

Comment optimiser le choix d'une grue mobile via une représentation détaillée du processus de sélection ?

Auteur : Mincke, Florent

Promoteur(s) : Boucher, Fabian

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12951>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master
« Ingénieur Civil en Architecture » par Florent Mincke

Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées
Année académique 2020-2021

*Comment optimiser le choix d'une grue mobile
via une représentation détaillée du processus de sélection ?*

Promoteur: Fabian Boucher
Co-promoteur: Jean-Yves Jonniaux
Jury: Catherine Elsen & Shady Attia
Président du Jury: Pierre Leclercq

Remerciements

Ce travail est le résultat de plusieurs mois d'investissement durant lesquels plusieurs personnes m'ont soutenu.

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Fabian Boucher, professeur à l'ULiège et Directeur du département Engineering de la S.A. Besix, qui, en acceptant d'être mon promoteur, m'a permis d'être stagiaire dans cette entreprise et de rencontrer son collègue Monsieur Jean-Yves Jonniaux, Project Manager - Methods & Steel, qui m'a fait partager sa passion pour les grues et, en tant que co-promoteur, s'est montré disponible et à l'écoute pour m'aider à atteindre mes objectifs.

Je tiens également à remercier Madame Catherine Elsen, professeure à l'ULiège, pour m'avoir mis sur la voie pour le choix du sujet de ce travail et pour ses précieux conseils ainsi que Monsieur Shady Attia, professeur à l'ULiège, pour avoir accepté de faire partie du comité de lecture.

Je remercie également Monsieur Lionel Sacré pour sa disponibilité et ses conseils avisés lors de la lecture du travail ainsi que Lila Droussin pour ses relectures.

L'élaboration de ce mémoire m'a fait prendre conscience des exigences du monde du travail et m'a donné l'opportunité de faire de riches découvertes, tant humaines que pratiques. Je tiens à remercier tous les professionnels qui m'ont accordé de leur temps pour me partager leur savoir-faire et leur expérience, et plus particulièrement Anthony Canor, Nik Andries, Nicolas Clerbois, Damiano Caffont et Geoffrey Andrieu qui ont accepté de prendre part aux entretiens ; Gérard Jungling (entreprise de levage Jungling) et Jacques Dubois (entreprise de levage J. Boutique) qui m'ont fait visiter leur parc de grues ; Florent Mercier (Dufour), Philippe Vandenbranden (Megamax), Mathieu Depre (J. Boutique), Kristof Van Loo (Van Der Spek), Dimitri De Mol (Van Der Spek) et J-Y Wiart qui m'ont fourni des fiches techniques et des documents relatifs aux levages ; et enfin, toutes les personnes qui m'ont accueilli sur les chantiers : Bertrand Hermans (visite de l'usine Solarec), Romuald Servaye, Benjamin Falla et Sébastien Galeran (site de Fauvillers), Kevin Vandermeulen (DP Liège Terminal Containers), Brice Devaux, Josy Drouguet et Benjamin Doudelet (MB manutention), Arno Diels (Ibens), Arnaud Villaume (Duchêne), Olivier Homerin (site du tram de Liège) et François Pahaut (BAM).

Enfin, je remercie ma famille et mes proches pour leur soutien indéfectible : Marine Mottet, Francesco Trapassi et Thibaut L'Hoest qui m'a mis sur la voie de l'ingénierie architecturale ; Hakim Hédia qui m'a aidé à surmonter ma première année d'études. J'adresse un remerciement particulier à mes parents qui m'ont toujours encouragé durant l'élaboration de ce travail et tout au long de mes études.

Résumé

Ce travail se donne pour objet l'analyse du processus de sélection d'une grue mobile ainsi que l'optimisation de son choix. Dès lors, différents outils sont développés et intégrés dans une méthode qui tente de formaliser les différents éléments à prendre en considération lors de la sélection d'une grue mobile.

La méthodologie mise en œuvre se base sur la récolte de données par le biais d'un questionnaire et d'entretiens adressés à des professionnels du domaine du levage dans le but de définir les caractéristiques du processus de sélection d'une grue. En outre, des visites effectuées sur douze chantiers ont permis de compléter cette méthodologie.

L'analyse des résultats du questionnaire et des entretiens a principalement mis en évidence la complexité et le manque de formalisation du processus de sélection d'une grue. Les visites *in situ* ont également mis en exergue la multitude de facteurs intervenant dans toute opération de levage.

La méthode que nous proposons est ainsi composée de quatre outils : un logigramme, une check-list, un tableur Excel et une grille d'optimisation. L'analyse des résultats a permis de faire évoluer le logigramme jusqu'à une version définitive qui segmente le processus de sélection d'une grue en cinq étapes et le considère comme itératif. La checklist suit la structure du logigramme et en détaille les différents éléments. L'étape de présélection, quant à elle, est facilitée par le tableur Excel. La grille d'optimisation favorise la comparaison de différents scénarios ainsi que leurs options respectives afin de sélectionner la grue la plus adaptée au projet. Enfin, trois cas d'étude illustrent l'application de ces différents outils.

Ce travail se veut être une aide pour les personnes débutant dans le domaine du levage, notamment en leur faisant gagner du temps.

Mots-clés

Grue mobile, processus de sélection, logigramme, check-list, tableur, grille d'optimisation, cas d'étude

Abstract

The purpose of this work is to analyse the selection process of a mobile crane and to optimize its choice. Therefore, different tools are developed and integrated in a method that tries to formalize the different elements to be taken into account when selecting a mobile crane.

The methodology used is based on the collection of data by means of a questionnaire and interviews with professionals in the lifting field in order to define the characteristics of the selection process of a crane. In addition, visits to twelve construction sites completed the methodology.

The analysis of the results of the questionnaire and the interviews mainly highlighted the complexity and the lack of formalization of the crane selection process. The on-site visits also highlighted the vast number of factors involved in any lifting operation.

The method we propose is thus composed of four tools: a flowchart, a checklist, an Excel spreadsheet and an optimization grid. The analysis of the results allowed us to develop the flowchart to a final version that segments the crane selection process into five steps and considers it as iterative. The checklist follows the structure of the flowchart and details the different elements. The pre-selection stage is made easier by the Excel spreadsheet. The optimization grid allows the comparison of different scenarios and their respective options in order to select the most suitable crane for the project. Finally, three case studies illustrate the application of these different tools.

This work is intended to be a help for people starting out in the field of lifting, particularly by saving them time.

Keywords

Mobile crane, selection process, flowchart, checklist, spreadsheet, optimization grid, case studies

Table des matières

I. INTRODUCTION	12
II. ÉTAT DE L'ART	14
PARTIE 1 - LE DOMAINE DU LEVAGE	14
1. Introduction.....	14
2. Types de grues mobiles.....	15
2.1. Grue automotrice compacte	15
2.2. Grue mobile sur porteur	16
2.3. Grue mobile sur chenilles.....	17
2.4. Grue sur barge.....	18
3. Équipements.....	19
3.1. Équipements complémentaires de flèche	19
3.2. Équipement de préhension de la grue	21
3.3. Système d'élingage	22
4. Caractéristiques des grues mobiles	24
4.1. Facteurs techniques dimensionnants	24
4.2. Mouvements	25
4.3. Stabilité	26
5. Fiches techniques	28
5.1. Fabricants et classification	28
5.2. Diagramme de charge	31
5.3. Tableau de charge	32
6. Levage en tandem	34
6.1. Levages homogènes	34
6.2. Levages distincts	34
7. Métiers et sécurité	36
PARTIE 2 - PROCESSUS DE SELECTION D'UNE GRUE	37
1. Caractéristiques générales.....	37
2. Pluralité des facteurs	38
3. Parties impliquées	40
4. Différentes approches	41
4.1. Méthode courante.....	41
4.2. Méthodes assistées par ordinateur.....	42
4.3. Synthèse des différentes méthodes.....	51
III. METHODOLOGIE.....	53
1. Le questionnaire.....	53
1.1. Élaboration du questionnaire.....	53
1.2. Modalités de réponses au questionnaire.....	55
1.3. Sélection des participants	55
2. Les entretiens	55
2.1. Élaboration des entretiens	55
2.2. Modalités de participation aux entretiens	55
2.3. Sélection des participants	56
3. Les visites de chantier	56
3.1. Préparation des visites de chantier	56
3.2. Réalisation des visites de chantier.....	56

IV. TRAITEMENT DES DONNEES.....	57
1. Analyse des résultats de l'enquête	57
1.1. Nature de l'échantillon.....	57
1.2. Approche globale	58
1.3. Approche spécifique.....	59
1.4. Levage	61
2. Analyse des entretiens	62
2.1. Nature de l'échantillon.....	62
2.2. Synthèse des informations.....	62
3. Visites de chantier.....	64
3.1. Visite de chantier 5 : Levage d'un broyeur à la Carrière de Préalles (12/04/21)	65
V. PROPOSITION D'UNE METHODE.....	68
1. Évolution du logigramme	68
1.1. Logigramme 1 ^{ère} version	69
1.2. Logigramme 2 ^{ème} version.....	71
1.3. Logigramme 3 ^{ème} version.....	73
1.4. Vue d'ensemble de l'évolution du logigramme	75
2. Logigramme final	76
3. Check-list	78
4. Tableur Excel.....	79
5. Grille d'optimisation du choix	80
VI. APPLICATION DE LA METHODE	83
1. Cas d'étude 1 – Préhension d'un cœur d'appareil de voie à la gare de Ans.....	83
2. Cas d'étude 2 – Démontage d'un pont Bailey à Tilff.....	100
3. Cas d'étude 3 – Montage de 5 éoliennes à Fauvillers.....	121
VII. DISCUSSION.....	137
1. Contributions	137
2. Limites	138
3. Perspectives	140
VIII. CONCLUSION.....	141
IX. BIBLIOGRAPHIE	142
1. Livres et articles scientifiques.....	142
2. Webographie.....	145
3. Check-lists & Normes.....	148

Table des figures

Figure 1 - Photo d'un levage à Rocourt (cf. annexe 1 : visite de chantier).....	12
Figure 2 - Grue à cage d'écureuil (ancêtre de la grue moderne).....	14
Figure 3 - Types de grue mobile	15
Figure 4 - Grue automotrice (LTC 1050-3.1).....	15
Figure 5 - Grue mobile sur porteur (LTM 1750-9.1)	16
Figure 6 - Stabilisateurs en H ou en X	16
Figure 7 - Flèche treillis et flèche télescopique.....	17
Figure 8 - Grue mobile sur chenilles (LR 500)	17
Figure 9 - Grue mobile sur chenilles utilisée sur barge (LR 1100).....	18
Figure 10 - Bigue utilisée pour lever un bateau (HEBO lift 6 et 7)	18
Figure 11 - Équipement complémentaire de flèche.....	19
Figure 12 - Grue mobile sur porteur équipée d'une volée variable et d'un spanlift	20
Figure 13 - Grue mobile sur chenilles équipée d'un superlift.....	20
Figure 14 - Schéma du mouflage	21
Figure 15 - Schéma d'un système d'élingage	22
Figure 16 - Élingage complexe	22
Figure 17 - (a) Élingues en nylon et (b) manilles au stock de chez J.Boutique	23
Figure 18 - Schéma portée et Hsc	24
Figure 19 - Schéma des mouvements d'une grue mobile sur porteur	25
Figure 20 - Schéma du renversement.....	26
Figure 21 - Schéma de la pression au sol d'une grue mobile sur porteur	27
Figure 22 - Marques des grues abordées dans ce travail.....	28
Figure 23 - Exposition LR 13000.....	29
Figure 24 - Diagramme de charges avec les explications d'utilisation.....	31
Figure 25 - Courbe de charge	33
Figure 26 - Retournement d'une charge avec deux grues	35
Figure 27 - Deux grues renversées en 2015 aux Pays-Bas.....	36
Figure 28 - Classification des facteurs proposée par Al-Hussein	38
Figure 29 - Facteurs de faisabilité technique.....	38
Figure 30 - Facteurs affectant la sélection d'une grue : degré moyen d'influence.	39
Figure 31 - Schéma des parties impliquées lors d'une sous-traitance.....	40
Figure 32 - Parties impliquées en interne.....	40
Figure 33 - Méthode courante de sélection d'une grue	41
Figure 34 - Processus de sélection d'une grue avec IntelliCranes	42
Figure 35 - Structure d'IntelliCranes.....	43
Figure 36 - Vues en élévation de la grue et exemples de contraintes du site	44
Figure 37 - Méthode Algorithme-1 (2001) et Algorithme-2 (2005)	45
Figure 38 - Méthode proposée par Wu et al. (2011)	45
Figure 39 - Logigramme de l'algorithme développé par Wu et al. (2011)	46
Figure 40 - Méthode proposée par Han et al., 2018	47
Figure 41 - Opération de levage (modèle 3D vs réalité).....	47
Figure 42 - Logigramme de la simulation 3D	48
Figure 43 - Question 12 du questionnaire	54
Figure 44 - Question 14 du questionnaire	54
Figure 45 - Question 42 du questionnaire	54
Figure 46 - Compagnies de levage ayant participé à l'enquête.....	57
Figure 47 - Entreprises ayant participé à l'enquête.....	57
Figure 48 - Nature de l'échantillon de l'enquête.....	57
Figure 49 - Analyse du classement préférentiel concernant 9 facteurs en rapport avec les conditions de site.....	59

Figure 50 - Analyse du classement préférentiel concernant 7 facteurs en rapport avec l'élément à lever	59
Figure 51 - Relevé photographique – visite de chantier à la Carrière de Préalp (12/04/21)	66
Figure 52 - Relevé photographique – visite de chantier à la Carrière de Préalp (12/04/21)	67
Figure 53 - Exemple de version intermédiaire - 19/04/21.....	68
Figure 54 - Logigramme 1ère version - 04/01/21	69
Figure 55 - Logigramme 2ème version - 18/05/21.....	71
Figure 56 - Logigramme 3ème version - 15/06/21.....	73
Figure 57 - Vue d'ensemble de l'évolution du logigramme	75
Figure 58 - Logigramme final - 30/06/21	76
Figure 59 - Version miniature de la check-list	78
Figure 60 - Étape 1 du logigramme.....	83
Figure 61 - Mapping plan.....	84
Figure 62 - Mapping coupe	84
Figure 63 - Relevé photographique – visite de chantier à la gare de Ans (7/04/21)	85
Figure 64 - Étape 2 du logigramme.....	86
Figure 65 - Position Scénario 2	86
Figure 66 - Position Scénario 1	86
Figure 67 - Position Scénario 3	86
Figure 68 - Disponibilité géographique.....	88
Figure 69 - Grue sur rail à la gare de Ans	88
Figure 70 - Grue sur rail - KRC 810 125t	88
Figure 71 - Illustration du passage de l'étape 2 à l'étape 3 du logigramme.....	89
Figure 72 - Étape 3 du logigramme.....	89
Figure 73 - Schéma du système élingage - Scénario 1	89
Figure 74 - Plan de préhension des cœurs d'appareils de voie	89
Figure 75 - Diagramme de charge - GMK 3060	90
Figure 76 - Diagramme de charge - LTF 1060-4.1	91
Figure 77 - Coupe Position initiale - GMK 3060.....	92
Figure 78 - Coupe Position finale - GMK 3060	92
Figure 79 - Rayon max - GMK 3060	92
Figure 80 - Rayon max - LTF 1060-4.1	92
Figure 81 - Zone de collision entre flèches	92
Figure 82 - Pression d'appui en charge.....	93
Figure 83 - Étape 3 du logigramme.....	94
Figure 84 - Schéma système d'élingage - Scénario 2	94
Figure 85 - Diagramme de charge - LTM 1120-4.1	95
Figure 86 - Ballast - LTM 1120-4.1	96
Figure 87 - Rayon max – Scénario 2	97
Figure 88 - Pression d'appui en charge.....	97
Figure 89 - Étape 1 du logigramme.....	100
Figure 90 - Photo de l'ancien pont de Tilff.....	100
Figure 91 - Pont en coupe transversale	100
Figure 92 - Pont en élévation ouest et en plan	101
Figure 93 - Schéma des propositions de découpe d'une structure	101
Figure 94 - Mapping plan.....	104
Figure 95 - Mapping coupe A-A'	104
Figure 96 - Relevé photographique – visite de chantier à Tilff (23/06/21).....	105
Figure 97 - Étape 2 du logigramme.....	106
Figure 98 - Hypothèses sur les positions.....	106
Figure 99 - Première estimation des portées pour les 4 scénarios.....	108
Figure 100 - Illustration du passage de l'étape 2 à l'étape 3 du logigramme.....	112
Figure 101 - Étape 3 du logigramme.....	112
Figure 102 - Plan - Scénario 1	113

Figure 103 - Zone de stockage - Scénario 1	113
Figure 104 - Coupe BB' : vérification des dégagements	113
Figure 105 - Chronologie du levage en élévation - Scénario 1	114
Figure 106 - Retour à l'étape de calcul de la capacité de levage	114
Figure 107 - Configuration sortie du logiciel Liccon	115
Figure 108 - Modification des conditions du site	115
Figure 109 - Schéma de la pente du nouveau pont	116
Figure 110 - SPMT Kamag K24 de chez Sarens	117
Figure 111 - Zone de stock	117
Figure 112 - Trajet : chantier - entrepôt	117
Figure 113 - Entrepôt Galère à chênée	117
Figure 114 - Étape 1 du logigramme	121
Figure 115 - Parc éolien	121
Figure 116 - Vestas V100 – 9 éléments	122
Figure 117 - (a) Accès au site de l'ET4 et (b) pente d'un site	124
Figure 118 - Mapping - plan	125
Figure 119 - Sites visités	125
Figure 120 - Site 1 visite de chantier 17/03/21	126
Figure 121 - Site 3 visite de chantier 17/03/21	127
Figure 122 - Site 4 visite de chantier 22/03/21	128
Figure 123 - Étape 2 du logigramme	129
Figure 124 - Présélection sur base d'une fiche technique	130
Figure 125 - Concepts pour l'énergie éolienne de chez Liebherr	131
Figure 126 - Étape 3 du logigramme	132
Figure 127 - Ensemble des configurations d'équipement de la grue SL3280 et dessin d'une grue sur chenilles	132
Figure 128 - (a) Sollicitations du vent et (b) Influence de la rugosité et des obstacles du paysage	134
Figure 129 - Formule de réduction de la vitesse du vent admissible	134
Figure 130 - Exemples de plans de levage site 1	135
Figure 131 - Élévation des différents éléments à lever	135
Figure 132 - Montage flèche treillis	136
Figure 133 - Logigramme final - 30/06/21	137
Figure 134 - Version miniature de la check-list	137

Table des tableaux

Tableau 1 - Tableau des pressions admissibles	27
Tableau 2 - Tous les modèles LTM et LR regroupés en gamme d'utilisation.....	28
Tableau 3 - Grues mobiles sur porteur et sur chenilles disponibles chez Terrex-Demag	30
Tableau 4 - Tous les modèles GMK regroupés en gamme d'utilisation	30
Tableau 5 - Un tableau de charge de la grue sur porteur AC700	32
Tableau 6 - Avantages et inconvénients d'un levage en tandem	34
Tableau 7 - Caractéristiques générales du processus de sélection d'une grue	37
Tableau 8 - Grues disponibles – Données de l'algorithme de Furusaka & Gray	44
Tableau 9 - Catégories et facteurs de la matrice de sélection.....	48
Tableau 10 - Résultats de la matrice pour un cas d'étude	49
Tableau 11 - Facteurs ayant un effet sur la sélection du type de grue	50
Tableau 12 - Attribution d'un qualificatif aux facteurs dynamiques	51
Tableau 13 - Intérêts des différentes méthodes	52
Tableau 14 - Question 22 du questionnaire.....	54
Tableau 15 - Définitions du processus de sélection d'une grue (question à choix multiples)	58
Tableau 16 - Classement préférentiel des étapes lors de la phase de calcul.....	60
Tableau 17 - Ordre d'importance des informations figurant sur un plan de levage.....	61
Tableau 18 - Classement préférentiel des facteurs en rapport avec la criticité d'un levage	61
Tableau 19 - Nature de l'échantillon des entretiens	62
Tableau 20 - Synthèse des informations relevées lors des entretiens.....	63
Tableau 21 - Visites de chantier	64
Tableau 22 - Différentes configurations de télescopage « + »	65
Tableau 23 - Résultats du tableur pour une portée de 14m et une charge de 21,5t.....	79
Tableau 24 - Étape 5 du logigramme - Grille d'optimisation du choix	80
Tableau 25 - Liste des facteurs avec l'échelle de pondération et les qualificatifs	81
Tableau 26 - Exemple de grille d'optimisation du choix appliquée au cas d'étude 1.....	82
Tableau 27 - Tableau résumé de la présélection pour chaque scénario	87
Tableau 28 - Hypothèses corrigées - Scénario 1	89
Tableau 29 - Facteurs techniques - Scénario 1	90
Tableau 30 - Tableau de charge - GMK 3060.....	90
Tableau 31 - Tableau de charge - LTF 1060-4.1.....	91
Tableau 32 - Configurations des grues - Scénario 1	91
Tableau 33 - Hypothèses corrigées - Scénario 2	94
Tableau 34 - Facteurs techniques - Scénario 2.....	95
Tableau 35 - Tableau de charge - LTM 1120-4.1	95
Tableau 36 - Configuration de la grue - Scénario 2 Option A	96
Tableau 37 - Tableau de charge - LTM 1200-5.1	96
Tableau 38 - Tableau de charge - AC-200	96
Tableau 39 - Configurations des grues - Scénario 2 Option B.....	97
Tableau 40 - Grille de pondération des facteurs appliquée au cas d'étude 1	98
Tableau 41 - Proposition 1 de découpage	102
Tableau 42 - Proposition 3 de découpage	102
Tableau 43 - Combinaisons des variables (case bleue = compatible).....	107
Tableau 44 - Résultats du tableur - Scénario 1.....	109
Tableau 45 - Résultats du tableur - Scénario 2.....	109
Tableau 46 - Résultats du tableur - Scénario 3.....	110
Tableau 47 - Résultats du tableur - Scénario 4.....	110
Tableau 48 - Grues présélectionnées pour les différents scénarios.....	111
Tableau 49 - Facteurs techniques - Scénario 1	112
Tableau 50 - Configuration - Scénario 1	112

Tableau 51 - Facteurs techniques - Scénario 1	114
Tableau 52 - Configuration - Scénario 1	114
Tableau 53 - Facteurs techniques et configuration du Scénario 3.....	116
Tableau 54 - Facteurs techniques et configuration du Scénario 4.....	118
Tableau 55 - Grille de pondération des facteurs appliquée au cas d'étude 2	119
Tableau 56 - Données sur les éléments à lever	122
Tableau 57 - Extrait du planning de levage.....	129
Tableau 58 - Grues compatibles	131
Tableau 59 - Tableau et diagramme de charge.....	133

I. Introduction

Dans un monde en perpétuelle mutation, le domaine de la construction relève des défis de conception toujours plus complexes. Pour accomplir ces prouesses techniques, les constructeurs font appel à un secteur à part entière : celui des appareils de levage. Les grues occupent une place essentielle au sein de ce secteur car elles assurent la circulation aérienne des matériaux et du matériel sur un chantier.



Figure 1 - Photo d'un levage à Rocourt (cf. annexe 1 : visite de chantier)

(Source : Mincke F., 2021)

Les enjeux liés au processus de sélection d'une grue sont majeurs car d'une part, la sécurité des opérations doit être assurée et, d'autre part, la sélection du modèle de grue la plus adéquate permet d'améliorer l'efficacité des projets, le respect du planning et donc des coûts.

• **Objet de la recherche**

Selon la revue de la littérature, le processus de sélection d'une grue ne serait pas uniquement basé sur un examen logique des facteurs techniques mais, comme le précisent Shapira & Glascock (1996), reposerait également sur d'autres aspects devant être pris en compte. Les facteurs qui influencent le choix de la grue sont nombreux et certains sont difficiles à quantifier (Sawhney & Mund, 2002).

Malgré les méthodes proposées par des chercheurs visant à faciliter la sélection de grues grâce à l'outil informatique, de nouvelles attentes émergent concernant une méthode qui intégrerait la complexité du processus de sélection. En outre, les ingénieurs en charge du levage s'appuient essentiellement sur leurs compétences et leur expérience professionnelle pour effectuer le choix de la grue la plus appropriée à chaque projet, ce qui aboutit à un manque de formalisation de ce processus de sélection.

Dès lors, la question de recherche suivante s'impose :

*Comment **optimiser** le choix d'une grue mobile
via une représentation détaillée du **processus de sélection** ?*

Pour optimiser le choix d'une grue, ce travail propose d'abord d'analyser son processus de sélection en saisissant ses caractéristiques générales et, dans un second temps, en appréhendant ses différentes étapes ainsi que leurs interactions. Par la clarification et la formalisation du processus de sélection d'une grue mobile, ce travail présente une méthode composée de quatre outils :

- Un logigramme permettant de comprendre le chemin de réflexion nécessaire à la sélection ;
- Une check-list détaillant chaque élément qui compose le logigramme ;
- Un tableur Excel facilitant l'étape de présélection ;
- Une grille d'optimisation du choix.

Cette méthode est essentiellement conçue comme un outil pour les jeunes ingénieurs débutant dans le domaine du levage. Elle peut néanmoins répondre à certaines questions que des professionnels du secteur de la construction se poseraient.

• **Structure du travail**

Avant de commencer à répondre pleinement aux objectifs fixés par ce travail, nous fournirons préalablement, dans la première partie de **l'état de l'art** (chapitre 2), une description générale des grues visant à rendre leur fonctionnement compréhensible sans entrer dans la complexité électromécanique de l'ensemble. Des indications concernant le choix et l'exploitation des grues sont également exposées. La deuxième partie de l'état de l'art portera sur la revue de la littérature concernant le processus de sélection d'une grue.

Ensuite, le chapitre 3 sera consacré à la **méthodologie** mise en œuvre pour permettre de répondre à la question de recherche. Celle-ci repose sur la récolte de données via un questionnaire et des entretiens avec des professionnels du domaine du levage ainsi que sur des visites de chantier. Le chapitre 4 de ce travail portera sur l'analyse thématique des **résultats**, suivie par la **présentation des outils** d'aide proposés (chapitre 5). Trois **cas d'étude** seront alors présentés pour illustrer l'application des outils élaborés et leurs caractéristiques (chapitre 6). Enfin, une **discussion** sur la méthode suivie d'une **conclusion** clôturera ce travail (chapitres 7 et 8).

II. État de l’art

Partie 1 - Le domaine du levage

1. Introduction

De tout temps, l’homme a cherché des méthodes pour déplacer des masses impossibles à manutentionner à force de bras. À partir du principe du levier, en passant par différentes inventions comme le traineau, la poulie et la chèvre à trois pieds développés durant l’Antiquité, on voit apparaître au Moyen Âge l’ancêtre de la grue moderne : la grue à cage d’écureuil. Ce mécanisme est constitué d’un tambour à l’intérieur duquel un homme doit marcher. Cette action, comme le moteur moderne, entraîne l’ensemble et enroule le câble de levage. Ce système décuple la force de levage et permet de soulever jusqu’à une tonne (Bernardoni & Neuwahl, 2014).

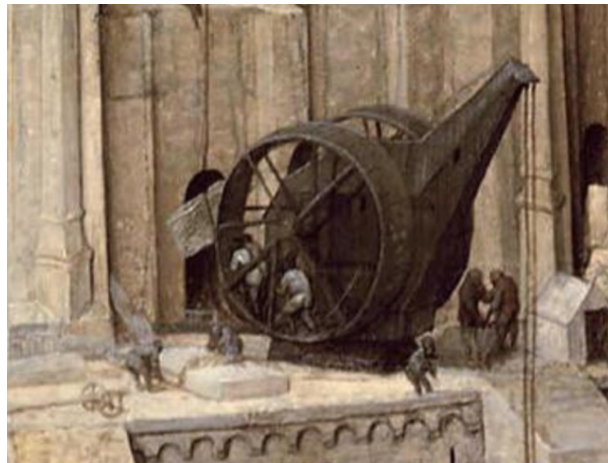


Figure 2 - Grue à cage d’écureuil (ancêtre de la grue moderne)

(Source : Bernardoni & Neuwahl, 2014, Les engins de chantier de Léonard de Vinci)

Depuis, les innovations techniques n’ont cessé d’évoluer vers les appareils de levage que nous connaissons aujourd’hui. L’évolution des grues est liée à l’augmentation de leur capacité de levage, qui a fortement augmenté à partir des années 1970 grâce à l’utilisation d’un acier très résistant pour les composantes des appareils de levage (Liu *et al.*, 2008).

Pour ne prendre que quelques exemples, nous pouvons mentionner les ponts roulants pour l’industrie, les ponts portiques pour les ports, la grue console (tournante, tournante à pivot, à colonne tournante, tournante à colonne fixe, à plate-forme tournante...), la grue Derrick, la grue Blondin, la grue flottante ou encore la grue à flèche relevable et la grue à vapeur, deux ancêtres des grues mobiles actuelles (Rousselet, 1932).

Les chantiers qui recourent à des appareils de levage sont divers et variés. Il existe des types de grue pour tous les usages. Ce travail se concentrera sur les grues mobiles qui, par leur polyvalence, conviennent pour de nombreux chantiers.

2. Types de grues mobiles

Les grues mobiles peuvent être employées aussi bien pour des interventions de levage simple, ponctuel et/ou de charge réduite, que pour des levages complexes, répétitifs et/ou de charge lourde. Ces appareils de levage, travaillant en porte à faux et à charge suspendue, sont conçus pour reprendre des efforts induits par la gravité de l'élément à lever. Ce dernier est suspendu par l'intermédiaire d'une membrure appelée flèche (Pelletier, 1999).

Il existe trois types de grues mobiles : les grues automotrices compactes, les grues mobiles sur porteur et les grues mobiles sur chenilles. Cette dernière peut être installée sur sol ou sur barge.

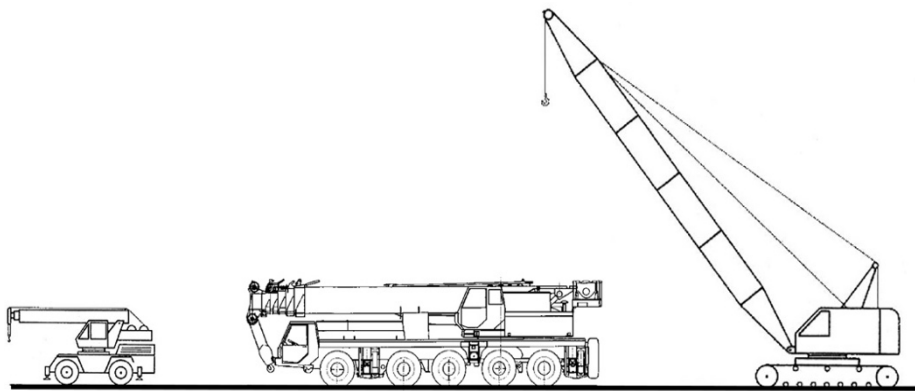


Figure 3 - Types de grue mobile

(Source : Pelletier C., 1999, p.7; Augoyard J.-P. & Lecoq A., 1992, p. 3) (Modifiée par Mincke F., 2021)

2.1. Grue automotrice compacte

Appelées « grues parc » à cause de leur dimension réduite, ces grues sont caractérisées par un seul poste dédié à la manœuvre de la grue et à la conduite du véhicule. Sa capacité de levage est limitée par rapport aux deux autres types de grue mobile. Les problématiques liées à ces grues de petites tailles ne seront pas abordées dans ce travail.



Figure 4 - Grue automotrice (LTC 1050-3.1)

(Source : <https://www.liebherr.com/fr/bel/actualités/news-communiqés-de-presse/detail/liebherr-présente-la-nouvelle-grue-mobile-compacte-ltc-1050-3.1-sur-le-salon-intermat-2015.html>)

2.2. Grue mobile sur porteur

Appelée « grue taxi » pour sa rapidité d'installation et de mise en œuvre, cette grue bénéficie d'une grande souplesse et s'adapte aux emplois les plus variés. Il existe un grand nombre de modèles différents (cf. chapitre II partie 1 section 5.1).

Ces grues sont dotées de deux cabines distinctes pour la manœuvre de la grue et la conduite du véhicule. Elles peuvent être conduites sur la route pour autant qu'elles ne dépassent pas la réglementation de 12 tonnes maximum par essieu. Cependant, elles ne peuvent pas se déplacer avec la charge suspendue en tête de flèche, ni avec leur flèche principale relevée, ni avec un équipement en tête de flèche.



Figure 5 - Grue mobile sur porteur (LTM 1750-9.1)

(Source : <https://vertikal.net/en/news/story/34158/liebherr-uprates-ltm-1750-91>)

Le pneumatique de la grue n'est pas dimensionné pour reprendre les efforts sous charge, c'est pourquoi celle-ci est dotée de stabilisateurs. L'extension de ces stabilisateurs est réalisée soit en H, soit en X en fonction des machines (cf. figure 6). Plus cette extension est grande, plus la capacité de levage s'accroît. Le calage des patins de la grue permet également de correctement positionner la grue en corrigeant (dans une mesure relative) un sol qui ne serait pas de niveau (Pelletier, 1999).

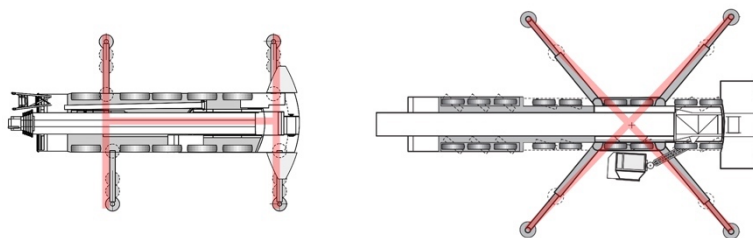


Figure 6 - Stabilisateurs en H ou en X

(Source : fiche technique AC200, p.2 ; et fiche technique AC750, p.2) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Les contrepoids de la machine, le moteur avec son treuil et son dispositif de freinage mais aussi et surtout sa flèche, sont disposés sur une plate-forme pivotante par rapport au châssis. Cet ensemble permet de satisfaire les mouvements du levage (cf. chapitre II partie 1 section 4.2).

Il existe deux types de flèche principale : les flèches treillis et les flèches télescopiques. Ces flèches sont conçues pour lever la charge verticalement. Si des forces horizontales s'ajoutent lors du levage, les efforts de flexion peuvent engendrer des problèmes de sécurité.

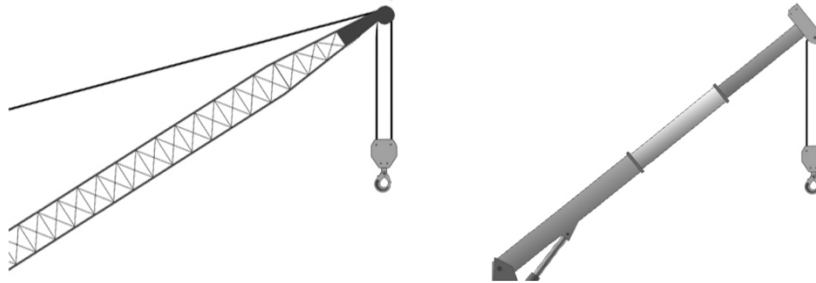


Figure 7 - Flèche treillis et flèche télescopique

(Source : Artarit F.-X., 2018, p. 13) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Les grues mobiles sur porteur sont, pour la plupart, équipées de flèches télescopiques. Ces flèches sont constituées de caissons mécano-soudés emboîtés les uns dans les autres. Leur avantage réside dans le fait que leur longueur est facilement ajustable en fonction du travail à effectuer. Ce type de flèche est peu encombrant et idéal pour les déplacements routiers.

2.3. Grue mobile sur chenilles

Ces grues sont généralement utilisées pour des levages lourds. Grâce à leur large surface de contact avec le sol, elles ont pour avantage d'exercer une faible pression au sol. Bien que, pour des questions de sécurité, les levages en position fixe soient préférés, le fait de pouvoir se mouvoir avec la charge suspendue en tête de flèche est un autre avantage de ces grues mobiles sur chenilles (Augoyard & Lecoq, 1992).



Figure 8 - Grue mobile sur chenilles (LR 500)

(Source : <https://www.liebherr.com/fr/bel/produits/grues-mobiles-et-sur-chenilles/grues-sur-chenilles/grues-sur-chenilles-lr/lr-1500.html>)

En revanche, ces grues sont encombrantes et leur transport est difficile. Elles ne peuvent pas être conduites sur la route car leur vitesse de déplacement est faible et les chenilles dégradent le bitume. Il faut dès lors transporter les différents éléments sur plusieurs camions.

Les grues mobiles sur chenilles sont, pour la plupart, équipées de flèches treillis. Ces flèches de section carrée sont constituées de membrures et de treillis en acier (en forme de tubes ou de cornières). Ces flèches sont performantes grâce à leur légèreté et leur flexibilité. Cependant, le montage et le démontage de celles-ci demandent beaucoup de temps. Encombrantes, elles ne sont dès lors pas facilement transportables.

Ces flèches se décomposent en trois parties distinctes : le pied (le point de pivot), la tête et la partie courante. Cette dernière est composée d'éléments standards de charpente métallique placés bout à bout afin d'obtenir la longueur de flèche voulue. À cet endroit vient également s'accrocher le hauban qui soutient la flèche.

2.4. Grue sur barge

La différence entre une grue terrestre et une grue sur barge réside dans le fait que la fondation de la grue sur barge, la plateforme, modifie son assiette en fonction du moment de la charge et de la position de la grue (Ernst, 1961).

La catégorie des grues sur barge comprend les bigues mais aussi les grues mobiles que l'on place sur des barges (il s'agit généralement de grues sur chenilles). Les barges sont généralement dépourvues de propulsion et doivent être amenées sur le chantier. Elles sont ensuite déplacées sur l'eau par le biais d'un « bateau pousseur ».

L'avantage des grues sur barge réside dans l'utilisation des conditions de site (la voie d'eau) qui permet de se rapprocher de l'élément à lever. Elles sont utilisées pour :

- La construction de bassins, de barrage, de quais, de môles, de ponts,... ;
- L'édification de bâtiments importants à proximité de la berge (entrepôts, etc.) ;
- Le transbordement de marchandises (permettant de libérer les quais d'un port) ;
- Les chantiers navals (pour la réparation de bateaux) ;
- Lever/récupérer des navires coulés.

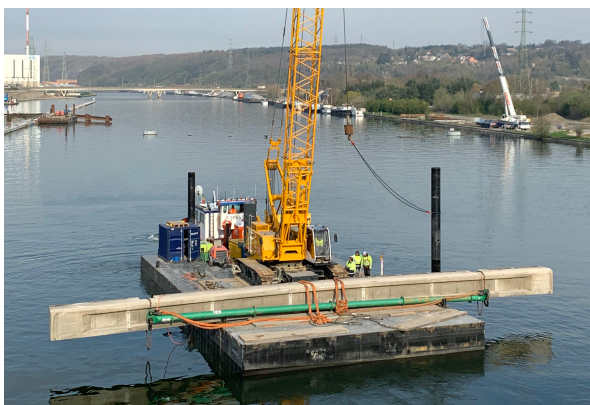


Figure 9 - Grue mobile sur chenilles utilisée sur barge (LR 1100)

(Source : Mincke F., 2021 cf. annexe 1 visite de chantier 9)



Figure 10 - Bigue utilisée pour lever un bateau (HEBO lift 6 et 7)

(Source : <http://www.trucks-cranes.nl/nederlands/hijskranen/hijsklussen/hebonassima.html>)

3. Équipements

Lors d'un levage avec une grue mobile, différents équipements sont présents. Certains d'entre eux sont nécessaires à la réalisation de tout levage, comme les équipements de préhension de la grue ainsi que le matériel qui compose le système d'élingage, ou encore les plaques de répartition des efforts au sol qu'il faut placer en dessous des patins/chenilles de la grue. D'autres équipements peuvent être ajoutés en fonction des besoins, comme le nombre de plaquettes de ballast à ajouter pour le levage et les équipements complémentaires de flèche (Vuillerme & Richaud, 2002).

