800.00 €	
Total général									477 491.60 €	

Figure 35 -Coût estimatif de la solution 1 - cf. annexe 3

6.3.2. Solution 2 : PMV de taille réduite sur ducs d'Albe

Dans cette deuxième solution, la conception est identique à celle de la solution 1, avec écran PMV, et feux à trois couleurs. Cependant la taille de l'écran PMV est réduite à 3m x 2m.

La consommation électrique d'un tel panneau est réduite par rapport à la solution 1 mais le dimensionnement électrique ci-dessous montre que la puissance nécessaire (1200W) reste trop élevée pour une solution avec panneaux PV + batterie puisqu'il faudrait encore une vingtaine de panneaux 400Wc de 1m sur 1,5m. Comme avec la solution 1, la mise en œuvre d'une caméra permettant de réduire le temps de sollicitation du panneau ne résout pas le problème : la seule solution reste l'alimentation par le réseau public basse tension.

	sans caméra		avec caméra	
	Nb d'heures		Nb d'heures	
Bilan de puissance				
Panneau LED	1200	24	1200	2
Feu LED	10	24	10	24
Capteur	5	24	5	24
Centrale acquisition	50	24	50	24
PC	100	24	100	2
Radio	10	24	10	24
Caméra			20	24
Puissance et Conso Wh / jour	1375 W	33000 Wh	1395 W	4880 Wh

Figure 36 - Mise en œuvre de la solution 2 - cf. annexe 6

Sur la base de ces identifications, le montant de cette solution est alors estimé à 391k€ HT, soit 86 k€ HT de moins que la solution 1. La différence technique entre les deux solutions réside dans la qualité des informations reçues à distance (cf. tableau et Figure 39 ci-dessous et annexe 6).

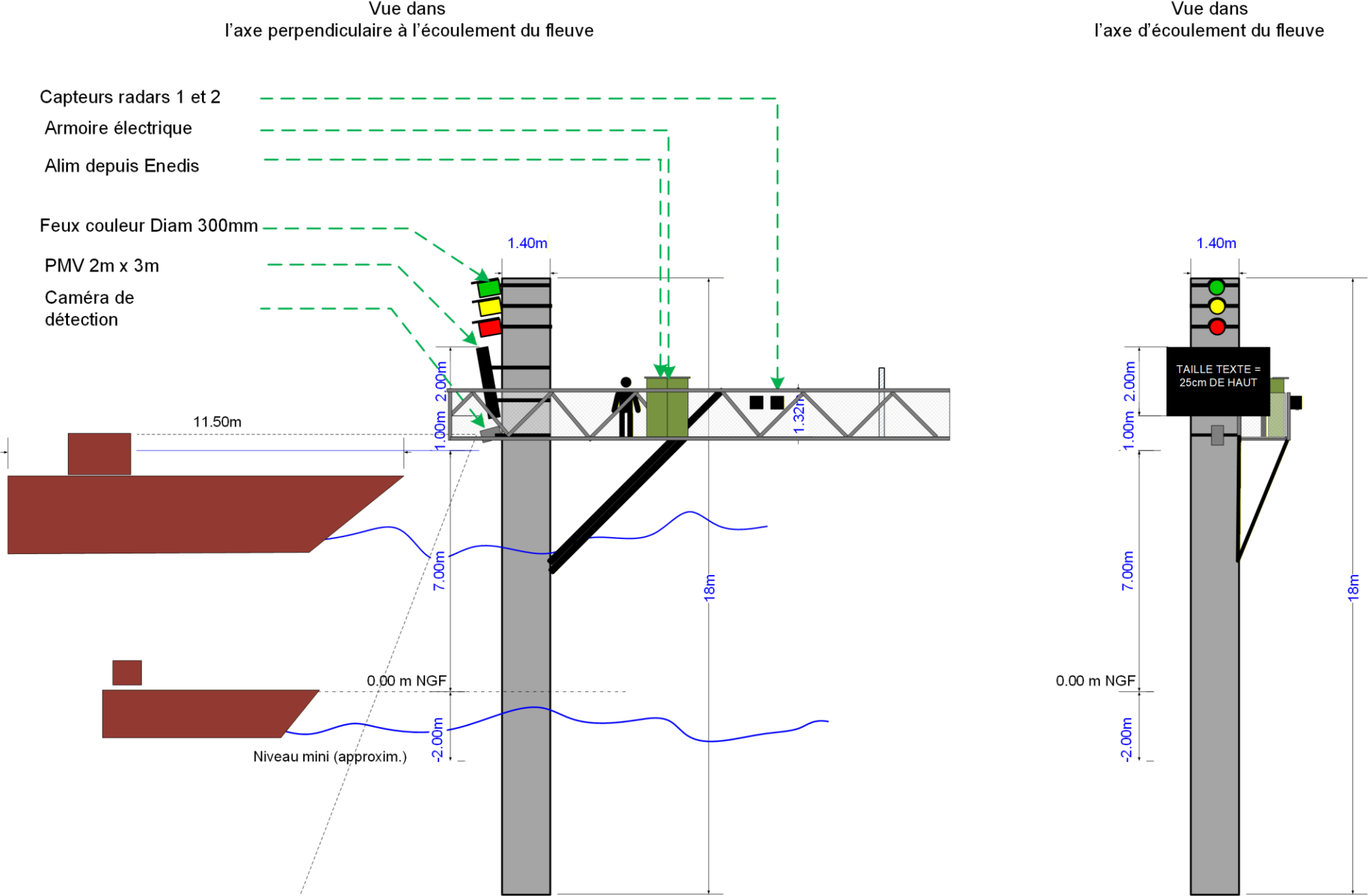
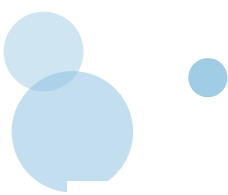


Figure 37 - Mise en œuvre de la solution 2 - cf. annexe 3

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT	
Bellevue	1	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment	Enedis	forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €	
			Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	50	4 140.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension HTA		forfait avec réfaction 40%	5 509.80 €	1	5 509.80 €	
			Coût Enedis	Coût variable HTA		par m de liaison avec réfaction 40%	139.80 €	380	53 124.00 €	
	Total 1								66 153.00 €	
	2	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €		
	Total 2								9 550.00 €	
	3	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images	Phoenix Contact BOX PC24			unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 3								5 180.00 €	
	4	Affichage	Ecran PMV		LED MASTER 260x175	unité	8 000.00 €	1	8 000.00 €	
			Support métallique écran PMV	50kg *3 € + soudage 1500 + Végapuls	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	6	7 865.00 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	6	1 500.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	0	0.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	0	0.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	Total 4								20 365.00 €	
	5	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier			unité	885.00 €	2	1 770.00 €
			Casquette de protection	Boîtier métallique + travail en atelier			unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 5								6 117.20 €	
	6	Duc d'Albe et	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès et supports			unité	30 000.00 €	1	30 000.00 €
	Total 6								95 000.00 €	
	7	Etude / Installation	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 7								9 175.00 €	
Estacade	8	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment		forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €	
			Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	200	16 560.00 €	
			Coût Enedis	Forfait Extension HTA		forfait avec réfaction 40%	5 509.80 €	0	0.00 €	
			Coût Enedis	Coût variable HTA		par m de liaison avec réfaction 40%	139.80 €	0	0.00 €	
	Total 8								19 939.20 €	
	9	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €		
	Total 9								9 550.00 €	
	10	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images	Phoenix Contact BOX PC24			unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 10								5 180.00 €	
	11	Affichage	Ecran PMV		LED MASTER 260x175	unité	8 000.00 €	1	8 000.00 €	
			Support métallique écran PMV	50kg *3 € + soudage 1500 + Végapuls	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	6	7 865.00 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	6	1 500.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	0	0.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	0	0.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	Total 11								20 365.00 €	
	12	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier			unité	885.00 €	2	1 770.00 €
			Casquette de protection	Boîtier métallique + travail en atelier			unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 12								6 117.20 €	
	13	Duc d'Albe et	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès			unité	20 000.00 €	1	20 000.00 €
	Total 13								85 000.00 €	
	14	Etude / Installation	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 14								9 175.00 €	
OTBSL	15	Développement solution Internet	Développement Applicatif	Estimation des coûts de développement d'une interface Systèmes à définir		taux horaire	85.00 €	280	23 800.00 €	
Total 15									23 800.00 €	
Total général									390 666.60 €	

