

## PORTE LEVANTE ADDITIONNELLE DE L'ECLUSE DE BOLLENE : CONCEPTION DU MECANISME DE MANOEUVRE ET INTERFACES AVEC L'EXISTANT

### *Additional lift gate of the Bollène lock: mechanical design and interfaces*

Damien BUARD, Benjamin BADIN  
CNR, 2 rue André Bonin 69316 LYON  
[d.buard@cnr.tm.fr](mailto:d.buard@cnr.tm.fr)

#### MOTS CLEFS

Suréquipement, Ecluse, Porte levante, Porte aval, Mécanisme de manœuvre, Treuil, Equilibrage

#### KEY WORDS

Over-equipment, Lock, Lift gate, Downstream gate, Operating mechanism, Winch, Balancing

#### RÉSUMÉ

*La Compagnie Nationale du Rhône exploite 19 barrages et 14 écluses sur le linéaire du Rhône. Dans le cadre des travaux associés au prolongement de sa concession, la CNR s'est notamment engagée à doubler la porte aval de l'écluse de Bollène (aménagement usine-écluse de Donzère-Mondragon). L'objectif principal de ce projet de suréquipement est de sécuriser la disponibilité à long terme de l'écluse par l'ajout d'une nouvelle porte à l'aval de celle existante, redondant ainsi cette fonction, tout en s'intégrant architecturalement dans le site dont la façade du bâtiment est classée au titre des monuments historiques.*

*La conception du mécanisme de manœuvre de ce nouvel équipement se révèle fortement contrainte, l'ouvrage existant n'ayant pas été prévu pour une telle extension. Position d'implantation de la porte et de ses mécanismes de manœuvre, position et hauteur des puits de contrepoids, puissance disponible, contraintes d'exploitation, contraintes de maintenance et exigences architecturales sont autant d'éléments influençant les décisions de conception.*

*L'objet de l'exposé est de réaliser un tour d'horizon des éléments techniques pris en compte à la conception des treuils de levage et des dispositifs d'équilibrage de cette future porte aval supplémentaire, ainsi que de présenter les impacts de son intégration dans l'aménagement.*

#### ABSTRACT

*Compagnie Nationale du Rhône operates 19 dams and 14 locks along the Rhône. As part of the projects associated with the extension of its concession, CNR has undertaken to double the downstream gate of the Bollène lock (Donzère-Mondragon lock-plant). The essence of this over-equipment project is to secure the long-term availability of the lock by adding a new gate downstream of the existing one, thereby redundantly performing this function, while at the same time integrating architecturally into the site, where the façade of the building is listed as a historic monument.*

*The design of the operating mechanism for this new equipment is highly constrained, as the existing structure was not designed for such an extension. The location of the door and its operating mechanisms, the position and height of the counterweight shafts, the available power, operating constraints, maintenance constraints and architectural requirements are all factors influencing design decisions.*

*The purpose of this presentation will be to provide an overview of the technical elements taken into account in the design of the hoists and balancing devices for this future additional downstream gate, as well as to present the impact of its integration into the existing lock.*

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Objectif et périmètre de la communication

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) a pour projet de doubler la porte aval de l'écluse de l'aménagement de Donzère-Mondragon, situé sur la commune de Bollène. L'enjeu est de disposer d'une nouvelle porte aval pour l'écluse, fiabilisant ainsi la navigation en cas de défaillance rendant la porte existante inopérante. La nouvelle porte sera, tout comme l'ancienne, du type levante au-dessus du chenal de navigation.

Le projet, en phase de consultation à l'heure où cet article a été écrit, comprend la fourniture et l'installation d'une porte aval et de sa motorisation, les modifications du génie civil et l'intégration dans l'automatisme de l'aménagement.

La complexité du projet réside en particulier dans le besoin d'implantation d'un équipement neuf dans un aménagement qui n'a pas été conçu à cette fin, tout en assurant sa continuité d'exploitation. La capacité structurelle des ouvrages de génie-civil existants, les encombrement disponibles en leur sein, le périmètre des démolitions réalisables, l'ancrage des nouvelles structures aux anciennes, les besoins d'ergonomie d'exploitation et de maintenance, la faisabilité de montage, le phasage de construction, la réalisation d'un chantier de construction pluriannuel sans impact délétère sur les besoins liés à l'exploitation du reste de l'aménagement, l'exigence de maintien constant du service de navigation sur le Rhône (engendrant de fait le passage de tiers dans le périmètre immédiat du chantier) et la maîtrise sans faille des durées des arrêts annuels de ce dernier sont autant d'éléments qu'il a fallu intégrer lors de la démarche de conception.

L'objet du présent article est de présenter en détail les contraintes externes qu'il a fallu prendre en compte et comment celles-ci ont guidé les choix de conception des mécanismes de manœuvre de la future porte aval. Ce choix de rédaction, par souci de concision, omet volontairement les détails de nombreuses autres problématiques du projet telles que l'optimisation de structure de vantellerie, la sécurité intrinsèque à la conception par considération des situations de rupture d'un élément de suspension, la maîtrise des nouveaux risques de coincement et chute d'embâcles sur les bateaux usagers, la protection contre les corps flottants, la protection contre l'incendie ou la prise en compte de la coactivité opérationnelle construction-navigation.

