

# CHOIX DE L'ARCHITECTURE D'UN APPAREIL DE LEVAGE BASÉ SUR UNE APPROCHE MULTI-CRITÈRES

## DESIGN CHOICE OF A LIFTING DEVICE BASED ON A MULTI-CRITERIA APPROACH

LAPEYRE Ghislaine

*TechnicAtome*

Aix-en-Provence

[ghislaine.lapeyre@technicatome.com](mailto:ghislaine.lapeyre@technicatome.com)

METADIER Florent

*REEL*

Saint-Cyr-au-Mont-d'Or

[fmetadier@reel.fr](mailto:fmetadier@reel.fr)

LEOTARDI Guy

*TechnicAtome*

Aix-en-Provence

[guy.leotardi@technicatome.com](mailto:guy.leotardi@technicatome.com)

### I. RÉSUMÉS

**Résumé** — La maîtrise des risques de manutention est une préoccupation majeure dans l'industrie nucléaire; d'autant plus depuis la chute d'un générateur de vapeur en cours de manutention sur le site de Paluel en 2016. Dans ce contexte, la sécurisation des chaînes des appareils de levage est devenue une nécessité pour garantir l'intégrité de la charge manutentionnée. En conséquence, la recherche d'architectures basées sur une approche multi-critères a pour objectif d'obtenir les niveaux de fiabilité les plus élevés sans pénaliser l'exploitabilité de ces appareils de levage. La conception des appareils de levage basée sur cette approche multi-critère est devenue une spécialité de nos sociétés TechnicAtome et le groupe REEL. La méthodologie a consisté à définir tout d'abord les critères à retenir dans cette étude et de les évaluer par rapport à une architecture de référence soit par une approche quantitative soit par une approche qualitative. L'ensemble des évaluations a été synthétisé dans un tableau permettant de voir la cotation de chaque critère pour chaque architecture étudiée en relatif à une architecture de référence. L'analyse des résultats a ensuite permis d'identifier la complémentarité de certains critères et de dégager les critères prépondérants dans le choix d'une architecture. Au final, cette démarche a abouti à des préconisations d'architectures en fonction du niveau de fiabilité recherché et des critères les plus impactant. Cette approche peut être poursuivie en intégrant de nouveaux critères, voire de nouvelles architectures.

**Mots-clefs** — *Manutention, Levage, Fiabilité, Architecture, Multi-critères*

**Abstract** — Mastering the reliability of managing handling risks is a major concern in the nuclear industry, especially since an event occurred at the Paluel site in 2016: the fall of a steam generator during handling. In this context, securing the equipment lifting chains has become a crucial constant to ensure the integrity of the handled load. Consequently, the search for architectures based on a multi-criteria approach has become a specialty of our companies TechnicAtome and REEL group. The methodology consisted of firstly defining the criteria to keep in this study and evaluating them in relation to a reference architecture either by a quantitative approach or by a qualitative approach. All of the evaluations have been summarized in a table allowing you to see the rating of each criterion for each architecture studied. Then the results' analysis made it possible to identify the complementarity of certain criteria and to identify the predominant criteria in the choice of an architecture. Ultimately, this approach resulted in architectural recommendations based on the level of reliability sought and the most impactful criteria. This approach can be continued by integrating new criteria, or even new architectures.

**Keywords** — *Handling, Hoisting, Reliability, Architecture, Multi-criteria analysis*

28 Les appareils de levage ont un rôle majeur dans la maîtrise du risque nucléaire. Par exemple, la réalisation d'opérations de  
 29 chargement/déchargement du combustible est une activité récurrente dans l'industrie nucléaire civile et militaire. La perte  
 30 d'intégrité du combustible (ou de manière plus générale, la charge manutentionnée) résultant d'un événement (chute, choc,  
 31 sectionnement d'élément combustible) causé par une défaillance intrinsèque au système, peut entraîner un accident nucléaire  
 32 avec des conséquences radiologiques graves pour les personnes et l'environnement. La maîtrise de la fiabilité des appareils de  
 33 levage est donc une préoccupation majeure dans l'industrie nucléaire; d'autant plus depuis la chute d'un générateur de vapeur  
 34 en cours de manutention sur le site de Paluel en 2016.

35 Dans ce contexte, la sécurisation des chaînes de levage est devenue une nécessité pour garantir l'intégrité de la charge  
 36 manutentionnée. Le principal objectif est donc de concevoir des systèmes fiables, maintenables, disponibles, sûrs et respectant  
 37 les exigences requises. En conséquence, la recherche d'architectures basées sur une approche multi-critères a pour avantage  
 38 d'obtenir les niveaux de fiabilité adaptés au juste besoin (notamment vis-à-vis du risque de chute de charge) afin de conserver  
 39 l'exploitabilité de ces appareils (disponibilité, complexité du contrôle commande, maintenance, ...) et de s'adapter aux  
 40 contraintes de chaque client (approche basse, affalage, ...). La conception d'appareils de levage basée sur cette approche multi-  
 41 critère est devenue une spécialité de nos sociétés TechnicAtome et le groupe REEL.

42 Cette communication est axée uniquement sur les dispositions techniques mises en place sur les appareils de levage permettant  
 43 de garantir les exigences requises. De fait, le facteur humain et organisationnel n'est pas abordé dans cette étude. Il est considéré  
 44 que l'organisation des équipes d'intervention est en adéquation avec les recommandations du concepteur et que les opérateurs  
 45 sont formés au pilotage des appareils de levage et aux risques associés. Enfin, le périmètre d'utilisation de cette approche est  
 46 plus large que l'industrie nucléaire uniquement. En effet, elle est généralisable à toutes les industries ayant un besoin fort de  
 47 maîtriser les risques liés aux opérations de levage.

48 Ce document s'articule autour des points suivants :

- 49 • l'état de l'art dans la conception des appareils de levage (cf. §III),
- 50 • la définition et la description d'un appareil de levage (cf. §IV),
- 51 • une présentation de l'approche multi-critère : démarche, architectures étudiées (mécanique et contrôle-commande),
- 52 critères, approche qualitative / quantitative (cf. §V),
- 53 • une analyse des résultats et les principaux enseignements qui résultent de la mise en œuvre de cette approche (cf. §VI),
- 54 • la conclusion de cette analyse et les perspectives envisagées (cf. §VII).

### 55 III. ETAT DE L'ART DANS LA CONCEPTION DES APPAREILS DE LEVAGE

56 Aujourd'hui, notre savoir-faire en matière d'appareils de levage s'est construit dans le temps avec la succession des conceptions.  
 57 Les nouveaux besoins ou le durcissement des contraintes des donneurs d'ordre, imposent aux concepteurs une perpétuelle  
 58 évolution des architectures dans le but de les améliorer et d'atteindre le niveau exigé. Ces évolutions donnent lieu à des  
 59 innovations en terme de mécanismes de levage ou de détection avec l'avancée des technologies. Ce savoir-faire est donc ancré  
 60 dans chaque société à travers son expérience, ses collaborateurs, ses processus internes et ses formations. La conception des  
 61 appareils de levage est régie par l'application du référentiel réglementaire (en supplément des spécifications du donneur d'ordre)  
 62 suivant :

- 63 • application de la Directive Machine 2006/42/CE pour une machine neuve (ou considérée neuve) et ses accessoires de  
 64 levage avec une utilisation dans l'Union Européenne et pour obtenir la certification CE,
- 65 • application des règles pour le calcul des appareils de levage (EN13001 ou Fédération Européenne de la Manutention),
- 66 • application des règles d'exécution et de contrôle des assemblages soudés dans les appareils de levage et de manutention  
 67 (NF E52-109),
- 68 • application de normes internationales sur la conception du contrôle-commande (NF C 15-100, NF EN 60204...), des  
 69 fonctions de sécurité (IEC61508, IEC62061, ISO13849...) ou des moyens d'accès permanents aux machines (NF EN  
 70 14122, ...),
- 71 • ...