3.1. Équipements complémentaires de flèche

Ces équipements complémentaires de flèche ont soit pour vocation d'augmenter la portée/la hauteur de la flèche, soit d'augmenter la capacité de levage. Il existe différents équipements de ce type ; les plus courants vont être exposés ci-après.

La fléchette est une structure treillis légère qu'on ajoute à la tête de flèche afin d'augmenter la longueur de la flèche. Son angle par rapport à la flèche permet de passer au-dessus des obstacles. Il existe des fléchettes fixes et des fléchettes pliantes et ces extensions peuvent, pour certains modèles de grue, être stockées le long de la flèche.

La volée variable est un équipement qui permet de satisfaire de grandes portées (définition de portée cf. section 4.1). Il est possible de faire varier son angle de calage sans modifier la position de la flèche principale. Ceci est rendu possible grâce à un treuil auxiliaire qui est relié aux haubans fixes de la volée (représentés en bleu sur la figure 12), les haubans étant, dans ce cas-ci, des tubes métalliques qui stabilisent la volée. Les volées variables sont des équipements employés sur des grues ayant une grande capacité de levage.

Ces équipements peuvent aussi bien être employés pour une grue mobile sur porteur que pour une grue sur chenilles.

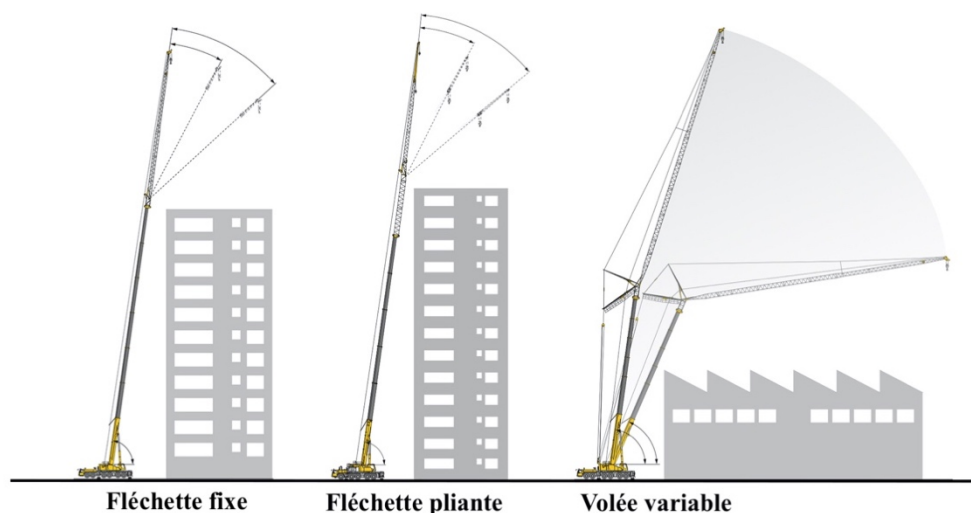


Figure 11 - Équipement complémentaire de flèche

(Source : Liebherr, 2016, aperçu de la technique des grues mobiles, p.31, 34 & 35)

Pour certaines grues mobiles sur porteur équipées d'une flèche télescopique, il est possible d'augmenter la capacité de levage et d'améliorer la stabilité latérale à l'aide d'un dispositif d'haubanage de flèche en « Y » dénommé « spanlift ». Ce système est représenté en rouge sur la figure 12. En bleu sont représentés les câbles métalliques qui relient l'équipement au pied et à la tête de flèche (dans ce cas-ci à la rallonge de flèche).



Figure 12 - Grue mobile sur porteur équipée d'une volée variable et d'un spanlift

(Source : Groupe Dufour, 2020, mode opératoire montage/démontage LTM 1750, p.1) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Pour les grues sur chenilles équipées de flèche treillis, il existe des superlifts qui permettent d'augmenter la capacité de levage. Ce système est constitué, dans ce cas-ci, d'un contrepoids supplémentaire à l'arrière de la grue sur chenilles.

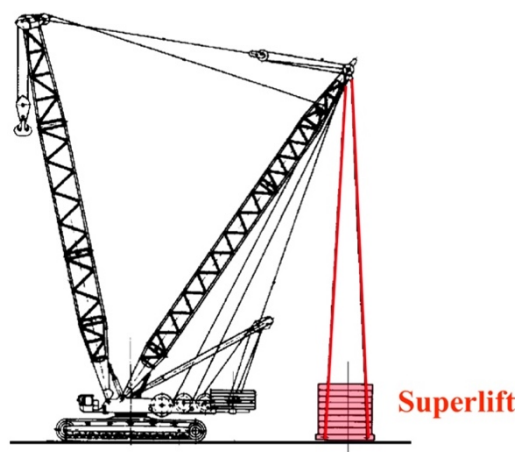


Figure 13 - Grue mobile sur chenilles équipée d'un superlift

(Source : Pelletier C., 1999, p.6) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Les grues sont équipées d'un anémomètre en bout de flèche et/ou d'un équipement de flèche qui donne à tout moment des informations sur les conditions météorologiques.

3.2. Équipement de préhension de la grue

Le mouflage est défini par « le nombre d'allers et de retours que fait le câble entre la tête de flèche et le moufle » (Pelletier, 1999, p.4). Cette technique se base sur le « principe de démultiplication de la force de levage grâce à des poulies » (Artarit, 2018, p. 92). Le mouflage permet d'augmenter la capacité de levage en sortie de treuil, d'utiliser des câbles de plus petit diamètre ainsi que des mécanismes plus légers.

Les moufles sont composés de plusieurs poulies (représentées en vert sur la figure 14). Les grues mobiles ont deux moufles : un moufle fixe situé en tête de flèche ou de toute extension de cette dernière, et un moufle mobile attaché au crochet. Ce dernier est doté d'un dispositif de sécurité dénommé « linguet » qui sert à éviter que l'élingue ne se détache. Le crochet permet de saisir le système d'élingage (défini au chapitre II partie 1 section 3.3) (Artarit, 2018).

Les câbles de levage (représentés en bleu sur la figure 14) sont composés d'un grand nombre de fils d'acier de haute résistance (Ernst, 1955). Quand le nombre de brins qui constituent le mouflage augmente, la force que doit fournir le treuil pour lever une charge diminue.

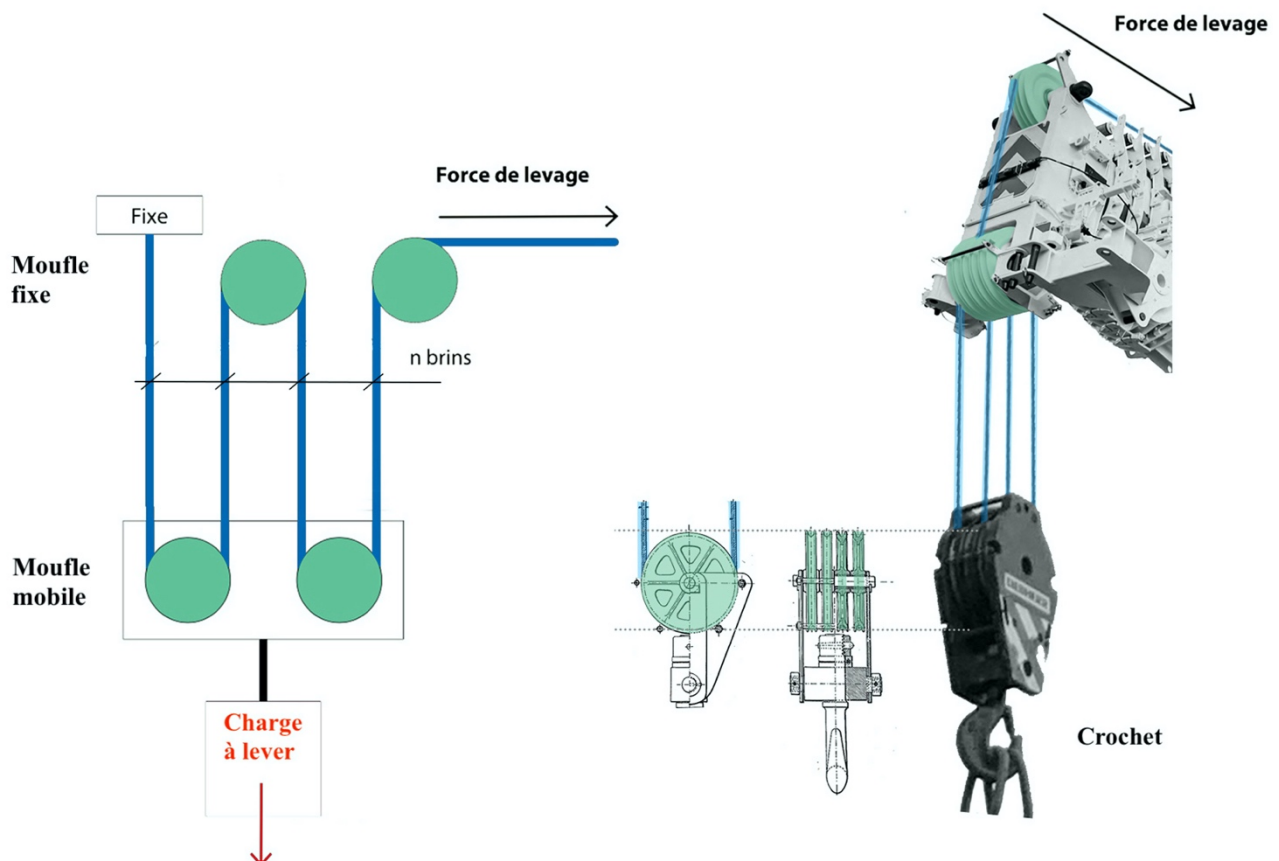


Figure 14 - Schéma du mouflage

(Sources : Magazine Liebherr Up Load, 2020, p.22 ; Rousselet L., 1932, p.255 ; Artarit F.-X, 2018, p. 92) (Modifiées par Mincke F., 2021)

3.3. Système d'élingage

L'« élingage » est l'action qui consiste à attacher une charge en vue de la lever. Le système d'élingage est composé de différents éléments qui font le lien entre la charge et le crochet de la grue (Artarit, 2020).

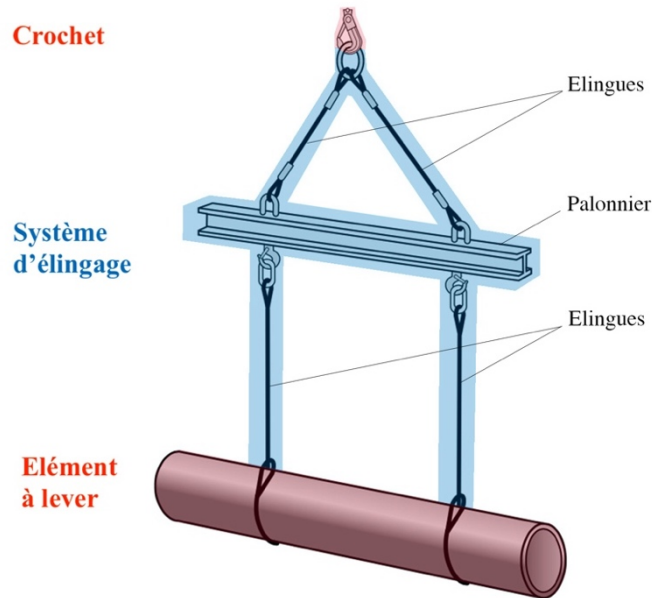


Figure 15 - Schéma d'un système d'élingage

(Source : Artarit F.-X, 2020, p.49) (Modifiée par Mincke F., 2021)

La stabilité de l'élément à lever au cours de l'opération dépend de son mode d'élingage. Une analyse doit dès lors être menée afin de déterminer les spécificités de l'élément à lever, à savoir : les dimensions, la charge, le centre de gravité, la présence ou non d'arêtes vives etc. Ces informations vont conditionner le système d'élingage. La complexité du système dépend donc de l'élément à lever (Anderson, 2016).



Figure 16 - Élingage complexe

(Source : https://www.linkedin.com/posts/a16-rotterdam_a16rotterdam-tunnel-heavylifting-activity-6771043387266101248-Tu-g)

Les élingues sont soit des chaînes, soit des câbles, soit du nylon tissé. Ces éléments sont généralement de longueurs fixes mais, dans certains cas de levage, il faut recourir à des élingues à chaînes spéciales dont il est possible de faire varier la longueur en cours de levage (Didier *et al.*, 2009).

Les élingues en nylon tissé sont majoritairement utilisées car elles ont pour avantage d'être plus légères et plus faciles à mettre en oeuvre que les autres types d'élingue. Les élingues ont une forme de gorge à leurs extrémités qui sont destinées à recevoir des manilles ou le crochet de levage.

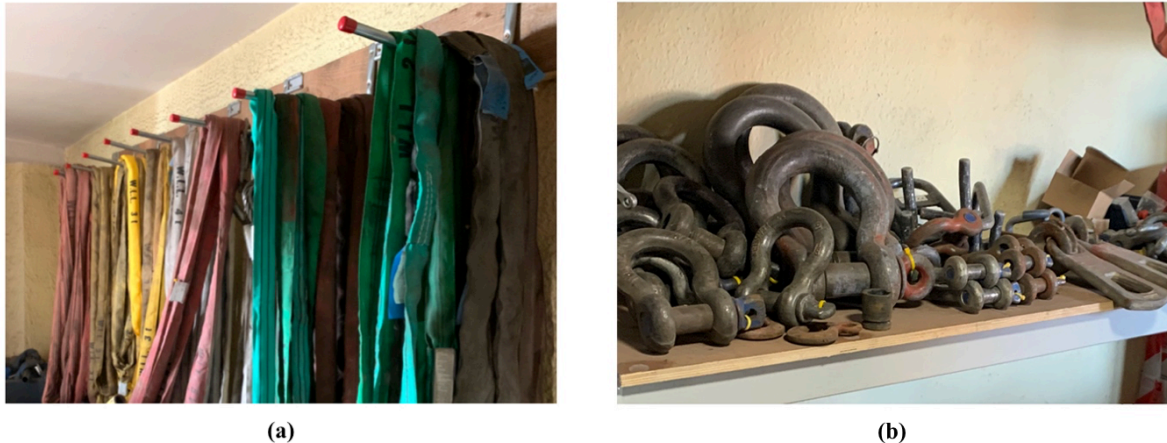


Figure 17 - (a) Élingues en nylon et (b) manilles au stock de chez J.Boutique

(Source : Mincke F., 2021)

La charge maximale qu'une élingue peut supporter est spécifiée sur cette dernière. Pour les câbles, cette charge est indiquée soit sur le manchon de sertissage, soit sur une languette. Pour les élingues en nylon, on peut connaître la charge maximale par leur couleur, par le nombre de lignes noires et par les inscriptions dont elles sont pourvues sur leur tranche.

Il faut prêter attention à l'influence de l'angle que les élingues forment avec la verticale sur les efforts qu'elles reprennent. En effet, plus les élingues sont inclinées, plus l'effort qu'elles doivent reprendre est grand. L'angle maximum autorisé pour les brins des élingues avec la verticale est de 60° (Anderson, 2016).

Pour réduire cet angle d'élingage et diminuer la tension dans les élingues, on emploie généralement des palonniers. Ce matériel permet aussi de réduire la hauteur du système d'élingage et la hauteur sous crochet (notion définie au chapitre II partie 1 section 4.1). Les palonniers sont aussi utilisés pour soutenir en plusieurs points intermédiaires les charges de grandes dimensions.

Nous n'aborderons que des cas où seul du matériel d'élingage est adjoint au crochet pour lever des charges. Toutefois, il existe divers équipements à adjoindre au crochet de la grue en fonction des usages, comme, par exemple, les pinces et griffes (pour faciliter la prise de la marchandise : ballots, rails, tôles, pierres...), les bennes (pour le transport de marchandises en vrac telles que le gravier, le sable...), les électroporteurs (transport de lingots, ferraille...) (Rousselet, 1932).

4. Caractéristiques des grues mobiles

4.1. Facteurs techniques dimensionnants

Ces facteurs techniques sont définis comme étant les paramètres qui conditionnent le choix d'une grue. Il s'agit de :

- La charge la plus lourde à soulever ;
- La plus grande portée à satisfaire ;
- La plus grande hauteur à atteindre.

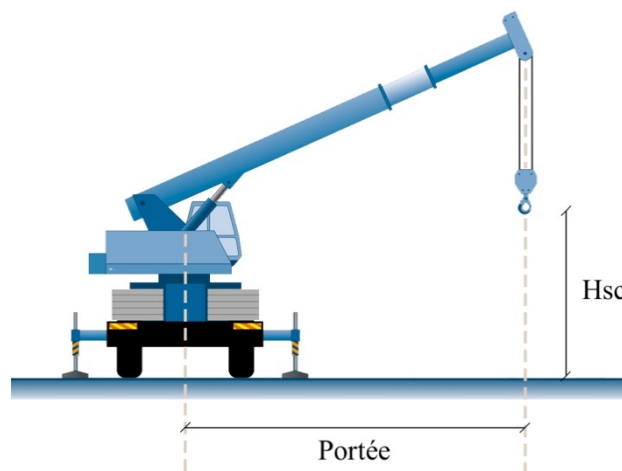


Figure 18 - Schéma portée et Hsc

(Source : Artarit F.-X., 2018, p. 60) (Modifiée par Mincke F., 2021)

La charge, la portée et la hauteur du levage sont liées et doivent être analysées de façon horizontale, c'est-à-dire simultanément, car une combinaison de ces dernières détermine la capacité de levage requise. En fonction du projet de levage, il se peut que ce soit tantôt la charge, tantôt la portée, tantôt la hauteur, ou une combinaison de ces dernières qui soit déterminante.

Définissons ces termes (Artarit, 2018, p. 40) :

- Portée: C'est la distance, sur le plan horizontal, entre l'axe d'orientation de la grue et l'axe du crochet. La portée dépend de la longueur et de l'inclinaison de la flèche.
- Hauteur sous crochet (Hsc): Cette hauteur est définie par la différence de niveau entre le crochet et les appuis de la grue.
- Capacité de levage: C'est la charge maximale d'utilisation d'une grue mobile pour une hauteur sous crochet et une portée donnée. Cette charge maximale dépend des conditions d'utilisation de la grue. Pour définir la capacité de levage d'une grue, on parle de charge maximale à portée minimale ou de charge minimale à portée maximale dans les fiches techniques du fabricant (cf. chapitre II partie 1 section 5).

Force est de constater que le choix d'une grue est un processus complexe qui ne dépend pas uniquement de ces facteurs techniques. Ce processus de sélection ainsi que les nombreux facteurs intervenant seront développés dans la partie 2 de l'état de l'art.

4.2. Mouvements

Les grues ont pour objectif premier de déplacer une charge. À cette fin, elles passent par différents mouvements qui sont décomposés ci-dessous pour une grue mobile sur stabilisateurs. Les éléments stationnaires sont représentés en rouge tandis que ceux en mouvements sont en bleu.

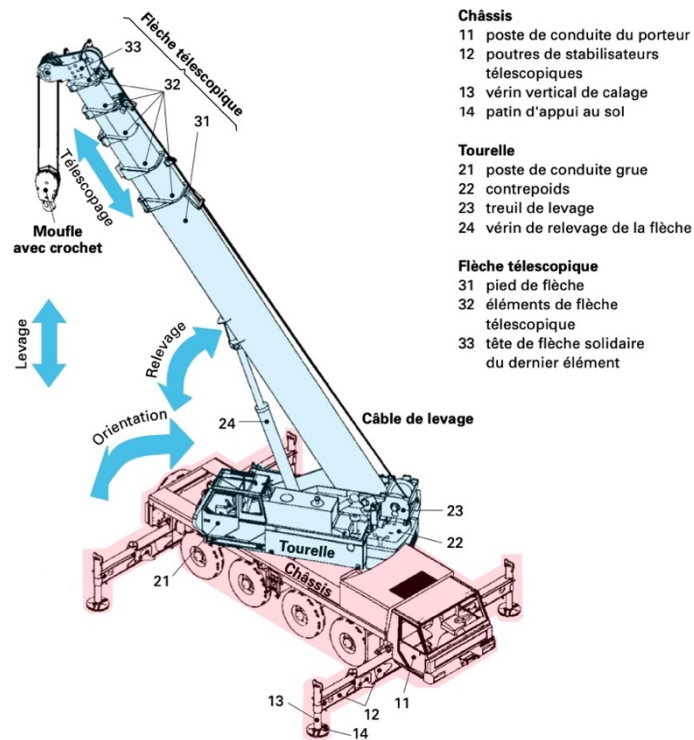


Figure 19 - Schéma des mouvements d'une grue mobile sur porteur

(Source : Pelletier C., 1999, p.2) (Modifiée par Mincke F., 2021)

- Le relevage et l'abaissement de la flèche sont des mouvements qui permettent de faire varier la portée de la grue (ainsi que la Hsc).
- La rotation consiste à faire pivoter l'ensemble constitué de la charge, de l'équipement et de la plate-forme autour d'un axe vertical par rapport au châssis (orientation sur 360°).
- Le levage et la descente consistent en des mouvements verticaux de la charge à l'aide du mécanisme de levage (le treuil de levage).
- Le télescopage est une modification de la longueur de flèche. Les grues équipées de flèche treillis ne peuvent effectuer ce mouvement. Le télescopage est rarement mobilisé lorsque la charge est suspendue au crochet (cf. chapitre IV section 3 visite de chantier 5).

Les grues sur chenilles sont en mesure de réaliser les 3 premiers mouvements. Elles peuvent également réaliser un mouvement de **translation** supplémentaire car elles peuvent se déplacer avec leur charge (Pelletier, 1999).

Ces mouvements mettent en lumière l'espace nécessaire pour faire évoluer la machine dans l'environnement. Les dégagements requis pour les obstacles éventuels influencent également le choix de la grue.

4.3. Stabilité

- Limite de stabilité

La capacité de levage est limitée par la stabilité de la machine et la résistance des éléments qui la composent (Pelletier, 1999). Cette stabilité est assurée tant que le moment de stabilité est supérieur à celui des moments de basculement. Le moment de stabilité est constitué des masses de la plateforme, du contrepoids et du châssis multipliées par la distance entre le centre de gravité du véhicule et le stabilisateur sollicité. Le moment de basculement est quant à lui constitué de la masse de la charge et de la masse de la flèche multipliées par la distance entre le centre de gravité de la charge et le stabilisateur sollicité (Artarit, 2018).

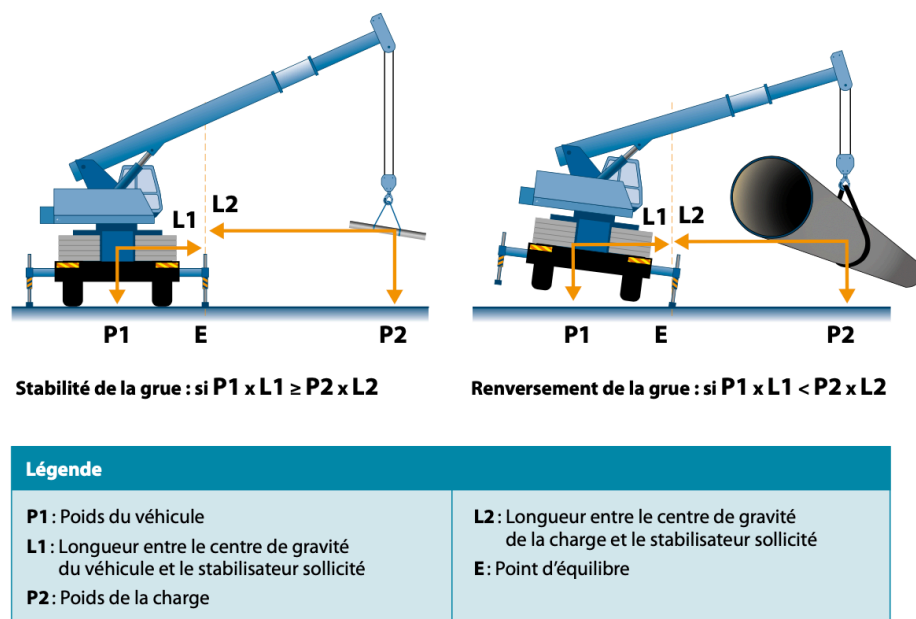


Figure 20 - Schéma du renversement

(Source : Artarit F.-X., 2018, p. 41)

L'empattement des stabilisateurs ainsi que les contrepoids favorisent la stabilité d'une grue mobile sur porteur. Pour une même grue, il existe différents tonnages de contrepoids additionnels ainsi que différentes positions de calage des stabilisateurs (cf. chapitre II partie 1 section 5). Plus la distance entre le centre de gravité du véhicule et le stabilisateur est grande, plus la capacité de levage de la grue est grande. Il en va de même pour l'emploi des contrepoids.

- Caractéristiques du sol

La stabilité de l'ensemble dépend aussi des caractéristiques du sol car les efforts doivent être repris par ce dernier. Plus la charge levée est lourde ou plus cette charge est levée à grande portée, plus la pression que la grue exerce sur le sol augmente. La pression étant le rapport de la force par la surface d'appui, il est possible d'ajouter, en dessous des stabilisateurs, des **plaques de calage** afin de répartir les charges dans le sol. Les grues sur chenilles exercent proportionnellement des pressions au sol plus faibles que les grues sur porteur grâce à leur large surface d'appui (Vuillerme & Richaud, 2002).

Lors de l'analyse des pressions d'appuis au sol, il est nécessaire de s'informer sur l'état du sol. Une analyse du sol *in situ* (sur base d'un essai de pénétration) ou une étude géotechnique (calcul à partir des propriétés de résistance du sol) peuvent être demandées pour déterminer la capacité portante admissible du sol (Liu *et al.*, 2008). La résistance du sol est fonction de sa composition et du degré de compacité de ses éléments constitutifs. Il faut faire attention aux tassements différentiels car ceux-ci peuvent favoriser les moments basculants précédemment énoncés (Artarit, 2018).

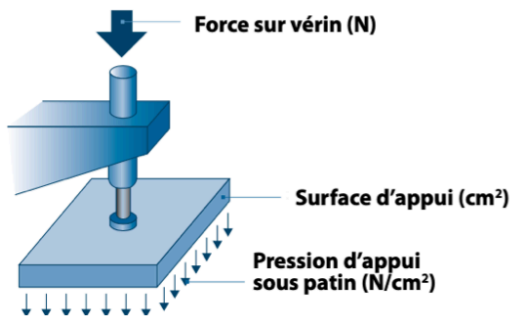


Figure 21 - Schéma de la pression au sol d'une grue mobile sur porteur

(Source : Artarit F.-X., 2018, p. 59)

	Nature du sol	Pression admissible (ordre de grandeur)	Observations
Pulvérulent	Sable fin (grain < 1 mm)	0,5 à 2 daN/cm ²	La pression admissible pour chaque catégorie est en fonction du serrage des grains (compacité).
	Sable grossier (grain de 1 à 3 mm)	2 à 3 daN/cm ²	
	Sable et gravier	3 à 4 daN/cm ²	
Cohérent	Marne ou argile molle (pétrissable, se roule à la main en petits cylindres de 3 mm de diamètre)	0,4 à 0,8 daN/cm ²	Sol non envahi par l'eau d'infiltration
	Marne ou argile mi-dure (ne peut se rouler en cylindre de 3 mm de diamètre sans se briser)	1,5 à 3 daN/cm ²	
	Marne ou argile dure (les mottes se brisent en morceaux)	3 à 4 daN/cm ²	
	Roche peu fissurée non désagrégée	10 à 30 daN/cm ²	Selon la nature de la roche et la structuration des couches

Tableau 1 - Tableau des pressions admissibles

(Source : Artarit F.-X., 2018, p. 59)

L'analyse de la composition d'un sol permet également d'identifier la présence ou non d'impétrants. Il faut éviter d'implanter une grue à proximité d'obstacles enterrés mais, si cela est inévitable, des mesures compensatoires¹ sont à prévoir (Didier *et al.*, 2009).

Un autre élément caractéristique d'un sol est sa pente. Pour positionner correctement la grue, l'horizontalité de cette dernière doit être assurée. Tout degré d'inclinaison des porteurs est à proscrire car ceux-ci favorisent le moment basculant de la grue. Dans la pratique, le châssis et la flèche de la grue se déforment sous l'effet d'un moment de flexion (cf. figure 96 relevé photographique du cas d'étude 2) et, dès lors, une inclinaison des porteurs peut s'observer (Laing & Halcrow, 2003).

• Grues sur barge

Les études de stabilité sont plus difficiles à réaliser pour les grues sur barges que pour les grues terrestres. L'inclinaison de la grue dans le sens longitudinal et transversal (dénommée la « bande » et ayant une valeur habituelle comprise entre 3 et 5°) crée des sollicitations supplémentaires pour la charpente dont il faut tenir compte. Le calcul de la stabilité doit également prendre en compte les mouvements du porteur qui est soumis à la houle (Artarit, 2018). La plateforme doit posséder au moins un franc-bord de 30cm minimum (hauteur du sol de la barge au-dessus du niveau de flottaison) (Ernst, 1961).

¹ Les mesures compensatoires : il peut s'agir de poutres ou de constructions temporaires afin de transférer les efforts loin des obstacles enterrés.

5. Fiches techniques

Tout constructeur fournit une fiche technique pour chacun de ses modèles de grue. Dans ces fiches figurent les diagrammes de charge et les tableaux de charge. Ces outils permettent à la personne en charge du mode opératoire de déterminer si le modèle de grue en question est doté d'une configuration adaptée au projet de levage.

5.1. Fabricants et classification

Il existe une grande variété de marques de grue sur le marché : Liebherr, Terrex-Demag, Manitowoc, Hitachi Sumitomo, Sennebogen,... (Berger, 2016). Les grues abordées dans ce travail sont essentiellement de marque Liebherr, Terrex-Demag et Manitowoc. Ces différentes grues sont utilisées par les sociétés de location telles que J. Boutique, MB manutention, Jungling et Havart. Ces compagnies exercent dans la province de Liège, mais nous pouvons également mentionner Dufour, Sarens ou encore Mammouth qui sont des compagnies de location au niveau international.



Figure 22 - Marques des grues abordées dans ce travail

(Source : <https://www.demagmobilecranes.com> ; <https://www.liebherr.com> ; <https://www.manitowoc.com>)

Lorsque l'on débute dans le domaine du levage, il est indispensable de s'informer sur les modèles de machines existant chez différents constructeurs. Le nom des machines est un cadre de référence pour les clients et les constructeurs. Ce cadre favorise le choix adéquat de la grue aux conditions de service pour lesquelles l'appareil est requis. La nomination des machines peut être définie en fonction de leur charge nominale, ou encore de leur tonne mètre (Pelletier, 1999).

• Chez Liebherr

Les dénominatifs LTM et LR sont respectivement attribués aux grues mobiles sur porteur dotées de flèches télescopiques et aux grues sur chenilles dotées de flèches treillis.

30t ≤ LTM < 200t				200t ≤ LTM < 500t		500t ≤ LTM		
LTM1030-2.1	LTM 1060-3.1	LTM 1100-4.2	LTM 1130-5.1	LTM 1230-5.1	LTM 1350-6.1	LTM 1500-8.1	LTM 11200-9.1	
LTM 1040-2.1	LTM 1070-4.2	LTM 1100-5.2	LTM 1160-5.2	LTM 1250-5.1	LTM 1400-7.1	LTM 1650-8.1		
LTM 1050-3.1	LTM 1090-4.2	LTM 1110-5.1		LTM 1300-6.2	LTM 1450-8.1	LTM 1750-9.1		
LTM 1055-3.2	LTM 1095-5.1	LTM 1120-4.1						
30t ≤ LR < 200t				200t ≤ LR < 500t		500t ≤ LR		
LR 1110				LR 1200.1	LR 1300.1 SX	LR 1500	LR 1750-1.0	LR 11000
LR 1130.1				LR 1250.1	LR 1300/1	LR 1600/2	LR 1750/2	LR 11350
LR 1160.1				LR 1350/1	LR 1400/2	LR 1600/2-W	LR 1880-1.0	LR 13000

Tableau 2 - Tous les modèles LTM et LR regroupés en gamme d'utilisation

(Source : Mincke F., 2021)

Sur base des modèles de LR et LTM disponibles, nous pouvons définir trois gammes d'utilisation en fonction de leur capacité nominale (en tonnes) : les grues de petite ($30t \leq \dots < 200t$), moyenne ($200t \leq \dots < 500t$) et de grande capacité de levage ($500t \leq \dots$).

On constate sur base du tableau 1 qu'il existe un grand nombre de modèles de LTM dont la gamme s'échelonne de la grue 30 tonnes à la grue 1200 tonnes de charge nominale. Il y a plus de modèle LTM dans la gamme de capacité réduite que dans la gamme de grande capacité. Afin de préciser leur dénomination respective, le nombre d'essieux est spécifié après le tiret ainsi que la version du modèle de grue après le point (1 = 1^{ère} version, 2 = 2^{ème} version).

Les modèles de grue LR sont des grues sur chenilles principalement dédiées aux levages lourds ; elles sont donc dotées d'un plus grand nombre de modèles dans la gamme de grande capacité.



Figure 23 - Exposition LR 13000

(Source : <https://www.equipmenthandbooks.com/2012/06/liebherr-lr-13000-on-crane-days/>)
(Modifiée par Mincke F., 2021)

La figure 23 représente de façon explicite la classe de capacité de la catégorie des grues sur chenille de chez Liebherr. On peut y voir leur grue mobile sur chenilles de plus grande capacité, la LR 13000 représentée en rouge sur la figure ci-dessous (capacité de levage maximale de 3 000 tonnes), qui lève 3 autres grues de leur flotte (respectivement la LR 11350 en bleu, la LR 1350 en vert et la LTR 1100 sans couleur).

Certains modèles des catégories LTF et LTR sont également utilisés dans les cas d'étude de ce travail (chapitre VI). Les LTF sont des grues mobiles sur porteur qui ont la particularité d'être montées sur un châssis de camion. Quant aux LTR, ce sont des grues mobiles sur chenilles à flèche télescopique qui sont généralement utilisées en grues d'appoint sur les chantiers.

• Chez Terrex-Demag

Les dénominatifs AC et CC sont respectivement attribués aux grues mobiles sur porteur et aux grues sur chenilles. Sur le tableau 2, on peut voir que la nomination des machines est fonction de la charge nominale pour les grues mobiles sur porteur mais pas pour les grues sur chenilles. Le nombre de modèles dont dispose Terrex-Demag est inférieur au panel offert chez Liebherr.

Comme chez Liebherr, le nombre d'essieux des grues sur porteur est précisé après le tiret. En revanche, ce fabricant ne précise pas la version de la grue. En effet, le dénominatif attribué en fonction des catégories peut varier entre une version plus récente et une version plus ancienne. C'est le cas pour la grue mobile sur chenille CC 3800-1 dont le nouveau modèle porte le nom de SL 3800-1 (grue rencontrée dans le cas d'étude 3 cf. chapitre VI section 3.).

Modèle	Classe de capacité t (USt)	Longueur max. de la flèche m (ft)	Essieux	Modèle	Capacité max. t (USt)	Hauteur de tête max. m (ft)
AC 45 City	45 (50)	31.2 (102.4)	3	CC 2400-1	400 (440)	168 (551)
AC 55-3	55 (60)	50.0 (164.0)	3	CC 2800-2	600 (660)	180 (591)
AC 60-3	60 (65)	50.0 (164.0)	3	CC 3800-1	650 (715)	192 (630)
AC 100-4L	100 (120)	59.4 (194.9)	4	PC 3800-1	650 (715)	192 (630)
AC 130-5	130 (140)	60.0 (197.0)	5	CC 6800-1	1250 (1375)	204 (669)
AC 160-5	160 (180)	68.0 (223.1)	5	CC 8800-1	1600 (1760)	240 (787)
AC 220-5	220 (245)	78.0 (255.9)	5	CC 8800-1 TWIN	3200 (3525)	234 (768)
AC 250-5	250 (300)	70.0 (229.7)	5			
AC 300-6	300 (350)	80.0 (262.5)	6			
AC 350-6	350 (400)	64.0 (210.0)	6			
AC 500-8	500 (600)	56.0 (183.7)	8			
AC 700-9	700 (800)	60.0 (197.0)	9			
AC 1000-9	1200 (1320)	50.0 (164.0) / 100.0 (328.1)	9			

Tableau 3 - Grues mobiles sur porteur et sur chenilles disponibles chez Terrex-Demag

(Source : <https://www.demagmobilecranes.com>)

Les tableaux récapitulatifs ci-dessus donnent une indication sur les longueurs de flèche maximales dont chaque modèle est pourvu. Cette information est utile lorsqu'on cherche un modèle de grue pour un projet de levage.

• Chez Manitowoc

Le dénominatif GMK est attribué aux grues mobiles sur porteur. Le libellé des grues sur chenilles n'est pas développé ici car elles n'ont pas été rencontrées dans le cadre de ce travail. La dénomination des machines est fonction de la charge nominale et le nombre d'essieux est ici placé après le dénominatif GMK. Ce fabricant n'est pas doté d'un large panel de grues et ne propose pas de grue de grande capacité.

30t ≤ GMK < 200t					200t ≤ GMK < 500t		
GMK3050-3	GMK3060L-1	GMK4090	GMK5150	GMK5180-1	GMK5250L-1	GMK6400	GMK7450
GMK3060-2	GMK4080-2	GMK4100L-1	GMK5150L		GMK5250XL-1	GMK6300L-1	

Tableau 4 - Tous les modèles GMK regroupés en gamme d'utilisation

(Source : Mincke F., 2021)

5.2. Diagramme de charge

Le diagramme de charge « donne dans un plan, pour chaque longueur d'équipement, la charge levée, avec, en abscisse, la portée maximale et, en ordonnée, la hauteur maximale sous crochet. Plusieurs digrammes sont nécessaires si les équipements sont nombreux » (Pelletier, 1999).

En observant ce diagramme, il ressort que pour une petite longueur de flèche, il est possible d'effectuer des levages lourds, tandis que pour une longueur de flèche maximale, il est possible d'effectuer des levages à grande hauteur ou de grande portée (Sacré, 2019).