Figure 38 – Coût estimatif de la solution 2 - cf. annexe 3

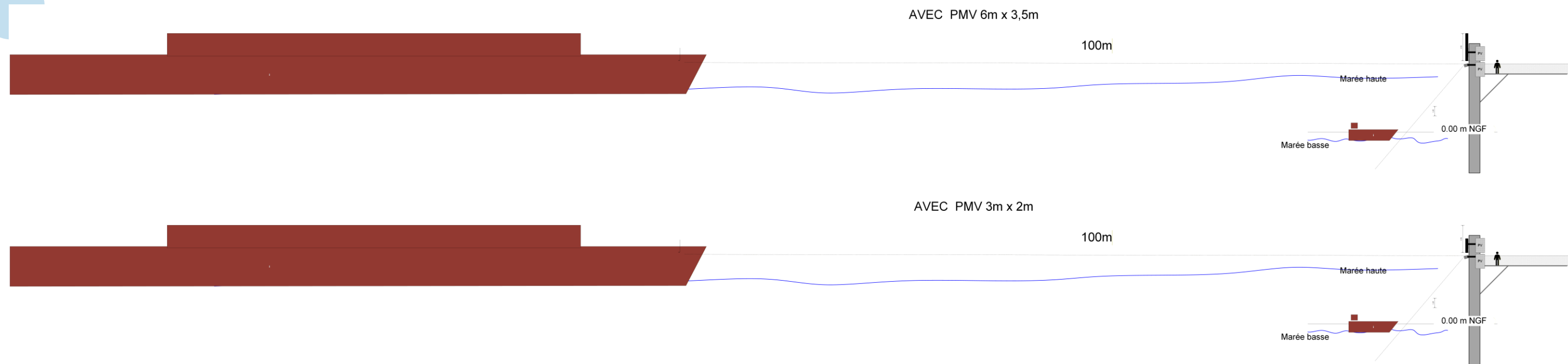
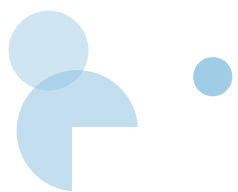


Figure 39 - Comparaison sur la taille des informations - Bateau type Loire Princesse à 100m de distance – avec panneau 6m x 3,5m en haut et avec panneau 3m x 2m en bas

6.3.3. Solution 3 : feux et indicateur digital sur ducs d'Albe

Dans cette troisième solution, le choix est fait de réduire de façon importante l'information diffusée localement, en la limitant à :

- Des feux donnant l'autorisation ou l'interdiction de franchissement,
- Un indicateur digital (*timer*) qui affiche le temps estimé de la durée d'affichage de chaque feu,
- Le sens de la marée donnée par les flèches lumineuses.

La consommation électrique de la solution est évaluée dans le tableau ci-dessous. Elle est suffisamment réduite (205W sans caméra et 225W avec caméra) pour permettre la mise en œuvre d'une installation PV solaire et batterie de stockage :

	Sans caméra		Avec caméra	
	P active (W)	Nb d'heures	P active (W)	Nb d'heures
Bilan de puissance				
Timer PMV 0.3 x 1m	120	24	120	3
feu LED	10	24	10	24
Flèche	10	24	10	3
Capteur	5	24	5	24
Centrale acquisition	50	24	50	24
Radio	10	24	10	24
Caméra	0	24	20	24
Puissance et Conso Wh / jour	205 W	4920 Wh	225 W	2670 Wh

Figure 40 - Mise en œuvre de la solution 3 - cf. annexe 6

Deux configurations : « avec » et « sans » caméra sont évaluées, la caméra servant à réduire la durée de fonctionnement du timer. Les résultats (cf. figures ci-dessous) montrent :

- Que l'installation PV doit être dimensionnée à 4500Wc avec 10 panneaux et une batterie de 32kWh,
- Que la caméra est nécessaire pour limiter la consommation et réduire l'installation.

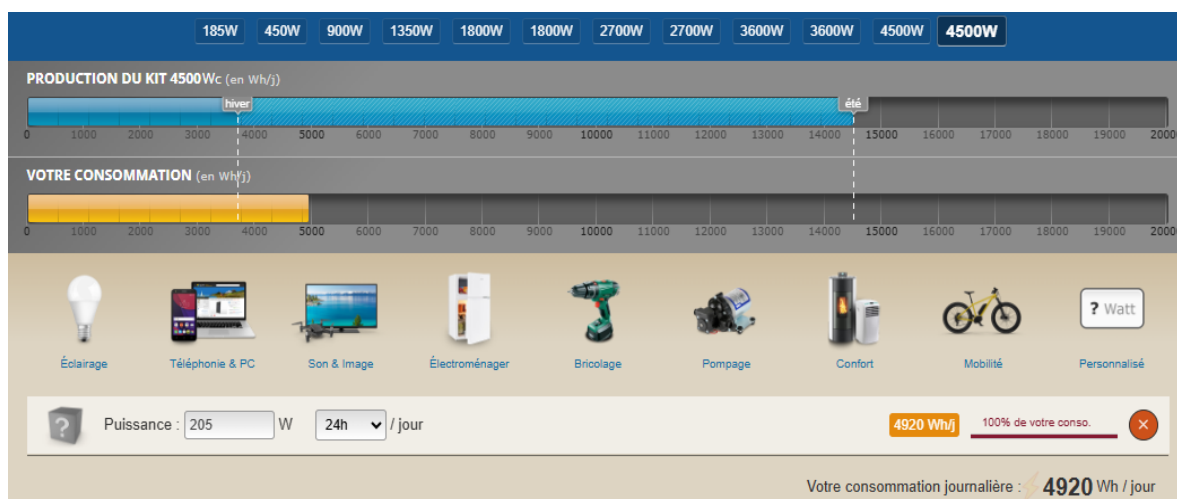


Figure 41 - Evaluation de l'installation nécessaire – sans caméra (site solaris-store.com)

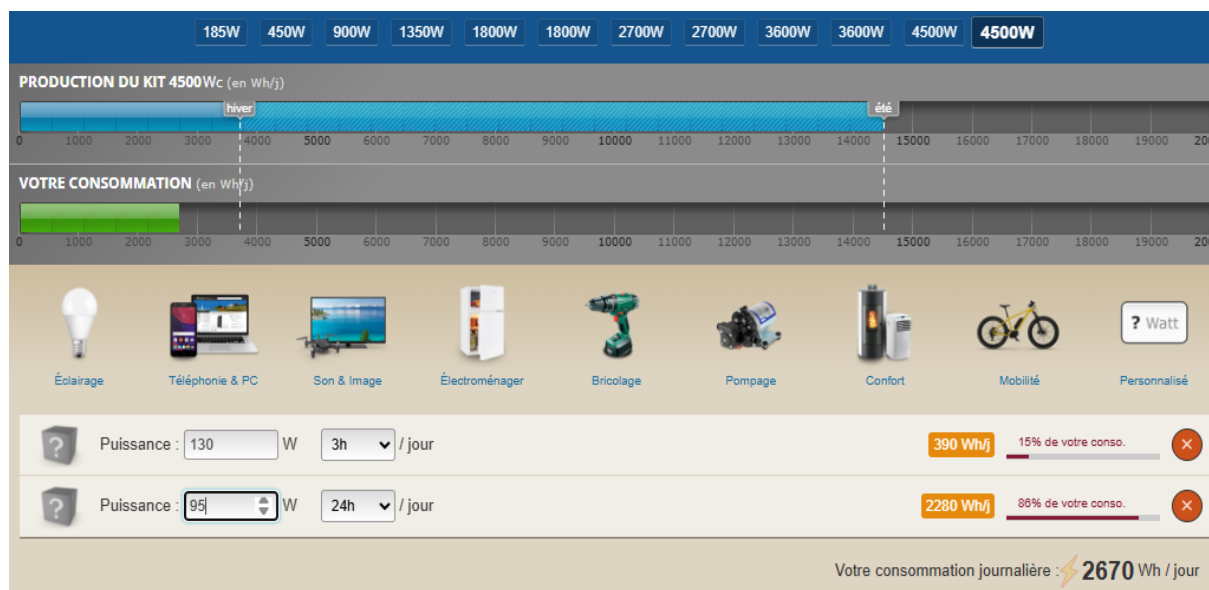


Figure 42 - Evaluation de l'installation nécessaire - avec caméra (site solaris-store.com)

Sur la base de ce dimensionnement technique, le montant total de la fourniture et mise en œuvre de la solution 3 est estimé à 340k€ HT soit 50k€ de moins que la solution 2 (cf. tableau ci-dessous et annexe 6).