### 1.2. Caractéristiques de l'aménagement Usine-Ecluse de Bollène

Le sas de l'écluse de Bollène présente 195 m de long et 12 m de largeur utile. Avec ses 24 m de hauteur d'éclusage, cette écluse est la plus grande de France.

Côte amont normale de la retenue	59.00 mNGF
Côte aval normale de la retenue	35.00 mNGF
Côte du seuil de porte	29.00 mNGF

Figure 1 : Côtes altimétriques caractéristiques pour la porte aval de Bollène

La porte aval existante est de type levante en arc. Elle mesure 14.6 m de haut pour une masse totale de 152 tonnes et est équilibrée par 149 tonnes de contrepoids. La manœuvre est assurée par deux treuils à chaînes.

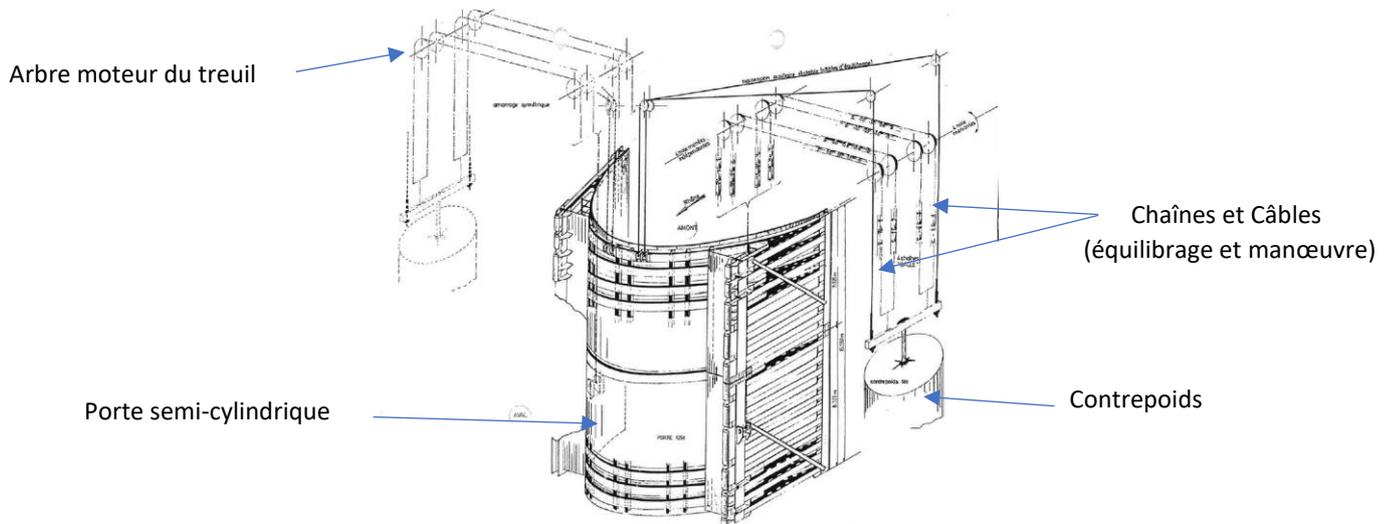


Figure 2: Représentation de la porte aval existante et de ses dispositifs d'équilibrage

Un dispositif de protection contre les chocs aval est présent à l'aval immédiat de la porte, sous la forme d'un pare-chocs busqué.

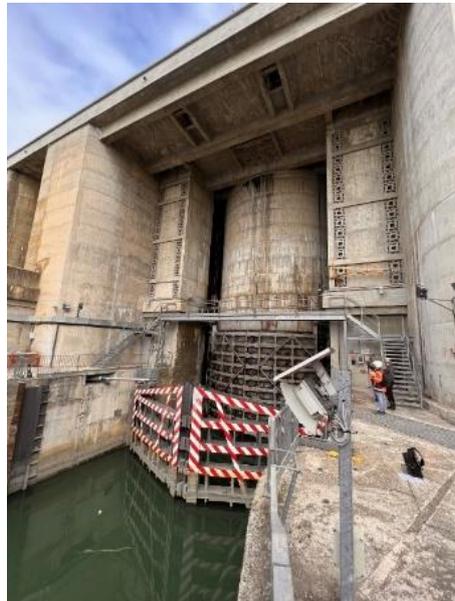


Figure 3: Vue de la porte aval fermée et de son pare-chocs busqué au premier plan

### 1.3.Descriptif succinct de la solution projet

La solution retenue est d'implanter une nouvelle porte de type plate levante 6 mètres à l'aval de la porte existante, en lieu et place de l'actuel pare-chocs aval busqué.

Une structure neuve génie-civil comportant un masque d'étanchéité de 16 mètres de hauteur sera créée et solidement ancrée à l'existant, dimensionnée pour reprendre les 6000 tonnes d'effort de poussée hydrostatique et assurer le guidage de la porte.

La position de la porte est imposée par la morphologie de l'ouvrage : son implantation doit être le plus proche possible de la porte existante pour limiter l'extension du sas, tout en permettant son montage sur site. La solution qui s'est rapidement imposée à la suite des études préliminaires a été d'implanter la porte au droit du pont mirador, à l'aval immédiat du bâtiment de tête aval.

Les puits de contrepoids sont aménagés sans démolition significative du génie-civil, deux trémies existantes (dont une accueillant précédemment un ascenseur) sont exploitées à cette fin.