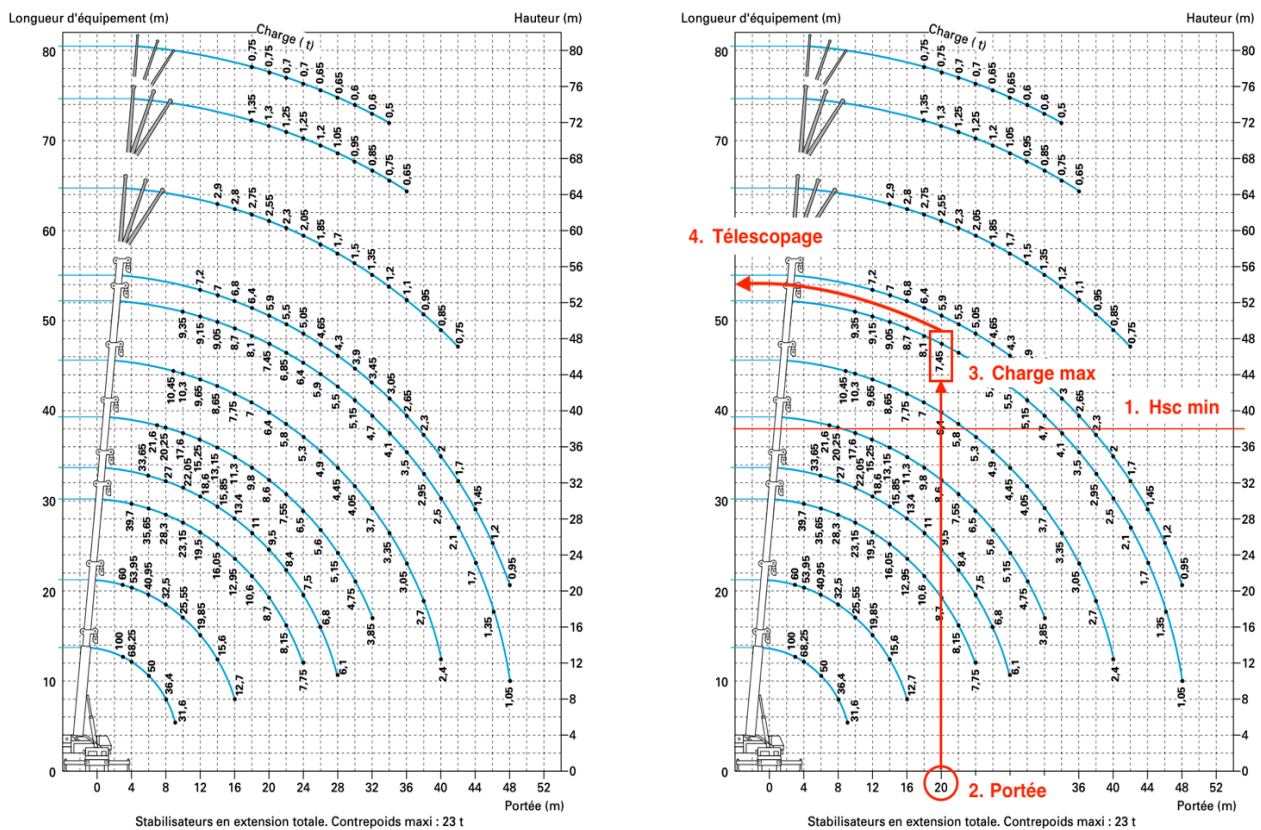


Figure 24 - Diagramme de charges avec les explications d'utilisation

(Source : Pelletier C., 1999, p.9) (Modifiée par Mincke F., 2021)

La longueur de flèche se mesure du centre de l'axe de pivotement de la flèche jusqu'à la tête de la flèche. Grâce à ce tableau, il est possible de comparer deux flèches de longueur différente. Force est de constater qu'à portée égale, la plus grande flèche aura une charge admissible inférieure à la flèche de longueur plus petite à cause de son élancement.

Pour le calcul de l'altimétrie, il faut tenir compte de l'encombrement de l'élément à lever et du système d'élingage. Afin de faciliter le travail du grutier dans la mise en oeuvre des mouvements de la grue, il est préférable d'avoir une tête de flèche un peu plus haute. On bénéficie ainsi d'une Hsc plus haute que l'Hsc minimale requise de sorte que le grutier pourra développer de plus amples mouvements de levage et de descente de la charge (Anderson, 2016).

Ce diagramme (exprimé sous SI système métrique) s'utilise comme suit :

Pour un élément à lever de charge donné (en tonnes), on regarde d'abord la portée (en mètres) à satisfaire ainsi que la hauteur sous crochet minimale (Hsc en mètres). On retrouve la charge maximale admissible sur la courbe qui satisfait les conditions de portée et d'Hsc. Si cette charge est supérieure à la charge de l'élément à lever, on regarde alors la longueur de l'équipement correspondant car cette configuration de grue pourrait être adaptée au projet de levage. Si, au contraire, cette charge est inférieure à la charge de l'élément à lever, il faut changer de configuration ou changer de grue.

La configuration d'une grue mobile sur porteur est composée d'un ensemble de caractéristiques qui ont été prédéfinies et qui n'évoluent pas au cours d'un levage (l'empattement des stabilisateurs, les contrepoids équipés, la longueur de flèche, la longueur de l'équipement,...). En revanche, pour satisfaire les différents mouvements et le levage de différents éléments, des caractéristiques comme la portée, l'angle de flèche et la charge évoluent au cours du levage et en fonction des différents éléments à soulever.

La configuration de la grue est donc différente en chaque instant du levage et il convient de regarder le diagramme de charge pour la configuration dont les facteurs techniques sont les plus contraignants.

5.3. Tableau de charge

Après avoir consulté le diagramme de charge, il faut regarder dans le tableau de charge correspondant à la configuration prédéfinie. Il existe un grand nombre de tableaux de charge dans une fiche technique et chacun de ces tableaux traduit un ensemble de configurations possibles de la grue (Sacré, 2019).

Chaque constructeur de grue ayant sa propre façon de libeller ses modèles de grue, les outils correspondant à ces différents modèles ont également chacun leur propre spécificité/formalisme. Voici ci-dessous, à titre d'exemple, un tableau de charge de la grue AC 700 de chez TEREX montée en WIHI avec un empattement maximal, une longueur de flèche principale de 45,5m et une rallonge en treillis de 4m.

WIHI

60 t

80 t

100 t

120 t

140 t

160 t

360°

ISO

45,5 m + 4 m

	24 m			30 m			36 m			42 m			48 m			54 m		
	83°	73°	65°	83°	73°	65°	83°	73°	65°	83°	73°	65°	83°	73°	65°	83°	73°	65°
m	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
20	51,5	-	-	45,0	-	-	36,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	49,5	-	-	45,0	-	-	36,0	-	-	30,0	-	-	26,0	-	-	-	-	-
24	47,0	-	-	43,5	-	-	36,0	-	-	30,0	-	-	26,0	-	-	23,0	-	-
26	44,5	-	-	41,5	-	-	35,5	-	-	30,0	-	-	26,0	-	-	23,0	-	-
28	42,5	-	-	40,0	-	-	35,0	-	-	30,0	-	-	26,0	-	-	23,0	-	-
30	-	-	-	39,0	-	-	35,0	-	-	30,0	-	-	26,0	-	-	23,0	-	-
32	-	32,5	-	38,5	30,5	-	34,5	-	-	30,0	-	-	25,9	-	-	23,0	-	-
34	-	30,5	-	37,5	29,0	-	34,0	27,5	-	30,0	-	-	25,9	-	-	23,0	-	-
36	-	29,6	-	-	27,7	-	34,0	26,1	-	30,0	-	-	25,8	-	-	23,0	-	-
38	-	-	-	-	26,5	-	33,5	24,8	-	30,0	23,8	-	25,7	-	-	22,9	-	-
40	-	-	22,3	-	25,7	-	33,5	23,8	-	29,8	22,7	-	25,6	21,7	-	22,9	-	-
42	-	-	21,1	-	24,9	20,4	-	22,9	-	29,7	21,6	-	25,5	20,6	-	22,9	-	-
44	-	-	-	-	19,6	-	22,3	-	-	29,5	20,8	-	25,3	19,7	-	22,8	19,1	-
46	-	-	-	-	18,8	-	21,8	17,4	-	29,4	19,9	-	25,2	18,8	-	22,8	18,2	-
48	-	-	-	-	18,2	-	21,6	16,7	-	29,4	19,9	-	25,0	18,0	-	22,7	17,5	-
50	-	-	-	-	-	16,0	-	16,0	-	29,4	18,8	15,3	24,9	17,3	-	22,6	16,7	-
54	-	-	-	-	-	-	15,2	14,2	-	29,4	18,1	14,2	24,9	16,2	-	22,3	15,5	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,3	24,9	15,5	13,0	20,8	14,6	11,6
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,0	11,9	11,0	13,9	10,6	9,9
66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,4	-	13,6	9,9	9,9
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,3	9,3

145,5 m
(45,5 m + 100 m)
145,5 m
(45,5 m + 100 m)

WIHI

Tableau 5 - Un tableau de charge de la grue sur porteur AC700

(Source : Fiche technique AC700 p.24)

Ce tableau est composé de groupes de colonnes successifs correspondant chacun à une longueur de l'équipement en tête de flèche principale (dans ce cas-ci, il s'agit d'une volée variable dénommée « WIHI »). Les colonnes indiquent l'angle de la flèche principale et la charge admissible. Chaque ligne du tableau correspond à une portée. Pour une même colonne (c'est-à-dire pour un même angle de flèche principale), cette portée varie en fonction de l'inclinaison de la volée variable. La différence de couleur est liée à l'utilisation de différents contrepoids (allant de 60t jusqu'à 120t pour ce tableau).

Chaque valeur indiquée dans une case du tableau de charge correspond à la charge maximale que la grue est capable de lever en une configuration donnée. L'ensemble de ces valeurs forme la courbe de la limite de stabilité représentée sur la figure 25. Les graphiques ci-dessous font ressortir le principe physique sous-jacent des tableaux de charge fournis par les constructeurs. Ils représentent donc la variation des performances d'une grue avec en abscisse la portée et en ordonnée la charge.

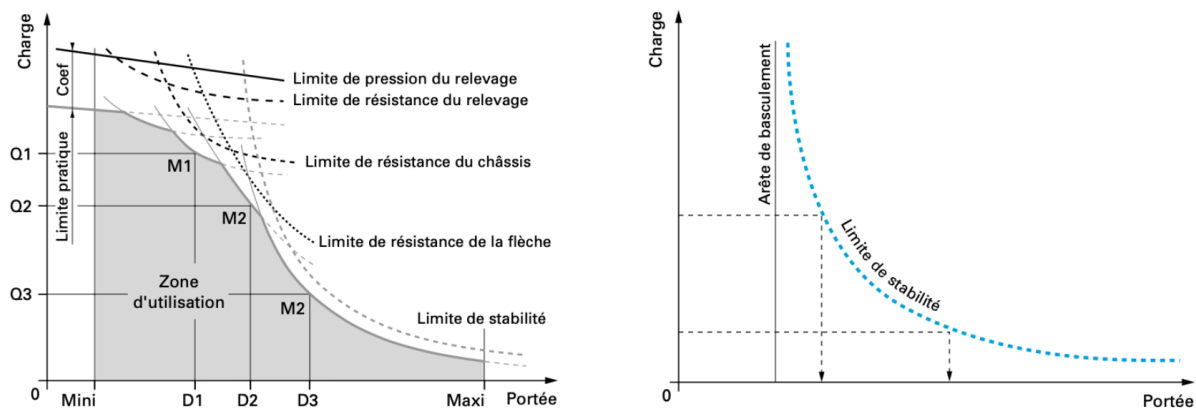


Figure 25 - Courbe de charge

(Source : Pelletier C., 1999, p.11)

La zone d'utilisation grisée sur cette figure représente l'ensemble des configurations de la grue pour lesquelles la charge à lever est inférieure à la valeur indiquée dans le tableau

La charge à lever résulte de l'addition des charges du moufle, du système d'élingage et de l'élément à lever. La masse des câbles n'est généralement pas prise en compte dans le calcul de la charge. Dans certains cas de levage, comme pour un chantier dans un puits ou des gratte-ciels, la longueur de câble entre la tête de flèche et le moufle est considérable. Il faut alors prendre en compte la masse du câble qui n'est plus négligeable dans les calculs.

Les informations qui définissent une configuration d'un modèle de grue sont sa charge maximale à portée minimale et sa charge minimale à portée maximale. Prenons l'exemple d'une longueur d'équipement de 30 mètres avec un angle de flèche principale de 73° et un ballast de 120 tonnes dans le tableau 4. La grue pourra lever des charges allant de 30,5 tonnes pour sa portée la plus petite (32 mètres) jusqu'à 24, 5 tonnes pour sa portée la plus grande (42 mètres).

Il est bon de noter que ces valeurs de charge maximale sont valables pour des vitesses de vent² inférieures à la vitesse du vent admissible indiquée dans le tableau (cf. chapitre VI section 3).

² Le vent induit des sollicitations supplémentaires sur la flèche et la charge (cf. figure 128)

6. Levage en tandem

L'analyse pré-levage est d'autant plus importante pour les cas de levage qui nécessitent une synchronisation du travail de deux grues sur charge unique. En effet, la préparation des méthodes de coordination nécessite une grande méticulosité. Il est possible d'identifier deux configurations de levage en tandem : les levages homogènes et les levages distincts (Han *et al.*, 2018).

6.1. Levages homogènes

Cette configuration mobilise des grues identiques qui portent chacune une portion égale de la charge à soulever dans le cadre d'une opération de déplacement. Cette configuration est un cas théorique : dans la pratique, les obstacles et la topographie du site de levage sont des contraintes qui permettent rarement une disposition symétrique des grues par rapport à la charge sur le chantier.

6.2. Levages distincts

Cette configuration fait appel à des grues de modèles ou de types différents. C'est le cas pour la plupart des levages en tandem car les grues sont rarement en mesure de soulever une portion de charge identique de l'élément à lever. Les principaux avantages et désavantages de ce mode opératoire sont les suivants :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Rapidité d'exécution- Facilité de mise en œuvre- Système d'élingage simple	<ul style="list-style-type: none">- Risqué- Onéreux- Cinématique complexe

Tableau 6 - Avantages et inconvénients d'un levage en tandem

(Source : Mincke F., 2021)

Ce type de lift s'exécute rapidement et mobilise un système d'élingage moins complexe. Cependant, l'exécution de l'opération présente un risque non négligeable à cause de la cinématique complexe du levage (Hermann *et al.*, 2011).

Il faut veiller à coordonner les mouvements pour éviter tout transfert de charge qui entraînerait une sollicitation excédentaire de la grue. Si le crochet se décentre de l'axe vertical de la tête de flèche, une force horizontale s'ajoute et crée un effet de flexion qui peut engendrer des problèmes de sécurité. Dès lors, durant le déplacement d'une charge avec deux grues, les têtes de flèche doivent être écartées l'une de l'autre par une distance constante qui dépend des dimensions de l'objet. En pratique, il n'y a pas de synchronisation parfaite des différents mouvements : l'un des mouvements est guidé par l'autre (D'Othée, 1972). Les opérations ne se réalisent pas simultanément. Les grues relèvent successivement leur flèche.

Il convient aussi de réguler la vitesse des différents mouvements afin d'éviter les mouvements de rebond de la charge.

Le redressement d'une charge est un cas de figure fréquemment rencontré dans les levages en tandem. En effet, des charges sont souvent transportées à l'horizontal sur les semi-remorques et pour les positionner aux endroits souhaités, il faut lever l'objet à la perpendiculaire au sol. Ce cas de figure a été rencontré pour le levage des pièces de logistique à l'usine Solarec à Neufchâteau (cf. annexe 1) et dans le cas d'étude 3 à Fauvillers (cf. chapitre VI section 3).

Pour les redressements, une analyse de la distribution des charges doit être menée afin de déterminer la capacité de levage requise pour chacune des deux grues. Ces dernières sont respectivement une grue de plus grande capacité pour réaliser le levage et une grue d'appoint (ayant une plus faible capacité) pour aider au retournement. Il faut prêter une attention particulière à l'exécution afin d'éviter que la grue de plus faible capacité supporte une proportion trop importante de la charge.

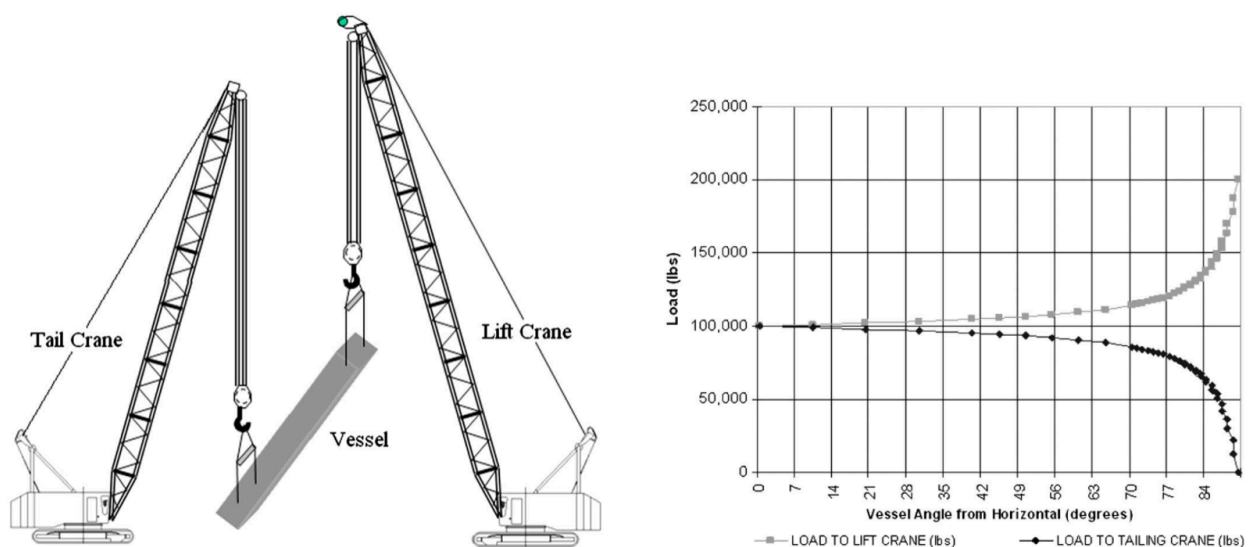


Figure 26 - Retournement d'une charge avec deux grues

(Source : Hermann *et al.*, 2011, p.479)

Les opérations pour la rotation d'une charge avec deux grues en tandem se déroulent comme suit :

- Tout d'abord, il faut élinguer respectivement la grue de plus grande capacité (grue 1) à la partie supérieure de la charge et la grue de plus faible capacité (grue 2) à la partie basse de la charge.
- Ensuite, elles opèrent un déplacement de la charge à l'horizontale afin de l'amener au lieu de rotation. A ce moment, les deux grues reprennent théoriquement la même portion de charge.
- La grue 1 lève ensuite l'objet et la grue 2 se synchronise pour effectuer ce mouvement de rotation. Au fur et à mesure que la charge pivote, la diminution de la portion de charge reprise par la grue 2 est proportionnelle au gain de charge reprise par la grue 1. Cette distribution est représentée sur la figure 26 (Hermann *et al.*, 2011). Lors de ce mouvement, la distance entre les têtes de flèches n'est, dans ce cas-ci, pas constante ; il convient donc de vérifier les dégagements afin d'éviter les collisions (Han *et al.*, 2018).
- Quand la rotation est effectuée, les deux grues descendent l'objet sur le sol. L'élingage de la grue 2 et celui de la grue 1 posent l'objet à l'endroit prévu.

7. Métiers et sécurité

Le domaine du levage requiert la coordination de différents métiers. Chacune de ces professions a un rôle à jouer afin d'assurer la sécurité du levage (Auclair *et al.* 2018).

- Le grutier est en charge de l'exécution des mouvements de l'appareil de levage. Son aptitude à réaliser certaines tâches dépend des accréditations qu'il possède. Ces dernières sont fonction des différents appareils de levage. Le grutier est capable d'apprécier les distances en 3D et connaît les particularités mécaniques et électriques de l'appareil de levage qu'il utilise.
- L'élingueur a la responsabilité d'exécuter correctement le système d'élingage.
- Le chef de manœuvre coordonne les mouvements de la grue et est en contact visuel et/ou auditif avec le grutier.
- L'ingénieur méthode, à côté de calculs d'appareils ou accessoires de levage, propose des procédures pour assurer le levage en sécurité.

Les risques potentiels lors de la planification du levage se doivent d'être spécifiés dans une fiche d'analyse de risque. Afin d'assurer la sécurité, une analyse de chaque position critique du levage doit être menée et représentée sur un/des plan(s) de levage. Une pondération sur la charge ainsi que des hypothèses conservatrices doivent également être réalisées. Il faut ensuite veiller à respecter les règles imposées concernant la prévention des accidents lors de l'exécution du levage.

Les levages en tandem étant plus risqués, une marge de sécurité suffisante doit être prise afin d'éviter tout incident. Au cas contraire, cela peut mener à des désastres comme ce fut le cas à Alphen aan den Rijn aux Pays-Bas en août 2015 (PreventFocus, 2016).

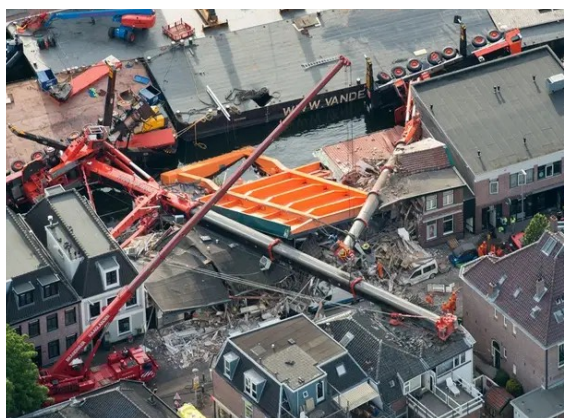


Figure 27 - Deux grues renversées en 2015 aux Pays-Bas

(Source : <https://www.20minutes.fr/monde/1662147-20150804-video-pays-bas-spectaculaire-chute-deux-grues-maisons>)

Le renversement de la grue est l'accident majeur auquel on peut être confronté lors d'un levage. Une défaillance de la planification du mode opératoire ou une mauvaise exécution du levage peuvent notamment expliquer ce phénomène, comme une surcharge, une insuffisance de la capacité portante du sol, l'absence d'un entretien/révision/réparation de la grue... Les grues mobiles sont, pour la plupart, équipées d'un dispositif appelé « limiteur de charge » qui empêche la grue de porter une charge supérieure aux limites de portée et de charge admissibles. Ce dernier est accompagné d'un indicateur de charge qui prévient le grutier par un signal sonore lorsque la limite est atteinte (Artarit, 2018).

Partie 2 - Processus de sélection d'une grue

Après avoir consacré la première partie de l'état de l'art au domaine du levage, à l'acquisition de la terminologie et des concepts en la matière, nous pouvons à présent aborder le processus de sélection d'une grue.

Dans cette deuxième partie de l'état de l'art, nous établirons d'abord les caractéristiques générales du processus de sélection d'une grue. Ensuite, nous nous pencherons sur la pluralité des facteurs ayant un impact sur ce processus et nous préciserons les parties impliquées dans le choix de la grue. La section majeure de cette partie traitera de différentes approches du processus de sélection.

1. Caractéristiques générales

Le processus de sélection d'une grue consiste en une réflexion en amont de l'opération de levage. Cette dernière requiert un planning précis afin d'éviter tout risque et tout retard dans l'organisation du chantier qui engendreraient des coûts supplémentaires (Shapira & Schexnayder, 1999).

La majorité des auteurs s'accordent pour caractériser le processus de sélection comme étant un processus complexe de prise de décision. D'autres caractéristiques, identifiées dans les articles scientifiques, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Auteurs	Complexe	Essentiel	Itératif	Chronophage	Culture d'entreprise
Furusaka & Gray (1984)	x	x			
Warszawski (1990)			x		
Shapira & Glascock (1996)	x				x
Shapira & Schexnayder (1999)	x				
Hanna & Lotfallah (1999)		x			
Al-Hussein (1999)	x		x		
Al-Hussein et al. (2001)	x	x		x	
Sawhney & Mund (2002)	x				
Wu et al. (2011)	x	x	x	x	
Han et al. (2018)	x		x	x	

Tableau 7 - Caractéristiques générales du processus de sélection d'une grue

(Source : Mincke F., 2021)

Selon Shapira & Schexnayder (1999), la sélection d'une grue pour un projet repose principalement sur le choix du type et du modèle de grue à utiliser, mais aussi sur une multitude d'autres facteurs qui rentrent en ligne de compte dans ce processus.

2. Pluralité des facteurs

Le problème majeur lié à la sélection d'une grue réside dans la multitude et l'interdépendance des facteurs. Étant donné la spécificité de chaque projet, il n'existe pas de liste exhaustive de facteurs ayant un effet sur la sélection d'une grue (Han *et al.*, 2018).

• Catégories de facteurs

Il est toutefois possible de dégager des catégories de facteurs. Al-Hussein (1999) distingue, par exemple les facteurs de faisabilité technique³, les facteurs contractuels et les facteurs économiques.

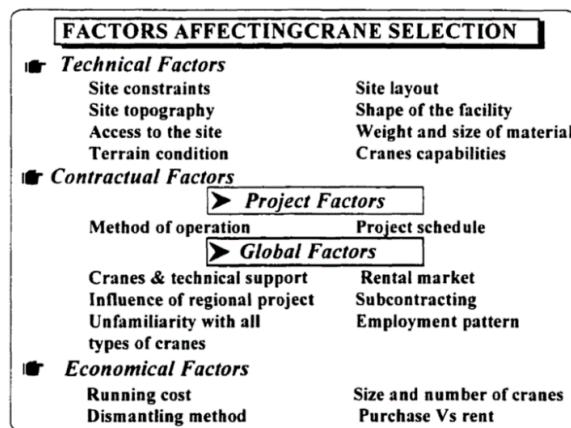


Figure 28 - Classification des facteurs proposée par Al-Hussein

(Source : Al-Hussein M., 1999, p.40)

Les facteurs de faisabilité technique définis par Al-Hussein concernent :

- Le site (« contraintes du site, topographie, accès au site, conditions du terrain, configuration du site, forme du bâtiment et des installations voisines... ») (Al-Hussein, 1999) ;
- Le levage (« la forme, le poids, la taille des objets à lever, l'emplacement des levages critiques... ») (Al-Hussein, 1999) ;
- L'équipement (« la configuration du montage de la grue, le type de flèche, la configuration de la fléchette... ») (Al-Hussein, 1999).

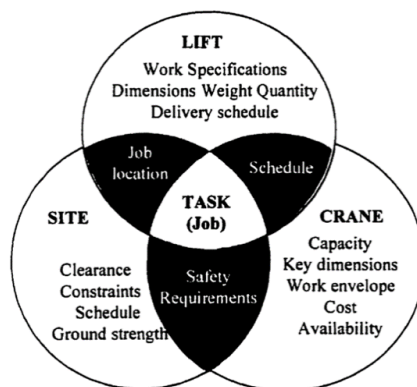


Figure 29 - Facteurs de faisabilité technique

(Source : Al-Hussein M., 1999, p.41)

³ Les facteurs de faisabilité technique renvoient ici à une catégorie de facteurs proposée par Al-Hussein. Il ne s'agit pas des facteurs techniques dimensionnants de la grue comme énoncés au chapitre II partie 1 section 4.1

Les facteurs contractuels concernent « la méthode de l'opération, la fréquence des levages, la vitesse, l'utilisation maximale des grues, les types de levage incluant les dimensions et le poids » (Al-Hussein, 1999). Il y a aussi la méthode de construction, le type de matériau ainsi que la disponibilité des grues.

Les facteurs économiques concernent « les frais de fonctionnement, l'assemblage et le désassemblage de la grue » (Al-Hussein, 1999). Les facteurs économiques varient en fonction du fait que l'entreprise générale de construction possède son propre parc de grues ou fait appel à une société de levage.

• Classement préférentiel ?

Dans leur étude menée sur 41 projets, Shapira & Schexnayder (1999) tentent de relever une prépondérance de certains facteurs en leur accordant un degré moyen d'influence.

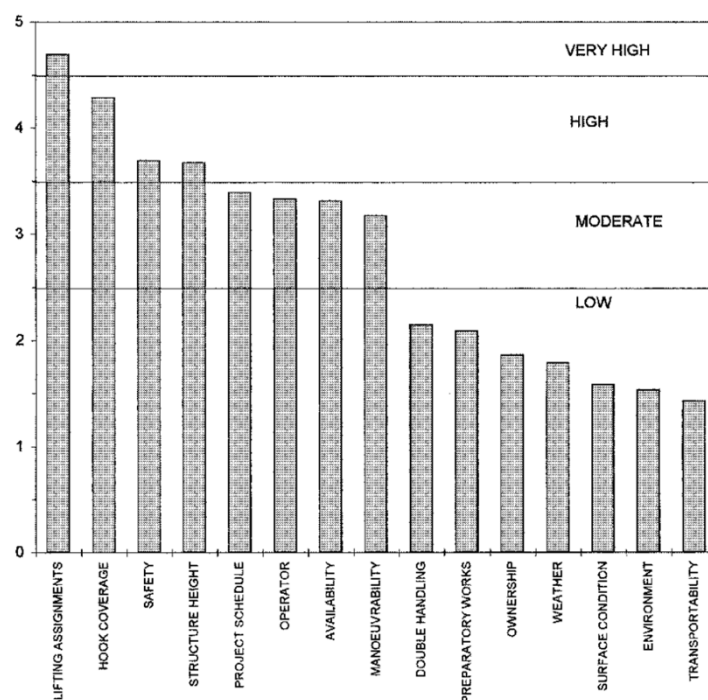


Figure 30 - Facteurs affectant la sélection d'une grue : degré moyen d'influence.

(Source : Shapira & Schexnayder, 1999, p.522)

Il en ressort que les facteurs liés à la nature de l'opération ont le plus grand degré d'influence. Le facteur « sécurité » est un élément omniprésent dans toute opération de levage. Toutefois, l'importance de ce facteur est majorée par la nature de l'opération comme dans le cas d'un levage en tandem qui comporte plus de risques qu'un levage simple (Shapira & Schexnayder, 1999).

Quant aux facteurs qui se sont vu accorder un moindre degré d'influence, à savoir les facteurs des conditions météorologiques, des conditions de site et de la transportabilité, les chercheurs expliquent que sur la plupart des chantiers visités, la météo, la capacité portante et les infrastructures routières ne posaient pas de problème majeur.

Cette étude souligne donc la difficulté d'établir un classement préférentiel de facteurs ayant un effet sur la sélection d'une grue (Shapira & Schexnayder, 1999).

3. Parties impliquées

L'analyse de la littérature fait apparaître que la personne en charge de l'élaboration du mode opératoire n'est pas toujours le planificateur unique d'un levage. Le processus de sélection est un travail collectif qui fait appel à des compétences variées (Shapira & Schexnayder, 1999).

Ce travail implique la participation de sous-traitants lorsque l'entreprise souhaitant réaliser un levage ne dispose pas de son propre parc de grues. Le processus de sélection se caractérise par une interactivité entre le client et la société de levage. La société de levage répond donc aux exigences contractuelles du client tout en s'assurant de la faisabilité technique et du rapport coût-efficacité (Al-Hussein, 1999).

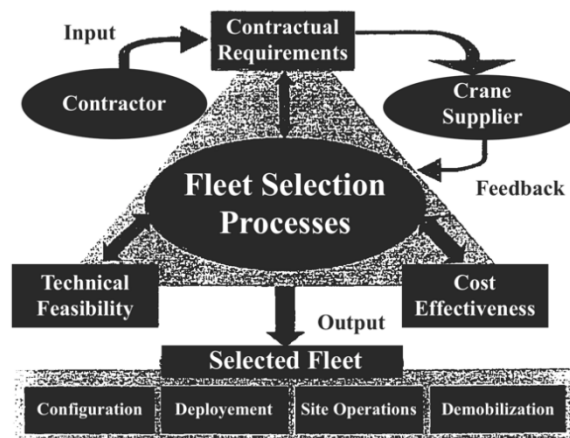


Figure 31 - Schéma des parties impliquées lors d'une sous-traitance

(Source : Al-Hussein M., 1999, p.37)

Lorsque qu'une entreprise dispose de son propre parc de grues, l'expert en levage soumet son rapport concernant le choix du mode opératoire à d'autres intervenants (chef de projet, conducteur de chantier, ...) lors d'une réunion. Différents aspects seront discutés afin de sélectionner la grue la plus adaptée au projet (Al-Hussein., 1999).

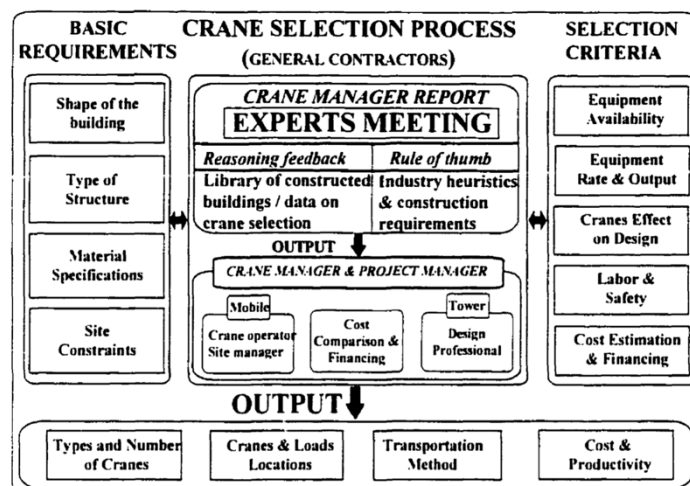


Figure 32 - Parties impliquées en interne

(Source : Al-Hussein M., 1999, p.33)

4. Différentes approches

4.1. Méthode courante

Sawhney & Mund (2002) proposent un schéma général représentant le processus de sélection d'une grue pour la méthode courante. Les facteurs caractéristiques du projet ainsi que les types de grues composent le point de départ de la méthode. L'expérience et l'heuristique mènent ensuite à la sélection d'un type de grue puis à la sélection du modèle de grue le plus adapté au projet selon la disponibilité et le coût de location. La configuration de la grue sélectionnée est déterminée grâce aux diagrammes / tableaux de charge fournis par les fabricants (cf. chapitre II partie 1 section 5). La façon de présenter ces fiches techniques varie d'un fabricant de grues à l'autre. Ce manque de standardisation peut mener à des difficultés lors de l'interprétation des diagrammes / tableaux de charge (Al-Hussein, 1999).

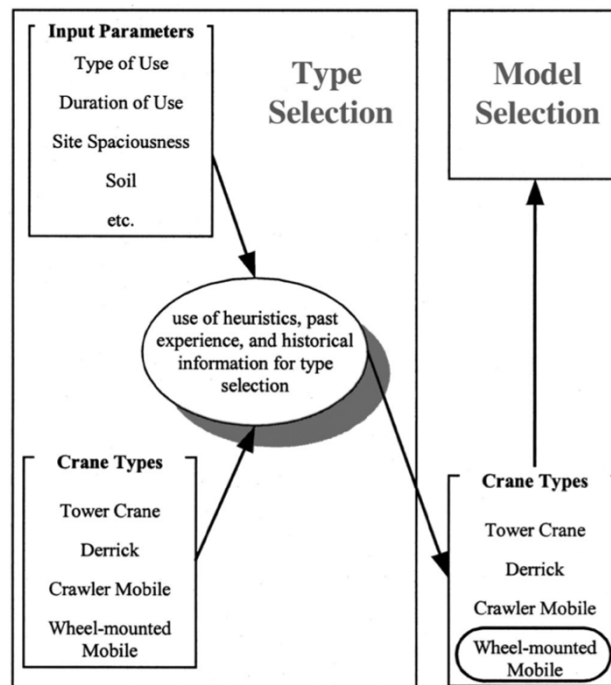


Figure 33 - Méthode courante de sélection d'une grue

(Source : Sawhney & Mund, 2002, p.266)

La méthode courante dépend largement de l'expérience des ingénieurs en charge du levage. La transmission d'expérience se fait entre le formateur et la personne à former. Han *et al.* (2018) relèvent une absence de check-list pour l'élaboration du levage dans les entreprises ayant pris part à leur étude. Malgré l'expérience et le bon jugement des ingénieurs, le manque d'une méthode systématique et d'un outil de simulation dynamique des grues peut mener à des erreurs (Han *et al.*, 2018). D'autres chercheurs mettent en avant ce manque d'approche rationnelle dans le processus de sélection d'une grue qui dépend alors de « l'expérience ou de l'intuition » (Furusaka & Gray, 1984).

4.2. Méthodes assistées par ordinateur

Les recherches entreprises pour mieux cerner le processus de sélection d'une grue ont mené à l'élaboration de certaines méthodes utilisant l'outil informatique. Les chercheurs ont développé des algorithmes dans le but de sélectionner une grue de manière efficace. Un algorithme est un « ensemble de règles opératoires dont l'application permet de résoudre un problème énoncé au moyen d'un nombre fini d'opérations. Un algorithme peut être traduit, grâce à un langage de programmation, en un programme exécutable par un ordinateur » (Larousse en ligne, 2021).

Dès 1972, nous trouvons des tentatives d'automatiser la sélection de grues et, dans les années 1980-1990, des systèmes basés sur les connaissances (« KBES Knowledge-based expert systems ») ont été développés tels que *Cranes* (développé par C. Gray et J. Little) et *Locrane* (développé par N. Peled et A. Warszawski). Les KBES consistent en une aide pour la sélection d'une grue appropriée au projet et pour son emplacement optimal sur le chantier de construction (Al-Hussein, 1999). Ces logiciels ont toutefois leurs limites car ils ne peuvent pas tenir compte de tous les facteurs étant donné leur nombre important et la difficulté de les quantifier (Hanna & Lotfallah, 1999).

• Méthode proposée par Sawhney & Mund (IntelliCranes (2002))

Sawhney & Mund (2002) ont développé « IntelliCranes », un outil ayant pour vocation de remplacer l'expérience et l'heuristique des experts en levage. IntelliCranes assiste aussi bien dans la sélection du type de grue que de son modèle.

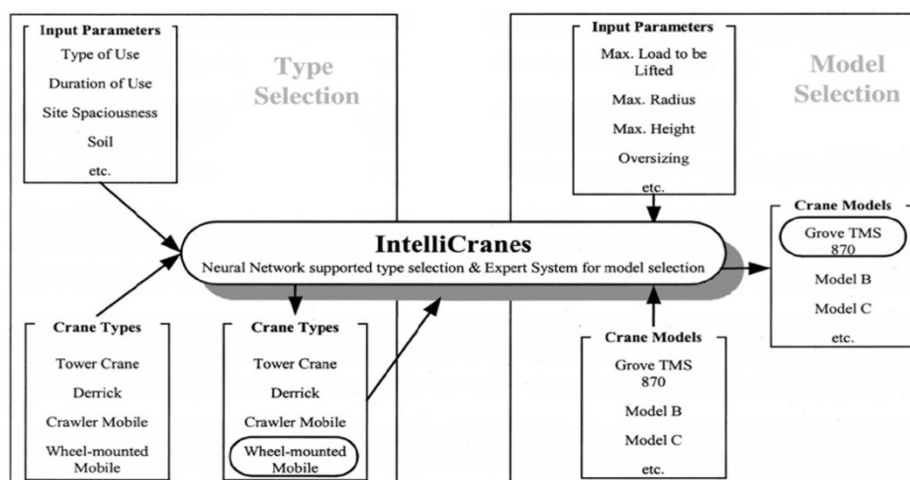


Figure 34 - Processus de sélection d'une grue avec IntelliCranes

(Source : Sawhney & Mund, 2002, p.229)

L'outil se compose de 2 modules, ayant chacun une base de données :

- Un module basé sur les méthodes de modélisation ANNs⁴ ;
- Un module basé sur les connaissances (KBES) pour la sélection du modèle de grue avec une base de données (« Cranes DB ») pouvant être mise à jour par l'utilisateur

⁴ ANNs : « Les Artificial Neural Networks sont composés d'éléments interconnectés appelés éléments de traitement ou des neurones artificiels agissant comme des microprocesseurs » (Sawhney & Mund, 2002, p.269)

Les limites de IntelliCranes résident dans la quantité de données disponibles dans la base de données (« Type Selections Training Data ») établie en fonction d'une série d'exemples d'anciennes sélections de types de grue et dans le fait que les dégagements ne sont pas vérifiés (Sawhney & Mund, 2002).