Cette solution, si elle est choisie, demandera cependant un certain nombre de vérifications en phase PRO, en particulier :

- La puissance réelle fournie par l'installation électrique, en fonction de l'orientation réelle des panneaux (ici elle est supposée plein sud) et en tenant compte de la baisse de rendement des panneaux dans le temps.
- La tenue de la structure vis-à-vis des efforts générés par le poids des panneaux et par les effets du vent.

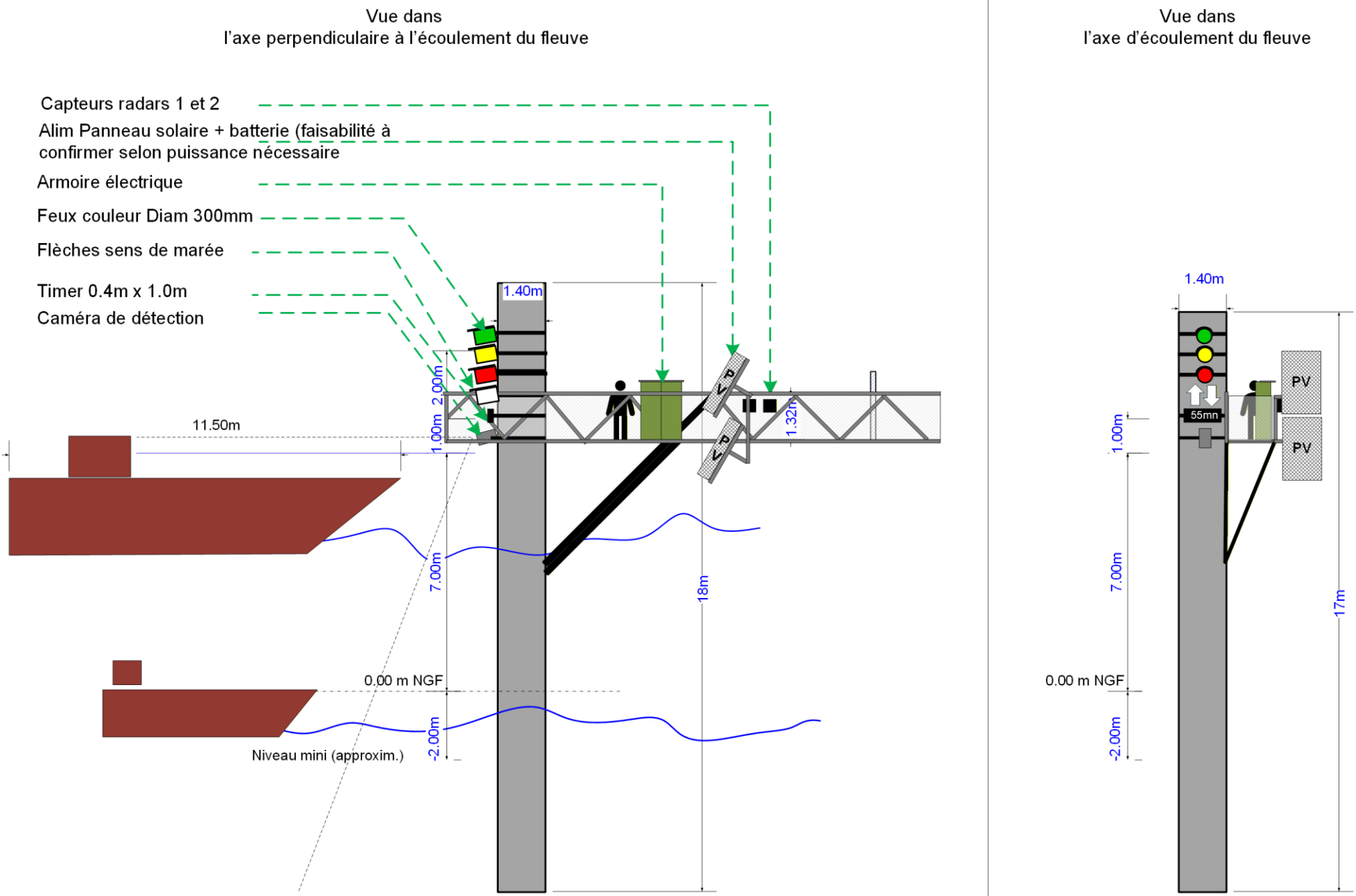


Figure 43 - Mise en œuvre de la solution 3 - cf. annexe 3 (nb de panneaux PV non représentatif)

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT	
Bellevue	1	Alimentation depuis PV et batterie	PV + Batterie + Onduleur + Batterie	KIT 4500W	Simulateur Solaire solaris-store.com	unité	13 000.00 €	1	13 000.00 €	
			Support mécanique panneaux fixés sur DA			unité	5 000.00 €	1	5 000.00 €	
			Coffret d'intégration matériel			RITTAL CS	unité	2 819.00 €	1	2 819.00 €
			Plateforme Support du c	Plateforme + fixation sur Duc d'Albe		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Etude et installation			taux horaire	70.00 €	35	2 450.00 €	
	Total 1								24 769.00 €	
	2	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €		
	Total 2								9 550.00 €	
	3	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC24	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €	
	Total 3								5 180.00 €	
	4	Affichage	Ecran PMV pour timer		LED MASTER 1m x 0.35	unité	6 600.00 €	1	6 600.00 €	
			Support métallique écran	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre antivan	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	0.5	655.42 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	0.5	125.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement + cal	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	Total 4								13 380.42 €	
	5	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €	
			Casquette de protection	Boîtier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €	
	Total 5								6 117.20 €	
	6	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès		unité	30 000.00 €	1	30 000.00 €	
	Total 6								95 000.00 €	
	7	Etude / Installation /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 7								9 175.00 €	
Estacade	8	Alimentation depuis PV et batterie	PV + Batterie + Onduleur + Batterie	KIT 4500W	Simulateur Solaire solaris-store.com	unité	13 000.00 €	1	13 000.00 €	
			Support mécanique panneaux fixés sur DA			unité	5 000.00 €	1	5 000.00 €	
			Coffret d'intégration matériel			RITTAL CS	unité	2 819.00 €	1	2 819.00 €
			Plateforme Support du c	Plateforme + fixation sur Duc d'Albe		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Etude et installation			taux horaire	70.00 €	35	2 450.00 €	
	Total 8								24 769.00 €	
	9	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €	
			Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
			Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €	
			Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
			Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €	
			Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €	
			Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €	
			Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €	
	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage			taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €		
	Total 9								9 550.00 €	
	10	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC24	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €	
			Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €	
	Total 10								5 180.00 €	
	11	Affichage	Ecran PMV pour timer		LED MASTER 1m x 0.35	unité	6 600.00 €	1	6 600.00 €	
			Support métallique écran	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre antivan	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	0.5	655.42 €	
			Divers support			forfait par m2	250.00 €	0.5	125.00 €	
			Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €	
			Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €	
			Caméra	Caméra avec détection mouvement + cal	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €	
			Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €	
	Total 11								13 380.42 €	
	12	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m	unité	903.60 €	2	1 807.20 €	
			Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €	
			Casquette de protection	Boîtier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €	
	Total 12								6 117.20 €	
	13	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €	
			Duc d'Albe	Passerelle d'accès		unité	20 000.00 €	1	20 000.00 €	
	Total 13								85 000.00 €	
	14	Etude / Installation /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €	
			Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €	
	Total 14								9 175.00 €	
TBSL	15	Dév solution Internet	Développement Applicatif	Estimation des coûts de développement d'une interface Systèmes à définir		taux horaire	85.00 €	280	23 800.00 €	
Total 15									23 800.00 €	
Total général									340 143.23 €	

Figure 44 – Coût estimatif de la solution 3 - cf. annexe 3

6.3.4. Solution 4 : feux et flèches seuls sur ducs d'Albe

Dans cette quatrième solution, l'installation comprend :

- Les feux d'autorisation et d'interdiction de franchissement,
- Les flèches lumineuses donnant le sens de la marée.