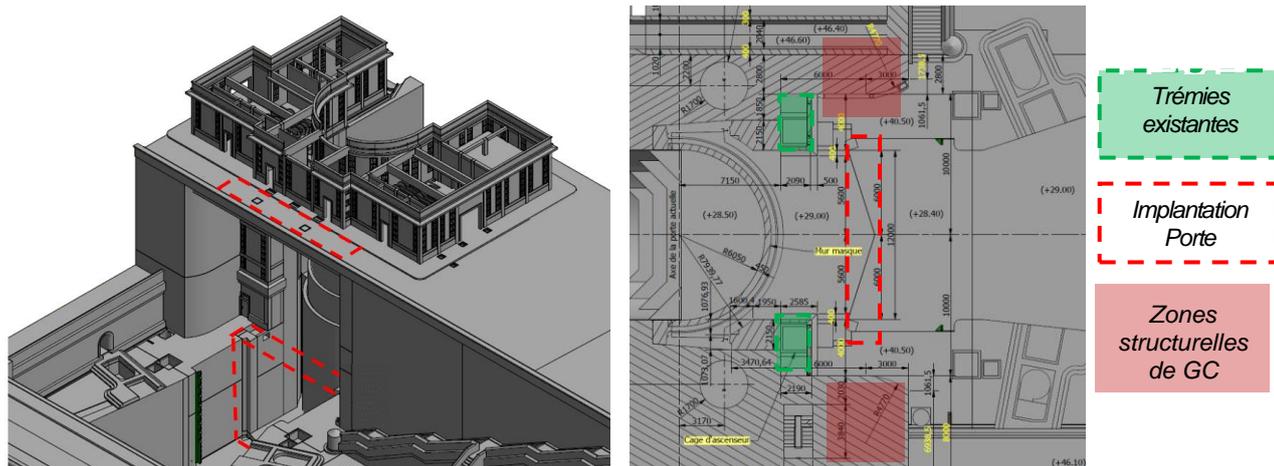


Figure 4 : Vue isométrique de l'aménagement existant et implantation de la future porte

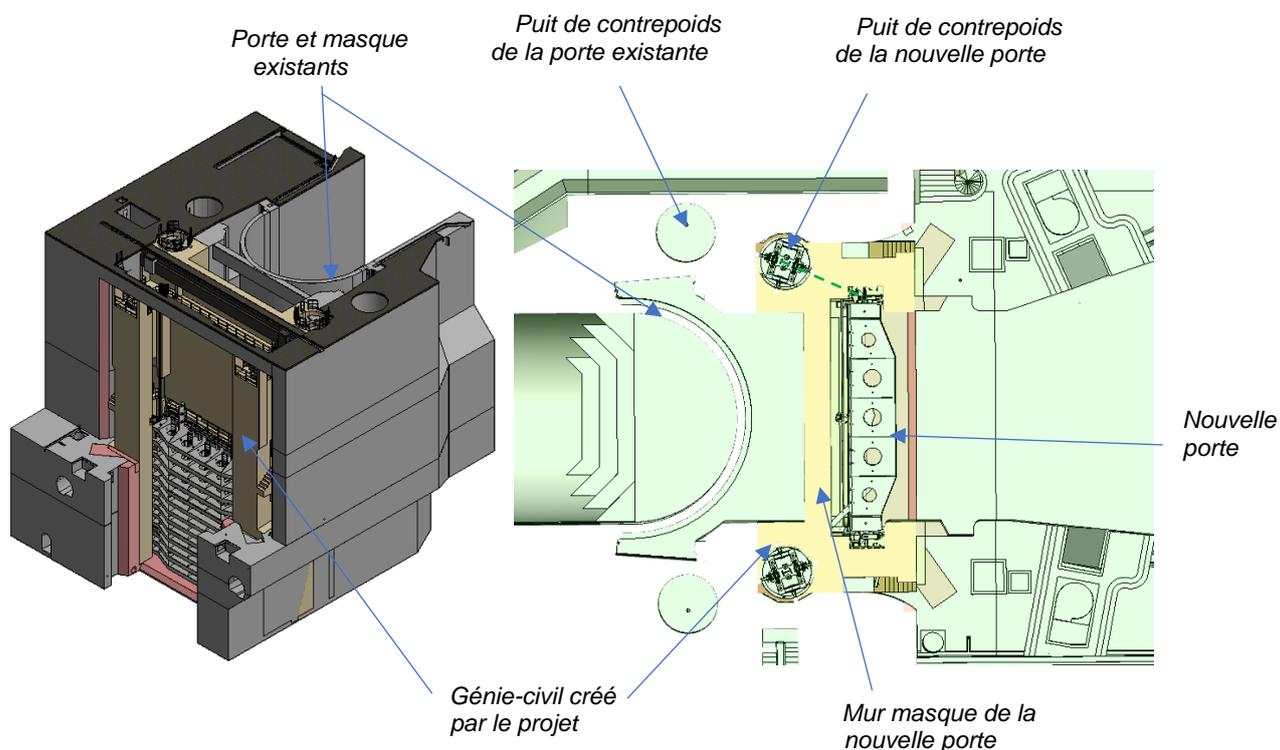


Figure 5: Vue projet - Isométrique et Vue coupe en plan  
(Le génie-civil créé par le projet est représenté de couleur beige)

## 2. BILAN DES CONTRAINTES TECHNIQUES EN JEU SUR L'AMENAGEMENT

Les contraintes principales imposées par l'implantation de la nouvelle porte sur l'aménagement maintenu en exploitation sont les suivantes :

- Le besoin de stabilité des ouvrages génie civil, nouveaux et existants.  
Les trois conséquences principales de cette contrainte sont :
  - la proximité d'implantation de la nouvelle porte relativement à la précédente,
  - l'imposition de la localisation d'implantation des puits de contreponds,
  - la **limitation de la profondeur** possible pour ces puits.
- La **limitation de puissance électrique** installée permettant d'alimenter les mécanismes de manœuvre de la nouvelle porte (maximum de 200kW de puissance disponible).