72  
 73 Un appareil de levage est, par définition, porteur de risques importants à l'égard de l'environnement, des colis manutentionnés et  
 74 des êtres humains. La réglementation (directive machine 2006/42/CE et arrêté du 1<sup>er</sup> mars 2004) impose :

- 75 • aux fabricants de concevoir des machines sûres,
- 76 • aux utilisateurs de maintenir les machines,
- 77 • d'utiliser les machines dans le cadre dans lequel elles ont été conçues,
- 78 • de confier l'utilisation de ces machines à du personnel formé et qualifié.

79 Cette réglementation définit également le besoin d'examens et de vérifications périodiques (épreuves en charge & contrôle de  
 80 bon fonctionnement des fonctions de sécurité) lors de la mise / remise en service ou périodiquement en exploitation. La  
 81 réglementation impose également un contrôle annuel des accessoires de levage (manilles, palonniers, élingues...) et avant chaque  
 82 utilisation par l'exploitant.  
 83

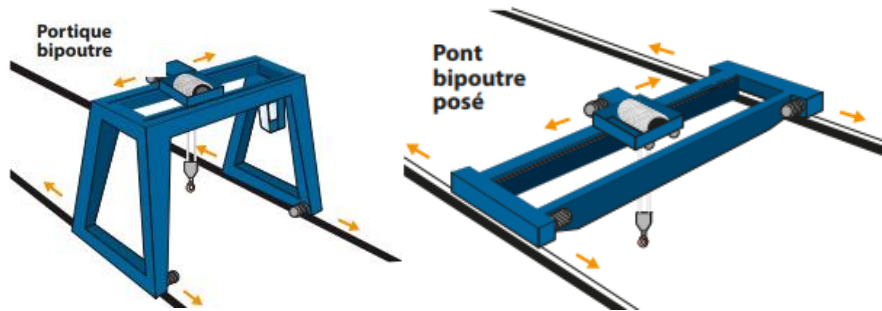
84 Hormis le référentiel réglementaire imposant les contraintes minimales de conception et la FEM aidant à identifier le type  
85 d'appareil de levage, aucun guide normatif ou procédure accompagne les industriels dans le choix des appareils de levage et de  
86 l'architecture en fonction des contraintes et du besoin. Cette compétence est un savoir-faire sensible et propre aux deux sociétés,  
87 développé avec la succession des conceptions.

#### 88 IV. DEFINITION & DESCRIPTION D'UN APPAREIL DE LEVAGE

89 Le levage industriel est une activité liée au domaine de la manutention, et consiste au déplacement d'objets lourds / d'envergures  
90 à l'aide d'appareils de levage (grues, chariots élévateurs...) pour diverses applications (nucléaire, défense...). Selon l'arrêté du  
91 1<sup>er</sup> mars 2004, un appareil de levage est défini comme une machine (énergie électrique / humaine), conduite par un opérateur  
92 agissant sur les mouvements de celle-ci, rendant possible le déplacement d'objets avec un changement significatif de niveaux.  
93 La sélection et la définition de l'appareil de levage répondant au besoin identifié, sont conditionnées à la future utilisation avec  
94 les indicateurs suivants :

- 95 • la capacité maximale en charge appelé communément CMU (= Charge Maximale d'Utilisation),
- 96 • le nombre de cycles de levage sur la durée de vie du moyen de levage,
- 97 • les distances moyennes parcourues,
- 98 • les spectres de charges (= totalité des charges levées durant la durée totale d'utilisation).

99 Les appareils de levage utilisés dans l'industrie, sont regroupés dans plusieurs familles comme les palans, treuils, potences,  
100 ponts roulants (monopoutre posée / suspendue ou bipoutre) et aux portiques (monopoutre ou bipoutre). Cette étude se concentre  
101 sur les familles des ponts roulants et des portiques (cf. Fig. 1) vis-à-vis de nos applications et de leurs modularités.

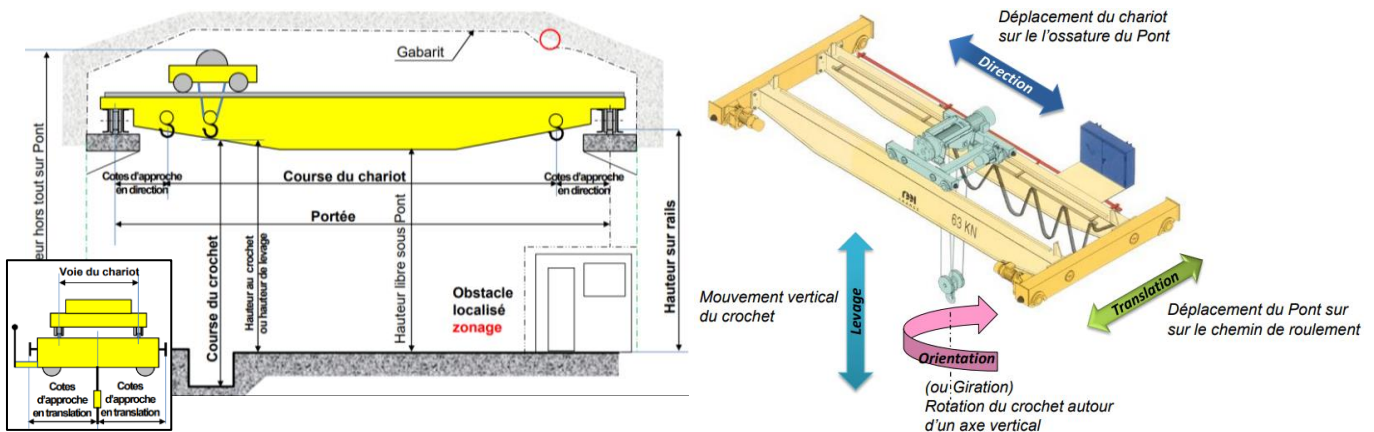


102  
103 Fig. 1. Vue d'ensemble d'un portique bipoutre (à gauche) et d'un bipoutre posé (à droite)

104 À partir de la norme NF EN 15011 (appareils de levage à charge suspendue – pont-roulants et portiques), un pont roulant est un  
105 appareil de levage à charge suspendue se déplaçant sur des rails / chemins de roulement (intégrés au bâtiment), comportant au  
106 minimum une poutre avec un mécanisme de levage, se déplaçant sur celle-ci. Concernant le portique, la différence vient  
107 essentiellement de l'appui de la poutre sur au moins une palée, se déplaçant par l'intermédiaire de roues ou de galets.