La consommation électrique de la solution est évaluée dans le tableau ci-dessous. Elle est suffisamment réduite : 85W pour permettre la mise en œuvre d'une installation PV solaire et batterie de stockage. La mise en œuvre d'une caméra n'est pas nécessaire car sa puissance est supérieure au gain qu'elle pourrait apporter.

	sans caméra		avec caméra		> pas d'intérêt de la caméra car pas de gain de consommation
Bilan de puissance	P active (W)	Durée	P active (W)	Durée	
Feu LED	10	24	10	24	
Flèche	10	24	10	24	
Capteur	5	24	5	24	
Centrale acquisition	50	24	50	24	
Radio	10	24	10	24	
Caméra	0	24	20	24	
Puissance et Conso Wh / jour	85 W	2040 Wh	105 W	2520 Wh	

Figure 45 - Mise en œuvre de la solution 4 - cf. annexe 6

Une évaluation de l'installation est réalisée via un site de dimensionnement. Les résultats ci-dessous montrent que l'installation PV doit être dimensionnée à 2700Wc avec 6 panneaux et une batterie de 23kWh.

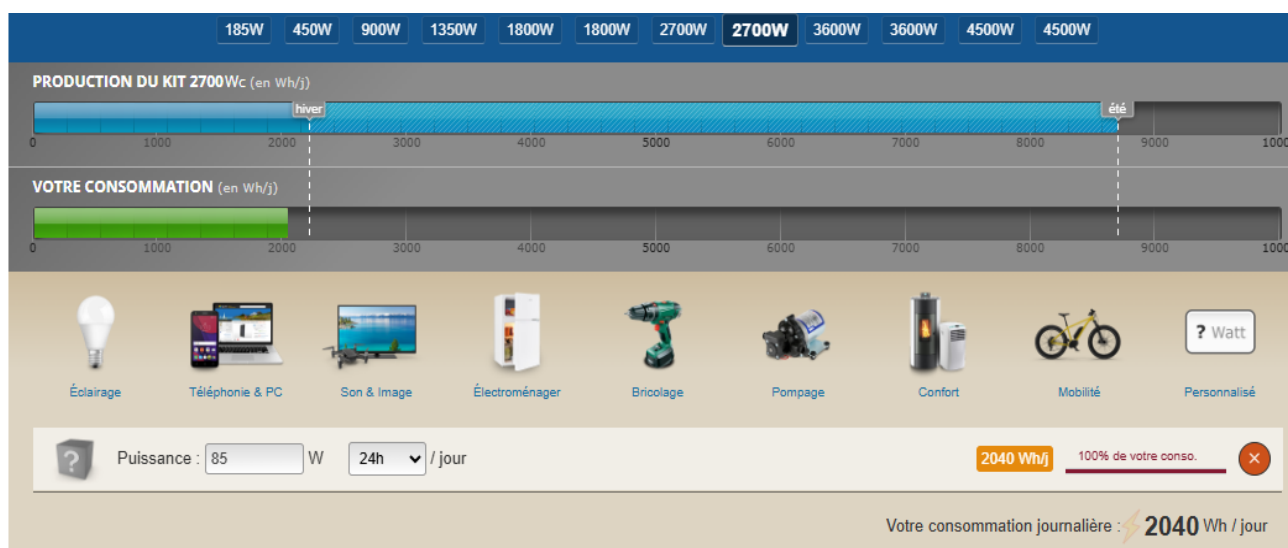


Figure 46 - Evaluation de l'installation nécessaire – sans caméra (site solaris-store.com)

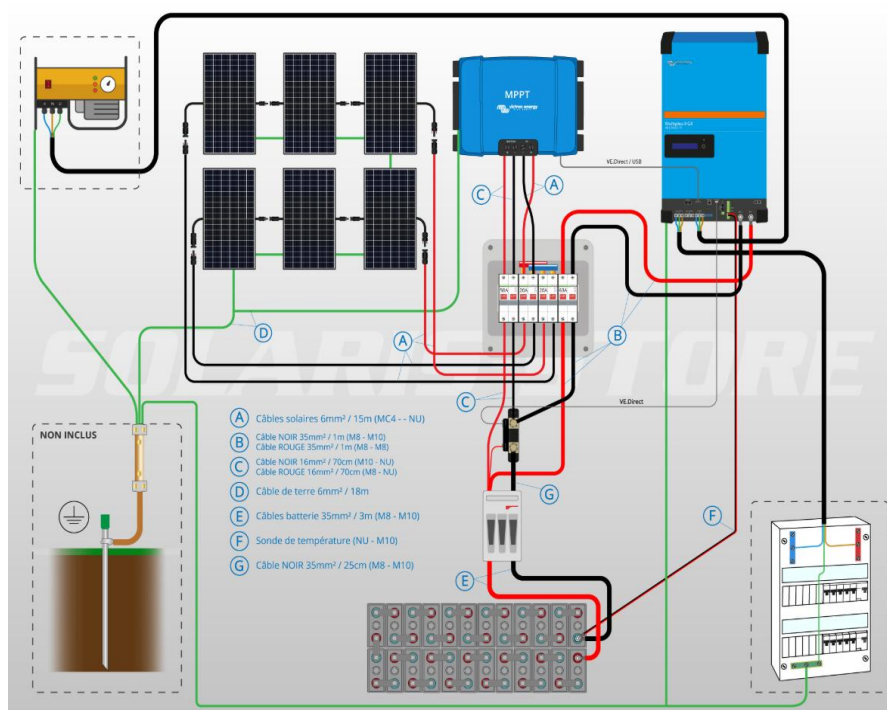


Figure 47 – Schéma électrique PV + batterie (site solaris-store.com)

Le montant total est estimé à 308k€ HT soit 32k€ de moins que la solution 3 (cf. tableau ci-dessous et annexe 6).

Cette solution, si elle est choisie demandera cependant un certain nombre de vérifications en phase PRO, en particulier :

- La puissance réelle fournie par l'installation électrique, en fonction de l'orientation réelle des panneaux (ici elle est supposée plein sud) et en tenant compte de la baisse de rendement des panneaux dans le temps.
- La tenue de la structure vis-à-vis des efforts générés par le poids des panneaux et par les effets du vent.