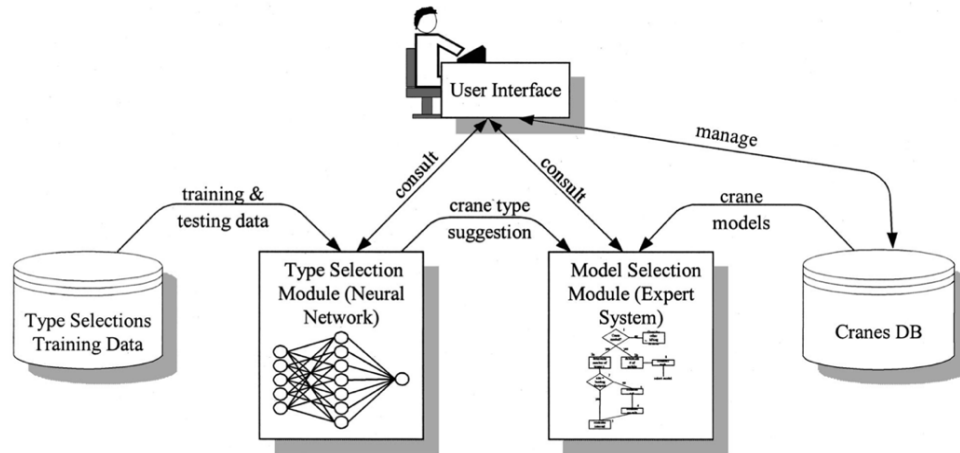


Figure 35 - Structure d'IntelliCranes

(Source : Sawhney & Mund, 2002, p.268)

• Méthode proposée par Furusaka & Gray (1984)

Les chercheurs Furusaka & Gray (1984) se sont intéressés au coût de l'opération de levage, c'est-à-dire au coût total de la location de la grue, de l'assemblage et du désassemblage. Ces chercheurs proposent de faire varier le type et le nombre de grues à utiliser pendant la construction afin de trouver la solution la plus économique.

À cette fin, ils ont mis au point un algorithme calculant l'utilisation combinée de plusieurs grues. La solution la plus avantageuse peut être atteinte en utilisant d'abord la grue avec le moindre coût de location puis en la remplaçant par une autre lorsqu'elle a atteint ses capacités maximales de levage.

Furusaka & Gray prennent comme données de base les informations relatives à un panel de différents types de grue, la durée du travail pour chaque étage du bâtiment ainsi que « les grandes lignes du projet de construction » (Furusaka & Gray, 1984, p.163). (cf. tableau 8).

Ils relèvent toutefois les limites de leur approche en soulignant que la mise en œuvre de plusieurs grues dépend de leur disponibilité.

Crane	Crane type	Boom length (m)	Weight range (m)	Capacity (ton m)	Tower height (m)	Hire-cost (\$)	Assembly cost (\$)	Dismantling cost (\$)	Item	Contents	Examples
Truck crane	01	24	16	22	0	30 000	0	0	Crane data	Lifting capacity, working range, height of tower, length of boom, hire-cost, assembling cost, demolishing cost	Refer to Table 1
	02	30	20	28	0	50 000	0	0			
	03	35	30	30	0	60 000	0	0			
	04	52	60	40	0	90 000	20 000	10 000			
	05	60	85	45	0	150 000	40 000	20 000			
	06	83	131	61	0	210 000	40 000	20 000			
Crawler crane	07	31	26	20	0	40 000	60 000	30 000	Outline of construction project	Axis X: number of spans, span length Axis Y: number of spans, span length Number of floors, floor height Area maximum lifting load for each floor Site width in axis Y	10, 6 2, 6 15, 3 all areas = 5, 3 or 1 (e.g. $[(1.1)/1F] = 1$) 30
	08	43	30	32	0	60 000	60 000	30 000			
	09	52	31	34	0	80 000	60 000	30 000			
	10	58	54	38	0	140 000	80 000	50 000			
	11	81	162	54	0	220 000	80 000	50 000			
Crawler tower crane	12	20	81	20	36	80 000	100 000	60 000	Constraints	Inside of building site? Maximum numbers of available static based tower crane Areas where crane can not be set up Areas where two or more cranes are needed	No No No
	13	22	88	22	39	90 000	100 000	60 000			
	14	31	144	31	41	100 000	120 000	80 000			
Travelling base tower crane	15	34	120	30	32	100 000	1 000 000	400 000			
	16	44	120	40	33	160 000	1 200 000	400 000			
Static base tower crane	17	30	35	30	100	40 000	240 000	160 000			
	18	32	60	32	100	50 000	240 000	160 000			
	19	34	120	30	100	80 000	280 000	200 000			
	20	44	120	40	100	130 000	280 000	200 000			

Tableau 8 - Grues disponibles – Données de l'algorithme de Furusaka & Gray

(Source : Furusaka & Gray, 1984, p.163)

• Méthode proposée par Al-Hussein *et al.* (Algorithme-1 (2001) et Algorithme-2 (2005))

Les chercheurs Al-Hussein *et al.* (2005) se sont intéressés, en plus de la sélection d'une grue mobile, à l'optimisation de son opération sur chantier. Ils mettent en évidence un large éventail de configurations géométriques nécessitant des formules spécifiques pour le calcul du dégagement.

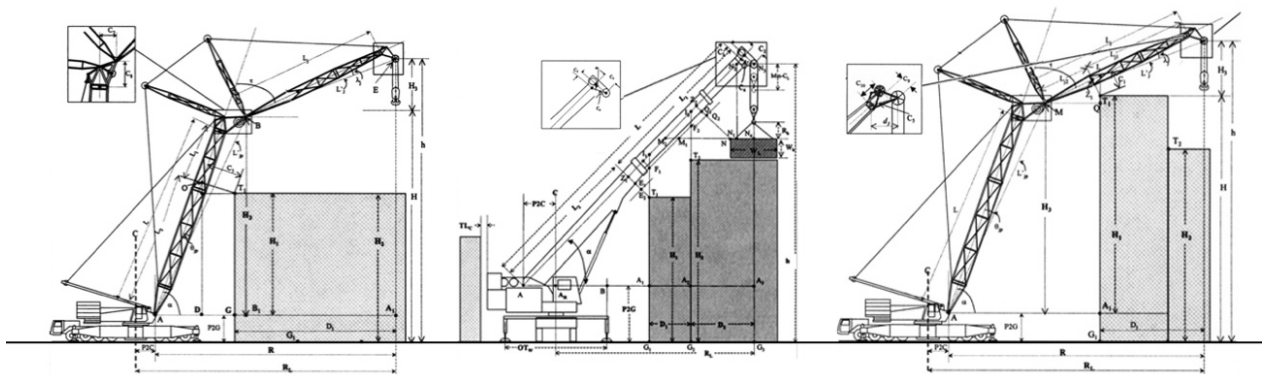


Figure 36 - Vues en élévation de la grue et exemples de contraintes du site

(Source : Al-Hussein *et al.*, 2005, p.582, p.583) (Modifiée par Mincke F., 2021)

La base de données appelée « D-Crane » comprend des informations relatives aux grues (configurations, capacités et variables géométriques) et au système d'élingage (élingues, manilles, palonnier(s)...). L'utilisateur introduit comme données de base les informations relatives au levage (hauteur, portée, charge), au site et aux dégagements. L'Algorithme-1 propose ensuite une liste de configurations possibles de la grue après une vérification de la capacité de la grue à lever l'objet ainsi que son adéquation au site. L'Algorithme-2 calcule les dégagements de la flèche et fléchette principale par rapport à la charge et aux constructions adjacentes ainsi que les rayons minimum et maximum de levage.

La limite de cette méthode (Algorithme-1 et Algorithme-2) réside dans le fait qu'elle ne tient pas compte des coûts de l'opération de levage (Al-Hussein *et al.*, 2005).

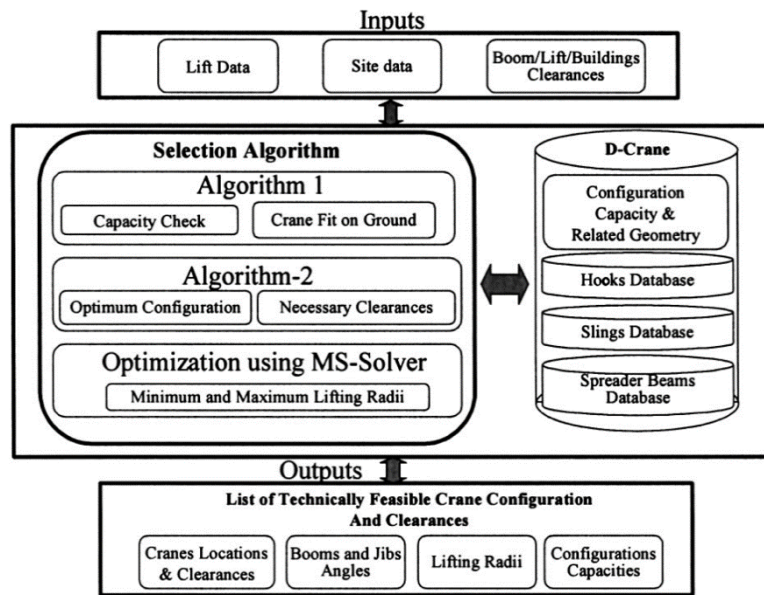


Figure 37 - Méthode Algorithme-1 (2001) et Algorithme-2 (2005)

(Source : Al-Hussein *et al.*, 2005, p.581)

• Méthode proposée par Wu *et al.* (2011)

Les chercheurs Wu *et al.* (2011) proposent un processus de sélection d'une grue basé sur un algorithme ainsi qu'une approche CAO (conception assistée par ordinateur) de simulation 3D. Les sorties de l'algorithme sont les entrées de la modélisation des grues, de la simulation de levage et de la génération du plan de levage (Wu *et al.*, 2011).

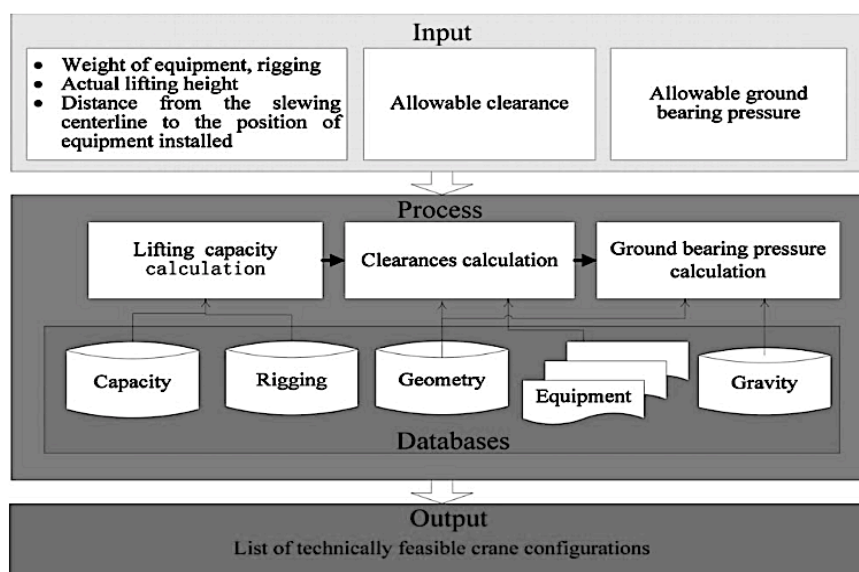


Figure 38 - Méthode proposée par Wu *et al.* (2011)

(Source : Wu *et al.*, 2011, p.58)

L'utilisateur introduit comme données de base les informations relatives au levage (hauteur, portée, charge), au système d'élingage, aux dégagements et à la pression d'appui au sol. La base de données comprend les informations relatives aux grues (configurations, capacités, caractéristiques géométriques) et au système d'élingage (élingues, manilles, palonnier(s), ...) ainsi que les descentes de charge.

Les données introduites par l'utilisateur et les informations de la base de données y correspondant sont les entrées de l'algorithme. Ce dernier est composé de 3 phases de calcul abordées dans l'ordre suivant :

1. Capacité de levage (G: capacité de levage [kg] ; R: rayon de travail [m] et H: hauteur du levage [m])
2. Dégagement (C: dégagement [m])
3. Pression d'appui au sol (GP: pression au sol [MPa])

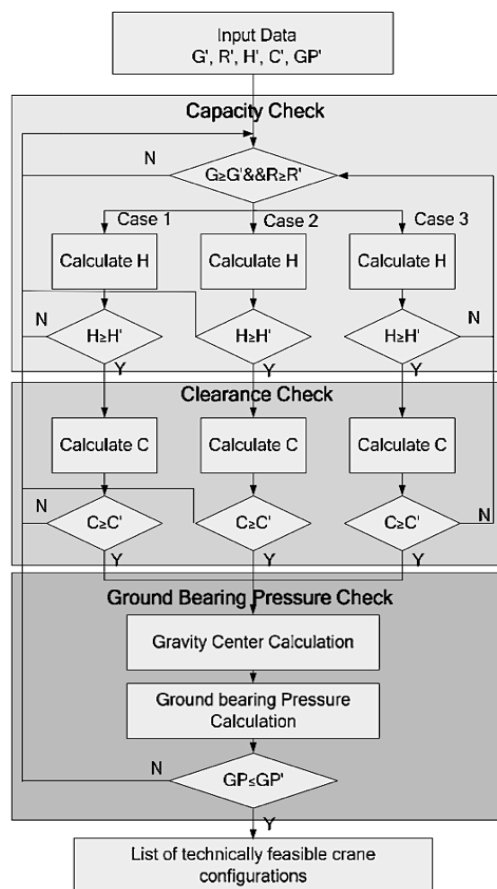


Figure 39 - Logigramme de l'algorithme développé par Wu et al. (2011)

(Source : Wu et al., 2011, p.59)

Pour une configuration donnée, une formule de vérification propre à chaque étape est employée. La formule de l'étape de calcul des dégagements impose, par exemple, que ces derniers (C [m]) soient supérieurs au dégagement admissible (C' [m]).

A la lecture du logigramme, on remarque que si une des formules de vérification des étapes n'est pas satisfaite, elle renvoie à la première étape où il convient de faire varier les paramètres de départ. Le processus doit se réitérer jusqu'à satisfaction de l'ensemble des formules de vérification.

• Méthode proposée par Han *et al.* (2018)

Han *et al.*, (2018) proposent une méthode complète qui repose sur une pré-sélection de grue, une simulation 3D et une matrice facilitant la sélection de la grue.

Dans cette méthode, il existe deux catégories de données entrantes : les données de base (« informations sur la grue, charge, géométrie du site, planning du projet et contraintes liées au site » (Han *et al.*, 2018, p 190)) et les critères (« disponibilité de la grue, accessibilité du site, montage et démontage de la grue, dégagements, critères du projet » (Han *et al.*, 2018, p 190)).

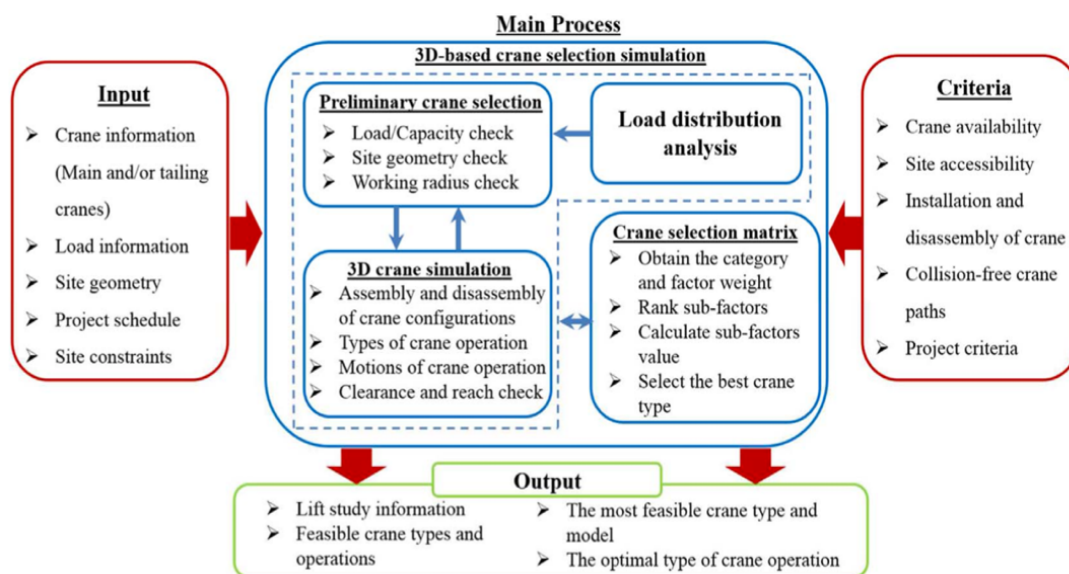


Figure 40 - Méthode proposée par Han *et al.*, 2018

(Source : Han *et al.*, 2018, p.190)

En intégrant une étape supplémentaire portant sur l'analyse de la distribution des charges, ce processus considère aussi les cas spéciaux de levage en tandem. Cette étape se place alors en début de processus comme indiqué sur le logigramme détaillé à la figure 42. La grue est ensuite prédimensionnée par rapport aux facteurs techniques dimensionnants, à savoir la charge la plus lourde à lever et/ou sa plus grande portée et/ou la plus grande hauteur.

La simulation 3D est un outil qui permet de vérifier les séquences d'assemblage et de désassemblage, les mouvements des opérations, les zones sans collision ainsi que les facteurs techniques (portées, hauteurs, charge(s)) dans des positions dynamiques.



Figure 41 - Opération de levage (modèle 3D vs réalité)

(Source : Han *et al.*, 2018, p.192)

Cette vérification des opérations en temps réel permet d'améliorer le processus de sélection de la grue en donnant les erreurs potentielles et offre une vue d'ensemble sur le travail. En réduisant les incertitudes, cette méthodologie améliore la sécurité et prévient ainsi les accidents (Han *et al.*, 2018).

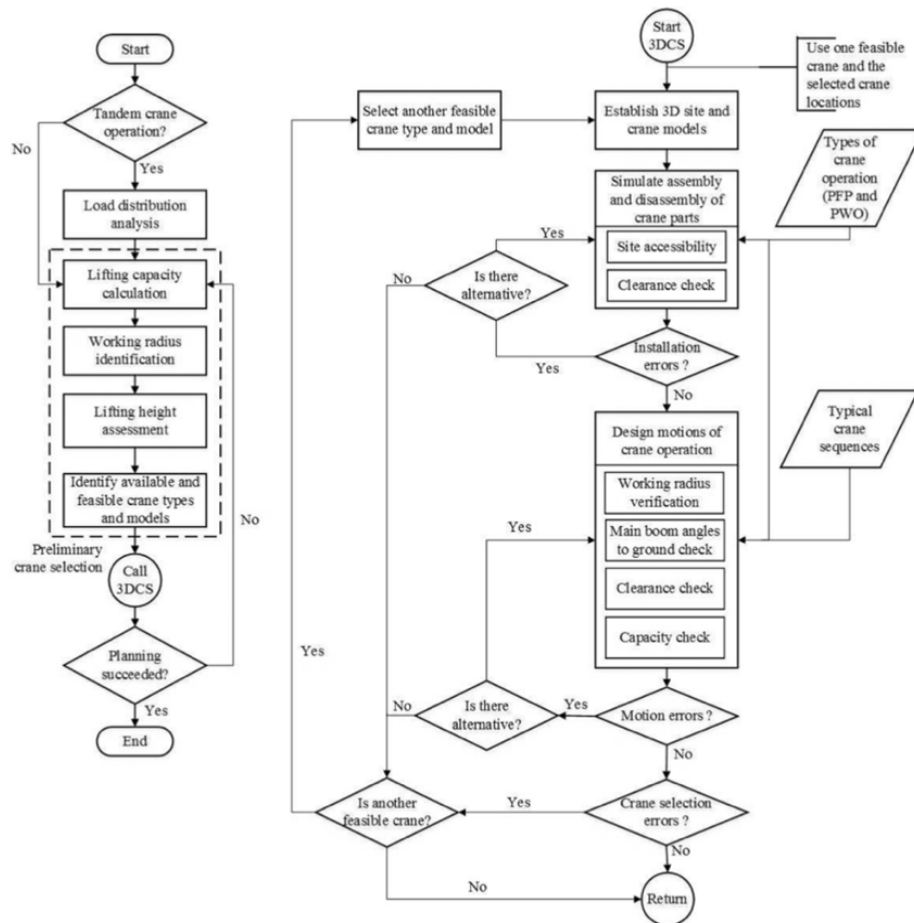


Figure 42 - Logigramme de la simulation 3D

(Source : Han *et al.*, 2018, p.191)

Dans le but de comparer différentes grues compatibles à un projet de levage, les chercheurs Han *et al.* (2018) proposent une matrice de sélection. Cette dernière est composée de facteurs qui ont été listés suite aux interviews menés avec des experts. Nous trouvons 3 catégories de facteurs divisées en groupes de facteurs qui sont eux-mêmes composés de sous-facteurs.

Main categories	Factors
Equipment and cost	<ul style="list-style-type: none"> ● Cost (sub-factors: crane rental, transportation, assembly, disassembly, crane mats, etc.) ● Installation & Disassembly (sub-factors: time/difficulties in assembly, time/difficulties in disassembly, etc.) ● Maintenance & Depreciations (sub-factors: average breakdown cycle, backup power system, availability of parts, complexity in maintenance, depreciation of crane mats, etc.)
Location and site	<ul style="list-style-type: none"> ● Additional Safety Features/Technology (sub-factors: operator's skill, comfort for operator, etc.) ● Weather (sub-factors: wind conditions, wind gust, and extreme winter conditions) ● Availability (sub-factors: crane availability in region and availability of technical supports) ● Space (sub-factors: space requirement for assembly, space requirement for movement, and serviceability in congested working site) ● Ground preparations (sub-factors: areas to be prepared, material cost, preparation method) ● Transportation (sub-factors: transportation of the crane, etc.)
Environmental impact	<ul style="list-style-type: none"> ● Energy (sub-factors: type of crane power, required running time) ● Health (sub-factors: noise & dust) ● CO₂ emissions (sub-factors: CO₂ emissions at operation, CO₂ emission at idle, etc.) ● Neighbor impact (sub-factor: privacy)

Tableau 9 - Catégories et facteurs de la matrice de sélection

(Source : Han *et al.* 2018 p.194)

Les chercheurs Han *et al.* (2018) développent une matrice qui, par le biais d'un module mathématique, exprime les différentes catégories et les facteurs en pourcentage pour les grues présélectionnées. Chacune des catégories et chacun des facteurs se voient donc accorder un pourcentage fixe en fonction de leur niveau d'importance par rapport aux autres catégories et facteurs.

L'encodage des pondérations de chaque sous-facteur est, quant à lui, laissé aux personnes en charge du levage car chaque projet a ses exigences spécifiques. Certains sous-facteurs peuvent être plus importants dans certains projets par rapport à d'autres.

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve les résultats du cas d'étude réalisé par les chercheurs Han *et al.* (2018). Leur objectif était de comparer deux options possibles : soit réaliser le levage avec une LTM 11200, soit avec une LR 1400. Le score qui ressort de la matrice étant plus grand pour la première option, ce sera sur la LTM 11200 que le choix se portera.

Category	%	Factor	Overall	Overall comparative	
				LTM 11200	LR 1400
Equipment and cost	60	Rental cost (30%)	18	16%	18%
		Installation and disassembly (50%)	30	30%	20%
		Maintenance and depreciations (10%)	6	5%	6%
		Additional safety features/technology (10%)	6	6%	5%
Location and site	30	Weather (10%)	3	3%	2%
		Availability (10%)	3	1%	3%
		Space (40%)	12	12%	10%
		Ground preparation (10%)	3	3%	1%
Environmental impact	10	Transportation (30%)	9	9%	6%
		Energy (40%)	4	4%	3%
		Health (30%)	3	3%	2%
		CO2 emission (30%)	3	3%	2%
Total score		Neighbor impact (0%)	0	0%	0%
				95%	79%

Tableau 10 - Résultats de la matrice pour un cas d'étude

(Source : Han *et al.* 2018, p.199)

La limite de cette matrice est qu'elle ne constitue pas un processus complètement automatisé mais est plutôt un « process of ranking alternative decisions » (Han *et al.*, 2018, p.199). Une part de subjectivité peut donc résider dans la définition de priorité dans les sous-facteurs.

• **Méthode proposée par Hanna & Lotfallah (1999) « A fuzzy logic approach »**

Hanna & Lotfallah (1999) proposent de convertir les facteurs qualitatifs de la sélection d'une grue en mesures numériques afin d'optimiser le choix du type de grue.

Ils décrivent leur méthode comme « une approche logique floue » (Hanna & Lotfallah, 1999, p. 598) en empruntant la théorie des ensembles flous⁵.

Factors affecting the crane selection			
Factors	Mobile cranes	Tower cranes	Derrick cranes
<i>F1. Site Conditions</i>			
(a) Soil Stability and Ground Conditions	Can operate in muddy terrain but requires good ground conditions	Can operate where ground conditions are poor	Used when ground conditions does not allow the use of mobile or tower crane
(b) Access road requirement and site accessibility	Requires access to and from lifting position	Preferred when poor accessibility prevails since tower cranes are brought to site disassembled	Minimum site accessibility and access road conditions are adequate since derricks are always dismantled into smaller units for transit
(c) Operating Clearance	Needs adequate operating clearance	Used when site is constricted or congested	Used when clearance is inadequate for the other units and sufficient space is unavailable for the erection of a tower foundation or base
<i>F2. Building Design</i>			
(a) Building Height	Adequate for all types of structures (up to 107 m)	Preferable for high-rise (over 107 m)	Preferable for high-rise and apartment buildings
(b) Project Duration	Used for shorter projects duration (less than 4 months)	Used when crane requirement is for long term in a specific location	Can be used for both long term and short term projects
<i>F3. Economy</i>			
(a) Cost of move in, setup, and move out	Not expensive	Expensive to set up because it requires a foundation and possibly bracing to the structure being erected	Cheaper than mobile and tower cranes
(b) Cost for rent	Usually cheaper if required for projects of short duration (less than 4 months)	Usually costs less for the long term duration (greater than 4 months)	Cheaper to rent and cheaper to buy
(c) Productivity	Not very productive	Much more productive than mobile units	Least productive
<i>F4. Capability</i>			
(a) Power Supply	Usually powered by diesel engines	Usually electrically powered (requires power supply)	Usually powered by diesel engines
(b) Load lifting Frequency	Used when lift frequency is sporadic	Preferred when lift frequency is high	Used if lift frequency is not a major consideration or no other viable alternative crane type exists
(c) Operators Visibility	Usually not good and fair for smaller units	Better	Depends on the location
<i>F5. Safety</i>			
(a) Initial Planning and Engineering	Details are not very much needed, only job site has to be examined for adequate crane maneuverability	Extensive planning is needed to provide the crane with appropriate foundation	Not very detailed
(b) Safety	Not considered to be very safe due to lack of safety devices or limited switches to prevent overloading	Considered to be very safe due to the presence of limit switches	Not considered to be safe

Tableau 11 - Facteurs ayant un effet sur la sélection du type de grue

(Source : Hanna & Lotfallah 1999, p. 603)

Le tableau ci-dessus mentionne 5 catégories de facteurs (conditions de site, conception du bâtiment, économie, capacité, sécurité) divisées en sous-facteurs entrant en ligne de compte pour la sélection d'une grue.

⁵ En 1965, Lofti Zadeh développe la théorie des ensembles flous « afin de représenter mathématiquement l'imprécision relative à certaines classes d'objets » (Source : <https://www.techno-science.net/definition/6226.html>)

Chacun des sous-facteurs se voit attribuer un qualificatif en fonction de son impact sur le projet de levage : « mauvais », « moyen », « bien ».

Efficiencies of crane types with respect to dynamic factors				
Dynamic factors	Qualities	Mobile cranes	Tower cranes	Derrick cranes
F1a	good	good	good	good
	moderate	poor	good	good
	bad	poor	fair	good
F1b	good	good	good	good
	moderate	poor	good	good
	bad	poor	good	fair
F1c	adequate	good	good	good
	moderate	fair	good	good
	inadequate	poor	fair	good
F2a	high	poor	good	good
	moderate	fair	good	good
	low	good	fair	fair
F2b	long	poor	good	good
	moderate	fair	fair	good
	short	good	poor	good
F3b	long	poor	good	good
	moderate	fair	fair	good
	short	good	poor	good
F4b	high	poor	good	fair
	moderate	fair	fair	fair
	low	good	poor	fair
F5a	detailed	good	good	good
	moderate	good	fair	good
	low	fair	poor	fair

Tableau 12 - Attribution d'un qualificatif aux facteurs dynamiques

(Source : Hanna & Lotfallah 1999, p. 605)

Les chercheurs mettent en évidence deux types de facteur : les facteurs dynamiques et les facteurs statiques. Ils qualifient de « dynamiques » les facteurs changeant en fonction de chaque projet et par « statiques » les facteurs invariants (Hanna & Lotfallah, 1999).

4.3. Synthèse des différentes méthodes

Afin de dégager les éléments essentiels de cette deuxième partie de l'état de l'art, nous avons mis en exergue les trois questionnements suivants :

- **Quels sont les facteurs qui influencent le choix de la grue?**

Comme exposé à la section 2 de l'état de l'art partie 2, il n'existe pas de liste exhaustive de facteurs. Il est donc difficile de lister les facteurs communs aux méthodes étudiées. Toutefois, nous pouvons souligner que toutes les méthodes se concentrent essentiellement sur les facteurs de faisabilité technique tandis que les méthodes proposées par Furusaka & Gray (1984), Hanna & Lotfallah (1999) ainsi que Han *et al.* (2018) prennent aussi en considération les facteurs économiques. Cette dernière méthode est la plus complète car, en plus de trois catégories de facteurs, elle envisage treize groupes de facteurs qui eux-mêmes sont composés de sous-facteurs (cf. tableau 9).

• **Quelles sont les étapes principales du processus de sélection d'une grue mobile?**

La collecte et le traitement des données de base ressort comme étant la première étape du processus de sélection. Les éléments contenus dans cette étape sont variables d'une méthode à l'autre. Toutefois, trois catégories identiques à chaque méthode sont identifiables : les conditions du site, les facteurs techniques dimensionnants et les caractéristiques de l'objet à lever.

L'examen d'adéquation est une étape commune à chaque méthode. Cette étape est essentielle car on y vérifie la compatibilité des données traitées avec le projet de levage. Les chercheurs Wu *et al.* (2011) proposent d'effectuer trois vérifications dans l'ordre suivant : la capacité de levage, les dégagements, la capacité portante.

En données de sortie, les méthodes proposées par Al-Hussein *et al.* (2005), Wu *et al.* (2011) ainsi que Han *et al.* (2018) donnent « a list of technically feasible crane configurations ». Seules les méthodes développées par Han *et al.* (2018) et Hanna & Lotfallah (1999) proposent une comparaison entre différentes grues compatibles.

Les chercheurs Han *et al.* (2018) intègrent deux étapes supplémentaires au processus de sélection : l'une prévoyant une présélection et l'autre portant sur l'analyse de la distribution des charges. Le cas du levage en tandem est ainsi considéré au début du processus de sélection.

Les chercheurs Wu *et al.* (2011) ainsi que Han *et al.* (2018) proposent explicitement des itérations dans le processus de sélection (cf. figures 39 et 42).

• **Quels sont les intérêts liés à chaque méthode?**

Nous ne nous sommes pas penchés sur les limites de chaque méthode mais plutôt sur leurs avantages respectifs, l'objectif étant de cerner les éléments qui pourraient servir de base à l'élaboration de notre méthode (cf. chapitre V). Ces éléments figurent en caractère gras dans le tableau suivant :

Furusaka & Gray (1984)	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation combinée de plusieurs grues Coût pris en considération
Hanna & Lotfallah (1999)	<ul style="list-style-type: none"> Proposition d'optimisation du choix de la grue → attribution d'un qualificatif à chaque sous-facteur
Sawhney & Mund (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Sélection du type de grues facilitée → méthodes de modélisation ANN
Al-Hussein <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Optimisation de la configuration Calcul des rayons minimum et maximum
Wu <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Logiciel de simulation 3D Formule de vérification Processus itératif
Han <i>et al.</i> (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Logiciel de simulation 3D Considération du cas de levage en tandem Proposition d'optimisation du choix de la grue → une matrice de sélection

Tableau 13 - Intérêts des différentes méthodes

(Source : Mincke F., 2021)

III. Méthodologie

Ce chapitre a pour objet l'explication des démarches entreprises pour la récolte de données. La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de ce travail se base sur un questionnaire, des entretiens et des observations *in situ*. Ces trois démarches sont complémentaires et permettent d'élargir le spectre des données recueillies ainsi que leur pertinence.

1. Le questionnaire

1.1. Élaboration du questionnaire

La rédaction des questions repose sur l'analyse de la littérature. Le questionnaire aborde les différentes dimensions du processus de sélection d'une grue en proposant une approche globale suivie d'une approche spécifique. Il traite également des questions relatives à l'opération de levage en elle-même. D'emblée, il est spécifié que le questionnaire porte uniquement sur les grues automotrices à flèches télescopiques et sur les grues sur chenilles.

L'entièreté du questionnaire se trouve en annexe 9.

• Contenu

Le questionnaire est composé de 48 questions regroupées en 5 rubriques listées ci-dessous :

- Informations personnelles (4 Q.) afin de dresser le profil des personnes participant à l'enquête ;
- Informations sur les grues (5 Q.) afin de savoir quelle marque de grue, quel modèle et quel équipement sont le plus fréquemment utilisés ainsi que la nature de l'opération la plus souvent traitée par l'échantillon de personnes ;
- Processus de sélection d'une grue : approche globale (10 Q.).
Cette rubrique permet de décrire le processus de sélection et d'identifier les outils utilisés ;
- Processus de sélection d'une grue : approche spécifique (22 Q.).
Cette rubrique traite des étapes spécifiques au processus de sélection ;
- Levage (7 Q.).

• Forme

Concernant le format des questions, le questionnaire se compose de questions ouvertes (21), semi-ouvertes (9) et fermées (18).

Les questions fermées permettent de traiter plus facilement les données. Parmi les 18 questions fermées, 10 sont à réponse unique avec le choix d'une seule modalité (oui/non) et 8 sont des listes d'items à classer par ordre d'importance. Les questions semi-ouvertes se basent sur une série de réponses proposées avec une modalité ouverte. Elles permettent ainsi de compléter les propositions préalablement élaborées. Les questions ouvertes permettent de récolter des données riches et variées. Elles permettent aussi de recueillir des informations en rapport avec des problèmes qui n'avaient peut-être pas été envisagés. En revanche, le traitement des réponses de ce type est long (Lugen, 2015).

- Exemple de question fermée à réponse unique avec le choix d'une seule modalité :

12. Considérez-vous le processus de sélection d'une grue comme un processus itératif? *

- ☐ Oui
☐ Non

Figure 43 - Question 12 du questionnaire

(Source : Mincke F., 2021)

- Exemple de question fermée à classement régi par un ordre d'importance :

22. Dans quel ordre traitez-vous ces différentes catégories de facteurs auxquels il faut porter attention lors de la récolte des données de base? *

	1	2	3
Facteurs techniques dimensionnants (la + grande portée, la + grande hauteur, la charge nominale)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Conditions du site (dégagement disponible pour la grue et les équipements, caractéristiques du sol)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Description de l'objet à lever (sachant que ces informations conditionnent le type d'élingage)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Tableau 14 - Question 22 du questionnaire

(Source : Mincke F., 2021)

- Exemple de question semi-ouverte :

14. Selon vous, quelle(s) approche(s) correspond(ent) le mieux au processus de sélection d'une grue? *

- ☐ Une approche globale qui s'affine au fur et à mesure
☐ Une pré-sélection rapide suivie d'une analyse spécifique
☐ Une gestion de données dont les facteurs sont traités de façon égale
☐ Une gestion de données au sein desquelles des facteurs prépondérants peuvent être mis en évidence
☐ Un système de composition par hypothèses
☐ Une méthode basée sur l'expérience transmise par un formateur
☐ Il n'y a pas de méthode spécifique car il n'existe pas de liste exhaustive de critères ni d'ordre de résolution du problème (chaque critère et chaque condition étant spécifiques au projet).

Autre : ☐ _____

Figure 44 - Question 14 du questionnaire

(Source : Mincke F., 2021)

- Exemple de question ouverte :

42. Pour les questions de cette section, avez-vous des remarques ou d'autres points d'analyse à prendre en considération lors du travail de sélection d'une grue?

Figure 45 - Question 42 du questionnaire

(Source : Mincke F., 2021)

1.2. Modalités de réponses au questionnaire

Il est bien spécifié que le questionnaire est réalisé dans un cadre pédagogique et que les réponses seront uniquement traitées dans ce cadre. Après une présentation du sujet de mon travail, j'informe les participants du temps qu'ils devront consacrer à répondre aux questions, à savoir environ 20 minutes. Ce questionnaire se présente sur Google Forms, un moyen efficace pour récolter les données.

1.3. Sélection des participants

Le questionnaire est rédigé en trois langues (français, anglais, néerlandais) afin d'interroger l'échantillon le plus large possible parmi des personnes expérimentées dans le domaine du levage.

Concernant le moyen de partage, j'ai sollicité par mail des contacts fournis par mon co-promoteur, différentes entreprises de levage et de construction belges et françaises, ainsi que l'Association des ingénieurs diplômés de l'Université de Liège (AILg), pour qu'ils participent à l'enquête.

Pour recourir à une plus large participation à l'enquête, j'aurais pu par exemple, utiliser LinkedIn comme moyen de communication. Néanmoins, je n'aurais pas eu de contrôle sur le profil des participants et je risquais donc d'avoir des participants non ciblés par l'enquête.

2. Les entretiens

2.1. Élaboration des entretiens

Ces entretiens semi-directifs sont basés sur les supports suivants :

- La deuxième version du logigramme (cf. chapitre V section 1.2) ;
- Les slides reprenant les résultats de l'enquête (cf. annexe 7) ;
- Une série de questions axées sur 3 rubriques (cf. annexe 8). Elles sont pré-établies mais une flexibilité d'interaction avec l'interviewé est envisageable.

Avant la date prévue des entretiens, j'ai envoyé aux participants les slides présentant les résultats de l'enquête ainsi que la 2^{ème} version du logigramme afin qu'ils m'en donnent leur feed-back.

2.2. Modalités de participation aux entretiens

Les entretiens se déroulent par visio-conférence selon un agenda établi en commun accord avec les interviewés. La durée de l'entretien varie selon le profil des participants car certains développent un aspect du sujet plus qu'un autre. L'enregistrement (avec l'accord des interviewés) de ces discussions me permet de revenir ensuite sur des éléments qui viendront compléter ma prise de notes lors des entretiens. Chaque participant est interviewé individuellement pour ne pas qu'ils s'influencent dans leur réponse aux différentes questions.

2.3. Sélection des participants

A la fin du questionnaire, une dernière rubrique est consacrée à la possibilité d'interviews ciblées. J'ai donc contacté certains participants qui m'avaient laissé leurs coordonnées et avaient marqué leur accord pour être interviewés. Cette sélection se base surtout sur les réponses des participants qui avaient dit avoir une méthode systématique pour sélectionner une grue, puisqu'il s'agit d'approfondir certaines données afin de faire évoluer le logigramme. J'ai choisi d'interviewer 6 personnes ayant chacune un profil différent afin de diversifier l'échantillon.

3. Les visites de chantier

Cette phase a débuté au mois de mars après la lecture d'articles scientifiques ainsi que l'élaboration du questionnaire et s'est terminée au mois de juin. Durant cette période, j'ai pu visiter 11 chantiers. J'ai également pu assister à un levage avant de commencer ce travail de fin d'étude lors de mon stage chez Arcadis en octobre 2020.

3.1. Préparation des visites de chantier

Cette partie du travail a été chronophage car beaucoup de démarches ont dû être effectuées pour être accepté sur les sites. Ces démarches comprennent :

- Le repérage de chantiers pour lesquels un levage est prévu ;
- Les échanges de mails ou conversations téléphoniques avec les différents intervenants ;
- Les démarches administratives concernant la sécurité sur les chantiers.