#### 108 A. Description générale d'un pont roulant / portique

109 Les ponts roulants (cf. Fig. 2) sont installés en hauteur dans des halls industriels, et circulent sur des voies de roulement parallèles  
110 intégrées sur des corbeaux en encorbellement reposant sur des poteaux. Lorsque les structures existantes ne peuvent pas  
111 supporter les descentes de charges générées par des ponts roulants, l'intégration de portique est la solution optimale.  
112



113  
114 Fig. 2. Vue d'ensemble d'un pont roulant dans son environnement et de ses principaux organes  
115

116 Les grandeurs importantes (cf. Fig. 2) pour la conception d'un pont roulant / portique sont la course du crochet, la hauteur sous  
 117 pont, les côtes d'approche en translation et direction, la portée, la hauteur sur rails, la hauteur sous crochet, course du chariot,  
 118 côte d'approche, hauteur sous pont. Ces grandeurs influencent la conception des principales structures alors que les côtes  
 119 d'approche (zone desservie) impactent directement la conception du mécanisme de levage (choix de la chaîne, potence...). Les  
 120 mouvements réalisés par un pont roulant sont les suivants :

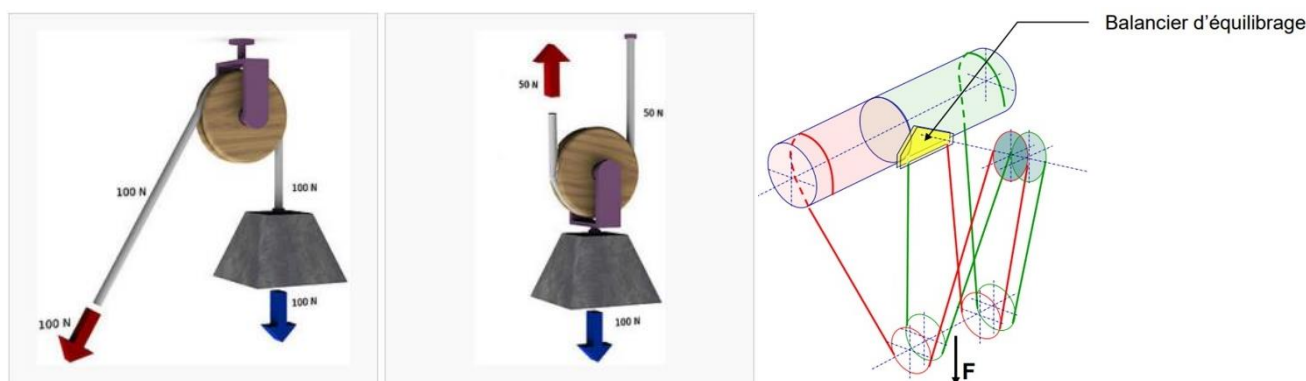
- 121 • déplacement de la charge (sens montée ou descente),
- 122 • déplacement du chariot de levage en direction (sens droit ou gauche),
- 123 • déplacement du quadrilatère en translation (sens avant ou arrière).

124 De plus, les appareils de levage comme des ponts roulants / portiques, sont capables par l'intermédiaire d'une conception adaptée,  
 125 de réaliser des mouvements complémentaires comme la rotation ou le basculement de charge.

126 Le pont roulant (cf. Fig. 2) est constitué des ensembles mécaniques suivants :

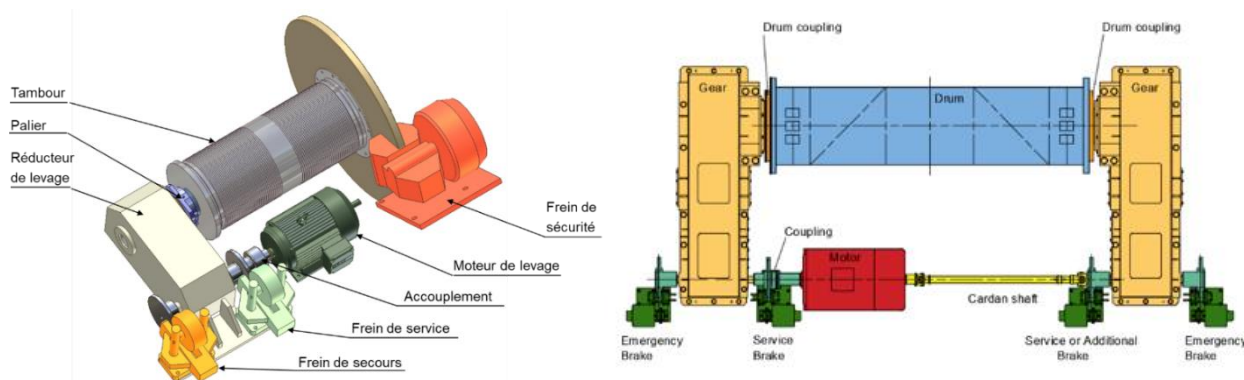
- 127 • un quadrilatère : *structure porteuse du chariot roulant dans un bâtiment (sens translation)*;
- 128 • un chariot de levage roulant sur le quadrilatère soutenant la cinématique de levage,
- 129 • la cinématique de levage assurant le déplacement (montée / descente) de la charge par l'intermédiaire d'au moins un câble  
 130 de levage,
- 131 • un contrôle-commande intégré dans diverses enveloppes électriques (armoires ou coffrets) assurant le pilotage et la  
 132 surveillance des cinématiques à l'aide d'une interface homme-machine.

134 Le mouflage permet une réduction de l'effort dans le câble de levage (cf. Fig. 3-gauche) et aussi de créer de redondances au  
 135 niveau des câbles de levage (cf. Fig. 3-droite).



136  
 137 Fig. 3. Vue d'ensemble d'un mouflage simple (à gauche) et d'un mouflage croisé (à droite)

138 **B. Description des mécanismes de levage existants**



139  
 140 Fig. 4. Vue de mécanismes de levage

141 Plusieurs types de chaînes de levage existent et sont principalement équipés des organes suivants :

- 142 • un moteur de levage,
- 143 • un réducteur de levage qui transmet mécaniquement une vitesse de rotation du moteur au tambour de levage,
- 144 • un tambour de levage chargé d'enrouler les câbles de levage et de supporter les efforts de tension des câbles,
- 145 • un ou plusieurs dispositifs de freinage, leurs nombres et leurs positions sont déterminées en fonction des objectifs de  
 146 sûreté, leurs dénominations courantes sont : frein de service, frein de secours et frein de sécurité,
- 147 • un dispositif de détection de surcharge (pesons, axes dynamométriques, ...) vis-à-vis de la réglementation.

148 Un ensemble de capteurs et dispositifs électroniques sont intégrés pour piloter et encadrer les mouvements.

149 C. Description du contrôle commande associé aux appareils de levage

150 Le contrôle commande permet de faire fonctionner l'appareil de levage en situation normale d'exploitation. Aujourd'hui, il est  
151 constitué à minima d'un automate de service ou d'un variateur, d'une supervision et d'un moyen de pilotage type boîte à bouton.  
152 Le contrôle commande permet aussi de prévenir le risque d'incident ou d'accident en déclenchant l'arrêt du mouvement par  
153 fermeture du ou des frein(s). À ce titre, il intègre possiblement des barrières de sécurité constituées :

- 154 • de capteurs permettant de détecter une situation anormale,
- 155 • d'automate de sécurité et /ou de chaîne câblée constituées de relais à seuil,
- 156 • de contacteurs permettant de couper l'alimentation des freins.

157  
158 Les ponts roulants et les portiques sont commandés par un opérateur formé et qualifié à l'utilisation d'un appareil de levage  
159 (formation certifiante définie par le code du travail), par l'intermédiaire d'un poste de commande :

- 160 • depuis le sol avec une radiocommande / boîte à boutons pendante,
- 161 • depuis une cabine intégrée directement au pont roulant / portique
- 162 • ou à distance depuis un poste de commande déporté.