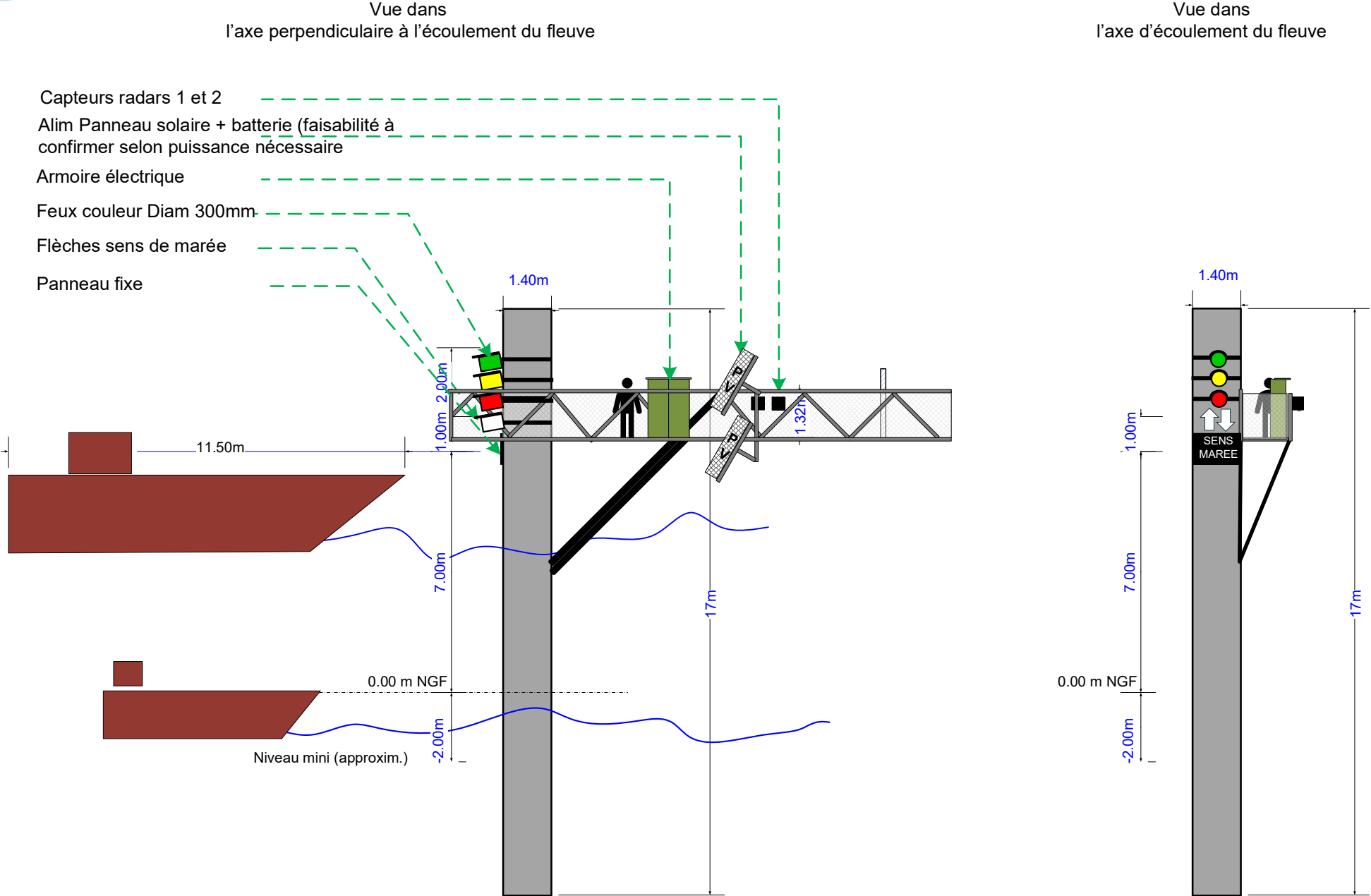
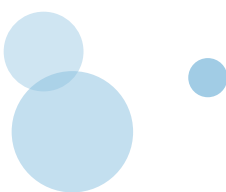


Figure 48 - Mise en œuvre de la solution 4 - cf. annexe 3 (nb de panneaux PV non représentatif)

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT
Bellevue	1	Alimentation depuis PV et batterie	PV + Batterie + Onduleur + Batterie	KIT 2700W	Simulateur Solaire solaris-store.com	unité	9 100.00 €	1	9 100.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Support mécanique panneaux fixés sur DA			unité	3 500.00 €	1	3 500.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Coffret d'intégration matériel		RITTAL CS	unité	2 819.00 €	1	2 819.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Plateforme Support du coffret	Plateforme + fixation sur Duc d'Albe		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Etude et installation			taux horaire	70.00 €	35	2 450.00 €
	Total 1								19 369.00 €
	2	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €
	Total 2								9 550.00 €
	3	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €
		Coffret mesure	PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	0	0.00 €
		Coffret mesure	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 3								4 180.00 €
	4	Affichage	Pas d'écran PMV			unité	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	pas de supports PMV			unité par m2	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Divers support			forfait par m2	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €
		Affichage	Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €
		Affichage	Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
	Total 4								3 500.00 €
	5	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €
		Capteurs	Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €
		Capteurs	Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 5								6 117.20 €
	6	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €
		Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Passerelle d'accès		unité	20 000.00 €	1	20 000.00 €
	Total 6								85 000.00 €
	7	Etude / Installation / Chantier sur site	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €
		Etude / Installation / Chantier sur site	Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €
	Total 7								9 175.00 €
Estacade	8	Alimentation depuis PV et batterie	PV + Batterie + Onduleur + Batterie	KIT 2700W	Simulateur Solaire solaris-store.com	unité	9 100.00 €	1	9 100.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Support mécanique panneaux fixés sur DA			unité	3 500.00 €	1	3 500.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Coffret d'intégration matériel		RITTAL CS	unité	2 819.00 €	1	2 819.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Plateforme Support du coffret	Plateforme + fixation sur Duc d'Albe		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Alimentation depuis PV et batterie	Etude et installation			taux horaire	70.00 €	35	2 450.00 €
	Total 8								19 369.00 €
	9	Coffret Elec et transmission	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €
	Total 9								9 550.00 €
	10	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €
		Coffret mesure	PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret mesure	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 10								5 180.00 €
	11	Affichage	Pas d'écran PMV			unité	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	pas de supports PMV			unité par m2	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Divers support			forfait par m2	0.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €
		Affichage	Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €
		Affichage	Caméra	Caméra avec détection mouvement	Bosch ou Axis ou équivalent	unité	2 500.00 €	0	0.00 €
		Affichage	Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
	Total 11								3 500.00 €
	12	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €
		Capteurs	Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €
		Capteurs	Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 12								6 117.20 €
	13	Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Duc d'Albe		unité	65 000.00 €	1	65 000.00 €
		Duc d'Albe et accès	Duc d'Albe	Passerelle d'accès		unité	30 000.00 €	1	30 000.00 €
	Total 13								95 000.00 €
	14	Etude / Installation / Chantier sur site	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €
		Etude / Installation / Chantier sur site	Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €
	Total 14								9 175.00 €
TBSL	15	Dév solution Internet	Développement Applicatif	Estimation des coûts de développement d'une interface Systèmes à définir		taux horaire	85.00 €	280	23 800.00 €
Total 15									23 800.00 €
Total général									308 582.40 €

Figure 49 – Coût estimatif de la solution 4 - cf. annexe 3

6.4. Solution 5 : feux et indicateur digital sur des infrastructures existants

Cette solution est développée pour éviter les coûts de mise en œuvre des ducs d'albes et des passerelles associées, à l'amont et à l'aval, qui représentent en effet une part de 35 à 50% du coût total.

En termes de fonctionnalités, la solution reprend l'architecture technique de la solution 3 (sauf les supports ducs d'Albes). Elle consiste :

- A diffuser l'information sur le sens des marées par des flèches lumineuses,
- A diffuser le temps restant estimé avant le passage à la couleur de feu suivante grâce à un PMV de taille réduite,
- A informer les navigants de l'autorisation ou non de passage grâce à un système de feux tricolore.

Elle utilise les infrastructures existantes comme supports des équipements:

- à l'amont : quai de déchargement,
- à l'aval : pont de Bellevue

Pour les deux sites, l'alimentation électrique sera fournie depuis le réseau Enedis basse tension, qui est accessible. La solution avec panneaux photovoltaïques n'est donc pas évaluée.

Cette solution constitue un compromis fonctionnel, dans la mesure où, à l'aval, les bateaux montants devront s'approcher relativement près du pont de Bellevue pour bien voir les informations qui leur sont fournies, ce qui pourrait limiter leur capacité à faire demi-tour. On pourra noter qu'à l'amont, la localisation du quai semble optimale.

Le montant total de cette solution est estimé à 176 k€ HT soit 135k€ de moins que la solution 4 et 165k€ de moins que la solution 3 (cf. tableau ci-dessous et annexe 6).