- Le **classement au patrimoine des monuments historiques de la façade de l'usine hydroélectrique de Bollène.**

Si la partie écluse n'est pas elle-même classée, elle se situe dans le périmètre d'influence du classement de l'usine : l'intégration architecturale de la nouvelle porte et mécanismes ne doit pas porter préjudice à l'harmonie de l'ensemble de l'édifice. Une des conséquences de cette contrainte est la **limitation de la hauteur d'implantation des mécanismes** et superstructures à la hauteur du bâtiment déjà existant.

A ceci s'ajoute une contrainte de Maîtrise d'Ouvrage définie pour la conception du nouvel équipement :

- Contrainte de **montage et maintenabilité de l'équipement hors du chenal navigable**, afin d'éviter autant que possible le recours aux interruptions de navigation pour réaliser ces opérations en exploitation courante.

### 3. CONCEPTION MECANIQUE DU MECANISME DE MANŒUVRE

#### 3.1. Choix du type de treuil

Le besoin de disposer d'un temps de manœuvre de porte de l'ordre de 2 minutes pour une porte dont la masse est estimée à plus de 200 tonnes conjugué à la limitation de la puissance électrique disponible rend envisageable toute solution de treuil à entraînement direct : seulement 200kW de puissance disponible pour un besoin de plus de 450kW dans cette configuration.

La puissance consommée étant directement proportionnelle à l'effort de manœuvre, cette limitation impose de rechercher une solution de treuil nécessitant un effort moteur le plus faible possible : la solution retenue est de concevoir un treuil de manœuvre complété de dispositions d'équilibrage de la porte aussi importantes que possible, à l'aide de contrepoids.

#### 3.2. Prise en compte des contraintes dans la démarche de conception du mécanisme de manœuvre

##### 3.2.1. Puissance électrique disponible

L'effort moteur de manœuvre est maximal lors des phases d'ouverture. Les facteurs principaux facteurs d'influence sont les suivants :

- La différence entre la masse de la structure de la porte et celle de ses contrepoids (majorée par les pertes de rendement du dispositif d'équilibrage),
- La masse des éléments de suspension et de manœuvre (câbles et chaînes),
- Les frottements résistants aux joints et aux galets de roulement (eux même impactés par l'exposition aux vents de la porte),
- La **masse d'eau embarquée** dans la porte lors de la manœuvre.

Ce dernier point n'est pas à négliger : compte tenu de la vitesse de manœuvre de la porte en ouverture de l'ordre de 0,12m/s, faute de précaution prise dans la conception des trous d'évacuation, cette masse parasite peut aisément atteindre plus de 15 tonnes.

Les caractéristiques du mécanisme de manœuvre de la porte aval existante, détaillés ci-après, illustrent cet effet.

Porte aval existante – Caractéristiques du mécanisme de manœuvre	
Masse porte	152 tonnes
Masse contrepoids	149.5 tonnes
Masse d'eau embarquée en manœuvre (max)	9.5 tonnes
<b>Effort de manœuvre du treuil (max)</b>	<b>17 tonnes</b>
Puissance moteur installé	50 kW

Figure 6: Porte aval existante - Caractéristiques du mécanisme de manœuvre

La maximalisation des surfaces d'écoulement d'eau a donc été une des données d'entrée pour la conception de la structure de la nouvelle porte.

### 3.2.2. Position des puits de contrepoids

Une disposition classique pour les mécanismes de levage des porte levantes de la CNR est d'installer les contrepoids dans le même plan que la porte, permettant ainsi de les relier aux chaînes de manœuvre des treuils. Ceci permet de générer un équilibrage complet (masse porte  $\approx$  masse contrepoids) minimisant l'effort de manœuvre tout en garantissant une prépondérance à la descente de la porte suffisante lors des manœuvres de fermeture : dans ce cas, le treuil tend à soulever les contrepoids, annulant de fait tout effet d'équilibrage. On peut observer que le mécanisme de manœuvre de la porte aval actuelle de l'écluse de Bollène, réalisé suivant cette conception, est extrêmement sobre du point de vue énergétique (effort de manœuvre maximum de 17 tonnes, soit équivalent à 11% de la masse de la porte).

Pour notre projet de suréquipement, la contrainte d'implantation des puits des contrepoids en amont du pertuis de la porte a engendré de fortes contraintes géométriques du fait du décalage en amont des éléments de suspension d'équilibrage vis-à-vis du plan de la porte. On peut voir sur la figure suivante que la position de ces puits crée une fermeture angulaire des câbles, réduisant à 145 mm l'écart entre chacun des câbles d'équilibrage.