J'ai tenté de trouver différents types de levage (montage, démontage, déplacement) ayant chacun leurs spécificités (chantier de construction résidentielle, chantier de construction génie civil, chantier éolien, site industriel, site de transport maritime, site ferroviaire) et pour lesquels différents modèles de grue étaient utilisés.

3.2. Réalisation des visites de chantier

Pour les visites de chantiers, je n'ai pas préparé de liste de questions à poser aux intervenants car ceux-ci étaient trop occupés. J'ai donc opté principalement pour une position d'observateur. J'ai alors suivi le travail de différents chefs de chantier, chefs de manœuvre, élingueurs et grutiers et j'ai pu confronter mes observations avec les informations données par les intervenants des chantiers. Mes observations et les rencontres avec les différentes personnes en charge du levage ont contribué à enrichir mes recherches.

Parmi ces différents chantiers, j'en ai sélectionné trois pour mes cas d'étude avec pour critères la qualité et la quantité d'informations disponibles pour ces levages.

IV. Traitement des données

Ce chapitre a pour objet l'analyse des données recueillies à l'aide du questionnaire, des entretiens et des visites de chantier.

1. Analyse des résultats de l'enquête

L'analyse complète des résultats de l'enquête se trouve en annexe 7.

1.1. Nature de l'échantillon

Malgré le nombre important de mails envoyés (~150) pour la participation à l'enquête, le taux de réponse est demeuré faible (~28%), même après une deuxième sollicitation. Le questionnaire est resté accessible sur l'application Google Forms du 02/03/2021 au 22/04/2021. Le lien a été beaucoup partagé mais je n'ai finalement reçu que 43 questionnaires complétés. 61% des participants font partie d'entreprises générales de constructions, 37% de compagnies de levage, les 2% restants reprenant un ingénieur retraité.



Figure 46 - Compagnies de levage ayant participé à l'enquête

(Source : Mincke F., 2021)



Figure 47 - Entreprises ayant participé à l'enquête

(Source : Mincke F., 2021)

On constate que les personnes qui ont rempli le questionnaire sont majoritairement des Belges ayant une formation d'ingénieur. J'ai demandé aux participants d'indiquer leurs années d'expérience dans le domaine du levage : il en ressort une valeur médiane de quinze ans et demi.

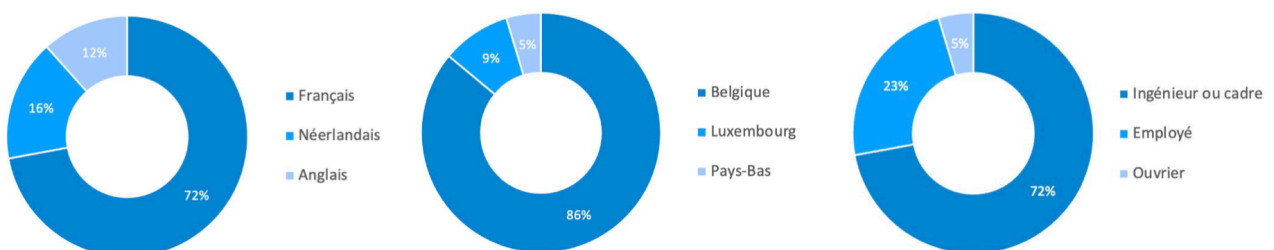


Figure 48 - Nature de l'échantillon de l'enquête

(Source : Mincke F., 2021)

1.2. Approche globale

• Définition

A la question 14, les participants ont été invités à choisir une ou plusieurs approches caractérisant le processus de sélection d'une grue. Trois définitions ont été mises en évidence. La définition « une présélection rapide suivie d'une analyse spécifique » a été choisie par 70% des participants.

Une présélection rapide suivie d'une analyse spécifique.	70 %
Il n'y a pas de méthode spécifique car il n'existe pas de liste exhaustive de critères ni d'ordre de résolution du problème (chaque critère et chaque condition étant spécifiques au projet).	30 %
Une gestion de données au sein desquelles des facteurs prépondérants peuvent être mis en évidence.	26 %
Une méthode basée sur l'expérience transmise par un formateur.	19 %
Une approche globale qui s'affine au fur et à mesure.	19 %
Un système de composition par hypothèses.	7 %
Une gestion de données dont les facteurs sont traités de façon égale.	5 %

Tableau 15 - Définitions du processus de sélection d'une grue (question à choix multiples)

(Source : Mincke F., 2021)

• Processus itératif

81% des participants considèrent que le processus de sélection d'une grue est un processus itératif. Ce processus consiste, par exemple, en un aller-retour entre le changement de position et de pression d'appui au sol, ou encore en un aller-retour entre les données de base (modification de ces dernières) et la pression d'appui au sol jusqu'à remplir la condition à satisfaire dans l'étape de vérification (pression d'appui au sol < capacité portante). Si l'itération ne donne rien, cela signifie que la grue dans sa configuration actuelle n'est pas compatible et qu'il faut chercher un autre équipement ou une autre grue.

• Outils utilisés pour la sélection d'une grue

Les outils utilisés peuvent influencer le temps nécessaire pour sélectionner une grue. Les fiches techniques/tableaux de capacité de levage fournis par les fabricants de grues sont les documents de base pour la sélection d'une grue. Un logiciel de simulation 3D est choisi en deuxième lieu par les participants ainsi que la représentation 2D (sur AutoCad ou à la main).

• Méthode systématique

58% des participants au questionnaire ont une méthode systématique pour sélectionner une grue. Cette question sur l'utilisation d'une méthode systématique ou non a orienté mon choix des personnes que j'allais solliciter pour une interview plus ciblée. J'ai donc essentiellement contacté des personnes ayant répondu affirmativement à cette question.

1.3. Approche spécifique

• Conditions de site

Parmi une liste de 9 facteurs en rapport avec les conditions de site, les résultats du questionnaire ne permettent pas de faire ressortir un classement préférentiel englobant tous les facteurs. Toutefois, il est possible d'identifier le facteur majoritairement placé en première position (l'accès au chantier), ainsi que le facteur qui se trouve en dernière position (taux d'émission de CO2).

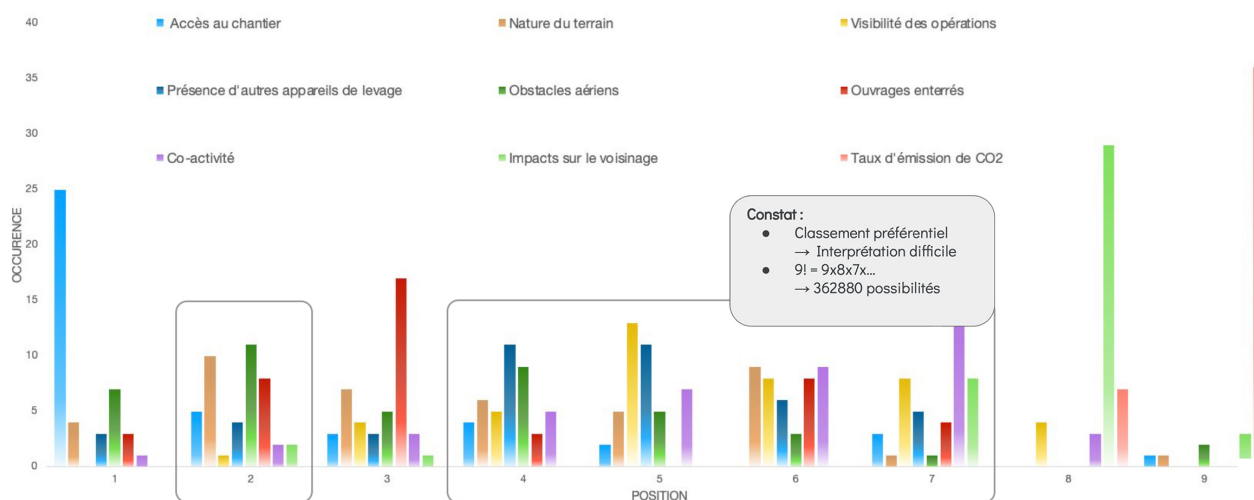


Figure 49 - Analyse du classement préférentiel concernant 9 facteurs en rapport avec les conditions de site

(Source : Mincke F., 2021)

• Élément à lever

Parmi une liste de 7 facteurs en rapport avec l'élément à lever, comme pour les conditions de site, on constate qu'il est difficile d'identifier un classement préférentiel car plus il y aura de facteurs impliqués, plus le nombre de permutations sera important.

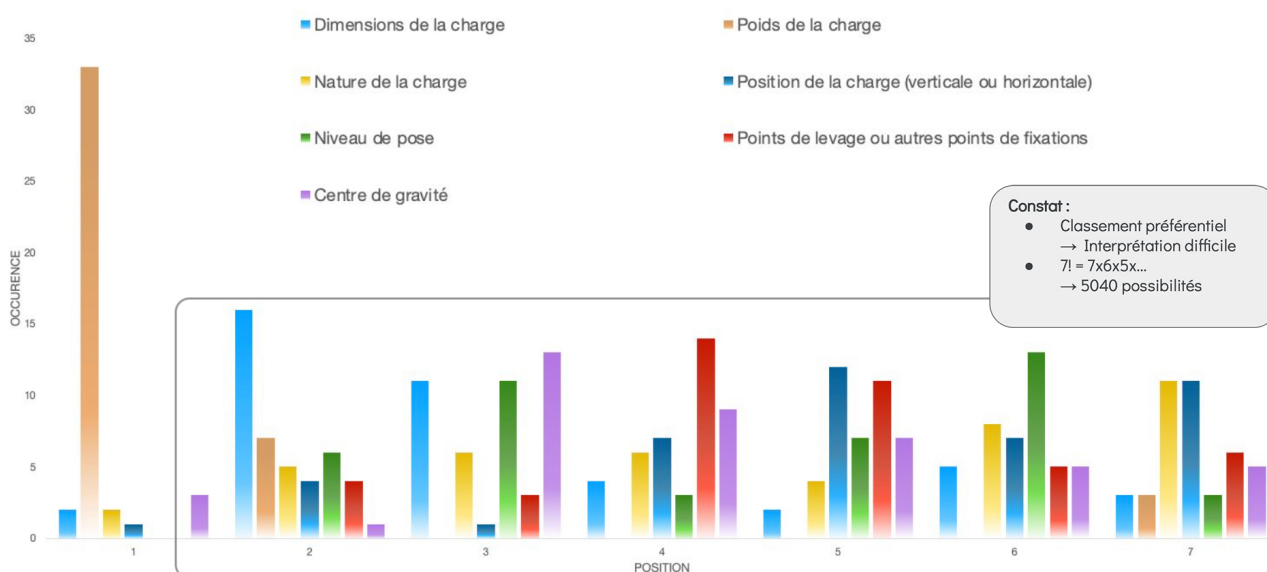


Figure 50 - Analyse du classement préférentiel concernant 7 facteurs en rapport avec l'élément à lever

(Source : Mincke F., 2021)

• Présélection

Au début de l'enquête, j'ai posé la question de savoir combien de grues/de configurations les participants envisageaient à partir des données de base qu'ils avaient sous les yeux. Plus tard, j'ai reposé la question pour savoir, hors des grues identifiées au début, combien il leur en restait. Les résultats obtenus à ces questions mettent bien en évidence le fait que l'on procède d'abord à une présélection lors du processus de sélection d'une grue. Ceci rejoint les réponses données pour la définition du processus proposée dans la rubrique sur l'approche globale.

• Phase de calcul

Pour la phase de calcul, une tendance de résolution du problème s'identifie clairement. 74% des participants calculent d'abord la capacité de levage, puis calculent le dégagement et ensuite, la pression d'appui au sol.

Calcul de la capacité de levage	1	1	2	2	3	3
Calcul du dégagement	2	3	3	1	2	1
Calcul de la pression d'appui au sol	3	2	1	3	1	2
	74%	9%	7%	5%	5%	0%

Tableau 16 - Classement préférentiel des étapes lors de la phase de calcul

(Source : Mincke F., 2021)

Une autre phase de calcul que je n'ai pas intégrée dans le classement préférentiel des 3 grandes étapes de calcul est celle du calcul du système d'élingage. La plupart des participants à l'enquête font ce calcul après ou entre ces trois étapes.

• Examen d'adéquation

77 % des participants au questionnaire réalisent une vérification des données calculées. Cette étape de vérification s'effectue donc après la phase de calcul et consiste en un examen d'adéquation entre les données de base et le résultat calculé. Si la condition est satisfaite, la grue est compatible au projet et on peut passer à la dernière étape : le choix de la grue.

• Choix de la grue

Lorsque plusieurs grues sont compatibles au projet, il convient de choisir la grue la plus adaptée sur base de différents critères. L'enquête montre que les critères qui ressortent comme étant prépondérants sont ceux du coût et de la disponibilité. Pour les autres critères, le constat reste le même que précédemment : il est difficile d'établir un classement préférentiel.

• Impondérables

Malgré la vérification de tous les critères pour dimensionner correctement une grue, il se peut que des impondérables obligent à trouver une solution B. La météo, le manque d'espace et les problèmes de stabilité sont les impondérables les plus fréquents.

1.4. Levage

• Plan de levage

J'ai demandé aux participants si un plan de levage était toujours réalisé et j'ai obtenu 53% de réponses affirmatives. L'emploi de l'adverbe « toujours » dans la question permet de nuancer les éléments de réponse : soit on interprète la réponse comme le fait de différencier le levage simple du levage critique (ce dernier exigeant toujours un plan de levage), soit il s'agit du cas où un client n'a pas demandé de plan de levage (celui-ci n'est donc pas réalisé).

Après avoir analysé différents plans de levage, j'ai remarqué que les informations fournies n'étaient pas mises en évidence de la même façon sur chaque plan. J'ai donc demandé aux participants de donner un ordre d'importance aux informations figurant sur un plan de levage. Voici l'ordre des informations présentes sur le plan de levage qui se dégage selon les participants : 44% des participants choisissent de placer le schéma d'implantation en premier lieu des informations figurant sur un plan de levage.

1	Schéma d'implantation	44 %
2	Caractéristiques du levage	40 %
3	Schéma d'élingage	33 %
4	Caractéristiques de la grue	23 %
5	Mode opératoire	37 %
6	Evaluation de la criticité	40 %

Tableau 17 - Ordre d'importance des informations figurant sur un plan de levage

(Source : Mincke F., 2021)

• Criticité d'un levage

Selon certains intervenants, la criticité du levage est définie par la culture de l'entreprise. En effet, il n'y a pas de norme concernant la criticité d'un levage. J'ai tout de même demandé aux participants d'établir un ordre parmi les 9 critères proposés permettant d'évaluer la criticité d'un levage. Voici la tendance qui se dégage dans l'ordre des propositions. 47% des participants estiment que la réserve de capacité de la grue est le premier critère permettant d'évaluer la criticité d'un levage.

1	La réserve de capacité de la grue	47%
2	La charge est levée à proximité de lignes électriques aériennes	47%
3	La charge est levée à proximité de bâtiments occupés ou au-dessus de zone piétonne	35%
4	La charge est levée au-dessus d'équipements en service	28%
5	Au moins deux appareils de levage sont nécessaires pour effectuer le levage	28%
6	La charge a une grande surface et un faible poids	30%
7	Absence de contact visuel entre le conducteur de l'engin et le chef de manoeuvre	33%
8	La charge est levée à xx mètres au-dessus du sol	30%
9	Présence de co-activité	30%

Tableau 18 - Classement préférentiel des facteurs en rapport avec la criticité d'un levage

(Source : Mincke F., 2021)

2. Analyse des entretiens

La difficulté majeure de ces entretiens réside dans le fait de devoir gérer le décalage entre ma position de chercheur débutant et mes interlocuteurs. Expérimentés et passionnés par leur travail, ils m'ont fourni un grand nombre d'informations mais, en réécoutant les enregistrements, j'ai constaté qu'ils ne répondaient pas forcément aux questions que j'avais préparées.

Lors de l'écoute des enregistrements, je ne retranscris pas la totalité des entretiens mais uniquement les idées intéressantes dans le but d'établir un corpus de référence qui m'aidera pour l'élaboration du logigramme. Rappelons que la partie principale de l'entretien est dédiée à la discussion sur la 2^{ème} version du logigramme. Il s'agit donc de faire tester cette version du logigramme par des experts en levage.

2.1. Nature de l'échantillon

Cinq participants de l'enquête ont accepté d'être interviewés. Ces différents intervenants avaient répondu, avoir une méthode systématique pour sélectionner une grue. J'ai également rencontré Lionel Sacré qui, en tant qu'auteur de deux ouvrages intéressants que j'ai lus, a pu me donner une vue globale sur le domaine du levage.

Entretien	Durée	Personnes	Entreprises
1	150 minutes	Lionel Sacré	Professeur à l'HEPL
2	90 minutes	Nik Andries	Besix
3	45 minutes	Anthony Canor	TIL group
4	60 minutes	Nicolas Clerbois	Besix
5	30 minutes	Damiano Caffont	Franki SA
6	45 minutes	Geoffrey Andrieu	Dufour

Tableau 19 - Nature de l'échantillon des entretiens

(Source : Mincke F., 2021)

2.2. Synthèse des informations

De manière générale, chaque intervenant a sa propre manière de travailler pour sélectionner une grue. Le terme « cuisine interne » est même utilisé dans l'entretien 2.

Concernant les remarques sur le logigramme, tous les intervenants s'accordent sur le fait qu'il s'agit de la logique à suivre pour le processus de sélection de la grue et qu'il s'agit d'une manière appropriée de résoudre le problème même si, dans la pratique, des *short cuts* sont opérés. De même, le logigramme liste chaque étape alors que dans la pratique, on ne les liste pas.

Le tableau 20 permet de visualiser les idées clés grâce à un relevé des informations récurrentes abordées au cours des différents entretiens.

Entretien	Données de base	Étape de calcul	Processus itératif	Coût & Temps	Optimisation	Disponibilité	Risques	Impondérables
1	x	x	x	x		x	x	x
2	x	x	x	x			x	
3	x			x	x	x	x	x
4	x				x		x	
5	x	x		x		x	x	
6			x	x	x	x	x	

Tableau 20 - Synthèse des informations relevées lors des entretiens

(Source : Mincke F., 2021)

Les participants mettent en évidence l'importance de *la collecte et du traitement des données de base* (première étape du logigramme) car cette étape constitue une grande part du travail à fournir. Les exigences liées aux desiderata du client ainsi que celles imposées par la communication, la réglementation, le respect du planning ainsi que l'aptitude des intervenants ressortent comme devant être considérées en premier lieu.

Concernant *l'étape de calcul* (troisième étape du logigramme), M. Andries a pointé le fait que le système d'élingage doit être dissocié du reste des étapes de calcul. Il s'agit en effet d'hypothèses (concernant le poids, la hauteur) qui doivent être confirmées et affinées au fur et à mesure de l'étape de calcul. Toujours pour cette étape, certains participants ont souligné le fait qu'ils ne réalisent pas eux-mêmes le calcul de la pression d'appui au sol car il s'agit d'un aspect du levage qu'ils sous-traitent à des bureaux spécialisés.

Le *caractère itératif* du processus de sélection d'une grue se confirme, car les intervenants soulignent le fait que si l'une des phases de calcul n'est pas satisfaite, soit il faut refaire les étapes de calculs précédentes, soit il faut envisager de modifier les données de base.

De ces différents entretiens, il ressort que *le temps et le coût* sont des facteurs importants dans toute opération de levage. *L'optimisation* a ensuite été abordée avec la sélection du modèle de grue le plus adéquat et la réduction du temps de travail. Il apparaît que le fait de faciliter le travail du grutier avant/pendant et après le levage favorise le respect du planning établi et donc, des coûts.

La disponibilité de la grue est un aspect très pragmatique. On envisage la disponibilité géographique des grues (dans un certain périmètre) et leur disponibilité au temps T pour l'opération. M. Canor soulève aussi le problème de la disponibilité des équipements de rechange. Même si l'on dispose d'une grue, un problème peut se poser au niveau d'une pièce.

Enfin, le risque est l'un des aspects du levage sur lesquels les participants insistent. Tout risque potentiel doit être anticipé au cours du processus de sélection d'une grue afin d'assurer la sécurité des opérations. Pour éviter tout problème, l'inventaire ainsi que la maintenance de la grue et de ses équipements, c'est-à-dire une inspection visuelle et une certification, doivent être réalisés. Pour contrer les impondérables, il faut toujours envisager une solution de rechange. La capacité à s'adapter est l'une des principales qualités d'un expert en levage.

3. Visites de chantier

Les visites de chantier ont mis en exergue la complexité spécifique de chaque opération de levage ainsi que la multitude de facteurs intervenant dans la sélection de la grue la plus adaptée à un projet. Elles m'ont permis d'étoffer et d'affiner la liste des facteurs qui composent les données de base.

Pour chacune des visites de chantier listée dans le tableau ci-dessous, une brève description de l'opération de levage, les apports de la visite de chantier ainsi qu'un relevé photographique seront exposés en annexe 1. A titre d'exemple, la cinquième visite de chantier sera exposée à la section suivante (IV. 3.1).

Les visites de chantier 2, 4 et 12 ne seront pas abordées dans l'annexe 1 car elles ont été sélectionnées comme cas d'étude (cf. chapitre VI). Pour ces levages, le processus de sélection va être analysé sur base de la méthode développée au chapitre V.

Visite	Date	Lieu	Type d'opération	Domaine d'application
1	19/09/20	Neufchâteau	Levage d'une pièce de logistique	Industriel
2	17 & 23/03/21	Fauvillers	Montage de cinq éoliennes	Eolien
3	29/03/21	Hermalle-sous-Argenteau	Levage de containers	Transport maritime
4	7/04/21	Ans	Préhension d'un cœur d'appareil de voie	Ferroviaire
5	12/04/21	Durbuy	Levage d'un broyeur	Industriel
6	13/04/21	Jupille	Démolition d'un pont barrage	Génie civil
7	13/04/21	Verviers	Démontage d'une grue tour	Résidentiel
8	14/04/21	Rocourt	Levage d'éléments préfabriqués	Résidentiel
9	16/04/21	Ampsin-Neuville	Démolition d'un pont barrage	Génie civil
10	16/04/21	Neupré	Montage d'une grue tour	Résidentiel
11	29/04/21	Liège	Pose des dalles d'un tram	Génie civil
12	23/06/21	Tilff	Démontage d'un pont Bailey	Génie civil

Tableau 21 - Visites de chantier

(Source : Mincke F., 2021)

3.1. Visite de chantier 5 : Levage d'un broyeur à la Carrière de Préalles (12/04/21)

- **But et brève description de l'opération de levage**


La société MB manutention est en charge du levage. Le but de l'opération est de placer un broyeur de 22 tonnes à l'intérieur d'un bâtiment. La complexité de ce levage réside dans les conditions de site. En effet, le bâtiment n'a pas d'ouverture au toit. Le grutier doit alors rentrer la flèche dans l'enceinte du bâtiment. Le grutier est positionné avec son LTM 1200-5.1 à une portée de 18 mètres du lieu de pose et opte pour une configuration plein calage avec vario-ballast de 52 tonnes (max. 72 tonnes). Un camion de transport est nécessaire pour transporter les contrepoids de la grue.

- **Apports de la visite de chantier**

C'est lors de cette visite de chantier que j'ai appris qu'il était possible d'effectuer un télescopage en charge, c'est-à-dire étendre la flèche alors que la charge est suspendue au crochet. Il s'agit néanmoins d'une opération à éviter car elle abîme la machine, mais dans ce cas de figure, le grutier n'a pas le choix. Par précaution, il faut bien graisser la flèche au préalable.

Les dégagements étant critiques pour cette opération, le grutier est même obligé d'enlever la fin de course de la tête de flèche pour gagner de la hauteur. En plus de faire attention à ne rien toucher, il doit aussi faire attention au retour du crochet pour éviter qu'il ne rentre dans les poulies. Son mouvement est composé du télescopage et de l'abaissement de la flèche en alternance. Pour le guider dans ses mouvements, un autre opérateur se trouvant à l'intérieur du bâtiment lui communique des informations par talkie-walkie.

Un autre apprentissage de cette visite de chantier est la découverte des abaques complets de la machine. Le grutier m'a montré la différence entre les « tableaux simplifiés » qui sont à disposition de tous et les siens. Dans ce document, on constate que pour une même longueur de flèche, à portée égale, il y a différentes charges admissibles en fonction du tronçon de flèche qui est télescopé. Cette information est importante car cela signifie qu'il y a des configurations de télescopage plus fortes que d'autres.



1	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	46 +
2	0 +	0 +	0 +	0 +	46 +	0 +	0 +	0 +	46 +
3	0 +	46 +	0 +	0 +	46 +	46 +	0 +	0 +	46 +
4	0 +	0 +	46 +	0 +	0 +	46 +	46 +	0 +	0 +
5	0 +	0 +	0 +	46 +	0 +	0 +	46 +	92 +	0 +
%									

Tableau 22 - Différentes configurations de télescopage « + »

(Source : Document avec les tableaux complets de la grue LTM 1200-5.1, p.566)

Le grutier m'a ensuite montré les informations sur le Liccon⁶. Quand les caissons de la flèche télescopique sont fixes, on dit que la flèche est « brochée ». Ces configurations sont représentées par le signe « + » dans les abaques complets. Lorsqu'il s'agit d'un télescopage en charge, le signe « - » est noté. On a par exemple « 0- et 46- », ce qui signifie que la portion de flèche en question varie entre 0 et 46 % de son extension. Force est de constater que les abaques sont différents pour un levage en flèche brochée et un levage avec télescopage en charge. Ce dernier a des valeurs de charge admissibles plus faibles qu'une flèche brochée avec une même configuration car il fait intervenir le vérin de télescopage qui se trouve à l'intérieur des caissons afin d'étendre la flèche. Une attention particulière doit donc être accordée à la planification du télescopage en charge.

⁶ Liccon est un logiciel de planification du travail des grues Liebherr.

- Relevé photographique



Figure 51 - Relevé photographique – visite de chantier à la Carrière de Préalles (12/04/21)

(Source : Mincke F., 2021)



Figure 52 - Relevé photographique – visite de chantier à la Carrière de Préalles (12/04/21)

(Source : Mincke F., 2021)

V. Proposition d'une méthode

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthode proposée sur base des recherches effectuées. Cette méthode s'appuie sur un logigramme⁷, une check-list, un tableur Excel et une grille d'optimisation qui permettent de guider les jeunes ingénieurs en charge du levage vers le choix de la grue mobile la plus adaptée à chaque projet.

1. Évolution du logigramme

Dans cette section, nous allons aborder l'évolution du logigramme au cours des recherches. L'évolution permet de mettre en évidence les apports des différentes démarches entreprises et leur impact sur l'évolution de la structure du logigramme.

Ce dernier a connu plusieurs formes provisoires qui ont été sujettes à discussion. Nous n'aborderons ici que les versions du logigramme affichant des changements notables dans le processus de réflexion et de sélection. Nous ne nous pencherons pas sur des versions intermédiaires en raison de leur manque de lisibilité qui peut conduire à des problèmes de compréhension du contenu.

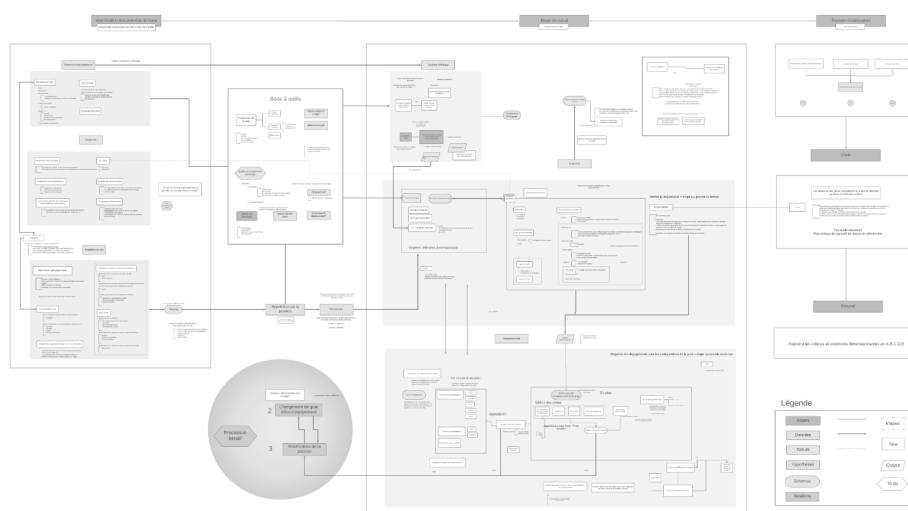


Figure 53 - Exemple de version intermédiaire - 19/04/21

(Source : Mincke F., 2021)

Dans un souci de compréhension de l'évolution, la qualité graphique des logigrammes a été uniformisée avec des couleurs d'étapes qui sont similaires entre chaque version.

⁷ Le logigramme est défini comme « un schéma qui décrit les étapes successives d'un processus » (La langue française en ligne, 2020).

1.1. Logigramme 1^{ère} version

Cette première version du logigramme est établie suite à l'analyse de la littérature (cf. chapitre II). Cinq étapes sont identifiées pour représenter le processus de sélection d'une grue mobile.

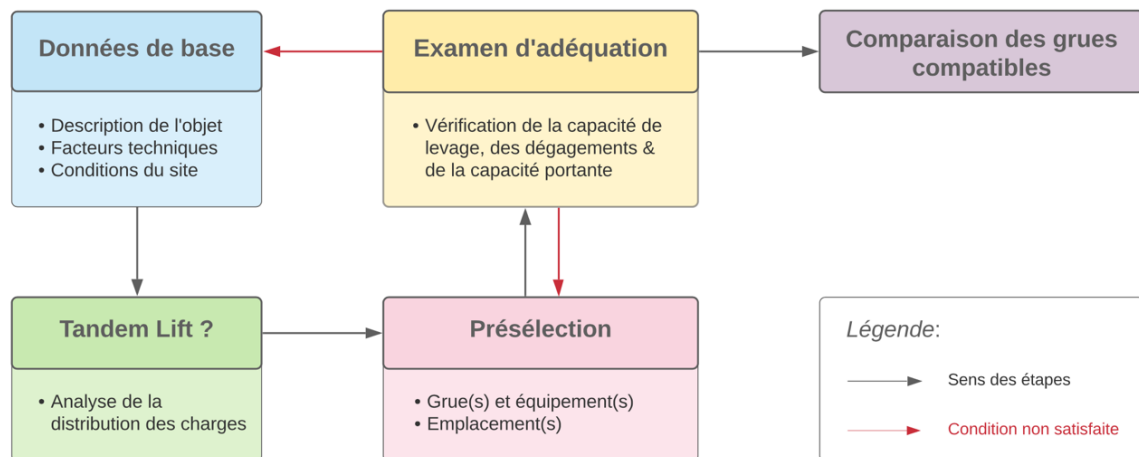


Figure 54 - Logigramme 1ère version - 04/01/21

(Source : Mincke F., 2021)

- **Données de base**

La première étape de la méthode proposée est représentée par la couleur bleue sur le logigramme. Elle consiste en la collecte et le traitement des données de base. Dans cette étape, trois points ont été identifiés comme étant des informations essentielles à récolter. Il s'agit de la description de l'objet à lever, des facteurs techniques dimensionnants (cf. chapitre II. partie 1 section 4.1) et des conditions du site.

- **Tandem lift**

La deuxième étape de ce logigramme consiste à se questionner sur le besoin d'une configuration de synchronisation de deux grues sur charge unique pour le levage. Comme exposé dans la méthode proposée par Han *et al.* (2018), ce questionnement apparaît au début du processus de sélection (cf. figure 42).

- **Présélection**

À partir de ces données de base, il est possible de déterminer le mode opératoire. Une sélection provisoire de la grue et de ses équipements ainsi qu'une réflexion sur la position à laquelle celle-ci va évoluer sont développées à la troisième étape représentée graphiquement par la couleur rose. La présence de cette étape a été influencée par la méthode proposée par Han *et al.* (2018) (cf. figure 40). Grâce à cette évaluation préliminaire, il est possible d'éliminer d'emblée certaines grues/configurations.

- **Examen d'adéquation**

Lors de cette quatrième étape (représentée par la couleur jaune), il faut vérifier que les conditions liées à la capacité de levage, aux dégagements et à la capacité portante du sol sont satisfaites pour les grues/équipements présélectionnés. Ces trois conditions ont été suggérées par la méthode proposée par Wu *et al.* (2011) (cf. figure 39).

Lorsqu'une des exigences n'est pas vérifiée, il faut trouver une alternative. Cette dernière consisterait à soit modifier les données de base, soit à retourner dans l'étape de présélection. Les flèches rouges sur le logigramme représentent les conditions non satisfaites.

Ces retours aux étapes précédentes montrent le caractère itératif du processus comme évoqué par Wu *et al.* (2011).

- **Comparaison des grues compatibles**

Si l'examen d'adéquation est vérifié, on peut passer à la dernière étape : on compare alors les possibilités restantes pour choisir la grue la plus adaptée au levage. Il s'agit donc d'une phase d'optimisation qui sera développée à la section 5 de ce chapitre. Les méthodes proposées par Hanna & Lotfallah (1999) et par Han *et al.* (2018) ont influencé cette étape.

1.2. Logigramme 2^{ème} version

Cette deuxième version du logigramme est établie suite à l'analyse des résultats de l'enquête (cf. chapitre IV section 1) et aux visites de chantier (cf. chapitre IV section 3). Comme dans la première version, le processus de sélection d'une grue mobile est représenté en cinq étapes. Néanmoins, des changements dans la structure et le contenu de ses étapes sont opérés. Une numérotation des étapes est ajoutée afin de faciliter la compréhension du processus.

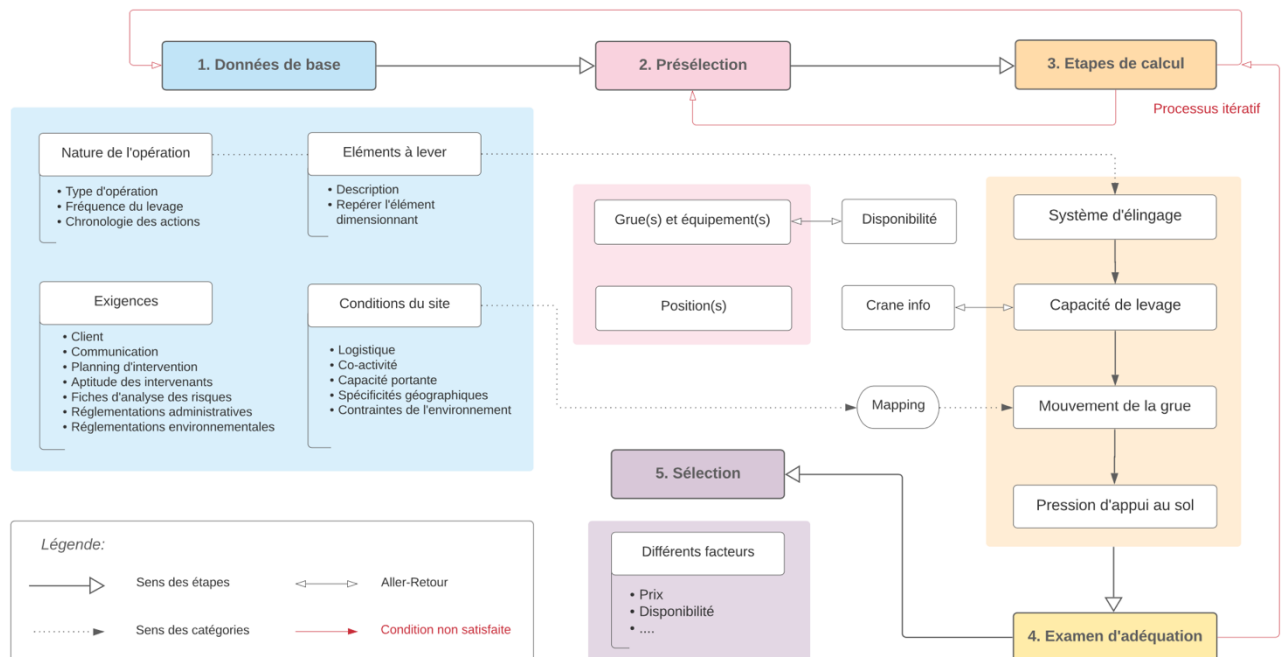


Figure 55 - Logigramme 2ème version - 18/05/21

(Source : Mincke F., 2021)

• Données de base

Cette étape comprend désormais quatre catégories de facteurs : la nature de l'opération, l'élément à lever, les exigences et les conditions du site. Pour chacune des catégories, des facteurs ont pu être listés grâce aux visites de chantier.

Suite à l'analyse des réponses aux questions de l'enquête portant sur le fait d'accorder un ordre d'importance à des facteurs au sein d'une même catégorie, il ressort que les facteurs ne peuvent pas être sujets à un classement préférentiel (cf. chapitre IV section 1.3). Ceci rejoint les constatations de Shapira & Schexnayder (1999) (cf. chapitre II partie 2 section 2).

Outre la présence d'informations supplémentaires dans cette version du logigramme, on peut aussi constater qu'il y a plus de flèches. En effet, des connexions entre catégories de facteurs ont été identifiées. C'est le cas pour la nature de l'opération et les renseignements sur l'élément à lever qui sont liés au système d'élingage car ces données vont le conditionner. Il en va de même pour les conditions du site et les mouvements de la grue.

La question portant sur le tandem lift n'est plus une étape à part entière du logigramme mais a été introduite dans la catégorie des données de base qui traite de la nature de l'opération. En effet, le tandem lift est une opération de levage spéciale rencontrée dans différents cas de figure (pour de plus amples détails sur ces cas, voir chapitre I. partie 1 section 6).

• Présélection

La présence d'une étape de présélection dans ce logigramme se confirme grâce au résultat d'une question de l'enquête (chapitre IV section 1.2). Cette dernière consistait à choisir une définition adéquate du processus de sélection. La définition « une présélection rapide suivie d'une analyse spécifique » a été choisie par 70% des participants (cf. tableau 15).

Les facteurs techniques dimensionnants sont retirés de l'étape 1 et sont introduits dans l'étape 2 de présélection car la portée, la charge et la hauteur ne sont pas toujours des données collectées. En effet, la portée et la hauteur sont liées à la position de la grue. Des hypothèses concernant les grues compatibles ainsi que leur(s) position(s) sont émises et seront affinées/vérifiées lors des étapes de calcul.

• Etapes de calcul

Une modification notable s'opère avec la présence des étapes de calcul (couleur orange) qui sont dissociées de l'examen d'adéquation (couleur jaune). Les étapes de calcul comportent quatre étapes à réaliser dans l'ordre suivant : calcul de l'élingage, de la capacité de levage, des mouvements de la grue et des pressions d'appui au sol. D'après l'enquête, cet ordre est le plus judicieux (cf. tableau 16). Il concorde également avec le logigramme développé par Wu *et al.* (2011) (cf. figure 39).

Une fois les étapes de calcul réalisées, nous pouvons passer à l'examen d'adéquation (« final check ») qui consiste à vérifier que tout a correctement été calculé.

• Sélection

Concernant la dernière étape du logigramme, peu de nouveautés ont été apportées. Il est toutefois bon de noter que, suite à l'analyse des réponses aux questions posées dans l'enquête, le facteur de la disponibilité est ressorti, au même titre que l'aspect économique, comme étant des éléments phares de la sélection.

• Processus itératif

Le processus itératif s'installe dorénavant entre les quatre premières étapes. Le renvoi de l'étape 3 à l'étape 2 survient lorsqu'une des phases de l'étape de calcul n'est pas satisfaite et qu'il n'y a pas d'alternative pour conserver la (les) grue(s) ou la (les) position(s) présélectionnée(s). Le renvoi de l'étape 4 à l'étape 3 est dû à la détection d'une erreur lors de la vérification finale des étapes de calcul.