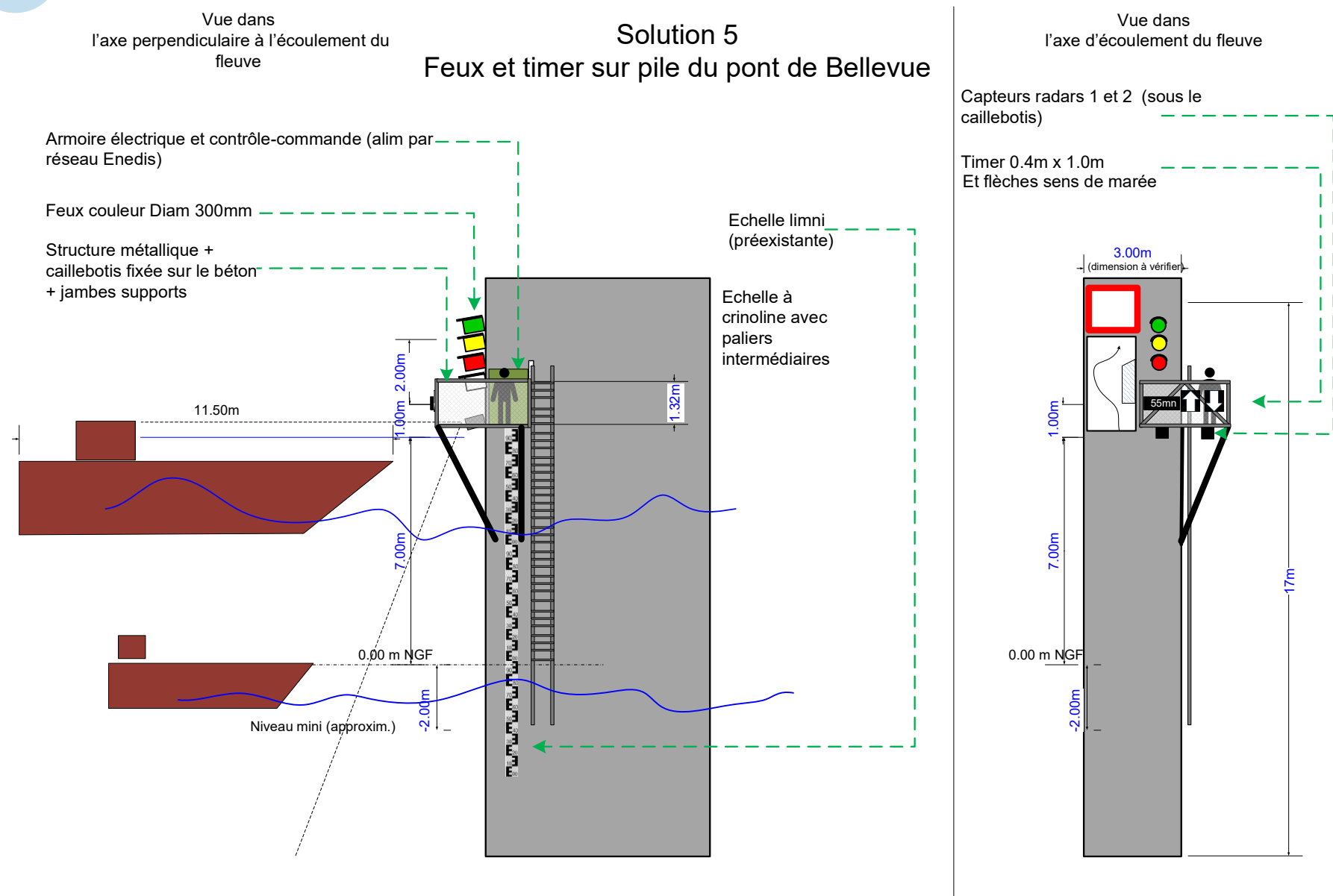


Figure 50 - Mise en œuvre de la solution 5 sur le pont de Bellevue à l'aval - cf. annexe 3