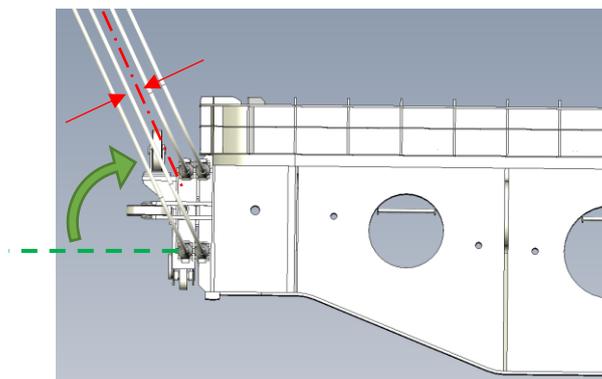


Figure 7: Fermeture angulaire des câbles vis-à-vis de la porte

Outre les difficultés de conception que ceci a engendré sur le portique des poulies d'équilibrage, la conséquence directe pour le treuil est l'impossibilité d'implanter une chaîne de manœuvre suivant le même cheminement que la nappe de câbles. Sans liaison à la chaîne de treuil, les contrepoids seront donc liés à la porte uniquement par les câbles d'équilibrage.

Le choix a finalement été fait de positionner la chaîne perpendiculairement au pertuis de la porte, tel qu'usuellement, afin de ne pas s'exposer à des risques d'usures prématurées de la chaîne ou de son attache sur la porte sous l'effet de débattements parasites non maîtrisés.

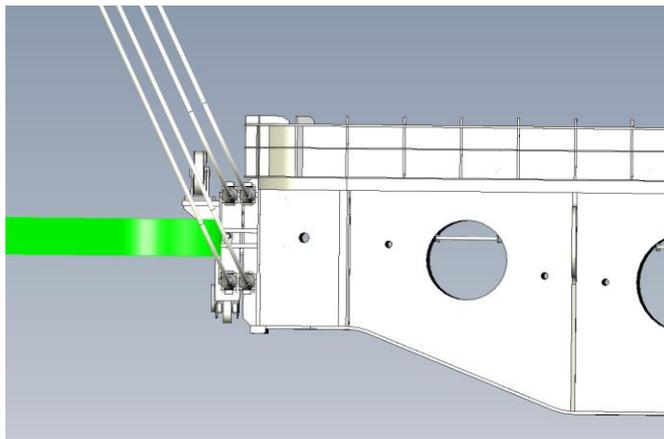


Figure 8: Position angulaire des câbles et symbolisation chaîne de manœuvre (en vert)

Le maintien d'un équilibre quasi complet aurait toutefois pu être atteint grâce à la mise en œuvre de contrepoids secondaires en bouts de chaînes de manœuvre, tout en assurant la prépondérance de fermeture de la porte (les treuils soulevant ces contrepoids secondaires en manœuvre de fermeture). Malheureusement, la nécessité de reprise des efforts de poussée hydrostatique par le génie-civil et le besoin de maintien de passage de cheminement pour les personnels exploitant ne permettent pas les déroctages nécessaires à l'implantation de tels dispositifs.