• Disponibilité – Crane info – Mapping

Nous pouvons constater que certains éléments se trouvent à l'extérieur des étapes, tels que la disponibilité, les informations sur la grue et le mapping. Ce sont des éléments hors catégorie considérés comme des « boîtes à outils » auxquelles on doit recourir à différentes étapes.

Des doubles flèches sont employées pour signifier qu'il y a des allers-retours. Elles sont utilisées pour relier la disponibilité aux hypothèses proposées dans l'étape de présélection et pour relier les informations sur la grue au calcul réalisé pour la capacité de levage.

Le mapping consiste en une représentation des spécificités du site. Il est lié aux conditions du site et aux mouvements de la grue par une simple flèche. On a ainsi un premier plan de zonage et des coupes qui aideront à déterminer les mouvements de la grue.

1.3. Logigramme 3^{ème} version

Cette troisième version du logigramme a été établie suite aux entretiens avec des experts en levage (cf. chapitre IV section 2).

L'ordonnance des étapes est similaire à la deuxième version du logigramme. Une description du contenu des étapes a été ajoutée en-dessous des titres afin de faciliter la compréhension du processus.

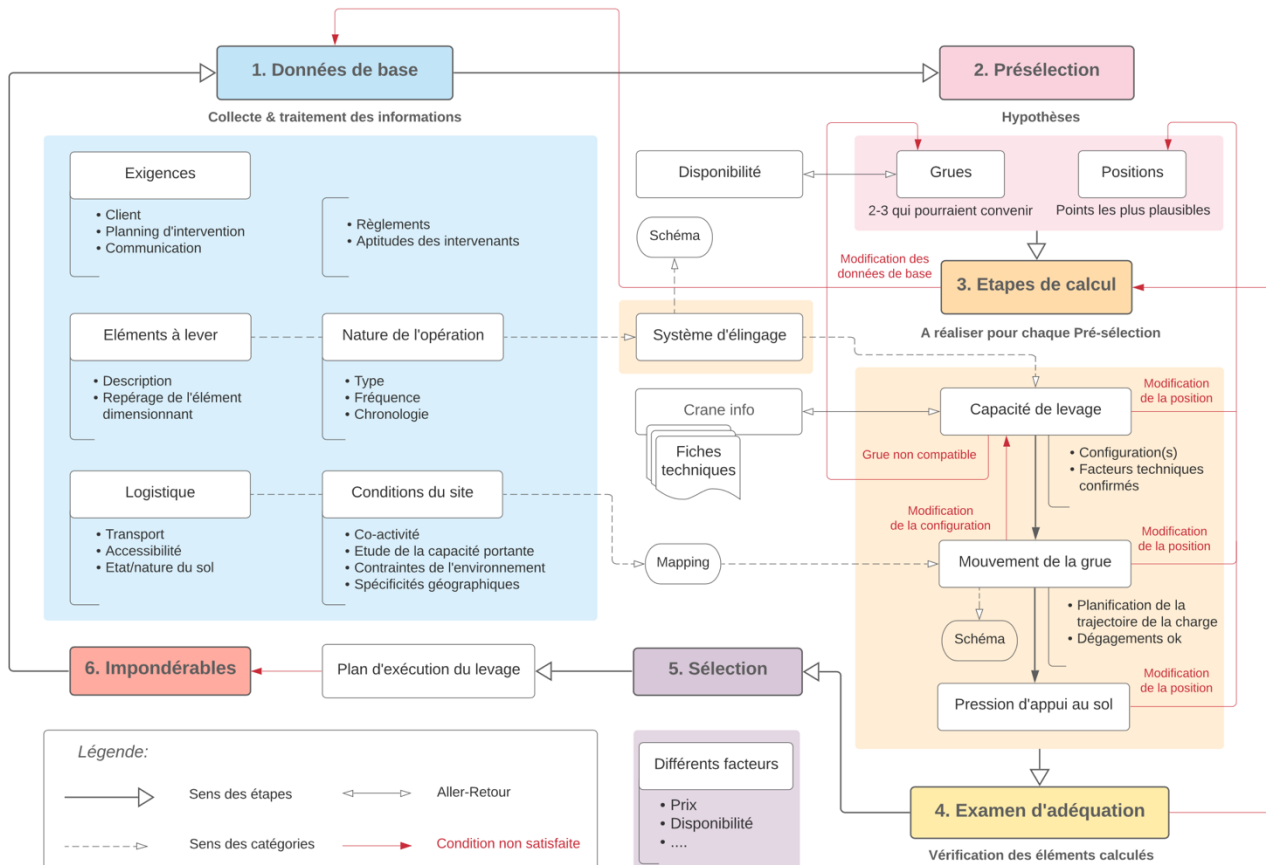


Figure 56 - Logigramme 3^{ème} version - 15/06/21

(Source : Mincke F., 2021)

• Données de base

Dans les données de base, une nouvelle catégorie concernant la logistique apparaît. Elle englobe les facteurs liés au transport, à l'accessibilité du site, à l'état et à la nature du sol. Cette catégorie se retrouvait dans la version précédente sous forme de point dans la catégorie concernant les conditions du site. Elle constitue désormais une catégorie à part entière et sera aussi représentée dans le mapping.

Par ailleurs, un ordre commence à se dessiner dans la collecte et le traitement des données de base car, suite aux entretiens, les exigences sont remontées en première position. Nous pouvons proposer l'ordre de résolution suivant : exigences, éléments à lever, nature de l'opération, logistique, conditions du site.

- **Etapes de calcul**

On constate que l'élaboration du système d'élingage est dissociée du reste des étapes de calcul. Dans la version antérieure, le système d'élingage se trouvait au-dessus du calcul de la capacité de levage, et cette position a été sujette à débat durant l'entretien 2 avec M. Andries. En effet, le fait de prioriser le système d'élingage peut être gênant dans la mesure où il ne s'agit pas de l'étape de calcul la plus importante. Son élaboration consiste en une étape de calcul à part entière qui se trouve désormais excentrée par rapport aux trois étapes principales de calcul.

La connexion entre le calcul du système d'élingage et le calcul de la capacité de levage est marquée par une flèche différente des autres flèches composant le sens des étapes. Le poids et la hauteur du système d'élingage doivent être introduits dans le calcul de la capacité de levage. Des hypothèses sur ces informations sont généralement émises et confirmées par la suite.

Le système d'élingage peut être simple ou complexe (illustration des propos cf. chapitre VI cas d'étude 1) et doit être illustré par le biais de schémas pour des questions de représentation.

- **Impondérables**

Il est important de noter que, de l'étape de sélection, on obtient un plan d'exécution du levage. Une flèche rouge lie ce plan à une nouvelle étape (point 6) qui vient s'ajouter : les impondérables. La présence de cette nouvelle étape se justifie par les résultats de l'enquête et suite aux visites de chantier. Malgré une bonne analyse de la situation, une fois sur un chantier de construction, d'éventuelles complications sont toujours possibles. Ces impondérables peuvent entraîner une modification des données de base et une nouvelle boucle à réaliser dans le logigramme de sélection.

Afin de prévenir d'éventuels problèmes, il faut envisager une solution de rechange. On peut mentionner comme impondérables, par exemple, les problèmes de planning, de gabarit, de pression au sol trop importante, de changements de disponibilité de la grue en un temps T, ou encore les conditions météorologiques défavorables (impondérable le plus fréquent d'après les personnes qui ont participé à l'enquête).

- **Processus itératif**

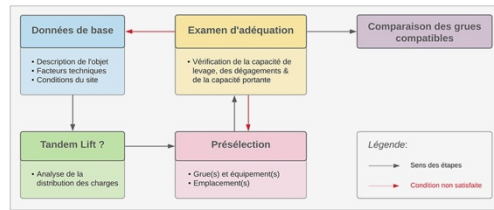
Dans cette version du logigramme, le processus itératif est plus détaillé. Il y a plus de connexions et il y a également des descriptifs définissant chaque flèche. En effet, le renvoi de l'étape 3 à l'étape 2 a été dissocié entre les changements de grues ou de positions. Un renvoi supplémentaire a été ajouté entre l'étape de calcul concernant les mouvements de la grue et la capacité de levage (illustration des propos cf. chapitre VI cas d'étude 2).

- **Disponibilité – Crane info – Mapping**

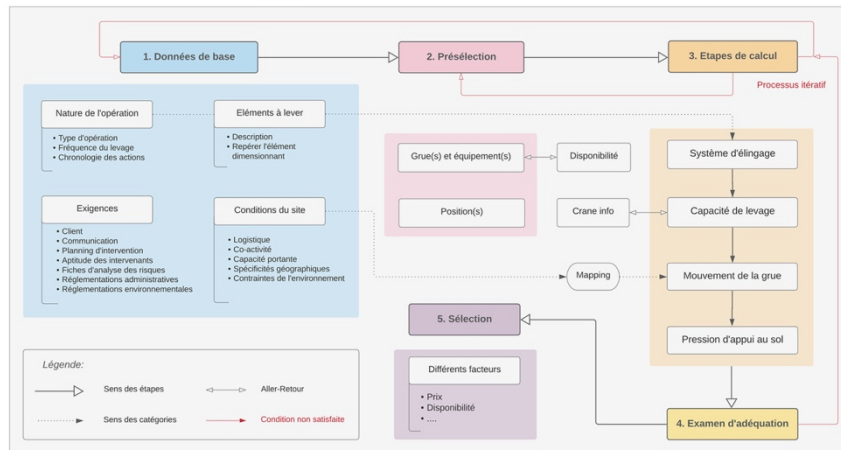
Remarquons que les « boîtes à outils » concernant la disponibilité, les informations sur les grues et le mapping prennent une place centrale dans cette version du logigramme (place précédemment occupée par l'étape de présélection). En effet, à la suite des entretiens, la disponibilité apparaît une nouvelle fois comme étant un élément déterminant dans le processus de sélection : si la grue n'est pas disponible, il est certain qu'on ne la sélectionnera pas (illustration des propos cf. chapitre VI cas d'étude 1). Les informations sur les grues (les fiches techniques) et le mapping sont aussi importants car on y fait appel dans les étapes de calcul.

1.4. Vue d'ensemble de l'évolution du logigramme

Logigramme première version



Logigramme deuxième version



Logigramme troisième version

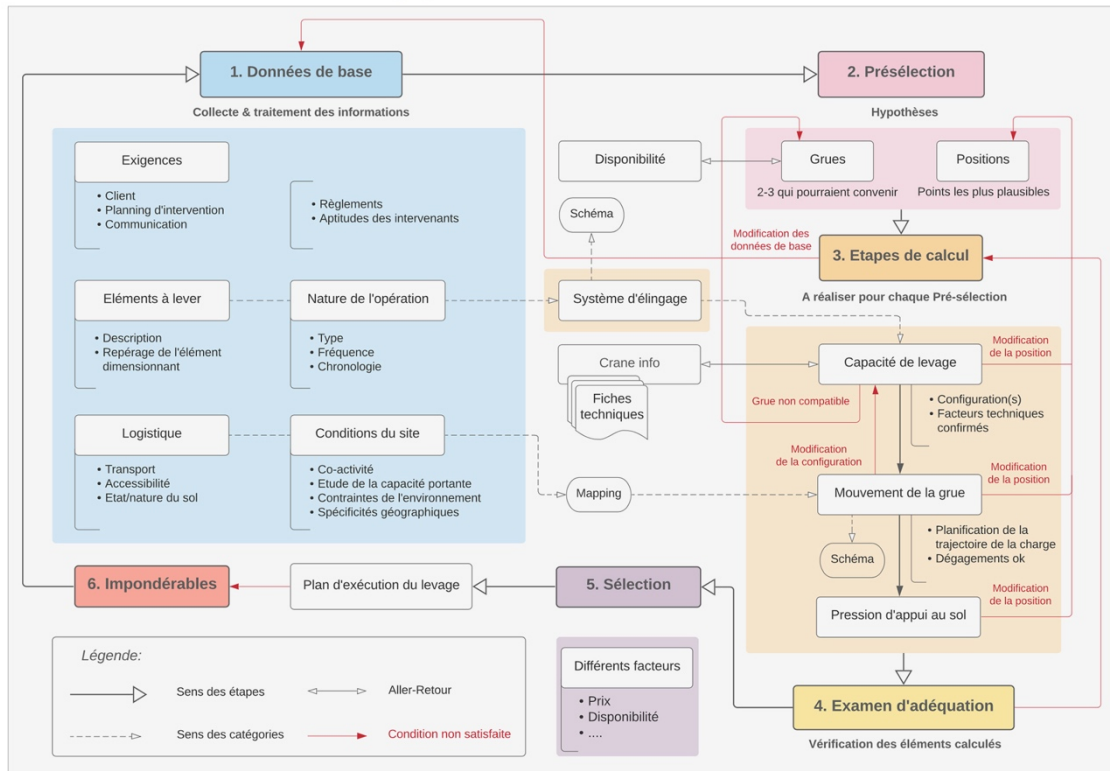


Figure 57 - Vue d'ensemble de l'évolution du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

2. Logigramme final

Le logigramme présenté à la figure 58 permet de comprendre aisément le chemin de réflexion nécessaire à la sélection d'une grue mobile adéquate. Cette dernière version plus sophistiquée est le résultat d'une évolution continue au fur et à mesure des recherches. Les informations contenues dans le logigramme étant synthétisées, ce dernier est accompagné d'une check-list.

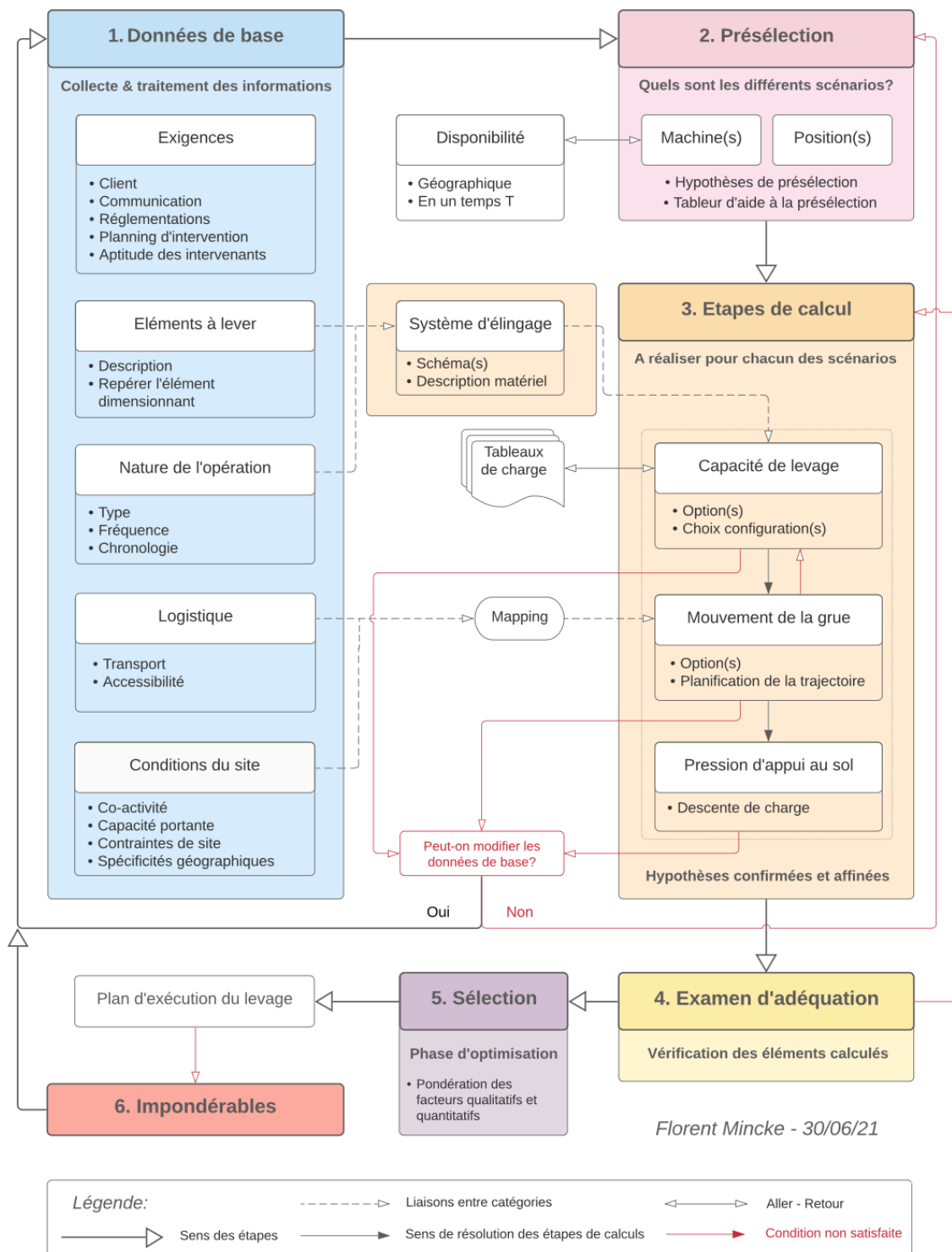


Figure 58 - Logigramme final - 30/06/21

(Source : Mincke F., 2021)

- **Scénario(s)**

Dans cette version finale, il apparaît au sein de l'étape de présélection l'idée d'élaborer des scénarios. Le mot scénario est défini comme « un ensemble de prévisions réalisées selon certaines hypothèses, et tenant compte des contraintes d'une situation » (Larousse en ligne, 2021).

Dans les versions précédentes du logigramme, il n'était question que d'hypothèses émises lors de cette étape mais il s'agit dorénavant d'imaginer une combinaison de variables afin d'envisager le déroulement des actions (illustration des propos cf. cas d'étude 2). Il s'agit d'un changement notable par rapport aux versions précédentes car les scénarios définissent différentes possibilités au problème posé. Les étapes de calcul et l'examen d'adéquation doivent être réalisés pour chaque scénario.

- **Option(s)**

Au sein des différentes étapes de calcul, il est maintenant envisagé d'avoir différentes options. Prenons, par exemple, l'étape de calcul qui traite de la capacité de levage afin d'expliquer ces différentes options. Il est possible de choisir différentes configurations de la machine (cf. chapitre II partie 1 section 5.2) qui peuvent convenir au projet de levage. Chacune de ces configurations constituera une option A, B, C,... du scénario en question.

- **Processus itératif**

Une dernière évolution notable observable sur ce logigramme consiste en l'embranchement dichotomique disposé de façon centrale. Ce dernier offre une meilleure représentation du processus itératif. Les trois étapes principales de l'étape de calcul renvoient maintenant vers l'étape 1 ou l'étape 2 suivant la réponse « oui » ou « non » à la question posée. Le logigramme est ainsi moins chargé.

Afin d'expliquer le processus itératif, prenons, par exemple, l'étape de calcul qui traite des pressions d'appui au sol. Si la condition n'est pas satisfaite à cette étape, c'est-à-dire si les pressions d'appui au sol dépassent la capacité portante du sol, il faut se poser la question de savoir si oui ou non les données de base sont modifiables, à savoir ici les conditions du site. Différentes possibilités peuvent être envisagées afin d'améliorer la capacité portante, comme par exemple créer un terrassement, une plateforme, des pieux... Il convient donc de chercher une solution pour valider l'étape de calcul en cause et conserver le scénario en cours de résolution.

Lorsqu'une des étapes de calcul n'est pas satisfaite et qu'il n'est pas possible de modifier les données de base, il faut changer de scénario.

3. Check-list

La check-list est élaborée en parallèle du logigramme. La check-list consiste en un document Excel à compléter qui suit la structure du logigramme et a pour but de détailler chaque élément qui le compose.

La version finale de cette check-list se trouve en annexe 2 et des versions appliquées aux différents cas d'étude figurent en annexe 3, 4 et 5. Une version miniature de cette check-list se retrouve dans la figure ci-dessous.

Figure 59 - Version miniature de la check-list

(Source : Mincke F., 2021)

4. Tableur Excel

Le tableur Excel suivant est développé dans le but de faciliter l'étape de présélection. Il est élaboré sur base du tableau des grues mobiles sur porteur de chez Sarens (Belgique). Ce tableau et le détail de la macro développée se trouvent **en annexe 3**.

Portée (m)	14
Charge (t) [Max 340,9 pour 5m]	21,5
Charge rectifié (t) [Max 375]	23,65
Catégories	140

Ballast "sur roues" (t)	
Max ballast (t)	30,8
Patin Longueur (m)	9,3
Patin Largeur (m)	8,3
Flèche principale Max (m)	66
Flèche treillis fixe/jib (m)	
Volée variable (m)	
Axe de rotation Ballast Y (m)	4,3

Tableau 23 - Résultats du tableur pour une portée de 14m et une charge de 21,5t

(Source : Mincke F., 2021)

En entrant la portée et la charge dans ce tableur (représentées en bleu dans le tableau ci-dessus), celui-ci donne une indication sur la catégorie de grue nécessaire pour réaliser le travail demandé. D'autres informations sont fournies comme le ballast nécessaire, la longueur de flèche, la présence d'équipement et des indications sur les dimensions.

5. Grille d'optimisation du choix

Cette section, représentée en mauve sur le logigramme, traite de la cinquième étape du processus de sélection d'une grue. L'objectif est de comparer les différents scénarios ainsi que leurs options respectives afin de sélectionner la grue la plus adaptée au projet.

L'outil développé à cet effet est représenté ci-dessous.

Pondération des facteurs pour chaque scénario et leurs options respectives								
Catégories des facteurs			Listing	Scénario 1		Scénario ...		Commentaires
				Option A	Option ...	Option A	Option ...	
Quantitatif	Facteurs ayant un caractère financier modulable	Coût direct	Machine Configuration de la machine Transport de la charge Transport de la machine Transport des équipements Intervention sur les contraintes de site Intervention sur la capacité portante (l'état/nature du sol) Intervention sur le design de l'élément à lever Matériel nécessaire pour l'élingage Main-d'oeuvre Durée du temps de travail L'organisation du chantier & son évolution					
		Coût indirect	Signalisation Permis / Demande d'autorisation Restrictions environnementales Fréquence du levage Chronologie des actions Co-activité Accessibilité Pression au sol Trajectoire de la charge Machine réserve de capacité					
Qualitatif	Facteurs relevant d'une certaine subjectivité		Désidérata du client Communication Impacts sur le voisinage Pré-qualification Conditions générales de l'équipement /de la machine Facilité de mise en oeuvre Complexité du système d'élingage Sécurité Risque					
Disponibilité	Géographique		Machine Equipement Matériel d'élingage					
	En un temps T		Machine Equipement Matériel d'élingage					
Facteur de correction			Laissé à l'appréciation du management					
Mutliplication des pondérations				0,0	0,0	0,0	0,0	

Tableau 24 - Étape 5 du logigramme - Grille d'optimisation du choix

(Source : Mincke F., 2021)

La proposition d'optimisation consiste à résoudre le problème de sélection de la grue la plus adéquate au projet par le biais d'une méthode MCDA « Multiple-criteria decision analysis », une analyse qui a pour objectif « d'aider à prendre une décision ou à évaluer plusieurs options dans des situations où aucune possibilité n'est parfaite » (Lehoux & Vallée, 2004, p.7.).

Pour ce faire, une liste de facteurs est établie sur base des trois premières étapes du logigramme. Les facteurs sont affectés d'une pondération échelonnée de 0 à 2 selon leur impact négatif/positif sur le projet et des qualificatifs sont assignés à chacune des pondérations accordées.

Etapes et facteurs listés dans le logigramme			Pondération				
			0	0,5	1	1,5	2
Données de base	Exigences	Désidérata du client	Non satisfait	Contraignant	Sans effet	Satisfait	/
		Communication	Impossible	Mauvaise	Normale	Bonne	Excellente
		Permis / Demande d'autorisation	Non délivrable	Longues démarches	Normal	Peu de contraintes	Pas de contrainte
		Signalisation	Impossible à mettre en oeuvre	Contraignante	Normale	Peu de signalisation	Pas de signalisation
		Restrictions environnementales	Non satisfaites	Contraignantes	Sans effet	Peu de contraintes	Pas de restriction
	Pré-qualification	Impacts sur le voisinage	Lourd	Contraignant	Normal	Peu d'impact	Aucun impact
		Durée du temps de travail	Très lent	Lent	Moyen	Rapide	Express
		Délai imparti entre choix & besoins sur chantier	Très lent	Lent	Moyen	Rapide	Express
		L'organisation du chantier & son évolution	Problématiques	Ralenties	Sans effet	Contribuent à l'avancement des travaux	/
			Pas d'accréditation	Mauvaise réputation	Sans effet	Bonne réputation	Affinité
Elément(s) à lever	Intervention sur le design	/	Contraignant de ne pas avoir la main sur le design	Sans effet	On a la main sur le design	/	
Nature de l'opération	Fréquence du levage	Très mauvaise	Mauvaise	Sans effet	Bonne	Excellente	
	Chronologie des actions	Impossible	Contraignante	Normale	Bonne	Excellente	
Logistique	Transport de la charge	Beaucoup trop	Trop	Normal	Peu	Minime	
	Transport de la machine	Beaucoup trop	Trop	Normal	Peu	Minime	
Conditions de site	Transport des équipements	Beaucoup trop	Trop	Normal	Peu	Minime	
	Accessibilité	Impossible	Pas facile	Normale	Facile	Très facile	
	Co-activité	Impossible	Contraignante	Sans effet	Absente	/	
	Intervention sur les contraintes de site	Impossible	Trop	Sans effet	Absente	/	
	Intervention sur la capacité portante (l'état/nature du sol)	Impossible	Trop	Sans effet	Absente	/	
Etape de calcul	Système d'élingage	Complexité	/	Complexe	Normal	Simple	/
		Matériel nécessaire	Beaucoup trop	Trop	Sans effet	Peu	Minime
		Facilité de mise en oeuvre	Très difficile	Difficile	Normale	Facile	Très facile
	Capacité de levage	Machine prix	Trop chère	Chère	Normale	Economique	Très économique
		Machine réserve de capacité	Surdimensionnee ou sous dimensionnée	Suffisante	Normale	Bien dimensionnée	/
		Configuration	Trop chère	Chère	Normale	Economique	Très économique
		Conditions générales de l'équipement / de la machine	Non inspectées	Vétustes	Normales	Neuves	/
Mouvement	Trajectoire de la charge	Non satisfaite	Complexe	Sans effet	Simple	/	
Pression au sol		Non reprise	Importante	Normale	Faible	/	
Disponibilité	Géographique	Machine	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/
		Equipement	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/
		Matériel d'élingage	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/
	En un temps T	Machine	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/
		Equipement	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/
		Matériel d'élingage	Indisponible	Délai	Pas de délai	Sur chantier	/

Tableau 25 - Liste des facteurs avec l'échelle de pondération et les qualificatifs

(Source : Mincke F., 2021)

A titre d'exemple, prenons la disponibilité géographique de la machine comme facteur ayant un impact sur le projet. On peut y accorder une des pondérations suivantes et les expliciter en commentaire : 0 - indisponible ; 0,5 - délai ; 1 - pas de délai ; 1,5 - sur chantier ; 2 - non applicable. Les pondérations inférieures au chiffre 1 ont donc un impact négatif sur le projet tandis que les pondérations supérieures au chiffre 1 ont un impact positif. Le chiffre 1 est affecté lorsque l'impact du facteur sur le projet n'est ni positif ni négatif. Il est possible que des pondérations soient non applicables pour certains facteurs. Celles-ci sont représentées par une barre « / » dans le tableau précédent. La pondération 1,5 signifie ici que la grue est déjà sur chantier et est prête à être utilisée, la pondération 2 étant non applicable à ce facteur.

Pour un scénario et une option donnée, une fois que toutes les pondérations ont été affectées aux facteurs ayant un impact sur le projet, la multiplication de toutes ces pondérations est ensuite effectuée. Il est bon de noter que si l'on accorde une pondération 0 à un des facteurs, tout le reste est annulé. Cela permet d'écarter directement la solution (illustration des propos cf. chapitre VI).

Les opérations précédemment énoncées sont ensuite reproduites pour chaque scénario/option imaginé. Chacune des possibilités de résolution du problème de levage se verra donc attribuer un score. Le classement des solutions s'opère par ordre décroissant des scores obtenus, la solution ayant le score le plus élevé étant la plus adaptée au problème posé.

Pondération des facteurs pour chaque scénario et leurs options respectives							
Catégories des facteurs			Listing	Scénario 1	Scénario 2		Scénario 3
					Option A	Option B	
Quantitatif	Facteurs ayant un caractère financier modulable	Coût direct	Machine	0,75	1,25	0,5	0,25
			Transport de la machine	0,75	1,5	1,5	0,25
			Transport des équipements	1,5	0,75	0,75	0,25
			Matériel nécessaire pour l'élingage	1,25	0,75	0,75	0,75
			Main-d'oeuvre	0,75	1,25	1,25	2
			Durée du temps de travail	1,5	1	1	1
		Coût indirect	Permis / Demande d'autorisation	1	1	1	0,5
			Machine réserve de capacité	0,75	1,25	0,5	0,5
			Qualitatif	Facteurs relevant d'une certaine subjectivité	Facilité de mise en oeuvre	1,5	1
Complexité du système d'élingage	1,25	0,75			0,75	1	
Risque	0,5	1			1	1	
Disponibilité		Machine	1	1	1	0	
		Matériel d'élingage	1,25	0,75	0,75	1	
Facteur de correction			Laisse à l'appréciation du management	score le + élevé 1	1	1	1
Mutiplication des pondérations				1,0	0,9	0,1	0,0

Tableau 26 - Exemple de grille d'optimisation du choix appliquée au cas d'étude 1

(Source : Mincke F., 2021)

Dans la grille d'optimisation, on peut également constater qu'une case est réservée à l'emploi d'un facteur de correction. Ce facteur permet d'introduire des éléments laissés à l'appréciation du management. Il peut être ajouté après avoir accordé les pondérations. Un commentaire peut également être introduit pour chacun des facteurs afin d'expliquer les pondérations accordées (cf. tableau 24).

Lors de l'application de la méthode d'optimisation proposée, il faut garder à l'esprit que chaque projet a des spécificités propres dont il faut tenir compte. Les facteurs qui peuvent intervenir dans le choix d'une grue mobile pour un projet de levage sont nombreux et divers (cf. chapitre 2 partie 2 section 2). On peut catégoriser ces facteurs afin de mieux les traiter. On différenciera les facteurs qui ont un caractère financier modulable de ceux qui sont plus subjectifs. Parmi les facteurs quantitatifs, il faut également différencier ceux qui sont corrélés de façon directe au prix de ceux qui le sont de manière indirecte.

Cette proposition d'optimisation rejoint la méthode proposée par Hanna & Lotfallah (1999) pour l'attribution de qualificatifs à des facteurs ainsi que la méthode proposée par Han, S. *et al.* (2018) pour l'attribution de pondération aux facteurs (cf. chapitre 2 partie 2 section 4.2). Cependant, la procédure scientifique développée dans cette cinquième étape du logigramme se différencie des méthodes assistées par ordinateur car le but de la manoeuvre employée est d'obtenir une méthode qui se situe entre la méthode courante (cf. chapitre 2 partie 2 section 4.1) et l'approche de pondération automatisée faisant appel aux logiciels de calcul.

VI. Application de la méthode

Ce chapitre a pour objet d'appliquer la méthode proposée à différents projets de levage. Pour faciliter la compréhension du processus de sélection, des commentaires détaillés accompagnent la réflexion alors que la check-list complétée pour chaque cas d'étude se retrouve en annexe 3, 4 et 5.

1. Cas d'étude 1 – Préhension d'un cœur d'appareil de voie à la gare de Ans

1. Données de base

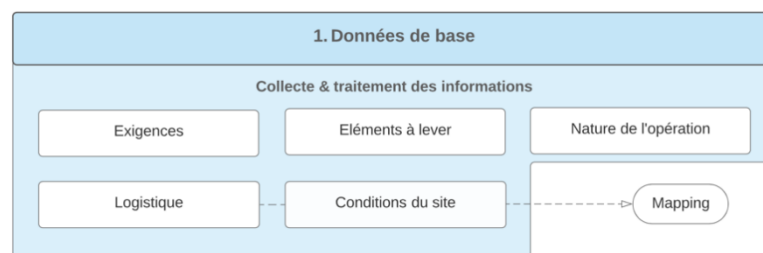


Figure 60 - Étape 1 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

■ 1.1. Exigences :

Le client doit libérer les wagons le 7/04/21. Il n'y a pas d'exigences en termes de réglementation car l'opération se réalise sur le parking du site d'Infrabel. Il faut uniquement prévoir un panneau pour indiquer aux employés qu'ils ne peuvent pas se garer dans la zone de levage en date du 7/04/21. En ce qui concerne le planning d'intervention, il s'agit d'une opération « one shot ». L'opération a été commandée ± 1 mois à l'avance et la date s'est imposée par le besoin de dégager la voie.

Dans la situation observée *in situ*, c'est l'entreprise MB manutention qui a été choisie pour réaliser le travail. Une pré-qualification a été menée afin de choisir au mieux les intervenants. Il s'agit de s'informer sur la réputation des différentes compagnies de location de grues dans la région de Liège (Jungling, Havart, MB Manutention, J. Boutique, Aertssen...) et de contacter la plus avantageuse économiquement tout en s'assurant de sa fiabilité, de sa régularité et de son expérience, sans oublier de considérer la vétusté de son matériel.

■ 1.2. Élément à lever :

La complexité de ce levage réside dans la nature de l'objet à manutentionner. La pièce, c'est-à-dire le cœur d'appareil de voie, ne peut pas subir de déformation. En effet, c'est un élément en métal de forme linéaire et de nature fragile. Il ne peut pas être modifié et sa charge est de 6,7 tonnes pour 28mètres de long. L'élément n'est pas régulier et son épaisseur est variable en raison des semelles sous les rails. Il faut également faire attention à l'endroit où l'on pose l'élément. Quatre points de levage sont répartis sur la longueur de l'élément.

■ 1.3. Nature de l'opération :

Le but de l'opération consiste à déplacer un aiguillage de chemin de fer qui se trouve sur un wagon en vue de le stocker. Il n'y a qu'une opération et elle est ponctuelle. En position initiale, l'élément se situe sur le wagon et, en position finale, sur les blocs de béton. La chronologie des actions se décompose en deux positions pour ce levage.

▪ 1.4. Logistique :

L'élément à lever arrive par la voie ferrée. Des réglementations en vigueur pour le transport ferroviaire sont à prendre en considération. Le wagon sera parallèle aux blocs de béton où l'élément devra être stocké. Dans l'optique d'un choix de grue mobile, il faut noter que la grue ne suit pas le même trajet que l'objet : elle peut arriver par la Rue Aily car son gabarit le permet et que le sol est une route bituminée en bon état.

▪ 1.5 Conditions du site :

Le bâtiment des bureaux de l'entreprise ne constitue pas un obstacle car il est séparé de la zone de levage par la route. En revanche, les poteaux d'éclairage sont des obstacles qui doivent être pris en compte. Aucune étude ne sera menée concernant la capacité portante du sol car nous partons du postulat que la zone bitumée est suffisamment résistante et qu'il y a absence d'impétrants.

▪ Mapping → Réalisé sur base de la logistique et des conditions du site

Les voies d'accès sont représentées par des flèches. En orange, on retrouve l'élément à lever. L'aplat bleu met en évidence la zone dans laquelle on peut implanter la grue. Il est bon de noter que, lors de la visite de chantier, les patins des grues étaient disposés sur la première voie de chemin de fer. Ces voies étant très résistantes, les grutiers ont pris l'initiative de se stationner à cet endroit afin de se rapprocher de la charge. Dans ce cas d'analyse théorique, nous n'implanterons pas les grues sur la zone représentée en rouge. L'aplat rouge représente les obstacles de l'environnement et les chemins de fer. Les carrés rouges sont les poteaux d'éclairage. Il faut faire très attention aux caténaires lorsqu'on réalise un levage proche d'une voie de chemin de fer. Dans ce cas-ci, ces obstacles aériens se trouvent suffisamment loin du lieu de levage.



Figure 61 - Mapping plan

(Source : Mincke F., 2021)

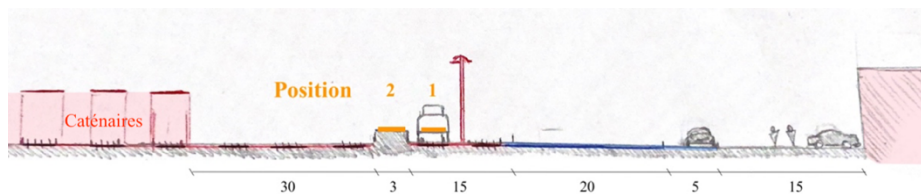


Figure 62 - Mapping coupe

(Source : Mincke F., 2021)

- *Relevé photographique*



Figure 63 - Relevé photographique – visite de chantier à la gare de Ans (7/04/21)

(Source : Mincke F., 2021)

2. Présélection

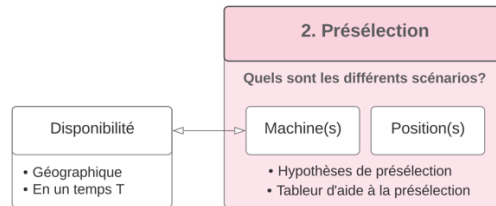


Figure 64 - Étape 2 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

Il est possible d'imaginer trois scénarios pour ce projet :

- Scénario 1 : deux grues mobiles de capacité réduite avec un élingage simple ;
- Scénario 2 : une grue mobile de plus grande capacité avec un élingage plus complexe ;
- Scénario 3 : une grue montée sur un wagon.

2.1. Positions :

Dans ce cas théorique, on ne se stabilise pas sur les voies de chemin de fer mais on implante la grue dans la zone bleue (sur le parking). Hormis les poteaux d'éclairage, l'environnement de ce projet comporte peu de contraintes.

Dans le cas des scénarios 1 et 2, la portée sera la plus grande au moment de déposer la charge dans la zone de stock. Pour le troisième scénario, c'est lorsque l'on prend l'élément.

Pour le scénario 1, les têtes de flèche des deux grues doivent être positionnées à 7,5m des extrémités. Il y a plus ou moins 14m entre les têtes de flèches. Dans le scénario 2, la tête de flèche doit être centrée par rapport à l'élément à lever. Et pour le troisième scénario, la grue sur rail pourrait se placer sur la deuxième ligne de chemin de fer après la zone de stockage afin d'avoir un recul suffisant. Une estimation des portées est indiquée sur les images ci-dessous.

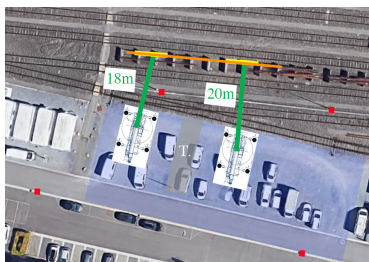


Figure 66 - Position Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

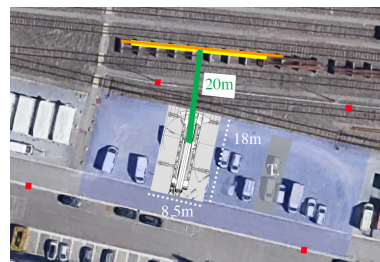


Figure 65 - Position Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

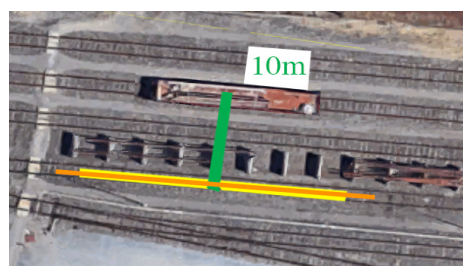


Figure 67 - Position Scénario 3

(Source : Mincke F., 2021)

▪ 2.2. Machines :

Dans le scénario 1, deux grues travaillent en tandem pour déplacer l'élément. Étant donné l'emplacement des points de levage, on peut émettre l'hypothèse que chacune des grues porte la moitié de la charge. L'une doit être capable de porter ce poids à 20 m, l'autre à 18m à cause du biais entre la zone de parking et les chemins de fer. En entrant ces données (figurant en bleu dans le tableau 20) dans **le tableur**, une catégorie de grue mobile « 70 tonnes » ressort, donnant une première indication sur les grues compatibles.