Solution 5
Feux et timer sur plateforme amont

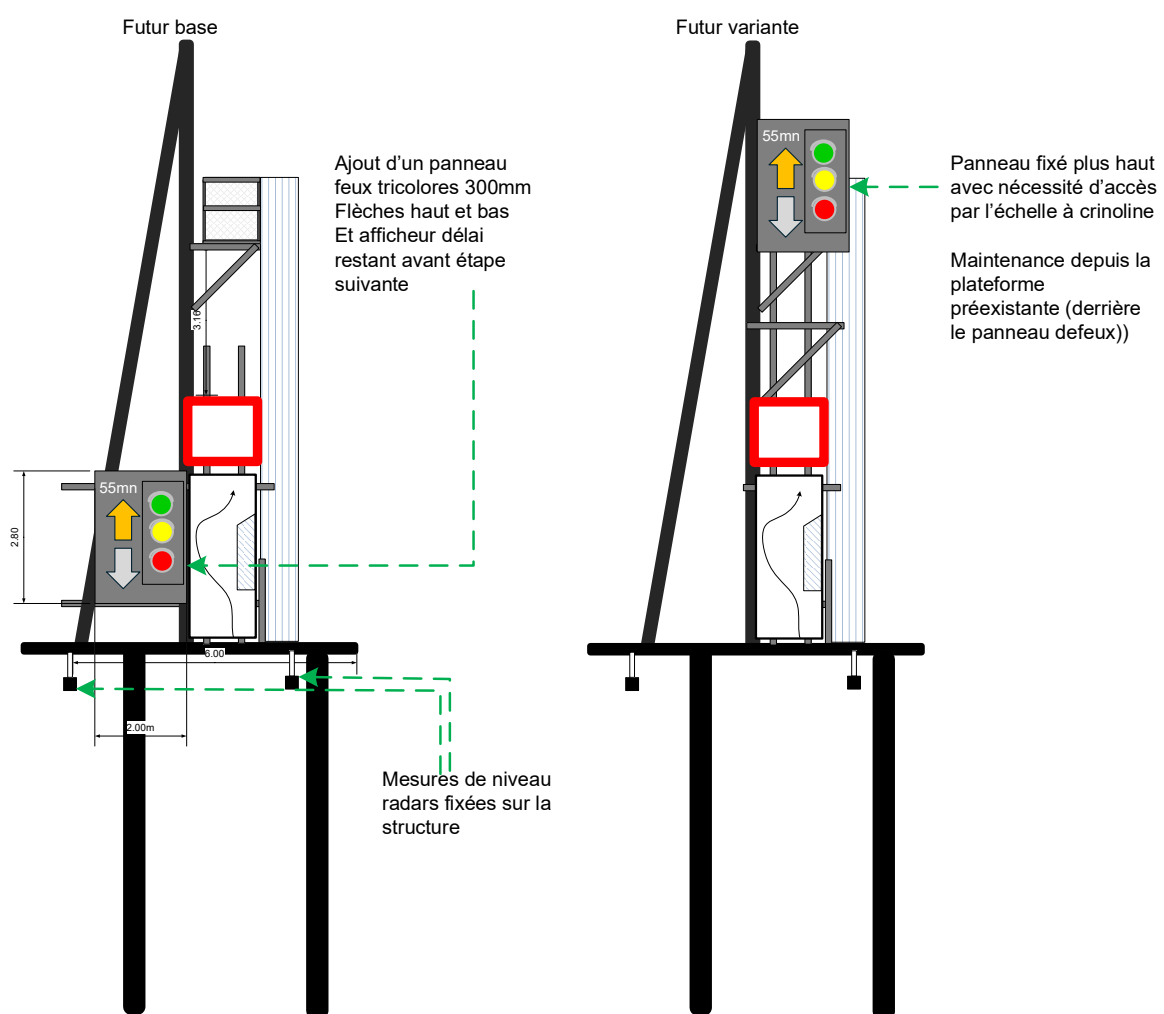


Figure 51 - Mise en œuvre de la solution 5 sur le quai à l'amont - cf. annexe 3

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT
Bellevue	1	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment	Enedis	forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €
		Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €
		Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	400	33 120.00 €
	Total 1								36 499.20 €
	2	Coffret Elec et	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €
	Total 2								9 550.00 €
	3	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €
		Coffret mesure	PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	0	0.00 €
		Coffret mesure	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 3								4 180.00 €
	4	Affichage	Ecran PMV pour timer		LED MASTER 1m x 0.35	unité	6 600.00 €	1	6 600.00 €
		Affichage	Support métallique écran PMV	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre antivandalisme	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	0.5	655.42 €
		Affichage	Divers support			forfait par m2	250.00 €	0.5	125.00 €
		Affichage	Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €
		Affichage	Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €
		Affichage	Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
	Total 4								10 880.42 €
	5	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €
		Capteurs	Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €
		Capteurs	Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 5								6 117.20 €
	6	Support	Fixation sur pile de pont	Plateforme d'accès		unité	10 000.00 €	1	10 000.00 €
	Total 6								10 000.00 €
	7	Etude /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €
		Etude /	Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €
	Total 7								9 175.00 €
Estacade	8	Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait de raccordment		forfait avec réfaction 40%	1 404.00 €	1	1 404.00 €
		Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Forfait Extension BT		forfait avec réfaction 40%	1 975.20 €	1	1 975.20 €
		Alimentation depuis Enedis	Coût Enedis	Coût variable BT		par m de liaison avec réfaction 40%	82.80 €	200	16 560.00 €
	Total 8								19 939.20 €
	9	Coffret Elec et	Alim	Disjoncteurs	SE	unité	100.00 €	5	500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Alim 230V/24Vcc 480W	MasterVolt Mass 24/25A	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Divers (filerie borniers, éclairage, ventil, prise courant)		unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Batteries Pbétanche		unité	300.00 €	2	600.00 €
		Coffret Elec et transmission	Alim	Enveloppe Coffret	SE PanelSet TM 1200x1200x400	unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Antenne radio	Antenne YAGI 869MHz	unité		2	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Emetteur / Récepteur	Paratronic	unité	950.00 €	1	950.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Support antenne		unité	700.00 €	1	700.00 €
		Coffret Elec et transmission	Com	Interface 4G	inclus dans Sofrel	unité		1	0.00 €
		Coffret Elec et transmission	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	40	2 800.00 €
	Total 9								9 550.00 €
	10	Coffret mesure	Centrale acquisition	Sofrel S4W	Sofrel	unité	2 500.00 €	1	2 500.00 €
		Coffret mesure	PC industriel interface- pour définir les images		Phoenix Contact BOX PC2430	unité	1 000.00 €	1	1 000.00 €
		Coffret mesure	Câblage	Coût d'étude, schéma, câblage		taux horaire	70.00 €	24	1 680.00 €
	Total 10								5 180.00 €
	11	Affichage	Ecran PMV pour timer		LED MASTER 1m x 0.35	unité	6 600.00 €	1	6 600.00 €
		Affichage	Support métallique écran PMV	50kg *3 € + soudage 1500 + Verre antivandalisme	SILATEC	unité par m2	1 310.83 €	0.5	655.42 €
		Affichage	Divers support			forfait par m2	250.00 €	0.5	125.00 €
		Affichage	Feux leds			unité	500.00 €	3	1 500.00 €
		Affichage	Flèches leds			unité	500.00 €	1	500.00 €
		Affichage	Divers support			unité	1 500.00 €	1	1 500.00 €
	Total 11								10 880.42 €
	12	Capteurs	Radar de niveau		VEGA VEGAPULS C21 20m IP68	unité	903.60 €	2	1 807.20 €
		Capteurs	Supports	Pièce métallique + travail en atelier		unité	885.00 €	2	1 770.00 €
		Capteurs	Casquette de protection	Boitier métallique + travail en atelier		unité	1 270.00 €	2	2 540.00 €
	Total 12								6 117.20 €
	13	Support	Fixation sur quai			unité	5 000.00 €	1	5 000.00 €
	Total 13								5 000.00 €
	14	Etude /	Installation	Etude		taux horaire	85.00 €	40	3 400.00 €
		Etude /	Installation	Chantier		taux horaire	55.00 €	105	5 775.00 €
	Total 14								9 175.00 €
TBSL	15	Dév solution Internet	Développement Applicatif	Estimation des coûts de développement d'une interface Systèmes à définir		taux horaire	85.00 €	280	23 800.00 €
Total 15									23 800.00 €
Total général									176 043.63 €

Figure 52 – Coût estimatif de la solution 5 - cf. annexe 3

6.5. Variante sur le support télécoms

Parmi les solutions techniques permettant de relier les deux sites, la radio et la 4G ont été présentées. Une solution par fibre optique est également envisagée. Son intérêt est essentiellement d'apporter une bonne qualité de communication entre les deux sites, avec une bande passante très grande, et une insensibilité aux perturbations atmosphériques (orage, pluie, vent, froid, etc.).

Le coût d'une telle solution est estimé à 75k€ HT soit un surcoût important par rapport à une solution radio ou 4G. L'évaluation tient compte de travaux qui peuvent être complexes en remontée de berges.

Variante: liaison fibre optique

Site	N° de prix	Description	Détail	Décomposition	Réf	Unité	PU HT	Quantité	Prix total HT
Estacade et Bellevue	Variante	Liaison fibre optique entre Estacade et Bellevue	Fibre lestée			ml	15.00 €	2500	37 500.00 €
			Pose fibre			ml	5.00 €	2500	12 500.00 €
			Remontée sur berges			ml	200.00 €	40	8 000.00 €
			Matériel divers (routeurs) + parefeux		unité	5 000.00 €	2	10 000.00 €	
			Etude et installation			taux horaire	70.00 €	105	7 350.00 €
Total Variante									75 350.00 €
Total général									75 350.00 €

Figure 53 - Estimation du coût de pose de fibre lestée entre les 2 sites

D'un point de vue technique, cette solution paraît difficile à mettre en œuvre, car elle oblige soit à poser la fibre en rive gauche ce qui conduit à traverser les apports de matériaux qui ont fait l'objet du chantier, soit à poser la fibre en rive droite dans la zone de navigation où les vitesses pourront être importantes ce qui risque d'endommager le câble.

Finalement, cette solution paraît coûteuse et relativement complexe à mettre en œuvre. A ce stade des études, il est proposé de ne pas la retenir.

6.6. Analyse des coûts et comparaison entre les solutions

Afin de comparer les cinq solutions, le graphique ci-dessous détaille les coûts de chacune décomposés par élément de fourniture et de travaux.