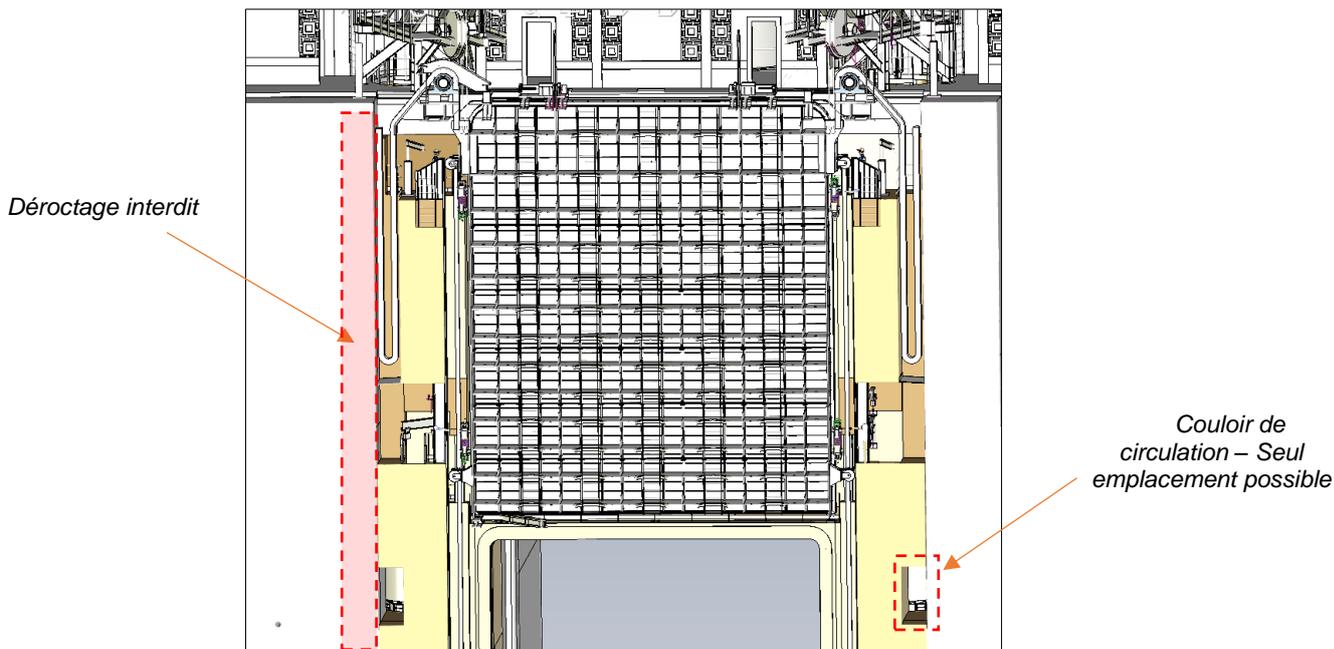


Figure 9: Treuils de manœuvre projet - coupe vue d'aval

Seul un équilibre partiel de la porte reste donc envisageable, la prépondérance à la fermeture de la porte (poids résiduel de celle-ci une fois tous les efforts externes retranchés) devant être suffisante à tout instant.

Cette prépondérance dépend essentiellement du déséquilibre de masse entre porte et contrepoids. Sécuriser la capacité à la descente de la porte implique de maximiser la masse de celle-ci vis-à-vis de celle de ses contrepoids, ceci au coût d'une augmentation proportionnelle de l'effort de manœuvre du treuil lors des phases d'ouverture.

Les pertes dues aux rendements des mécanismes d'équilibrage (guidage des poulies et enroulement des câbles dans les gorges de celles-ci) accentuent encore le besoin de déséquilibre de masses et jouent deux fois en notre défaveur :

- **A la fermeture**, ces pertes engendrent un besoin de travail supplémentaire pour lever les contrepoids : la porte est d'avantage retenue. Pour un besoin de prépondérance défini, les contrepoids doivent être plus légers en pratique que d'après un calcul théorique mené sans prise en compte des pertes de rendement.
- **A l'ouverture**, le travail dissipé par les poulies se retranche au travail fourni par les contrepoids. La porte « voit » cette fois des contrepoids virtuellement plus légers qu'en réalité : leur participation à la manœuvre est minorée à cause des pertes de rendement, pertes engendrant un supplément d'effort à développer par le treuil. Cet effort supplémentaire est transmis par les chaînes de manœuvres, il entre donc également en compte dans leur dimensionnement.

Afin de limiter la consommation électrique des mécanismes de treuil, un objectif de recherche de l'écart de masses au « juste nécessaire » doit donc impérativement être poursuivi lors du dimensionnement.

La prise en compte de l'ensemble de ces éléments a abouti aux résultats d'études suivants pour notre projet :

Porte aval projet – Caractéristiques du mécanisme de manœuvre	
Masse porte projet	205 tonnes
<b>Prépondérance voulue</b>	<b>22.5 tonnes</b>
<i>(dont prise en compte poussée Archimède)</i>	<i>(15 tonnes)</i>
Masse contrepoids	163 tonnes
<b>Effort de manœuvre du treuil (max)</b>	<b>90 tonnes</b>
Puissance moteur installé	160 kW

Figure 10: Porte aval projet - Caractéristiques du mécanisme de manœuvre

On peut noter que l'effort de manœuvre maximum du treuil projet est équivalent à 44% de la masse du vantail de porte, soit une performance nettement inférieure à celle des mécanismes de la porte existante. L'absence de liaison chaînes de manœuvre-contrepois est extrêmement pénalisante sur ce point.

### 3.2.3. Hauteur des puits de contrepoids

Les implantations des puits de contrepoids étant définies, leurs côtes basses minimales ont également été imposées par les contraintes de génie civil : des puits trop profonds engendreraient des instabilités des structures par manque de béton dans les zones de dissipation de charges de poussée hydrostatique de l'actuelle porte aval.

L'enjeu est donc de parvenir à réaliser l'équilibrage de la porte avec une paire de contrepoids combinant simultanément des caractéristiques :

- De masse suffisante pour réaliser l'équilibrage attendu,
- De course utile suffisante pour permettre les 15,6 mètres de manœuvre nécessaires.

Afin de limiter l'impact sur le visuel et la structure de l'aménagement, l'avant-projet sommaire prévoyait initialement l'installation des treuils à une altimétrie relativement basse, sous le pont mirador présent actuellement. Si l'objectif recherché était atteint, cette solution avait les inconvénients de limiter fortement :

- La course utile disponible pour les contrepoids, imposant une solution technique de mouflage des contrepoids,

- L'encombrement disponible pour l'installation de l'ensemble des mécanismes de treuil et d'équilibrage, rendant ainsi extrêmement exigües les conditions d'accès pour montage et entretien.

Ce choix de conception a été remis en question lors d'une réévaluation des enjeux en cours de projet : il a été décidé d'implanter les treuils au plus haut possible, i.e. au niveau du pont mirador. Les conséquences de cette décision ont été de devoir réaliser d'importants travaux de génie civil supplémentaires pour :

- Reconstituer la possibilité de circulation routière à l'aval du mirador (construction d'une passerelle en béton accrochée au bâtiment, existant dans le respect des contraintes architecturales du site),
- Permettre le montage vertical des portiques d'équilibrage (modification du bâtiment aval pour créer des trémies de montage).