163 Chaque poste de commande est équipé d'un arrêt d'urgence assurant l'arrêt complet du moyen en cas d'incident. Parallèlement  
164 au poste de commande, des arrêts d'urgence sont implantés dans des zones stratégiques (armoire électriques, postes de  
165 commandes, au sol...).

166 D. Qu'est ce qu'un levage sécurisé ?

167 Comme mentionné en introduction, les appareils de levage sécurisés sont employés pour des applications dans des installations  
168 à risques avec une surveillance renforcée et des procédures éprouvées, et lorsque la chute de la charge peut conduire à :

- 169 • un accident de criticité ou un événement de sûreté nucléaire (niveau de risque très élevé),
- 170 • un endommagement d'un colis sensible ou à des conséquences à haute valeur économique (niveau de risque élevé),

171  
172 Un moyen de levage sécurisé intègre une conception avec les caractéristiques suivantes :

- 173 • fréquence annuelle d'occurrence (FAO) faible vis-à-vis de l'événement « Chute de charge » et/ou « Choc de la charge »,
- 174 • limitation du nombre de Pièces à Défaillance Unique dans la chaîne de levage,
- 175 • distance d'arrêt du levage (= approche basse) maîtrisée en situation accidentelle.

176 E. Événements redoutés lors de l'utilisation d'un appareil de levage

177 Le principal événement redouté lors de l'utilisation d'un appareil de levage est la chute de charge. Les principales causes  
178 engendrant une chute de charge sont un mauvais élingage de la charge, une conduite inappropriée du moyen ou une défaillance  
179 intrinsèque du moyen. Pour rappel, cette analyse se focalise sur cette dernière cause. Les scénarios pouvant conduire à une chute  
180 de charge en fonctionnement normal sont :

- 181 • emplaçonnement de la charge, c'est-à-dire un arrêt brutal de la charge lors d'une montée entraînant une destruction d'un  
182 élément de la cinématique puis une chute de charge,
- 183 • surcharge, c'est-à-dire un effort anormal (supérieur à la CMU) appliqué sur la cinématique de levage,
- 184 • défaut d'alimentation générale de l'appareil de levage sécurisée. L'intégration de freins (fonctionnement en logique  
185 positive) sur les chaînes de levage permet de réduire ce risque de chute,
- 186 • rupture mécanique,
- 187 • perte de couple moteur entraînant la chute de la charge. L'intégration d'une fonction du type « Survitesse /  
188 Désynchronisme » permet de réduire le risque de chute,
- 189 • rupture structurelle suite à la ruine du quadrilatère ou du chariot de levage par exemple,
- 190 • rupture de l'accessoire de levage ou l'élingage (hors scope de cette étude).

191 Les fonctions de sécurité mises en œuvre sur les appareils de levages sécurisés vis-à-vis de l'emplaçonnement / survitesse /  
192 surcharge stoppent immédiatement les mouvements suite à une détection.

193 La chute de charge n'est pas le seul événement redouté. D'autres événements redoutés tels que les chocs peuvent survenir (hors  
194 scope de cette étude).

195 V. METHODOLOGIE

196 A. Démarche d'analyse : approche multicritère

197 Pour rappel, l'objectif est de préconiser/sélectionner une cinématique de levage (mécanisme et contrôle commande) adaptée à  
198 un besoin spécifique. Pour ce faire, une approche multi-critères est mise en œuvre. L'intérêt de cette démarche est de rechercher  
199 l'architecture la plus adaptée en fonction des critères spécifiés par le donneur d'ordre.  
200

201 Le principe de cette démarche est de réaliser une évaluation de différents critères pour plusieurs architectures en relatif à une  
 202 architecture de base qui correspond au minimum à la réglementation en vigueur. La méthodologie employée est la suivante :

- 203 • identification des critères importants pour la conception,
- 204 • identification d'une architecture de référence,
- 205 • identification des architectures mécaniques et électriques à étudier,
- 206 • cotation du critère pour chaque architecture par rapport à l'architecture de référence. En fonction de la pertinence pour  
 207 l'étude, les critères sont évalués de façon quantitative ou qualitative. Par exemple, compte tenu des enjeux de maîtrise  
 208 des risques, la fiabilité de l'appareil de levage par le calcul d'une FAO vis-à-vis de la chute de charge est une approche  
 209 quantitative comme le nombre de PDU et la distance d'arrêt en approche basse. Pour les autres critères, une approche  
 210 qualitative est appliquée.

211 La comparaison des architectures est réalisée pour une CMU donnée de l'appareil de levage à concevoir.

212 *B. Description des architectures*

213 *1) Architecture de référence*

214 L'architecture de référence (considérée dans notre étude) correspond à l'architecture minimum demandée par la réglementation.  
 215 Elle correspond à une architecture chaîne ouverte (CO) classique constituée d'un moteur, d'un frein de service au moteur, d'un  
 216 câble de levage, d'un variateur, d'un capteur de charge et d'un sélecteur de levage pour limiter la course de levage. Cette  
 217 architecture est assimilable à un appareil de levage du commerce (COTS).

218 *2) Mécanique*

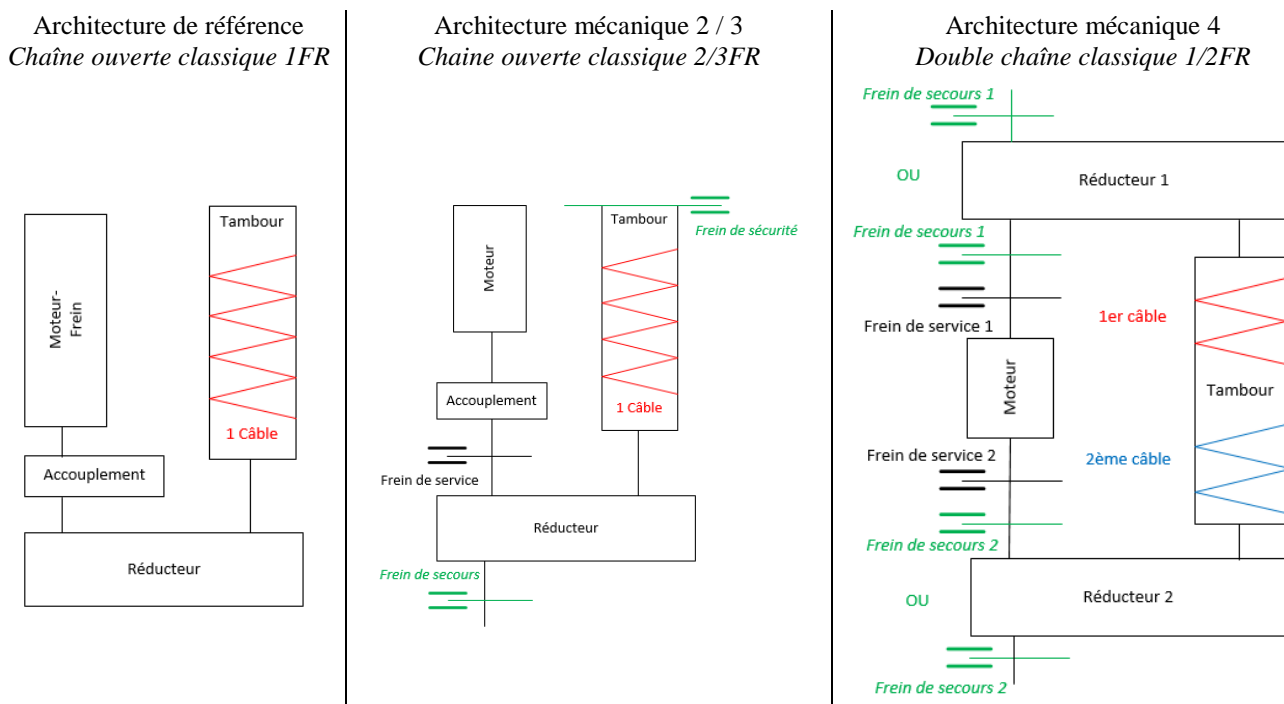
219 À partir de l'architecture de référence (cf. §V.B.1), nous avons fait évoluer l'architecture chaîne ouverte classique en ajoutant  
 220 des équipements mécaniques (freins, câbles) jusqu'à une architecture double chaîne classique.