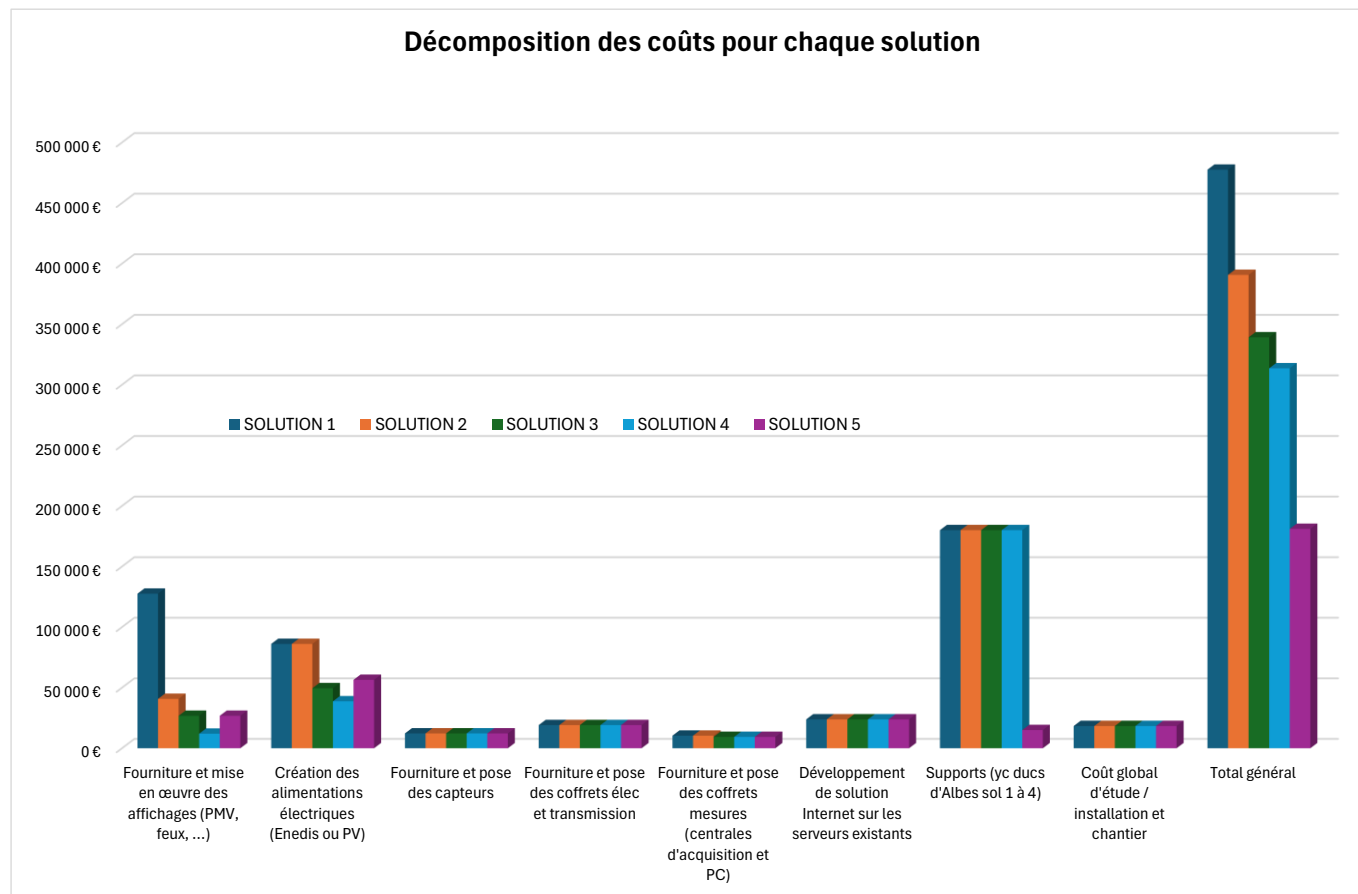


Figure 54 - Décomposition des coûts pour les cinq solutions

Le graphique fait apparaître que :

- Le premier poste de coûts des solutions 1 à 4 concerne la fourniture et mise en œuvre des ducs d'Albe et des passerelles d'accès associées. Ce coût représente 176k€ de façon indifférenciée pour toutes les solutions, soit 37% de la solution 1 et 57% de la solution 4.
- Le deuxième poste de coût le plus élevé est celui de l'affichage. La taille du panneau joue beaucoup sur ce poste, ce qui explique les écarts : 127k€ pour la solution 1 et 12k€ pour la solution 4 (cette dernière ne comprenant pas de PMV mais uniquement des indicateurs lumineux : feux et flèches).
- Le troisième poste de coût est lié au poste affichage. Il concerne l'alimentation électrique. Il varie entre 86k€ pour la solution 1 et 38k€ pour la solution 4. Des incertitudes vis-à-vis de la faisabilité et des coûts des solutions devront être levées en phase PRO.
- La solution 5 permet de réduire de façon importante le coût total du projet.

En complément de cette analyse, le tableau ci-dessous dresse une comparaison synthétique : qualité / coût des quatre solutions envisagées

Solution	Principe général	Avantages / Inconvénients techniques	Coûts
1	Feux + PMW grande taille 6,5m x 3m – support sur ducs d'Albes	Avantage : Taille adaptée au contexte, qualité des messages Inconvénient : forte conso électrique, supports et protections coûteux, onéreux en maintenance	477k€ HT
2	Feux + PMV taille moyenne 3m x 2m – support sur ducs d'Albes	Avantage : Qualité des messages, à condition de messages plus simples Inconvénient : forte conso électrique, supports et protections coûteux	390k€ HT
3	Feux + Timer + Flèches lumineuses – support sur ducs d'Albes	Avantage : Consommation plus raisonnable qui permet l'utilisation de panneaux – batteries. Coût de maintenance moins élevés que solution 1 ou solution 2 Inconvénient : message très simple, à voir s'il est bien compris	340k€ HT
4	Feux + Flèches lumineuses seules – support sur ducs d'Albes	Avantage : Consommation réduite, installation plus simple et maintenance peu coûteuse. Inconvénients : pas de message à compenser par un site internet	308k€ HT
5	Feux + Timer + Flèches en utilisant les infrastructures existantes comme support	Avantage et inconvénients de la solution 3 Avantage majeur : coût des supports réduit	176k€ HT

Au final, la solution 5 permet une installation moins coûteuse sur site qui doit être compensée par le développement d'une solution sur serveur distant accessible par internet.

A ce stade de l'étude des provisions pour aléas et risques divers de l'ordre de 20% doivent être ajoutées aux valeurs présentées ici.

7 Planning

Le planning proposé est le suivant :

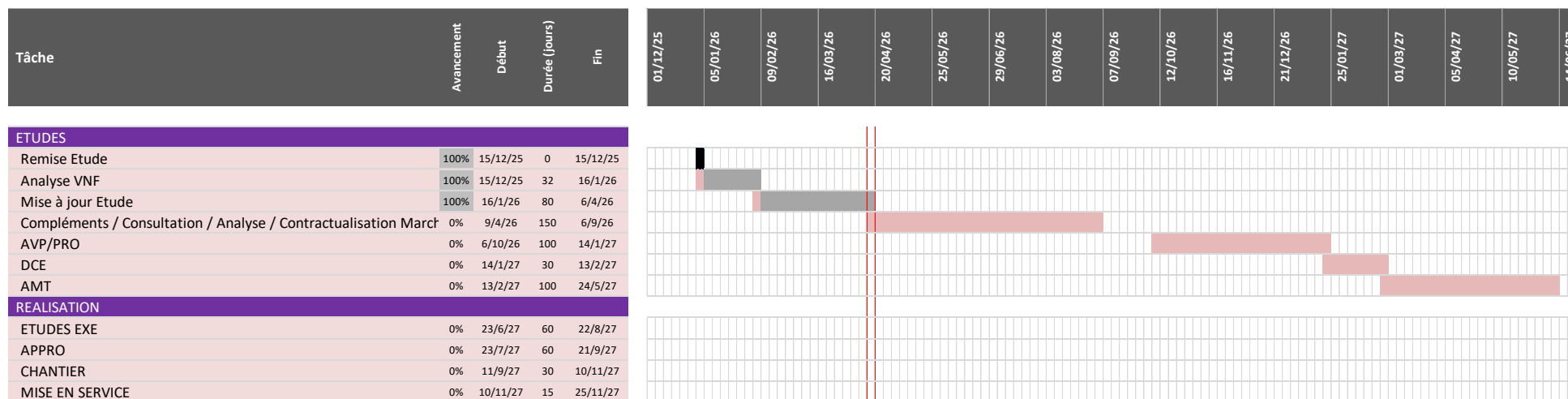


Figure 55 - Planning de la phase études et réalisation

Ce planning conduit à une mise en service à fin-2027. Le déroulement de la phase chantier devra être étudié plus en détail lors des prochaines phases du projet, en particulier l'allotissement et l'ordonnancement.

8 Points à traiter en phases suivantes

Lieux / Ouvrages	Point à traiter	Interlocuteurs
Les 2 sites	Alimentation électrique – Demande PRAC à Enedis si solution retenue pour devis complet	MOE
Les 2 sites	Dimensionnement PV à vérifier selon la possibilité d’orientation des panneaux, la place disponible sur les infrastructures, les efforts à reprendre par les structures	MOE
Les 2 sites	Etude détaillée des supports télécoms en fonction du choix ou des exigences de la MOA	MOA
Les 2 sites	Conventions pour installation des supports	MOE/ MOA

9 Annexes

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 1- Résultats hydrauliques

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 2- Affichage

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 3- Architecture Loire -V4

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 4- Consignes feux navigation

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 5- Test radio

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 6- Dimensionnement élec

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 7- Evaluation des coûts

DIMP-I_2025-0971-00_PMV_Annexe 8- Planning



Siège social

2 rue André Bonin
69316 LYON CEDEX 04
France
Tél. : +33 (0) 472 00 69 69

cnr.tm.fr

L'énergie au cœur des territoires

Toute copie de ce document est interdite