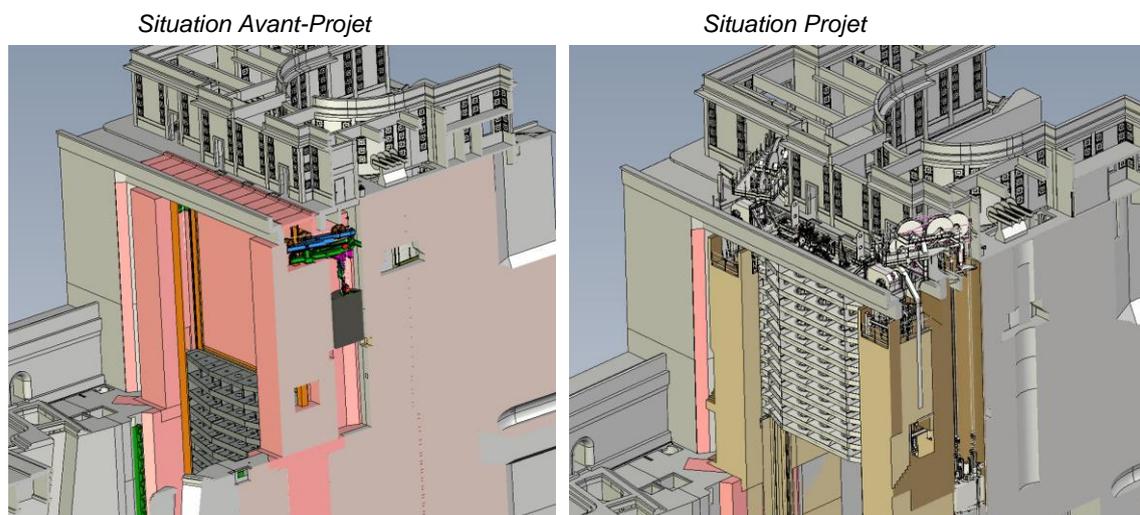


Figure 11: Evolution des encombrements et implantations des mécanismes en cours d'étude

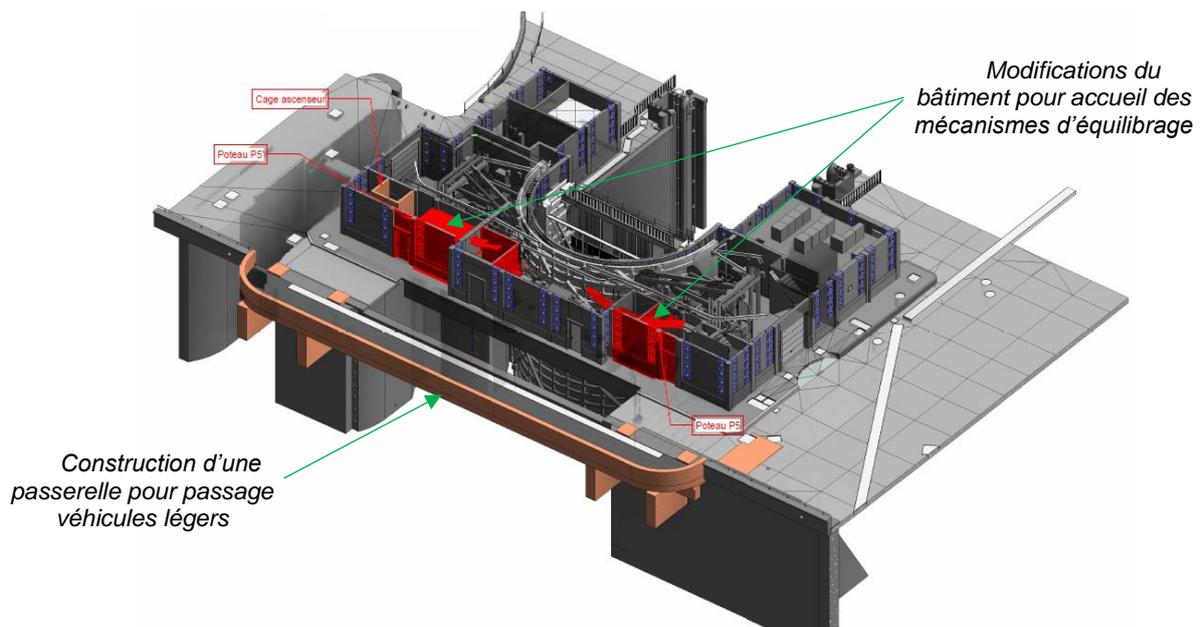


Figure 12: Impact génie civil pour l'intégration des mécanismes projet

Malgré cette avancée, la hauteur disponible pour les puits de contrepoids était de l'ordre de 20.5 mètres pour une course utile attendue (course de porte) de 15.5 mètres. En retranchant à ceci l'encombrement nécessaire pour la mise en œuvre des équipements de butonnage des contrepoids (pour reprise en poids pour les opérations de montage et de maintenance), la hauteur physique d'encombrement disponible pour construire le contrepoids est restée fortement contrainte.

Afin de parvenir à la conception d'une solution technique opérationnelle, les deux axes de travail suivants ont été exploités au maximum du raisonnablement possible :

- **Minimiser la masse de la porte** (afin de minimiser la masse, donc le volume, de contrepoids nécessaire). Une étude d'optimisation de structure a donc été réalisée pour la porte, en intégrant la contrainte de facilité d'évacuation d'eau embarquée.
- **Densifier le contrepoids** pour une masse donnée : les contrepoids seront entièrement en acier (plutôt qu'en structure mixte acier et béton : l'impact coûts n'est pas négligeable).