221 L'architecture 2 correspond à une architecture chaîne ouverte à 2 freins avec soit 2 freins GV (Grande Vitesse) identiques (frein  
 222 de service et frein de secours) soit 1 frein GV et 1 frein PV (Petite Vitesse) au tambour (frein de service et frein de secours).

223 L'architecture 3 correspond à une architecture chaîne ouverte à 3 freins (frein de service, frein de secours et frein de sécurité).

224 L'architecture 4 correspond à une architecture de type double chaîne classique (DC) avec 4 freins (2 freins de service et 2 freins  
 225 de secours). Les 2 freins de secours peuvent être en amont ou en aval du réducteur sur l'arbre GV.

226



227

Fig. 5. Description des différentes architectures mécaniques étudiées

228

L'architecture mécanique est retranscrite dans le tableau d'étude, par l'intermédiaire des lignes « Architecture » et « Freins ».

## 3) Contrôle-Commande

À partir de l'architecture de référence (cf. §V.B.1), nous avons fait évoluer l'architecture en ajoutant des barrières de sécurité (capteurs, automates, chaînes câblées) de type:

- non classées ou classées (matériel avec un niveau PL suivant la norme 13849 ou SIL suivant les normes 61508 ou 62061),
- redondées afin de les rendre robustes à une défaillance,
- diversifiées afin de limiter les Défaillances de Cause Commune (DCC).

Le contrôle commande de l'architecture mécanique 2 comprend 3 niveaux d'évolution du contrôle commande, à savoir :

- évolution 1 : ajout d'un automate de service avec l'ajout d'un surcourse haut traité par l'automate de service ou en chaîne câblée,
- évolution 2 : ajout d'une barrière de sécurité spécifique (automate de sécurité ou chaîne câblée) non classée,
- évolution 3 : ajout d'une barrière de sécurité spécifique classée.

Le contrôle commande des architectures mécaniques 3 et 4 comprend 5 niveaux d'évolution du contrôle commande, à savoir :

- évolution 2 : ajout d'une barrière de sécurité spécifique (automate de sécurité ou chaîne câblée) non classée,
- évolution 3 : ajout d'une barrière de sécurité spécifique classée,
- évolution 4 : ajout de 2 barrières de sécurité (1 barrière classée et 1 barrière non classée) ou de 2 barrières de sécurité classées redondées identiques,
- évolution 5 : ajout de 2 barrières de sécurité classées, redondées et diversifiées,
- évolution 6 : ajout de 4 barrières de sécurité classées, redondées et diversifiées 2 à 2.

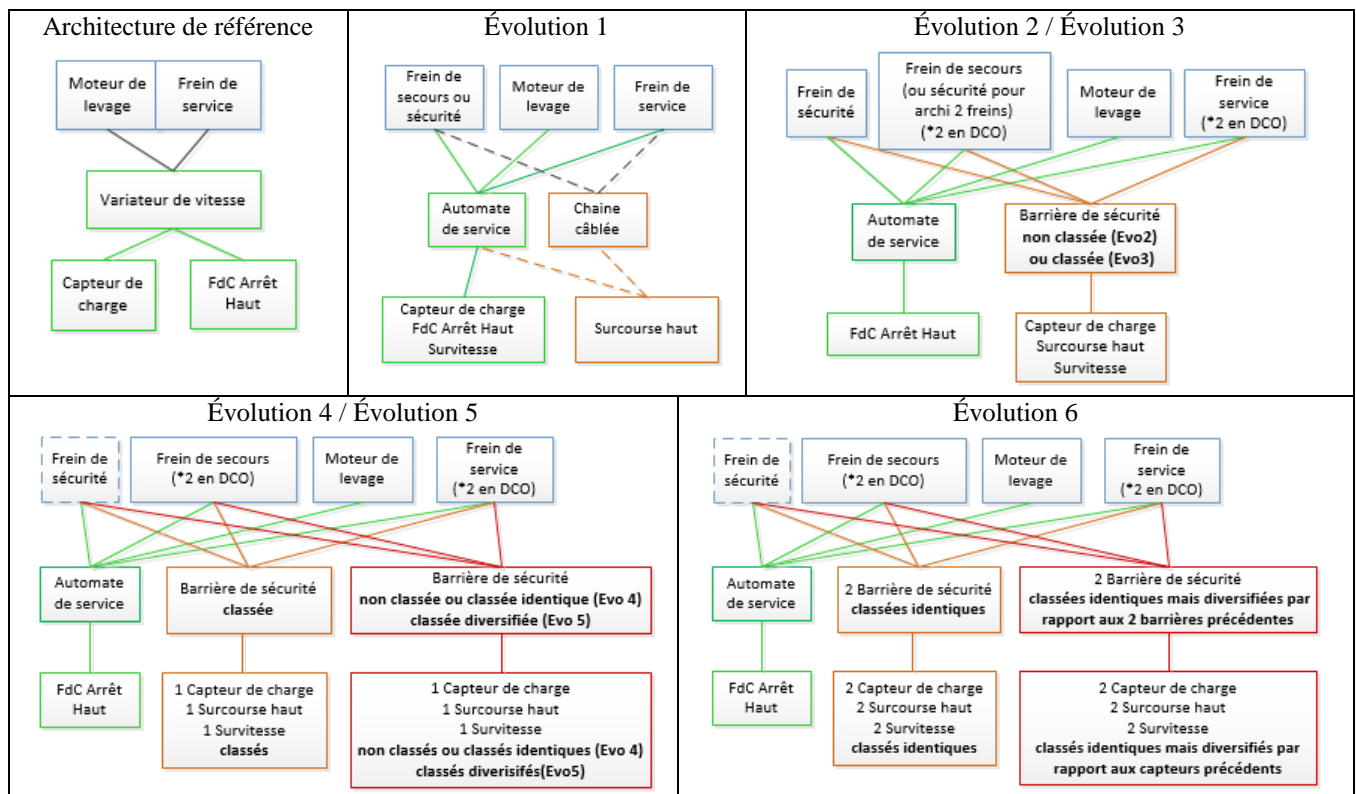


Fig. 8. Descriptions des différentes architectures contrôle commande étudiées

L'architecture du contrôle-commande est retranscrite dans le tableau d'étude, par l'intermédiaire de la ligne « Architecture électrique ».