Pour le scénario 2, on émet une hypothèse d'un élingage plus lourd et d'une hauteur sous crochet plus grande.

Le tableur n'est pas applicable pour le scénario 3 car il ne s'agit pas d'une grue mobile. Cette grue spéciale pour les travaux de chemin de fer possède un élingage spécifique un peu plus lourd.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Hypothèses			
Hauteur sous crochet (Hsc en m)	~ 10	~ 15	~ 15
Charge du système d'élingage (t)	~ 2	~ 4	~ 5
Charge totale (t)	~ 9	~ 11	~ 12
Charge grue 1 (t)	~ 4,5	/	/
Charge grue 2 (t)	~ 4,5		
Tableur			
Portée (m)	~ 20	~ 20	/
Charge (t)	~ 4,5	~ 11	
Charge rectifiée (t)	4,95	12,1	
Catégories	70	120	
Patin Longueur (m)	8	7,2	
Patin Largeur (m)	6,3	7	
Flèche principale Max (m)	50	52	
Axe de rotation Ballast Y (m)	3,46	3,84	
Grues présélectionnées			
Marque	Grove	Liebherr	Heiring - Kriow
Type	Grue mobile sur porteur	Grue mobile sur porteur	Grue sur rail
Modèle	GMK 3060	LTM 1120-4.1	KRC 810 125t
• Grue 2			
Marque	Liebherr		
Type	Grue châssis de camion		
Modèle	LTF 1060-4.1		

Tableau 27 - Tableau résumé de la présélection pour chaque scénario

(Source : Mincke F., 2021)

▪ **Disponibilité :**

- **Géographique :**

Le lieu de levage se trouve à Ans, une commune située près de Liège. Le bassin liégeois est dense en entreprises de location de grues (J. Boutique, Jungling, Havart, MB Manutention, Aertssen,...) et l'on peut y trouver la gamme de grues requise pour réaliser les scénarios 1 et 2. En revanche, il est possible que le matériel nécessaire pour le système d'élingage du scénario 2 ne soit pas tout de suite disponible (besoin d'un grand palonnier).



Figure 68 - Disponibilité géographique

(Source : Google Maps)

Pour le scénario 3, la disponibilité de la machine et de ses équipements pose problème. En effet, d'après les acteurs du terrain, il n'existe que très peu de grues sur rail aptes à effectuer ce travail en Belgique. Infrabel n'a donc pas pu faire appel à une grue sur rail. En conséquence, ce scénario ne sera pas traité dans la phase de calcul.

Au niveau du parc de grues interne à l'entreprise Infrabel, ils n'ont pas de grue mobile à leur disposition. La société dispose seulement d'une grue sur rail sur le site, mais elle n'a pas la capacité de levage requise pour ce travail.



Figure 69 - Grue sur rail à la gare de Ans

(Source : Mincke F., 2021)



Figure 70 - Grue sur rail - KRC 810 125t

(Source : <https://www.kirow.de/fr/products/railway-logistics/multi-tasker/>)

- **En un temps T :**

L'opération a été commandée plus ou moins un mois à l'avance et la date a été imposée.

3. Phase de calcul

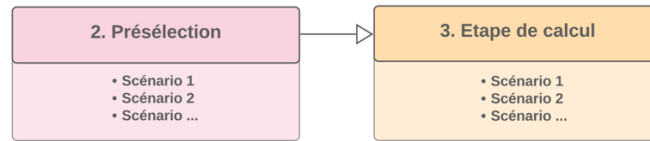


Figure 71 - Illustration du passage de l'étape 2 à l'étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

SCENARIO 1

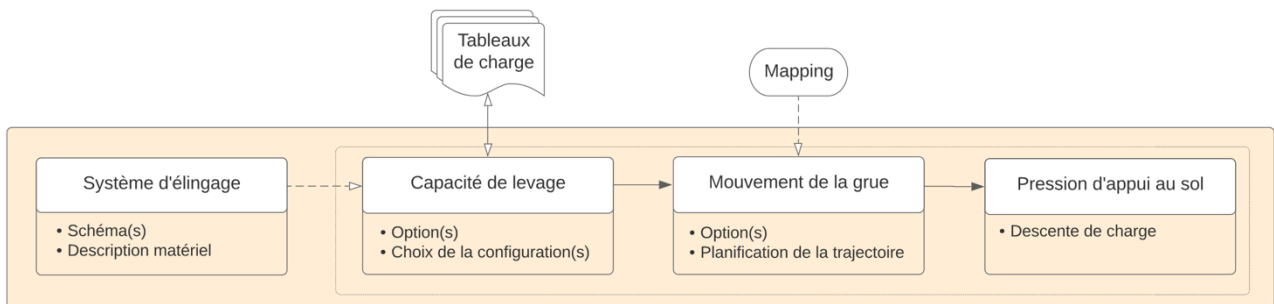


Figure 72 - Étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

3.1. Système d'élingage :

L'élingage doit être réfléchi afin d'éviter que la pièce ne fléchisse sous son propre poids.

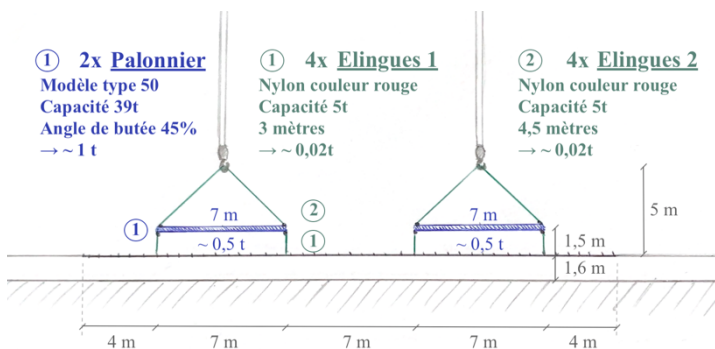


Figure 73 - Schéma du système élingage - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

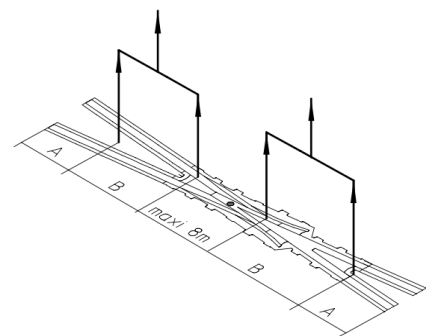


Figure 74 - Plan de préhension des cœurs d'appareils de voie

(Source : F32 plan réalisé par Infrabel)

Les hypothèses conservatrices prises à l'étape 2 peuvent être réduites :

Hypothèses corrigées	
Hauteur sous crochet minimale (Hsc en m)	6,6
Système d'élingage (t)	~ 1
Charge totale (t)	~ 8
Charge grue 1(t)	~ 4
Charge grue 2 (t)	~ 4

Tableau 28 - Hypothèses corrigées - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

3.2. Capacité de levage :

Une configuration simple sans équipement de flèche sera utilisée pour une question de rapidité d'exécution. On opte pour une position plein calage⁸ car l'espace disponible est largement suffisant et cela permet d'avoir une plus grande capacité de levage. Une pondération sur la charge devra être considérée car le tandem lift est une opération risquée.

Facteurs techniques		
Grues	GMK 3060	LTF 1060-4.1
Charge nominale (t)	4	
Portée maximale (m)	18	20
Hauteur min tête de flèche (m)	10	

Tableau 29 - Facteurs techniques - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

Sur base de ces facteurs techniques, il faut recourir aux fiches techniques des grues afin de déterminer leurs configurations. La méthode employée est la même que celle définie dans la section 5 partie 1 de l'état de l'art. Pour trouver la bonne configuration, on regarde d'abord dans le diagramme de charge pour trouver le télescopage nécessaire. On regarde ensuite dans le tableau de charge la charge indiquée à la portée et au télescopage précédemment défini. Il faut veiller à choisir le bon tableau de charge correspondant aux ballasts, à l'empattement et à la configuration de flèche voulus. La charge indiquée dans le tableau doit être supérieure à la charge de l'élément à lever.

- Grue 1 : Grove GMK 3060

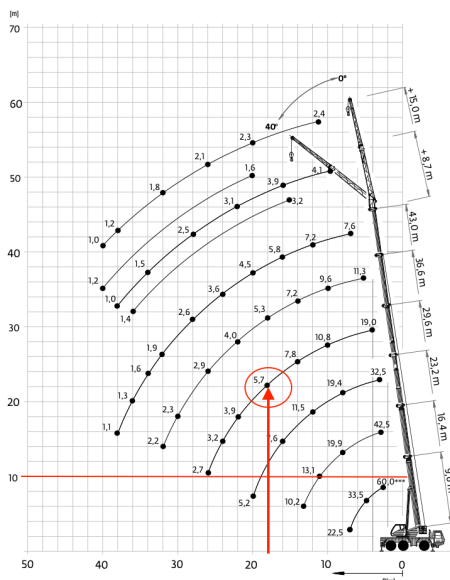


Figure 75 - Diagramme de charge - GMK 3060

(Source : Fiche technique GMK 3060, p.8)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

9,6 - 43,0 m

6,2 m

360°

13,6 t

EN 13000

m	9,6°	9,6	13,0	16,4	19,8	23,2	26,8	30,4	34,0	36,6	40,2	43,0	m
2,5	60,0***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5
3,0	48,5	45,0	45,5	42,5	38,5	32,5	23,5	-	-	-	-	-	3,0
4,0	41,0	37,5	37,5	36,5	33,5	29,5	21,5	19,0	-	-	-	-	4,0
5,0	33,5	32,0	32,0	30,5	28,5	26,0	19,4	17,5	14,4	11,3	-	-	5,0
6,0	27,5	27,5	27,5	27,0	25,5	23,5	17,9	16,1	14,2	11,3	9,0	-	6,0
7,0	22,5	22,5	23,0	22,5	22,5	21,0	16,3	14,7	13,2	11,3	9,0	7,6	7,0
8,0	-	-	19,9	19,9	19,7	19,4	15,2	13,3	12,2	10,9	9,0	7,6	8,0
9,0	-	-	17,3	17,4	17,1	16,9	14,1	11,9	11,3	10,3	9,0	7,6	9,0
10,0	-	-	15,0	15,1	14,7	14,6	13,0	10,8	10,3	9,6	8,6	7,6	10,0
11,0	-	-	-	13,1	13,1	12,9	12,2	9,7	9,3	8,9	8,1	7,5	11,0
12,0	-	-	-	11,6	11,6	11,3	11,5	9,1	8,6	8,4	7,7	7,2	12,0
13,0	-	-	-	10,2	10,2	9,9	10,3	8,4	8,0	7,8	7,3	6,8	13,0
14,0	-	-	-	9,0	9,3	9,1	9,6	7,8	7,4	7,2	6,9	6,5	14,0
15,0	-	-	-	-	8,0	8,4	8,2	7,1	6,8	6,6	6,5	6,2	15,0
16,0	-	-	-	-	7,3	7,6	7,3	6,7	6,4	6,2	6,1	5,8	16,0
18,0	-	-	-	-	-	6,3	6,0	5,7	5,6	5,3	5,3	5,2	18,0
20,0	-	-	-	-	-	5,2	5,0	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	20,0
22,0	-	-	-	-	-	4,2	3,9	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	22,0
24,0	-	-	-	-	-	-	2,9	3,2	3,2	3,3	3,5	3,6	24,0
26,0	-	-	-	-	-	-	-	2,7	2,7	2,9	3,2	3,1	26,0
28,0	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	2,6	2,9	2,6	28,0
30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,9	2,4	2,5	2,2	30,0
32,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	2,1	1,9	32,0
34,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8	1,6	34,0
36,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,3	36,0
38,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	38,0

*** Over rear with special equipment • nach hinten mit Sonderausrüstung • En arrière avec équipement supplémentaire • Per la parte traseri con equipo adicional • Sull'anteriore con equipaggiamento ausiliario • Над задний частью с специальным оборудованием

Tableau 30 - Tableau de charge - GMK 3060

(Source : Fiche technique GMK 3060, p.9)
(Modifié par : Mincke F., 2021)

⁸ Le plein calage signifie que l'empattement des stabilisateurs est en extension maximale.

- Grue 2 : Liebherr LTF 1060-4.1

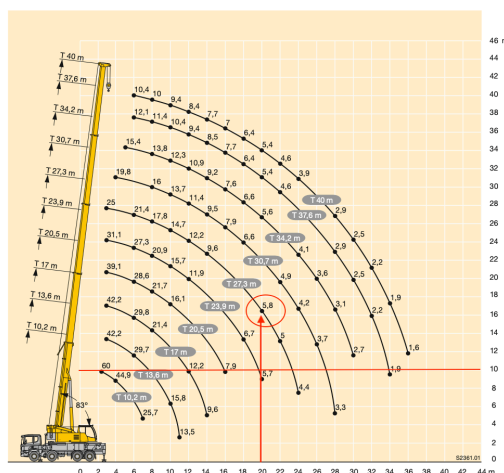


Figure 76 - Diagramme de charge - LTF 1060-4.1

(Source : Fiche technique LTF 1060-4.1, p.7)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

		EN											
		T											
		10,2 m	13,6 m	17 m	20,5 m	23,9 m	27,3 m	30,7 m	34,2 m	37,6 m	40 m		
m												m	
2,5	60											2,5	
3	55,1	42,3	42,2	42,2	39,1	31,1	25					3	
3,5	50,3	42,3	42,3	41,4	38,5	31,3	24,8					3,5	
4	44,9	42	41,6	39,1	37,3	31,4	24,6					4	
4,5	40,2	38,8	38,8	36	33,8	31,2	24,1	19,7				4,5	
5	36,7	35,3	35,3	33,4	31,5	30,3	23,4	19,5	15,4			5	
6	30,5	29,4	29,7	29,8	28,6	27,3	21,4	18,5	15,1	12,1	10,4	6	
7	25,7	24,7	25	25,1	25,5	24,4	19,4	17,2	14,5	11,8	10,2	7	
8			21,5	21,4	21,7	20,9	17,9	16	13,8	11,4	10	8	
9			18,4	18,7	18,7	18	16,3	14,8	13,1	10,9	9,7	9	
10			15,8	16,2	16,1	15,7	14,7	13,7	12,3	10,4	9,4	10	
11			13,5	13,9	13,9	13,6	13,4	12,6	11,6	9,9	8,9	11	
12				12,2	12,1	11,9	12,2	11,4	10,9	9,4	8,4	12	
14				9,6	9,6	9,9	9,6	9,5	9,2	8,5	7,7	14	
16					7,9	8,1	7,9	7,9	7,6	7,7	7	16	
18						6,7	6,6	6,6	6,6	6,4	6,4	18	
20						5,7	5,7	5,7	5,6	5,4	5,4	20	
22							4,9	4,9	4,8	4,6	4,6	22	
24								4,2	4,1	3,9	3,9	24	
26								3,7	3,6	3,4	3,4	26	
28									3,1	2,9	2,9	28	
30										2,7	2,5	30	
32											2,2	32	
34											1,9	34	
36											1,6	36	

Tableau 31 - Tableau de charge - LTF 1060-4.1

(Source : Fiche technique LTF 1060-4.1, p.4)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

Un facteur correctif sur la charge ou sur le tableau de charge pourrait être introduit car on est en présence d'un tandem lift. Cependant, l'analyse de la capacité de levage relève que les deux grues ont une réserve de capacité de 30% chacune et, étant donné l'hypothèse émise selon laquelle chaque grue reprend la moitié de la charge totale, les grues en question sont compatibles pour ce levage sous la configuration définie.

Configurations choisies		
Grues	GMK 3060	LTF 1060-4.1
• Télescopage flèche principale (m)	30,4	27,3
• Mouflage	Selon le grutier	
• Ballast (t) (full ballast ici)	13,6	10,2
• Empattement (m)	6,2	6,85
• % de la capacité	70	69

Tableau 32 - Configurations des grues - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

3.3. Mouvement de la grue :

Il faut maintenant définir la trajectoire de la charge. L'élément doit être déplacé de la position 1 à 2. Le mouvement en charge que devront effectuer les grues est simple et sera composé d'un relèvement du crochet suivi d'un abaissement de flèche et enfin, d'un déroulement du câble.

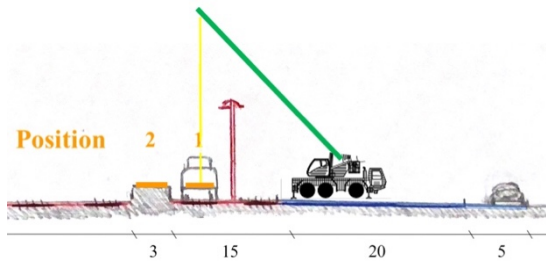


Figure 77 - Coupe Position initiale - GMK 3060

(Source : Mincke F., 2021)

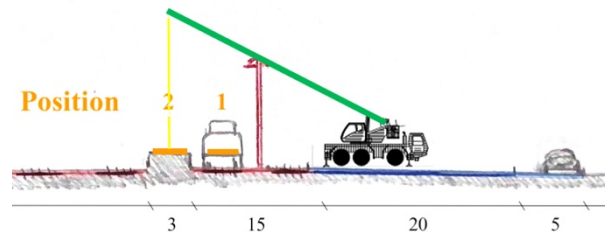


Figure 78 - Coupe Position finale - GMK 3060

(Source : Mincke F., 2021)

Sur base du mapping, il est possible d'identifier les zones de rotations limitées comme représentées en rouge sur la figure 79. Les lampadaires constituent un obstacle à la rotation de la grue GMK 3060. Les cercles rouges sont représentés pour la configuration choisie au point 3.1. Dans ce cas d'étude, le mouvement en charge est simple et les contraintes de site le sont tout autant. Cependant, étant donné qu'il s'agit d'un tandem lift, il faut aussi veiller aux zones de collision possible entre les flèches des deux grues.

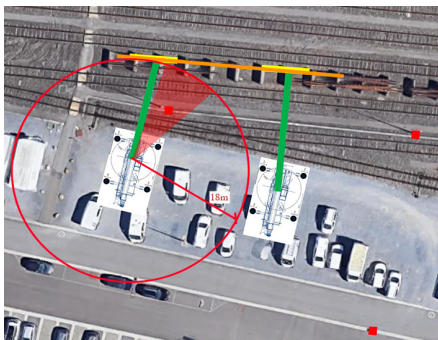


Figure 79 - Rayon max - GMK 3060

(Source : Mincke F., 2021)

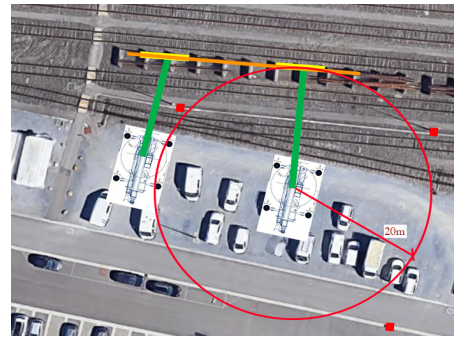


Figure 80 - Rayon max - LTF 1060-4.1

(Source : Mincke F., 2021)

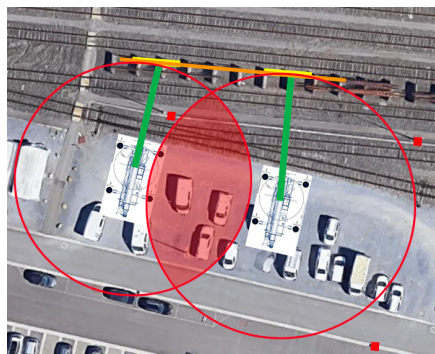


Figure 81 - Zone de collision entre flèches

(Source : Mincke F., 2021)

▪ 3.4. *Pression d'appui au sol :*

En ce qui concerne les pressions d'appui au sol, il n'y a pas besoin de vérifier la capacité portante du sol dans ce cas de figure car le sol est une surface en bitume en bon état. En effet, il faut seulement veiller à bien placer des plaques de répartition en-dessous des patins de la grue pour une meilleure répartition des efforts dans le sol.

Il est toutefois bon de noter que les stabilisateurs qui se trouvent en dessous de la flèche vont reprendre un effort un peu plus important en charge que ceux situés en-dessous des contrepoids (représentés en rouge sur la figure 82).

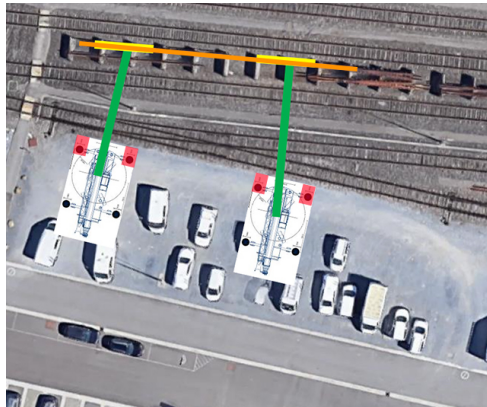


Figure 82 - Pression d'appui en charge

(Source : Mincke F., 2021)

SCENARIO 2

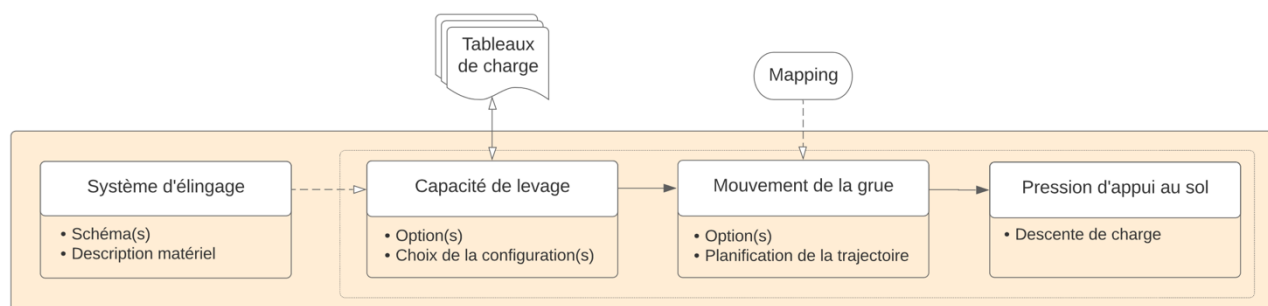


Figure 83 - Étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

■ 3.1. Système d'élingage :

Le palonnier écarteur modulable permet de déplacer cette charge de forme élancée. La longueur est augmentée par pas de 0,1, 0,25 ou 0,5 mètre à l'aide de modules se présentant sous la forme d'entretoises. Cet équipement est facile à transporter. Les manilles doivent être adaptées à la charge.

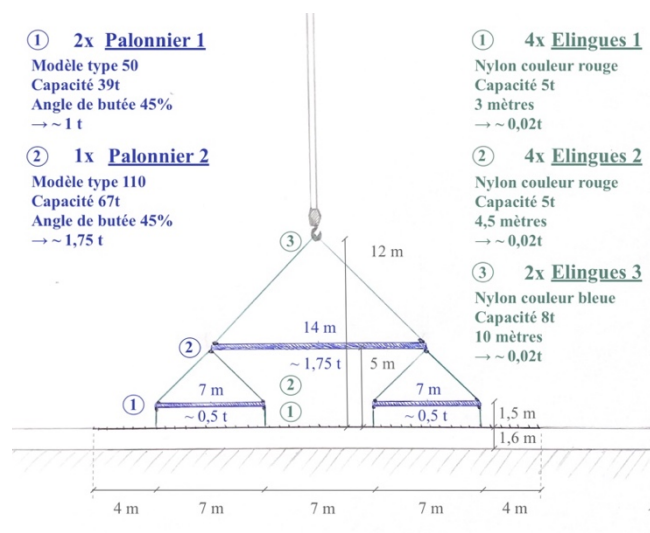


Figure 84 - Schéma système d'élingage - Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

Les hypothèses conservatrices prises à l'étape 2 peuvent être réduites :

Hypothèses corrigées	
Hauteur sous crochet minimale (Hsc en m)	13,6
Système d'élingage (t)	3
Charge totale (t)	~ 10,5

Tableau 33 - Hypothèses corrigées - Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

3.2. Capacité de levage :

- Option A

Une configuration simple sans équipement de flèche sera utilisée pour une question de rapidité d'exécution. On opte pour une position plein calage car l'espace disponible est largement suffisant et cela permet d'avoir une plus grande capacité de levage.

Facteurs techniques	
• Grue - LTM 1120-4.1 (option A)	
Charge nominale (t)	10,5
Portée maximale (m)	20
Hauteur min tête de flèche (m)	14

Tableau 34 - Facteurs techniques - Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

Sur base de ces facteurs techniques, il faut maintenant recourir aux fiches techniques des grues afin de déterminer leurs configurations comme décrit dans le scénario 1. Ici, la grue doit être capable de soulever 10,5t à 20m de portée pour une tête de flèche à minimum 14m de hauteur.

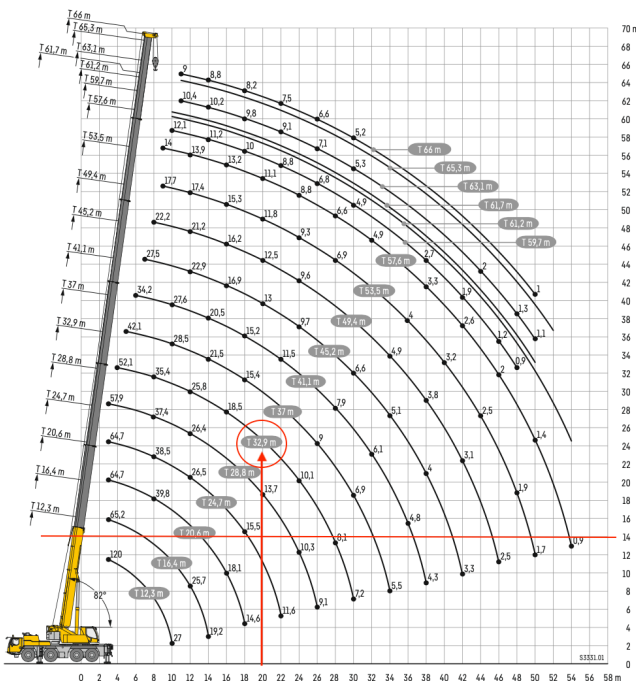


Figure 85 - Diagramme de charge - LTM 1120-4.1

(Source : Fiche technique LTM 1120-4.1, p.12)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)







												
		12,3 m	16,4 m	20,6 m	24,7 m	28,8 m	32,9 m	37 m	41,1 m	45,2 m	49,4 m	53,5 m
3		120	69,5	65,2	64,7	64,7	57,9					
3,5		75,1	69,5	65,2	64,7	64,7	62,6					
4		69,9	66,4	65,1	63,6	61,2	58,5	5,1				
4,5		64	61,7	60,3	58,1	56,7	54,1	5,5				
5		58,9	57,3	56,1	54	52,2	49,3	4,5	42,1			
6		52	50	49,8	47,8	46,3	44,4	4,5	40,2	34,2		
7		46,1	44,2	44,8	43,5	41,9	40,2	3,8	36,5	33,6	27,5	
8		40,8	39,5	40,4	39,8	38,5	37,4	3,4	33,5	31,7	27,4	22,2
9		35,4	34,8	34	34,5	33,3	34,1	3,6	30,7	29,8	27,1	22,1
10		27	27	31,9	32,6	32,4	31,4	3,1	28,5	27,6	26,1	22
11				28,6	29,2	29,4	28,9	2,8	27	25,7	24,4	21,7
12				25,7	26,4	26,5	26,4	2,8	25,4	24,1	22,9	21,2
13					23,2	23,8	24	23,8	23,5	22,5	21,4	20,1
14					19,2	21,6	21,8	21,6	2,9	21,5	20,5	19,4
15						19,7	19,9	19,8	2,2	19,8	18,8	17,4
16						18,1	18,2	18,6	1,5	18,1	17,6	16,2
18							14,6	15,5	15,9	14,8	15,2	14,1
20							13,2	13,4	13,5	13,2	13,4	12,5
22						11,6	11,8	11,6	11,7	11,5	11,3	10,9
24							10,3	10,1	10,3	10	9,7	9,6

Tableau 35 - Tableau de charge - LTM 1120-4.1

(Source : Fiche technique LTM 1120-4.1, p.13)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

Configuration choisie	
• Grue - LTM 1120-4.1 (option A)	
• Type de flèche principale (m)	Télescopage 32,9
• Mouflage	Selon le grutier
• Ballast (t)	31 - full et VarioBallast
• Empattement (m)	7 → plein calage
• % de la capacité	78

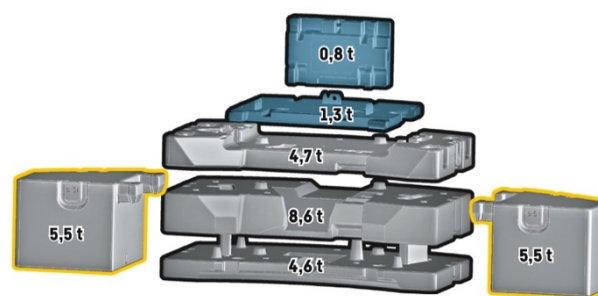


Tableau 36 - Configuration de la grue - Scénario 2
Option A

(Source : Mincke F., 2021)

Figure 86 - Ballast - LTM 1120-4.1

(Source : Fiche technique LTM 1120-4.1, p.9)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

Cette machine convient pour le levage. Cependant, elle requiert une configuration full et Varioballast⁹. Un camion de transport supplémentaire est donc nécessaire car la réglementation n'autorise que 12 tonnes maximum par essieu.

Le but est d'avoir une grue qui n'a pas besoin de contrepoids en plus de ceux qu'elle transporte sur son châssis. On cherche dès lors une option B qui satisfait le scénario 2. La grue précédente « LTM 1120-4.1 » est l'option A.

- Option B

Dans cette perspective, la grue LTM 1200-5.1, de plus grande capacité, est intéressante. On peut également la comparer avec son homologue de chez Terrex l'AC-200 par exemple, mais ce modèle n'est plus produit aujourd'hui. Il faut donc être attentif à la vétusté du matériel. On est ici en présence d'une gamme de grues à 5 essieux avec une configuration plein calage, sans équipement de flèche avec les mêmes facteurs techniques que dans l'option A.

	13,2 m	17,7 m	22,2 m	26,7 m	31,3 m	35,8 m	40,3 m	44,8 m	49,3 m	53,8 m	58,3 m	62,8 m	67,3 m	72 m
3	141	125	120	107	85	69								3
3,5	130	120	110	98	81	66								4
4	111	111	110	98	81	66								4,5
5	103	103	95	83	71	56								5
6	85	79	71	66	61	56								6
7	66	62	58	53	51	47	42,5	39						7
8	52	50	47,5	46	45	39	35,5	32,5						8
9	41	41,5	41	38,5	38	33	30	28,8	27,1					9
10	33	35	34,5	33	31	29	26	25,9	23,5	22,3				10
11	29,6	30	28,7	27	25,3	22,7	22,8	21,5	20	18,6				11
12	25	26,2	25,2	23,8	23,8	19,9	20,1	19,8	17,7	16,9	15,6			12
14	18,6	19,7	20	19	19,1	17,3	17,5	16	15,3	14,2	13,5	12,6	10,6	14
16	15,5	15,9	16,3	15,7	15,6	14,4	13,9	13,3	12,5	11,6	10,6	10	16	16
18	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	12,4	12	11,3	10,4	9,6	8,7	8,6	18	18
20	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	10,9	10,2	9,6	8,8	8	7,1	7,1	20	20
22	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,4	8,7	8,1	7,4	6,7	5,8	5,8	22	22
24	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	8,1	7,5	6,9	6,2	5,6	4,8	4,8	24	24
26						7,1	7	6,4	5,9	5,2	4,6	3,8	26	26
28						5,8	6,1	5,9	5,5	5	4,4	3,8	3,1	28
30							5,2	5,1	5,1	4,7	4,3	3,6	3,1	30
32								4,5	4,3	4,3	4	3,6	3	32
34									3,7	3,7	3,4	3	2,4	34
36										3,1	2,8	2,5	1,9	36
38											2,6	2,3	2,1	38
40												2,2	1,9	40
42													1,6	42

Tableau 37 - Tableau de charge - LTM 1200-5.1

(Source : Fiche technique LTM 1200-5.1, p.6)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

	12,4	16,6	20,9	25,1	29,4	33,6	37,9	42,1	46,4	50,6	54,9	59,1	63,4	67,8
3	140,5	140,5	140,0	121,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
3,5	128,5	128,5	128,0	121,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5
4	118,0	118,0	117,5	117,0	94,8	-	-	-	-	-	-	-	-	4
4,5	109,0	109,5	109,0	108,0	94,8	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5
5	101,5	101,5	101,0	100,5	94,8	73,7	-	-	-	-	-	-	-	5
6	85,1	86,3	84,9	80,9	73,0	65,4	-	-	-	-	-	-	-	6
7	70,7	71,9	69,8	64,9	61,3	55,9	52,8	-	-	-	-	-	-	7
8	55,4	57,4	58,0	54,9	50,5	45,3	45,1	41,8	-	-	-	-	-	8
9	43,7	46,1	46,7	46,1	45,1	41,6	37,9	35,5	33,8	-	-	-	-	9
10	-	37,8	38,3	39,7	38,5	35,6	33,1	31,6	29,1	27,8	-	-	-	10
12	-	26,8	28,4	28,6	28,2	27,0	25,1	23,7	22,1	21,5	-	-	-	12
14	-	21,6	21,7	22,0	22,2	21,4	20,8	19,8	19,0	18,2	17,3	15,6	-	14
16	-	17,0	17,7	18,0	17,5	17,8	17,2	17,1	16,3	15,2	14,1	13,0	12,0	16
18	-	-	14,7	14,7	14,6	14,6	14,3	13,6	12,7	11,7	10,6	10,3	18	18
20	-	-	-	12,5	12,5	12,4	12,1	11,9	11,4	10,6	9,7	8,4	20	20
22	-	-	-	-	10,6	10,6	10,5	10,2	10,0	9,5	8,9	8,1	7,2	22
24	-	-	-	-	9,1	9,0	8,9	8,7	8,4	7,9	7,4	6,7	5,9	24
26	-	-	-	-	8,0	7,8	7,7	7,4	7,1	6,6	6,1	5,6	4,8	26
28	-	-	-	-	6,7	6,6	6,3	6,0	5,5	5,0	4,5	3,8	3,6	28
30	-	-	-	-	5,8	5,6	5,3	5,1	4,6	4,1	3,6	3,0	2,7	30
32	-	-	-	-	4,9	4,5	4,3	3,8	3,3	2,8	2,2	2,0	32	32
34	-	-	-	-	4,2	3,9	3,6	3,1	2,7	2,1	1,6	1,4	34	34
36	-	-	-	-	3,3	3,0	2,5	2,1	1,5	1,0	-	-	36	36
38	-	-	-	-	2,8	2,4	2,0	1,5	1,0	-	-	-	38	38
40	-	-	-	-	2,0	1,5	1,1	-	-	-	-	-	40	40
42	-	-	-	-	1,6	1,1	-	-	-	-	-	-	42	42
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	44

Tableau 38 - Tableau de charge - AC-200

(Source : Fiche technique AC-200, p.9)
(Modifiée par : Mincke F., 2021)

⁹ Une configuration Varioballast est une particularité des machines Liebherr qui consiste à étendre le rayon de ballast.

On peut constater que, même pour une gamme de grues surdimensionnées pour le travail, ces machines doivent nécessairement travailler avec un contrepoids. Pour l'option B, un transport supplémentaire est également indispensable.

Configurations choisies		
Grues (option B)	LTM 1200-5.1	AC-200
• Télescopage flèche principale (m)	31,3	33,6
• Type de moufle	Selon le grutier	
• Ballast (t) (full ballast ici)	12	16,3
• Empattement	8,3	8,2
• % de la capacité	89	84

Tableau 39 - Configurations des grues - Scénario 2 Option B

(Source : Mincke F., 2021)

3.3. Mouvement de la grue :

La trajectoire de la charge ainsi que les mouvements en charge de la grue sont similaires pour les scénarios 1 et 2. Les zones de rotations limitées sont différentes (cf. figure 87).

3.4. Pression d'appui au sol :

Comme dans le scénario 1, il n'est pas nécessaire de vérifier la capacité portante du sol et les stabilisateurs qui se trouvent en dessous de la flèche vont, ici aussi, reprendre un effort un peu plus important en charge que ceux situés en dessous des contrepoids.

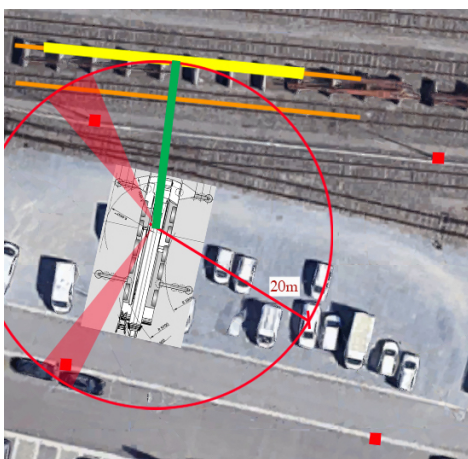


Figure 87 - Rayon max – Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

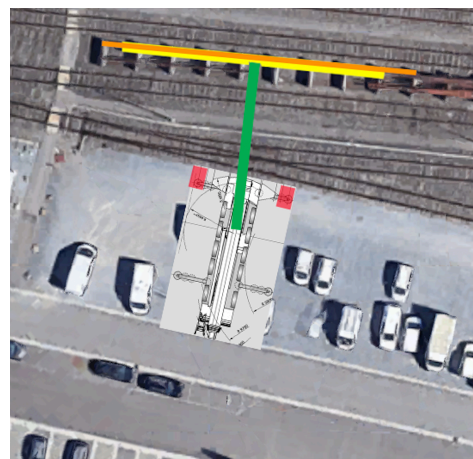


Figure 88 - Pression d'appui en charge

(Source : Mincke F., 2021)

4. Examen d'adéquation

Dans cette section, il s'agit de vérifier que les éléments calculés pour les différents scénarios ainsi que leurs options respectives satisfont les données de base. Suite au contrôle des résultats obtenus dans les étapes de calcul, l'examen d'adéquation est satisfait pour ce cas d'étude théorique.

5. Sélection de la grue la plus adaptée au projet

On arrive à la dernière étape du processus de sélection, il s'agit de la proposition d'optimisation. La méthode utilisée consiste à reprendre les facteurs importants du projet et de les pondérer selon leur impacts positifs ou négatifs sur le projet. Chacun de ces facteurs est pondéré en fonction des différents scénarios et options identifiées précédemment. Hors de la liste exposée dans le tableau 24, il y a 13 facteurs qui ont été retenus comme ayant un impact sur le projet.