#### 3.2.4. Construction et Maintenabilité hors du chenal navigable

Afin de permettre la réalisation des opérations de montage initial et des interventions de maintenance avec continuité de la navigation, le choix a été fait de pouvoir réaliser la majorité de celles-ci avec la porte en position haute. Pour cela, il est notamment indispensable de pouvoir décharger les câbles d'équilibrage en cette position : des dispositifs de reprise en charge par butonnage de la porte et des contrepoids sont donc nécessaires.

Nous avons abordé précédemment que la contrainte de maintien de la stabilité des structures génie-civil existantes limite la profondeur totale des puits de contrepoids ainsi que leurs diamètres. Ceci impacte également les encombrements résiduels disponibles pour l'implantation des accès physiques aux parties supérieures des contrepoids et aux dispositifs de butonnage inférieurs. La définition de ceux-ci a dû être réalisée de concert avec celles des dispositions de génie-civil afin de :

- **Adapter les implantations de tirants d'ancrage** pour permettre un minimum de passage physique vers la partie supérieure des contrepoids (dispositions de stabilité internes au génie-civil).
- **Valider finement la profondeur maximale fonctionnellement possible pour le puit** du contrepoids : une réserve suffisante est à prévoir sous le contrepoids afin de permettre la mise en place des vérins et cales de reprise en charge des contrepoids, en tenant compte de l'allongement en service des câbles.

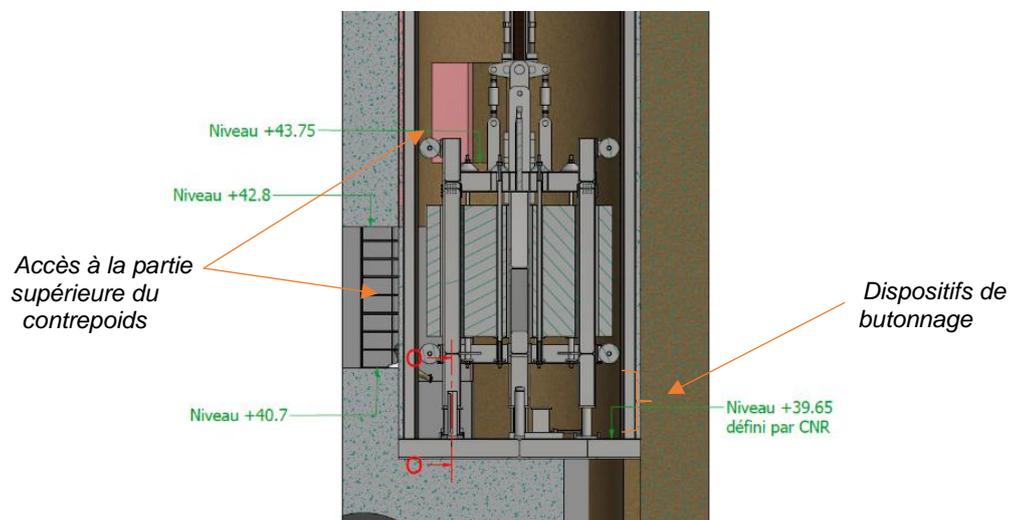


Figure 13: Vue en coupe d'un contrepoids

Afin de ne pas exposer les intervenants à un risque d'accès sous le contrepoids suspendu, les dispositifs de butonnage sont installés à demeure en fond de fosse et manœuvrables au moyen de commandes déportées.

L'accès pour maintenance ou mise au point de ces mécanismes de butonnage est quant à lui réalisable via un dispositif de verrouillage mécanique des contrepoids en position haute (situation nécessitant de condamner la porte en position fermée).

Il est à noter que ces éléments de détail de conception sont fortement contraints compte tenu des enjeux structurels du génie-civil et sont définis relativement tardivement dans la démarche d'étude.

#### **4. CONCLUSION**

L'opération de suréquipement portée par ce projet est inédite en son genre et ne comporte pas de référence équivalente identifiée à ce jour. Les études d'un tel projet nécessitent un grand soin dès l'avant-projet, la complexité de celles-ci étant nettement supérieure à celle d'un projet de construction neuve. Les problématiques techniques et organisationnelles d'importance majeure sont nombreuses, le présent article n'illustre qu'une partie de celles-ci.

La transversalité des contraintes entre les métiers génie-civil, mécanique et contrôle-commande, ainsi que l'interdépendance des choix de conception obligent à la conduite de ces études par itération et en grande concertation. Le besoin de précision nécessaire à la validation des faisabilités peut aller jusqu'à un ordre de grandeur de quelques centimètres.

L'évaluation des contraintes techniques guidant les choix de conception doit être faite au début des études et mise à jour entre les diverses itérations de celles-ci. Le travail conjoint entre corps de métier et la capacité à ré-évaluer les enjeux en cours de projet a permis d'aboutir à un projet de solution de mécanisme de manœuvre viable et présentant un niveau de performances conforme aux attentes de la Maitrise d'Ouvrage.

#### **REMERCIEMENTS**

Remerciements à l'ensemble de l'équipe de conception de la Direction de l'Ingénierie et Grands Projets de la CNR, à SETEC ISM (Amaury Rase-Pourchon) pour la conduite des études projet pour la conception du vantail et des mécanismes des organes de manœuvre, à BRL Ingénierie (Philippe Schalkwijk) pour celle des études génie-civil.