### C. Description des critères

L'évaluation des différentes architectures est réalisée sur un ensemble de 14 critères retenus sur la base de notre retour d'expérience :

- FAO de chute de charge : correspond à l'occurrence annuelle d'apparition de l'événement redouté chute de charge. Cette FAO est calculée selon deux profils : 1 profil dit court de 100 heures et 1 profil dit long de 2000 heures,

- encombrement mécanique de chaque architecture à CMU équivalente il est précisé la direction associée de l'encombrement (verticale ou horizontale),

- 261 • encombrement électrique de chaque architecture : une flèche rouge vers le haut correspond à une augmentation du
- 262 volume des enveloppes électriques,
- 263 • impact sur la disponibilité : une flèche rouge vers le bas indique une dégradation de la disponibilité (augmentation de
- 264 l'indisponibilité de l'appareil),
- 265 • gestion mode dégradé mécanique : une flèche verte vers le haut correspond à une meilleure gestion
- 266 (facilité/accessibilité) en cas de panne mécanique mais l'affalage ne couvrira pas le cas du réducteur bloqué. Deux
- 267 flèches vertes vers le haut indiquent la couverture de l'ensemble des cas dont celui du réducteur bloqué,
- 268 • gestion mode dégradé électrique : le symbole  indique la mise en place de shunt pour mieux gérer les pannes de
- 269 capteurs ou du contrôle commande,
- 270 • présence d'une fonction d'affalage : une flèche verte indique une meilleure gestion de l'affalage (affalage avec contrôle
- 271 de la vitesse et un nombre de freins en barrière qui augmente),
- 272 • complexité du contrôle commande : une flèche rouge vers le bas correspond à un contrôle commande plus complexe
- 273 (ajout de barrière supplémentaire par automate ou chaîne câblée),
- 274 • approche basse : correspond à la distance parcourue en cas de rupture du réducteur avant que les freins n'arrêtent le
- 275 mouvement de la charge (distance d'arrêt). Pour l'architecture de référence ou l'architecture 2 freins GV, l'approche
- 276 basse n'existe pas en cas de rupture du réducteur car il n'y a pas de protection quel que soit la hauteur où se produit à
- 277 la rupture,
- 278 • durée annuelle des opérations de maintenance préventive : une flèche rouge vers le haut correspond à une augmentation
- 279 de la durée annuelle des opérations de maintenance préventive,
- 280 • coût global de possession à CMU identique : correspond à l'ensemble des coûts (étude, fabrication, exploitation) du
- 281 moyen de manutention,
- 282 • CMU : charge maximale à ne pas dépasser lors de l'utilisation du moyen de manutention pour respecter les critères de
- 283 dimensionnement du moyen. Une flèche verte vers le haut indique une augmentation possible de la CMU par rapport
- 284 l'architecture de référence,
- 285 • cyber sécurité : correspond à l'effort à mettre vis-à-vis de la démonstration cyber sécurité (volume documentation à
- 286 produire pour démontrer/justifier la non vulnérabilité). Une flèche rouge vers le haut correspond une augmentation du
- 287 volume documentaire,
- 288 • quantité de PDU : nombre de pièces à défaillance unique, c'est-à-dire que la défaillance d'une pièce engendre
- 289 directement une chute de charge. Ces pièces nécessitent un dimensionnement et un suivi renforcés.

#### 290 D. Approches quantitative et qualitative

##### 291 1) Approche quantitative (FAO, approche basse et nombre de PDU)

292 La FAO de l'ER chute de charge a été estimée pour deux profils d'emploi. L'étude considère que les tests périodiques ont eu

293 lieu juste avant de réaliser les opérations. Les taux de défaillance ou probabilité de défaillance pris en compte dans les modèles

294 de calcul de FAO sont :

- 295 • moteur et variateur :  $1.10^{-5}$  panne / heure,
- 296 • arbre, réducteur, accouplement : probabilité de rupture de  $10^{-7}$ ,
- 297 • tambour et câble : probabilité de rupture de  $10^{-10}$ ,
- 298 • freins : probabilité de défaillance à l'appel de  $10^{-4}$ ,
- 299 • automate de service ou automate de sécurité non classé :  $1.10^{-5}$  panne / heure,
- 300 • automate de sécurité classé :  $1.10^{-7}$  panne / heure,
- 301 • capteur non classé :  $1.10^{-6}$  panne / heure,
- 302 • capteur classé :  $1.10^{-8}$  panne / heure,
- 303 • contacteur non classé :  $1.10^{-6}$  panne / heure,
- 304 • contacteur classé :  $1.10^{-7}$  panne / heure,
- 305 • probabilité de perte d'alimentation électrique : 1,
- 306 • probabilité d'accrochage de la charge :  $10^{-2}$ .

307 Ces données de fiabilité correspondent aux valeurs communément admise dans ce type d'étude. L'approche basse et la quantité

308 de PDU sont également estimés de façon quantitative (ordre de grandeur).

##### 309 2) Approche qualitative (encombrement...)

310 L'approche qualitative va permettre de réaliser des choix de conception au niveau de l'architecture du moyen de levage en

311 fonction de l'importance des différents critères. Elle correspond à une démarche de type analyse de la valeur.

## 312 VI. RESULTATS

313 La mise en œuvre de la démarche décrite ci-dessus sur plusieurs architectures d'appareil de levage a permis de réaliser un

314 tableau/une cartographie qui va permettre de sélectionner l'architecture correspondant au besoin exprimé.



Architecture mécanique	Chaîne ouverte									Double chaîne				
	Architecture de référence	2 GV 1 GV & 1PV	2 GV 1 GV & 1PV	2 GV 1 GV & 1PV	3FR	3FR	3FR	3FR	3FR	2 x 2FR	2 x 2FR	2 x 2FR	2 x 2FR	2 x 2FR
Évolution 1		Évolution 2	Évolution 3	Évolution 2	Évolution 3	Évolution 4	Évolution 5	Évolution 6	Évolution 2	Évolution 3	Évolution 4	Évolution 5	Évolution 6	
Autres hypothèses		-	-	-	-	-	-	-	Sans DCC Freins PDU = 1,10 <sup>-12</sup>	-	-	-	-	Sans DCC Freins PDU = 1,10 <sup>-12</sup>
Type de mouflage	1	2	2	2 ou 3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mode Dégradé	1	1 (2GV) 2 (1 GV & 1PV)	1 (2GV) 2 (1 GV & 1PV)	1 ou 2	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4
FAO - Chute de charge (100heures de fonctionnement)	3.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup> - 2.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	5.10 <sup>-7</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	3.10 <sup>-7</sup>	2.10 <sup>-8</sup> - 4.10 <sup>-10</sup>	2.10 <sup>-10</sup>	2.10 <sup>-10</sup> - 3.10 <sup>-11</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	3.10 <sup>-7</sup>	2.10 <sup>-8</sup> - 3.10 <sup>-10</sup>	1.10 <sup>-10</sup>	1.10 <sup>-10</sup> - 1.10 <sup>-12</sup>
FAO - Chute de charge (2 000heures de fonctionnement)	5.10 <sup>-2</sup>	2.10 <sup>-2</sup> - 2.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-6</sup> - 4.10 <sup>-7</sup>	6.10 <sup>-9</sup>	3.10 <sup>-10</sup> - 8.10 <sup>-11</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-6</sup> - 3.10 <sup>-7</sup>	6.10 <sup>-9</sup>	1.10 <sup>-10</sup> - 4.10 <sup>-11</sup>
Encombrement mécanique	-	=	=	=	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Encombrement électrique	-	↗	↗↗	↗↗↗ (APS) ↗↗↗ (LC)	↗↗ (APS) ↗↗↗ (LC)	↗↗ (APS) ↗↗↗ (LC)	↗↗↗ (APS) ↗↗↗↗ (LC)	↗↗↗↗	↗↗↗↗↗	↗↗ (APS) ↗↗↗ (LC)	↗↗ (APS) ↗↗↗ (LC)	↗↗↗ (APS) ↗↗↗↗ (LC)	↗↗↗↗	↗↗↗↗↗
Impact sur la disponibilité	-	↘	↘↘	↘↘↘	↘↘	↘↘	↘↘↘	↘↘↘	↘↘↘↘	↘↘	↘↘	↘↘↘	↘↘↘	↘↘↘↘
Gestion mode dégradé mécanique	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗
Gestion mode dégradé électrique	-	=	=	=	=	=	✓	✓	✓	=	=	✓	✓	✓
Présence d'une fonction d'affalage	-	= (2GV) ↗ (1 GV & 1PV)	= (2GV) ↗ (1 GV & 1PV)	↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗
Complexité du Contrôle-Commande	-	↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗↗↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗↗↗
Distance d'arrêt (cas accidentel)	-	= (2GV) ≈ 500mm	= (2GV) ≈ 500mm	= (2GV) ≈ 500mm	≈ 500mm	≈ 500mm	≈ 500mm	≈ 500mm	≈ 500mm	≈ 150mm	≈ 150mm	≈ 150mm	≈ 150mm	≈ 150mm
Durée annuelle des opérations de maintenance préventive	-	↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗↗↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗↗↗
Coût global de possession	-	€	€	€€	€€	€€€	€€€€	€€€€	€€€€€	€€	€€€	€€€€	€€€€	€€€€
CMU	-	=	=	= (2GV) ↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Impact de la cybersécurité	-	=	↗	↗ (APS) = (LC)	↗	↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)	↗	↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)	↗↗ (APS) = (LC)
Quantité de PDU (Pièces à Défaillance Unique)	-	3 x PDU (2GV) 2 x PDU	3 x PDU (2GV) 2 x PDU	3 x PDU (2GV) 2 x PDU	2 x PDU	2 x PDU	2 x PDU	2 x PDU	2 x PDU	1 x PDU	1 x PDU	1 x PDU	1 x PDU	1 x PDU

Critères de comparaison

- 315 Freins : FR = frein GV = frein sur axe moteur PV = frein au tambour
- 316
- 317 Type de mouflage :
- 318 1. Un câble de levage
  - 319 2. Mouflage standard avec deux câbles de levage
  - 320 3. Mouflage croisé avec deux câbles de levage + 3 x Pincés de frein (dimensionné à % de la CMU) dit de « Sécurité »
  - 321 4. Mouflage croisé avec deux câbles de levage
- 322 Mode dégradé :
- 323 1. Pas de shunt et affalage avec levier manuel sur frein de service
  - 324 2. Pas de shunt, affalage avec levier manuel sur frein de service et desserrage hydraulique sur le(s) frein(s) de sécurité
  - 325 3. Pas de shunt, affalage avec levier manuel sur freins de service et de secours puis desserrage hydraulique sur le(s) frein(s) de sécurité
  - 326 4. Shunts, affalage avec levier manuel sur freins de service et de secours puis desserrage hydraulique sur le(s) frein(s) de sécurité

327 Cette cartographie nous a permis de dégager les résultats suivants :

- 328 • vis-à-vis de l'architecture globale sur le critère de FAO :
  - 329 ○ dans le cas d'une chaîne ouverte classique, l'ajout d'une barrière de sécurité (non classée/classée) au niveau
  - 330 du contrôle commande s'accompagne forcément de l'ajout d'un frein pour obtenir un gain conséquent sur la
  - 331 FAO. Autrement dit, réaliser l'une OU l'autre des modifications n'a aucun impact sur la fiabilité de l'appareil
  - 332 de levage. Il faut considérer ces 2 modifications comme indissociables afin d'améliorer significativement la
  - 333 fiabilité de l'appareil de levage considéré,
  - 334 ○ la double chaîne classique permet d'obtenir des FAO inférieures à  $10^{-11}$  en optimisant le dimensionnement
  - 335 des PDU (le contrôle commande n'est plus prépondérant contrairement à une architecture de type chaîne
  - 336 ouverte classique),
- 337 • vis-à-vis de l'architecture mécanique :
  - 338 ○ une architecture de type chaîne ouverte classique entraîne une contrainte d'encombrement vertical, un
  - 339 minimum de deux PDU et une distance d'arrêt accidentel inexistante (architecture de 1 ou 2 freins GV) ou
  - 340 de l'ordre de 500 mm,
  - 341 ○ une architecture de type double chaîne classique entraîne une contrainte d'encombrement horizontal, un
  - 342 unique PDU et une distance d'arrêt accidentel de l'ordre de 150 mm. L'encombrement horizontal dégrade les
  - 343 zones d'approche vis-à-vis de l'environnement,
  - 344 ○ la gestion des modes dégradés mécaniques est facilitée avec l'architecture de type double chaîne
  - 345 ○ les deux types d'architectures peuvent permettre de réaliser un affalage. Toutefois, la chaîne ouverte avec
  - 346 deux freins GV ne permet pas un affalage en cas de blocage du réducteur de levage. La chaîne ouverte
  - 347 classique trois freins et la double chaîne classique permettent d'augmenter le nombre de protection lors de
  - 348 l'affalage : l'opération est contrôlée par contrôleur de vitesse et au minimum deux freins peuvent agir sur le
  - 349 mouvement de descente,
- 350 • vis-à-vis de l'architecture électrique :
  - 351 ○ l'ajout de barrières de sécurité dans le contrôle commande (quel que soit le type d'architecture) et de shunts
  - 352 associés augmente l'encombrement électrique (augmentation du volume des enveloppes électriques) de
  - 353 l'appareil de levage. Cette augmentation du volume d'enveloppes électriques peut être minimisée en fonction
  - 354 des technologies employées. Une barrière en logique câblée entraîne une augmentation plus conséquente du
  - 355 volume qu'une barrière avec automate mais cette dernière entraîne une augmentation de la contrainte
  - 356 cybersécurité (justification conséquente),
  - 357 ○ une augmentation du volume et de la complexité du contrôle commande entraînent une dégradation de la
  - 358 disponibilité de l'appareil de levage et par conséquent une augmentation de l'indisponibilité et de la durée de
  - 359 la maintenance préventive pour vérifier le fonctionnement des fonctions de sécurité (et confirmer les
  - 360 hypothèses prises pour le traitement de la chute de charge).

361 Cette analyse nous a permis d'identifier la complémentarité entre plusieurs critères et de regrouper et de prioriser les critères  
362 en 4 catégories (critères principaux, critères secondaires, contraintes et résultats) pour choisir la solution optimale en matière  
363 de conception et d'architecture. Le tableau ci-après présente le classement des critères dans les 4 catégories.  
364

365

TABLE I. PRIORISATION DES CRITÈRES

<b>Priorité Principale</b>	FAO Distance d'arrêt (approche basse en levage) Coût
<b>Priorité Secondaire</b>	Gestion mode dégradé mécanique Gestion mode dégradé électrique Affalage Cybersécurité
<b>Contraintes</b>	Encombrement mécanique Encombrement électrique CMU
<b>Résultante</b>	Disponibilité Complexité du contrôle commande Durée des opérations de maintenance préventive Quantité de PDU

366

367 L'évolution du coût est directement lié au choix de de la chaîne de levage et l'objectif de FAO à atteindre. Les appareils de  
368 levage au coût le plus faible sont des palans, matériel du commerce. Le coût augmente également en fonction de l'évolution  
369 des chaînes (1 frein GV puis 2 freins puis 3 freins). Enfin, l'évolution du coût dépend également d'autres facteurs comme le  
370 niveau de justification et de suivi (sûreté pratique), la CMU et l'étude vis-à-vis du séisme (fort spectre, missilité en charge,  
371 fonctionnement post-séisme...). Cette étude sur les facteurs impactant directement le coût de la conception, conduit au graphe  
372 suivant :

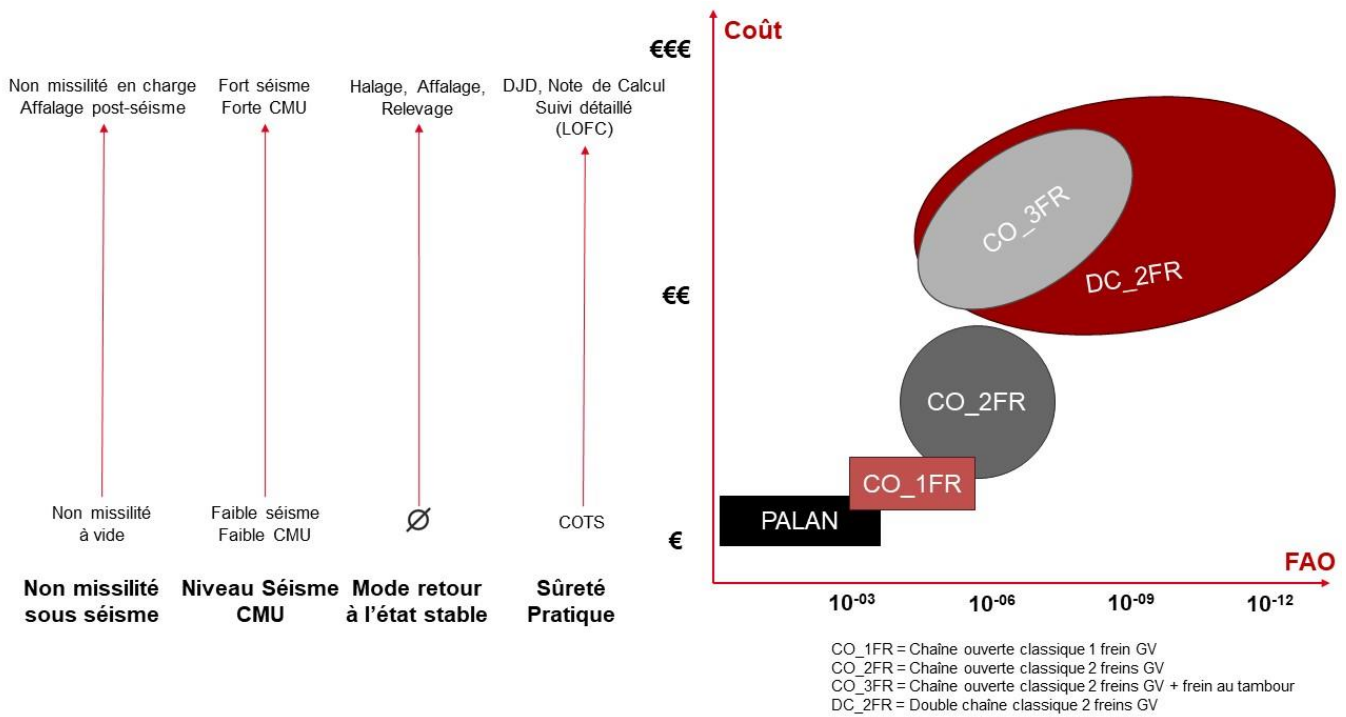


Fig. 6. Évolution du coût par chaîne de levage en fonction de la FAO et d'autres leviers

## VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette démarche s'applique à des appareils de levage dans des installations à risques avec un fort enjeu vis-à-vis de la chute de la charge manutentionnée qui implique un développement spécifique de l'appareil de levage. Elle a permis d'identifier les critères à considérer pour choisir une architecture :

Classe de FAO chute de charge	Catégorie du levage	Architecture préconisée	Justification
Supérieure à $10^{-3}$ /an	Non sécurisé	CO_1FR	Le choix va dépendre du coût uniquement
Entre $10^{-3}$ et $10^{-5}$ /an	Non sécurisé	CO_1FR CO_2FR	Le choix entre ces 2 architectures dépendra des exigences de distance d'arrêt accidentel et des exigences en affalage
Entre $10^{-5}$ et $10^{-8}$ /an	Sécurisé	CO_2FR CO_3FR DC	Le choix dépendra des critères de distance d'arrêt accidentel, des exigences en affalage et de l'encombrement. Si ces critères ne sont pas rédhibitoires, la chaîne ouverte deux freins sera moins chère pour le même objectif de FAO. La double chaîne reste compétitive selon les critères.
Entre $10^{-8}$ et $10^{-11}$ /an	Sécurisé	DC	La DC présente un coût inférieur à la chaîne ouverte trois freins si pas de contrainte d'encombrement mécanique horizontal
Inférieure à $10^{-11}$ /an	Sécurisé	DC uniquement	Seule architecture à pouvoir atteindre ce niveau de fiabilité

La démarche présentée est principalement basée sur la composante sûreté/sécurité de la sûreté de fonctionnement, avec une orientation sur le choix de la chaîne de levage (et le contrôle commande associé) vis-à-vis de la chute de charge (principal événement redouté d'un appareil de levage). Néanmoins, quelques optimisations supplémentaires de conception (sur la chaîne de levage notamment) donneraient l'opportunité d'améliorer encore certains critères comme l'absence de PDU sur la chaîne de levage par exemple et permettrait de limiter la complexité du contrôle commande et son niveau de classement.

De plus, les moyens de levage offrent une multitude d'opportunités avec des chaînes de levage sans câble (pignon crémaillère...) ou des chaînes cinématiques basées sur la disponibilité, autre composante de la Sûreté de Fonctionnement. Des contraintes environnementales comme le séisme (missilité...) ou le vent, ont un impact sur la conception et le dimensionnement des appareils de levage.

Enfin, les appareils de levage sont également sujets à d'autres événements redoutés influençant la conception : chocs du colis ou choc du moyen de levage avec un autre moyen imposant des fonctions d'anticollision ou de contrôle de la trajectoire (absence de survol...) par exemple.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier leurs deux sociétés, REEL et TechnicAtome, de nous donner cette opportunité de communiquer sur notre savoir-faire ainsi qu'aux équipes pour le support apporté.

394

## REFERENCES

395 NF EN 15011 Décembre 2020 – Appareils de levage à charge suspendus (ponts roulants et portiques)

396 ED6105 Octobre 2018 – Manuel de sécurité sur les ponts roulants

397 FO 002 – 1 Septembre 2021 – Conception mécanique des appareils de levage (formation dispensée par REEL ACADEMY)

Recueils des Instructions Techniques de la Propulsion Nucléaire (TA)