Pondération des facteurs pour chaque scénario et leurs options respectives							
Catégories des facteurs			Listing	Scénario 1	Scénario 2		Scénario 3
					Option A	Option B	
Quantitatif	Facteurs ayant un caractère financier modulable	Coût direct	Machine	0,75	1,25	0,5	0,25
			Transport de la machine	0,75	1,5	1,5	0,25
			Transport des équipements	1,5	0,75	0,75	0,25
			Matériel nécessaire pour l'élingage	1,25	0,75	0,75	0,75
			Main-d'oeuvre	0,75	1,25	1,25	2
			Durée du temps de travail	1,5	1	1	1
		Coût indirect	Permis / Demande d'autorisation	1	1	1	0,5
			Machine réserve de capacité	0,75	1,25	0,5	0,5
Qualitatif	Facteurs relevant d'une certaine subjectivité	Facilité de mise en oeuvre	1,5	1	1	1	
		Complexité du système d'élingage	1,25	0,75	0,75	1	
		Risque	0,5	1	1	1	
Disponibilité		Machine	1	1	1	0	
		Matériel d'élingage	1,25	0,75	0,75	1	
Facteur de correction			Laisseé à l'appréciation du management	1	1	1	1
Mutliplication des pondérations				1,0	0,9	0,1	0,0

Tableau 40 - Grille de pondération des facteurs appliquée au cas d'étude 1

(Source : Mincke F., 2021)

On peut commencer l'explication de l'emploi des pondérations en mettant en évidence l'élimination d'emblée du scénario 3. En effet, un facteur zéro accordé à la non-disponibilité de la grue sur rail va annuler tous les autres. Les autres cases ont toutefois été remplies pour l'exercice. Concernant la disponibilité du matériel d'élingage, il se peut qu'il y ait un certain délai pour le scénario 2, contrairement au scénario 1 pour lequel le matériel est facilement disponible.

Il y a aussi des pondérations liées au matériel dans les facteurs corrélés au coût direct. Le matériel nécessaire étant plus important dans les scénarios 2 et 3, ils ont reçu des pondérations plus faibles. Pour le transport de ces équipements, deux semi-remorques sont nécessaires pour les équipements du scénario 2 tandis qu'il faut faire appel à un seul semi-remorque pour les équipements du scénario 1. Les grues de 60 tonnes (scénario 1) ont l'avantage de pouvoir rouler avec leurs contrepoids ainsi que d'avoir un espace de rangement pour leurs plaques de répartition.

Un facteur déterminant dans ce cas d'étude est le coût direct de la machine. La pondération accordée au scénario 2 option A est supérieure à celle accordée au scénario 1 car, dans le scénario 2, on a recours à une seule grue de 120 tonnes tandis que le scénario 1 fait appel à deux grues de 60 tonnes pour réaliser le levage. Le prix de la machine passe donc presque du simple au double dans ces deux scénarios. Pour ce même facteur, une pondération de 0,5 et de 0,25 a respectivement été

accordée au scénario 2 option B et au scénario 3. Cela est dû au fait que la grue de 200t choisie dans le scénario 2 a un coût élevé et que le coût d'une grue sur rail est très élevé.

Pour le transport de la machine, le rapport entre les pondérations du scénario 1 et 2 passe du simple au double car il est question d'une ou deux grues à amener. Pour le scénario 3, une faible pondération a été accordée car il y a beaucoup de contraintes pour le transport de la grue sur rails. Ce dernier scénario est également pénalisé pour les demandes d'autorisation nécessaires.

On peut constater que le facteur concernant la facilité de mise en oeuvre est lié à celui de la durée du travail. La mise en oeuvre est plus aisée dans le scénario 1 et il en résulte un temps de travail réduit. La pondération est donc plus grande pour le scénario 1 que pour les autres scénarios.

Il est également possible de faire un rapprochement entre le facteur de la main-d'oeuvre et celui de la complexité de l'élingage. L'élingage du scénario 2 étant plus complexe, il se voit accorder une faible pondération à l'inverse de sa main-d'oeuvre qui se voit accorder une pondération plus élevée. En effet, avec un système d'élingage plus complexe, on ne doit recourir qu'à une seule grue et à moins de main-d'oeuvre. Le cas de figure inverse est observé pour le scénario 1. Une pondération de 2 a été accordée pour la main-d'oeuvre du scénario 3 car si Infrabel avait une grue sur rail, elle n'aurait pas besoin de faire appel à de la main-d'oeuvre supplémentaire et se satisferait de ses équipes.

La réserve de capacité de la machine doit également être prise en compte dans les coûts indirects. Les grues étant surdimensionnées pour le travail, elles reçoivent une pondération plus faible.

On peut clôturer cette explication de l'emploi des pondérations par le facteur risque. Les duo-lifts sont reconnus pour être plus dangereux que les levages simples ; le scénario 1 se voit donc attribuer une pondération plus faible.

La pondération des facteurs en fait apparaître certains comme prépondérants dans ce projet : ceux liés à la machine, aux systèmes d'élingage et à la disponibilité. Le but de cet exercice étant de comparer une solution de levage en tandem lift avec celle d'un levage qui ne recourt qu'à une grue, il ressort de cette analyse que le scénario 1 est à privilégier car il a obtenu le score le plus élevé. C'est également ce scénario qui a été observé *in situ*. Cependant, il faut noter que le score obtenu pour l'option A du scénario 2 se rapproche fort du scénario 1.

6. Impondérables

Les conditions climatiques peuvent être considérées comme un impondérable dans ce cas-ci. En effet, nous étions au début du mois d'avril et il neigeait. Malgré les conditions climatiques, le levage a eu lieu car la charge devait être déplacée pour libérer la voie de chemin de fer (cf. relevé photographique à la figure 63).

2. Cas d'étude 2 – Démontage d'un pont Bailey à Tilff

1. Données de base

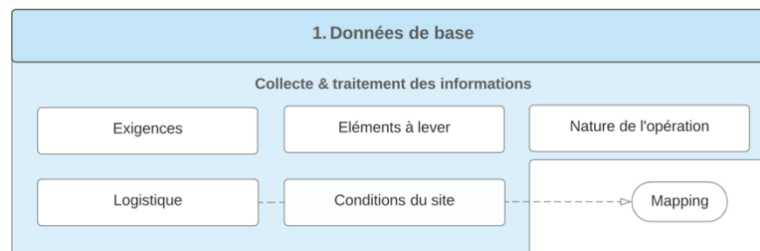


Figure 89 - Étape 1 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

■ 1.1. Exigences :

L'entreprise BAM est chargée de la construction du pont-passerelle au-dessus de l'Ourthe et des voies de chemin de fer à Tilff. La société Jungling est en charge du levage. L'opération doit se faire dans les plus brefs délais selon les desiderata du client. Le délai imparti entre la commande et l'exécution sur chantier est donc restreint. Dans le cas où le pont nouvellement créé doit être privatisé pour le levage, une demande d'autorisation pour implanter la grue sur la route avec les panneaux de signalisation et les restrictions qui en découlent est nécessaire, de même que dans le cas où le levage s'opère à proximité d'une voie de chemin de fer. Des restrictions environnementales sont également à prendre en considération si le levage doit s'opérer dans le lit de l'Ourthe. Enfin, un éventuel impact sur le voisinage doit également être envisagé car le centre de Tilff se trouve à proximité de la zone de levage sur la rive droite.

En ce qui concerne l'organisation générale du chantier, le nouveau pont est opérationnel. Les travaux de la rive gauche où se trouve la gare de Tilff sont presque terminés (pose des pavés au sol et des briques de recouvrement de la berge). Pour une question de continuité des travaux dans cette partie du chantier, le côté du pont en connexion avec la gare devrait être retiré en premier lieu.

■ 1.2. Élément à lever :

Une des complexités de ce levage réside dans l'intervention sur le design de l'élément. En effet, le pont peut être découpé de différentes façons afin d'être levé. Différentes options de découpage de l'élément sont à prévoir avec, pour chacune, ses hypothèses de charge.



Figure 90 - Photo de l'ancien pont de Tilff

(Source : https://www.chuliege.be/jcms/c2_19361750/en/fermeture-du-pont-de-tilff)



Figure 91 - Pont en coupe transversale

(Source : Mincke F., 2021)

Dans ce cas-ci, l'estimation du poids de l'élément est relativement proche de son poids réel car il s'agit d'une construction métallique. Dans le cas d'un démontage de poutre en béton précontraint comme, par exemple, lors de ma 9^{ème} visite de chantier (cf. annexe 1), il est difficile d'estimer le poids réel de l'élément. Cela est dû à l'utilisation de gravats de densité variable qui composent le béton.

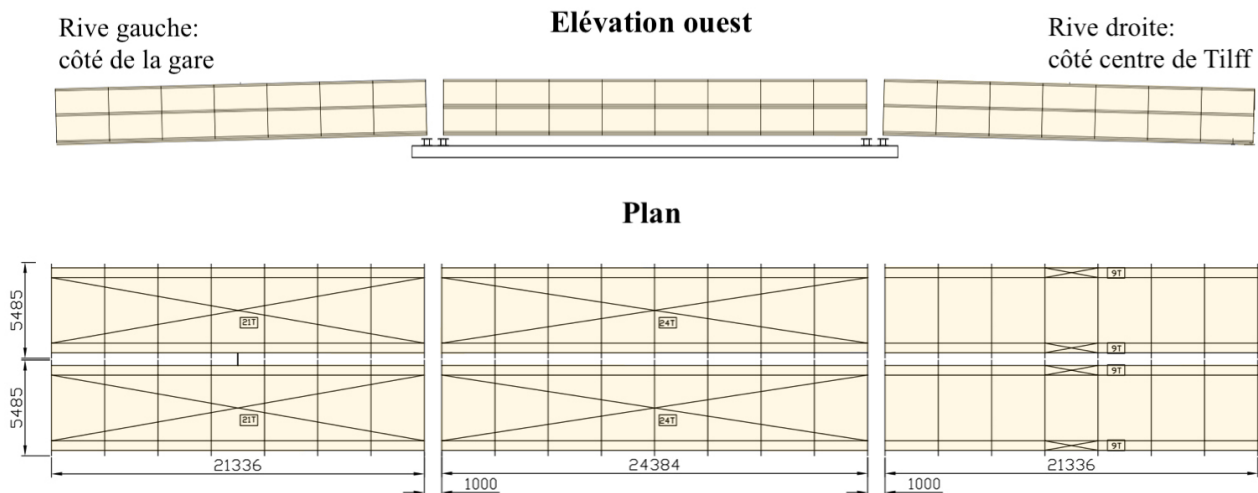


Figure 92 - Pont en élévation ouest et en plan

(Source: BAM) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Le pont est composé de 3 parties distinctes. Ces parties sont elles-mêmes séparées en 2 structures différentes car le pont comporte deux voies de roulement. Nous sommes donc en présence de 6 structures (représentées en orange sur le plan ci-dessus). Les parties situées aux extrémités sont identiques. Quant aux éléments centraux, ils sont un peu plus longs et plus lourds.

- **Question à se poser** : Quelle sont les possibilités de découpes de l'élément ?

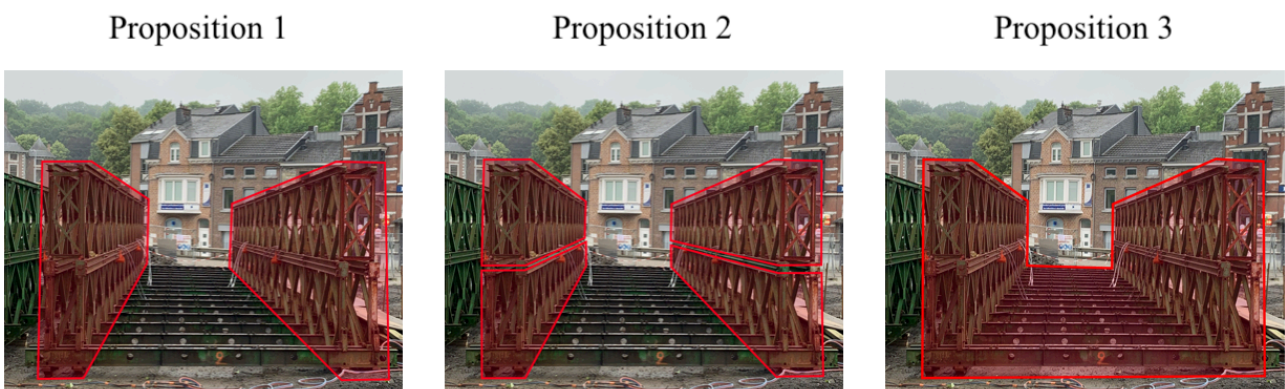


Figure 93 - Schéma des propositions de découpe d'une structure

(Source: Mincke F., 2021)

- Proposition 1 :

Une possibilité pour découper cette structure serait de séparer les éléments du plancher des éléments qui composent les parois. Les poutres qui composent le plancher seront d'abord sectionnées et pourront être levées à l'aide de la grue d'appont du chantier. Le revêtement du chemin de roulement doit être enlevé au préalable. L'avantage de cette proposition de découpe de l'élément est de pouvoir conserver les éléments verticaux. Les éléments verticaux qui seront levés ont une forme de parallélépipède rectangle.

Proposition 1 - élément vertical d'une structure	Quelle partie du pont?	
Hypothèses dimensions (en m)	partie centrale	partie côté centre de Tilff ou côté gare
Longueur	24,4	21,4
Hauteur	3	3
Hauteur d'élingage	~ 3	~ 3
Hauteur sous crochet minimum (Hsc)	~ 6	~ 6
Hypothèses charge (en t)		
Système d'élingage (t)	~ 0,2	~ 0,2
Charge (t)	~ 9,8	~ 9
Charge totale (t)	~ 10	~ 9,2

Tableau 41 - Proposition 1 de découpage

(Source : Mincke F., 2021)

- Proposition 2 :

Afin de réduire la charge des éléments verticaux, il pourrait être envisagé de les découper horizontalement. La charge serait ainsi divisée par deux.

- Proposition 3 :

Cette solution consiste à soulever toute la structure sans la découper. Cette possibilité comprend le fait de conserver ou non le chemin de roulement. C'est un gain de temps et de main-d'œuvre mais l'élément à lever est lourd.

Proposition 3 - ensemble d'une structure	Quelle partie du pont?			
Hypothèses dimensions (en m)	partie centrale		partie côté centre de Tilff ou côté gare	
Chemin de roulement	Avec	Sans	Avec	Sans
Longueur	24,4		21,4	
Hauteur	3		3	
Hauteur d'élingage	~ 4		~ 4	
Hauteur sous crochet minimum (Hsc min)	~ 7		~ 7	
Hypothèses charge (en t)				
Système d'élingage (t)	~ 0,4		~ 0,4	
Charge (t)	~ 36,5	~ 24	~ 33,5	~ 21
Charge totale (t)	~ 37	~ 25,5	~ 34	~ 21,5

Tableau 42 - Proposition 3 de découpage

(Source : Mincke F., 2021)

- Proposition 4:

Cette quatrième proposition consiste en un mixte entre les propositions précédentes. En fonction de la partie du pont à lever, on peut décider de lever entièrement certaines structures (comme dans la proposition 3) ou de laisser certains éléments verticaux en entier (comme dans la proposition 1). Cela permettrait de diminuer le temps de travail.

- Proposition 5:

Un deuxième mixte réalisable consisterait à tantôt couper certaines parties horizontalement (comme dans la proposition 2), tantôt laisser certains éléments verticaux en entier (comme dans la proposition 1).

- Proposition 6:

Il peut aussi être envisagé de déboulonner tous les éléments qui composent la structure dans sa position actuelle. Une grue autre que celle d'appoint présente sur le chantier ne sera peut-être pas nécessaire.

▪ **1.3. Nature de l'opération :**

Le but de l'opération consiste à démonter un pont métallique de 70 ans. Il s'agit d'un pont qui devait être provisoire mais qui est resté 16 ans en place. Ce type de pont (pont Bailey) était construit pendant la guerre 40-45 par les Américains qui devaient rapidement passer au-dessus des rivières. Le pont est constitué d'éléments modulables en acier. Les soldats construisaient ce type de pont sur les bords de berge et le poussaient simplement pour le mettre en place.

Pour démonter ce pont, il faudra opérer un levage car la technique utilisée autrefois par les soldats ne pourra pas être employée, faute d'espace disponible. Ce levage est répétitif dans la mesure où l'on va devoir lever les mêmes éléments plusieurs fois.

Il y a plusieurs opérations à réaliser et, comme énoncé dans les exigences, il faudrait dans un premier temps enlever les éléments qui se trouvent près de la gare pour finir les parachèvements. Cependant, la chronologie des opérations sera à individualiser en fonction des scénarios.

▪ **1.4. Logistique :**

Dans ce cas-ci, la problématique n'est pas d'amener la pièce sur le site pour le levage mais de soulever et d'évacuer l'élément. Lorsque la structure est au sol, on peut la démonter plus facilement que dans sa position d'origine. Il est possible de charger les éléments sur une semi-remorque après le démantèlement.

Les voies d'accès sont en bon état et le lieu de levage peut être desservi par la rive gauche ou droite de l'Ourthe. Il est à noter que depuis le site, on a un accès quasi direct à l'autoroute E25.

▪ **1.5. Conditions du site :**

Dans la zone de levage, il y a le pont automobile, un piétonnier nouvellement créé, une ligne de chemin de fer, l'Ourthe et des bâtiments occupés. Il faut porter une attention particulière à la coactivité. Sachant qu'il s'agit d'un levage exceptionnel, des mesures doivent être prises afin d'éviter que les passants ne se rendent à des endroits à risques pour regarder le levage.

La présence du cours d'eau est une spécificité géographique du site. Lorsqu'on a accès à une voie d'eau, on peut envisager d'effectuer un levage sur barge afin de se rapprocher de la charge. Malheureusement, dans ce cas-ci, le tirant d'eau n'est pas suffisant pour pouvoir utiliser une grue sur

barge. La voie de chemin de fer aurait aussi pu être exploitée mais la contrainte des fils électriques au-dessus des voies écarte d'entrée de jeu le choix d'une grue sur rail.

- **Mapping** → Réalisé sur base de la logistique et des conditions du site

Sur base du point traitant de la logistique et des conditions de site, il est possible de représenter les spécificités du site dans un mapping. On retrouve en rive gauche la gare et en rive droite le centre de Tilff. L'élément à lever est représenté en orange et le pont nouvellement construit en gris. La zone bleue est à disposition de la société BAM pour les travaux. Il faut prendre en compte la présence d'arbres dans cette zone. Les contraintes du bâti sont représentées en rouge.

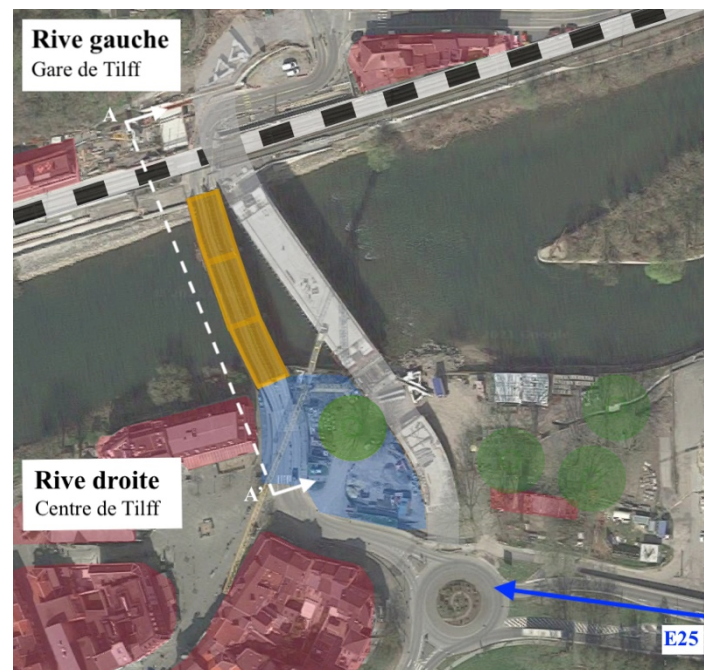


Figure 94 - Mapping plan

(Source : Mincke F., 2021)

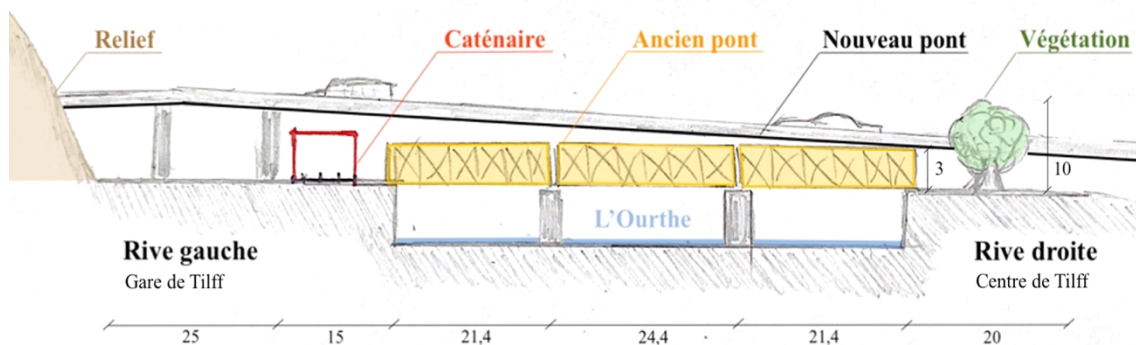


Figure 95 - Mapping coupe A-A'

(Source: Mincke F., 2021)

■ *Relevé photographique*



Figure 96 - Relevé photographique – visite de chantier à Tilff (23/06/21)

(Source : Bam & Mincke F., 2021)

2. Présélection

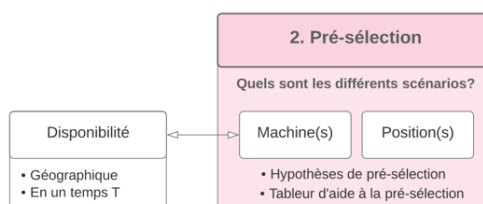


Figure 97 - Étape 2 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

2.1. Position(s) :

Grâce aux données de base récoltées, il est possible d'émettre des hypothèses concernant la position de la grue. Nous avons identifié quatre emplacements où cette dernière pourrait être implantée.

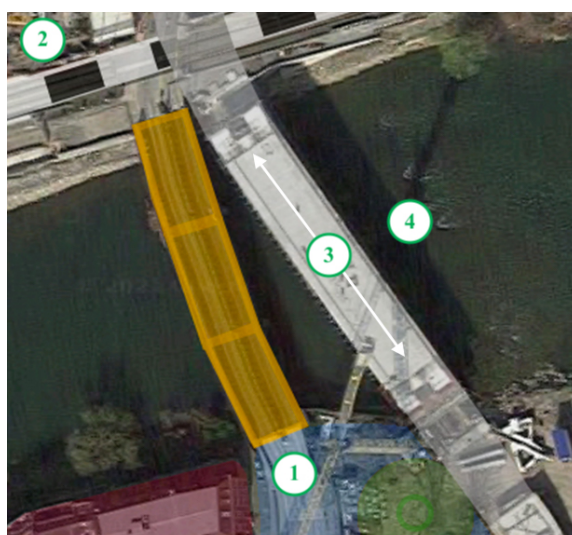


Figure 98 - Hypothèses sur les positions

(Source : Mincke F., 2021)

- Position 1 : Une première possibilité consiste à placer la grue à l'entrée de l'ancien pont du côté centre de Tilff.
- Position 2 : La deuxième consiste à implanter la grue avant la voie de chemin de fer, soit côté gare.
- Position 3 : La troisième consiste à installer la grue sur le pont, soit en position fixe, soit en faisant varier son emplacement.
- Position 4 : Une quatrième possibilité pourrait être de construire une plate-forme sur le lit de l'Ourthe.
- Position 5 : Une dernière possibilité consisterait à faire varier l'emplacement de la grue entre les positions 1, 2 et 3.

2.2. Machine(s) :

Il existe 3 gammes de machines pour lesquelles on peut émettre des hypothèses quant à leur utilisation pour ce projet : les grues de petite, moyenne et grande capacité.

Scénarios

Question à se poser - Quels sont les scénarios possibles pour effectuer ce levage?

Pour répondre à cette question, nous devons manier 3 variables : la position, le découpage des éléments et la gamme de grue. Chacune de ces variables comporte différentes options précédemment définies. L'analyse des combinaisons de ces variables met en évidence l'existence d'un grand nombre de scénarios envisageables pour ce projet.

		Gamme de grue		
		Grande capacité	Capacité moyenne	Capacité réduite
Positions	Position 1			
	Position 2			
	Position 3			
	Position 4			
	Position 5			
Découpes	Proposition 1			
	Proposition 2			
	Proposition 3			
	Proposition 4			
	Proposition 5			
	Proposition 6			

Tableau 43 - Combinaisons des variables (case bleue = compatible)

(Source : Mincke F., 2021)

Il convient d'écarter les scénarios les moins adaptés et de sélectionner ceux qui semblent les plus appropriés. L'idéal serait d'avoir 3 scénarios à étudier et à comparer.

On peut d'emblée éliminer les scénarios pour lesquels la grue doit s'implanter en deuxième position. La grue aurait pu être placée du côté du chemin de fer, mais elle serait alors trop éloignée de l'élément à lever et n'aurait pas assez de recul par rapport aux caténaires. Or, cet obstacle aérien serait très contraignant et les dégagements nécessaires auraient été difficilement réalisables. Nous aurions pu envisager de recourir à une grue mobile équipée d'une volée variable, mais enjamber les caténaires aurait été trop dangereux. De plus, l'espace nécessaire pour monter cette volée et pour déposer la charge aurait constitué une entrave supplémentaire de par les contraintes du site (colline, nouveau pont).

Nous pouvons également éliminer la solution qui consiste à construire une plate-forme sur le lit de l'Ourthe. Les restrictions environnementales imposées par la présence de vie aquatique dans cette zone sont trop contraignantes. Opérer à cet endroit impliquerait également de mener des études concernant les conditions de sol car elles ne sont pas connues. Les coûts indirects du levage pour la construction de la plate-forme seraient aussi trop importants.

Nous écarterons également les propositions 2 et 5 (découpe de l'élément). Ces solutions permettent de diminuer la gamme de grues requise pour le travail mais elles ne permettent pas de conserver les éléments du pont. Or, ce dernier appartient à la société BAM qui l'a racheté auparavant et qui tient à le conserver pour le réutiliser si besoin. De plus, le travail de découpe serait plus important, ce qui suppose plus de main-d'oeuvre et de temps.

Nous éliminerons également la proposition 6 de découpe de l'élément. Cette méthode qui consiste à déboulonner toute la structure demande encore plus de temps et de main-d'oeuvre, sans compter les risques encourus par les opérateurs.

Enfin, nous pouvons écarter les grues de grande capacité pour ce levage. En effet, bien que la plus grande charge à soulever peut atteindre 36,5 tonnes, les conditions de site sont contraignantes en chacune de ces positions et il serait difficile d'implanter une grue de grandes dimensions.

Suite à l'élimination de certaines options, il est possible de dégager 4 scénarios pour ce projet de levage. Pour chacun de ces scénarios, il convient d'émettre des hypothèses concernant les différentes portées afin de présélectionner la grue.

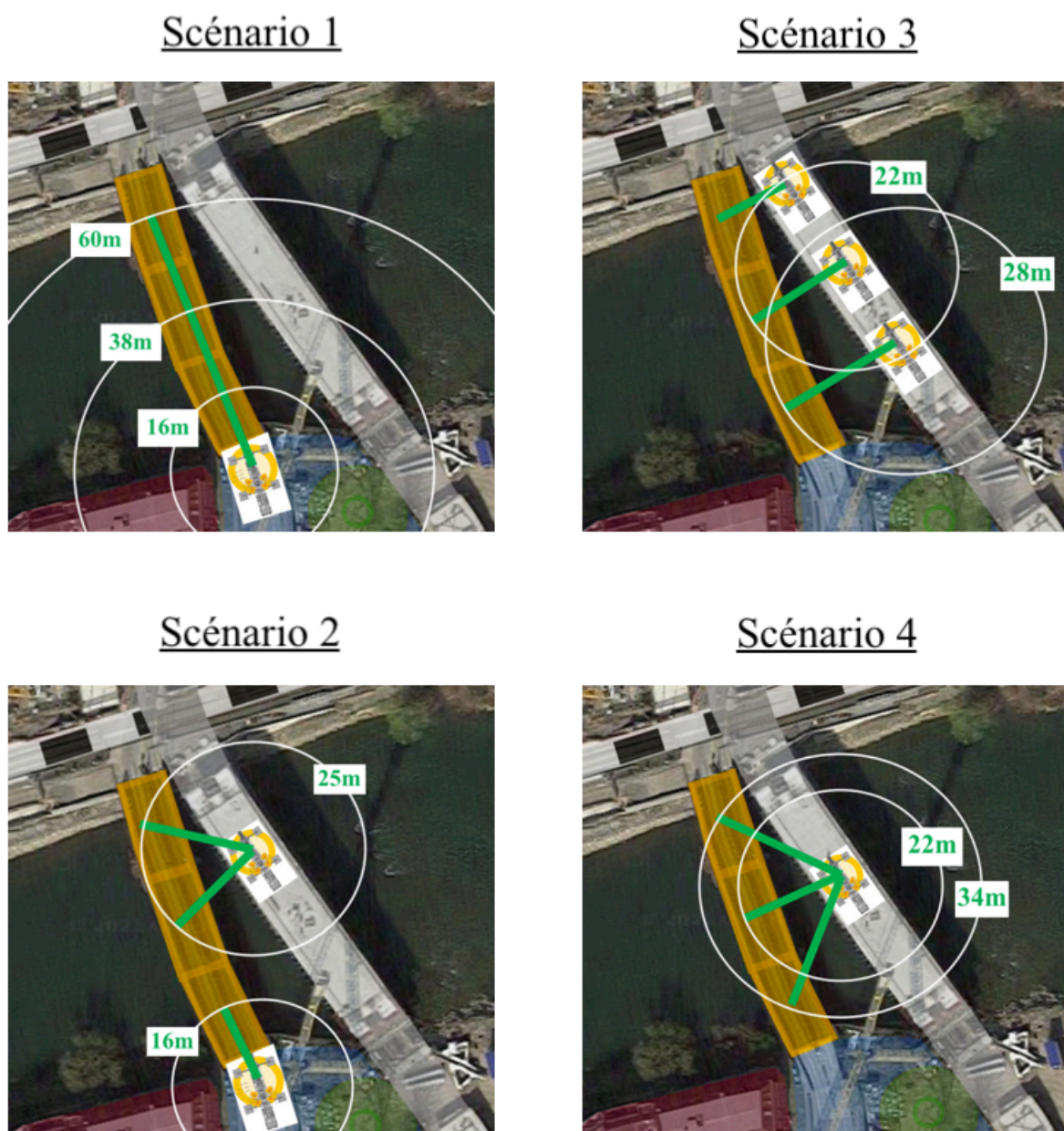


Figure 99 - Première estimation des portées pour les 4 scénarios

(Source : Mincke F., 2021)

- **Scénario 1** (*observé in situ*)

Dans ce premier scénario, on opte pour une grue de capacité moyenne en position fixe du côté du centre de Tilff (position 1) avec une découpe mixte des structures (proposition 4).

En fonction de l'éloignement de la grue par rapport à la structure, soit on découpera cette dernière afin de lever les éléments verticaux entiers, soit on lèvera entièrement certaines structures avec ou sans le chemin de roulement.

En entrant les données (en bleu ci-dessous) dans *le tableur*, on obtient une catégorie de grue mobile qui donne une première indication sur les grues compatibles. Les possibilités de découpe qui n'ont pas été retenues pour ce scénario sont représentées par des éléments barrés.

Tableur - Scénario 1 (position 1)						
Partie du pont:	côté gare	centrale		côté centre de Tilff		
Découpage:	Proposition 1	Proposition 3		Proposition 1	Proposition 3	
Chemin de roulement	/	Avec	Sans	/	Avec	Sans
Portée (m)	~ 60	~ 38	~ 38	~ 38	~ 16	~ 16
Charge (t)	9,2	37	25,5	10	34	21,5
Charge rectifiée (t)	10,12	40,7	28,05	11	37,4	23,65
Catégories	350	500	400	200	200	160
Max ballast (t)	140	165	140	72	72	46,8
Patin Longueur (m)	8,9	10	10	8,9	8,9	9,3
Patin Largeur (m)	8,5	9,6	9,5	8,3	8,3	8,3
Axe de rotation Ballast Y (m)	5,7	6,6	5,6	4,85	4,85	4,3

Tableau 44 - Résultats du tableur - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

- **Scénario 2**

Pour ce deuxième scénario, on opte pour une grue qui verrait son emplacement varier entre deux points fixes : une position sur le pont (position 3) et une autre du côté du centre de Tilff (position 1). Etant donné que l'on se rapproche de l'élément à lever, on choisit ici de lever la structure en entier (proposition 3).

On implante la grue sur le pont de façon à avoir la même portée pour la partie côté gare et pour la partie centrale. Le pont à démonter étant composé de deux voies de roulement, il convient de regarder les portées des structures les plus éloignées du pont (idem pour les scénarios 3 et 4).

Tableur - Scénario 2 (proposition de découpe 3)						
Partie du pont:	côté gare		centrale		côté centre de Tilff	
Position:	Position 3		Position 3		Position 1	
Chemin de roulement	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
Portée (m)	~ 26	~ 26	~ 26	~ 26	~ 16	~ 16
Charge (t)	34	21,5	37	25,5	34	21,5
Charge rectifiée (t)	37,4	23,65	40,7	28,05	37,4	23,65
Catégories	400	250	400	350	200	160
Max ballast (t)	140	97,5	140	140	72	46,8
Patin Longueur (m)	10	8,8	10	8,9	8,9	9,3
Patin Largeur (m)	9,5	8,5	9,5	8,5	8,3	8,3
Axe de rotation Ballast Y (m)	5,6	5,6	5,6	5,7	4,85	4,3

Tableau 45 - Résultats du tableur - Scénario 2

(Source : Mincke F., 2021)

- Scénario 3

Pour ce troisième scénario, on opte pour une grue de capacité moyenne qui verrait son emplacement varier entre trois points fixes. En fonction de la partie de pont à démonter, la grue se rapprochera de l'élément afin de diminuer les portées à satisfaire.

Il faut noter le fait que les deux ponts ne sont pas parallèles l'un à l'autre et que, dès lors la portée est variable. Il convient donc de comparer le levage de la partie du pont côté Tilff (élément pour lequel la portée est la plus grande) avec celle de la partie centrale afin de déterminer quel élément sera dimensionnant.

Tableur - Scénario 3 (position 3 mobile)				
Partie du pont:	centrale		côté centre de Tilff	
Découpage	Proposition 3		Proposition 3	
Chemin de roulement	Avec	Sans	Avec	Sans
Portée (m)	~22	~ 22	~28	~ 28
Charge (t)	37	25,5	34	21,5
Charge rectifiée (t)	40,7	28,05	37,4	23,65
Catégories	350	250	400	250
Max ballast (t)	140	97,5	140	97,5
Patin Longueur (m)	8,9	8,8	10	8,8
Patin Largeur (m)	8,5	8,5	9,5	8,5
Axe de rotation Ballast Y (m)	5,7	5,6	5,6	5,6

Tableau 46 - Résultats du tableur - Scénario 3

(Source : Mincke F., 2021)

- Scénario 4

Une variante au scénario précédent consisterait à conserver une position centrale sur le pont nouvellement construit (position 3). Cette position a pour avantage de diminuer la portée sans devoir déplacer la grue.

Etant donné l'implantation symétrique de la grue par rapport aux parties du pont côté centre de Tilff et côté gare (même portée), il convient de comparer le levage d'une de ces parties avec celle de la partie centrale afin de déterminer quel élément sera dimensionnant.

Tableur - Scénario 4 (position 3 fixe)				
Partie du pont:	centrale		côté centre de Tilff	
Découpage	Proposition 3		Proposition 3	
Chemin de roulement	Avec	Sans	Avec	Sans
Portée (m)	~ 22	~22	~34	~ 34
Charge (t)	37	25,5	34	21,5
Charge rectifiée (t)	40,7	28,05	37,4	23,65
Catégories	350	250	700	350
Max ballast (t)	140	97,5	160	140
Patin Longueur (m)	8,9	8,8	12,2	8,9
Patin Largeur (m)	8,5	8,5	12,3	8,5
Axe de rotation Ballast Y (m)	5,7	5,6	7,5	5,7

Tableau 47 - Résultats du tableur - Scénario 4

(Source : Mincke F., 2021)

- Discussion

Après avoir introduit les données dans le *tableur*, il est possible de présélectionner des grues pour chaque scénario. Celles-ci sont exposées dans le tableau ci-dessous. On opte dans ce cas-ci pour différents modèles de grues mobiles sur porteur et de marque Liebherr car comparer des modèles de différents fabricants n'est pas l'objectif de ce cas d'étude.

Scénario 1	Scénario 2		Scénario 3	Scénario 4
LTM 1450-8.1	LTM 1350-6.1	LTM 1160-5.2	LTM 1250-5.1	LTM 1350-6.1

Tableau 48 - Grues présélectionnées pour les différents scénarios

(Source : Mincke F., 2021)

Le scénario 1 consiste en l'opération observée *in situ*. A cause des contraintes du site (arbres, bâtiments occupés), il faudra veiller aux dégagements et établir une zone de stockage des éléments pour ce scénario.

Afin de réaliser une opération sur le pont nouvellement construit, il est nécessaire de demander des autorisations spéciales et de réaliser les travaux de nuit car il faut privatiser complètement les deux bandes de roulement du pont. Ces démarches devront être effectuées pour les scénarios 2, 3 et 4. Pour ces scénarios, il est préférable d'opter pour un levage de la structure complète (proposition 3) dans un souci de rapidité d'exécution, l'idée étant de l'évacuer directement par convoi exceptionnel. Pour la plupart des levages, on enlèvera le chemin de roulement afin de diminuer la charge de la structure.

Force est de constater que le scénario 3 requiert une grue de plus petite capacité que le scénario 4. Grâce au déplacement de la grue, la portée critique est plus petite que dans les autres scénarios, permettant de recourir à un modèle de grue plus économique. En revanche, le fait de réaliser le levage en un point central comme proposé dans le scénario 4 permet un gain de temps.

Pour le scénario 2, on constate ici qu'il est possible de dissocier le levage en deux temps. Dans un premier temps, nous pourrions lever la partie côté gare et la partie centrale avec une grue de 350 tonnes, dans un second temps, lever la partie côté centre de Tilff avec une grue de 160 tonnes. Cependant, ce scénario est similaire au scénario 4 qui fait aussi appel à une grue de 350 tonnes. De ce fait, on va écarter le scénario 2 qui est plus contraignant et ce, au profit d'un scénario 4 qui consiste en une opération « one shot ».

- Disponibilité

Le lieu de levage se trouve à Tilff, une commune située près de Liège. L'ordre croissant de disponibilité des machines se présente donc comme suit : scénario 1- 4 - 3. Cet ordre est fonction de la capacité de la grue. Plus la grue est de petite capacité, plus il y a un grand nombre de grues dans la région.

3. Phase de calcul

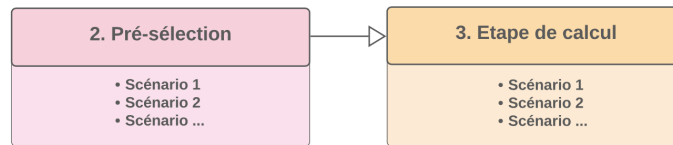


Figure 100 - Illustration du passage de l'étape 2 à l'étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

3.1. Système d'élingage :

Pour ce projet, le système d'élingage n'est pas un paramètre déterminant dans le choix de la grue. Il ne nécessite pas de réflexion particulière et aucun dispositif spécial ne doit être utilisé pour la préhension des pièces. C'est pourquoi des hypothèses ont été émises au point 1. 2. concernant le poids et la hauteur des différents systèmes d'élingage en fonction des différents éléments à lever (cf. tableaux 41 et 42). Il faudra toutefois veiller à placer les élingues au bon endroit en fonction du centre de gravité de l'élément à lever, à prendre des précautions pour ne pas placer les élingues sur des bords tranchants et à bien choisir des élingues adaptées à la charge.

SCENARIO 1

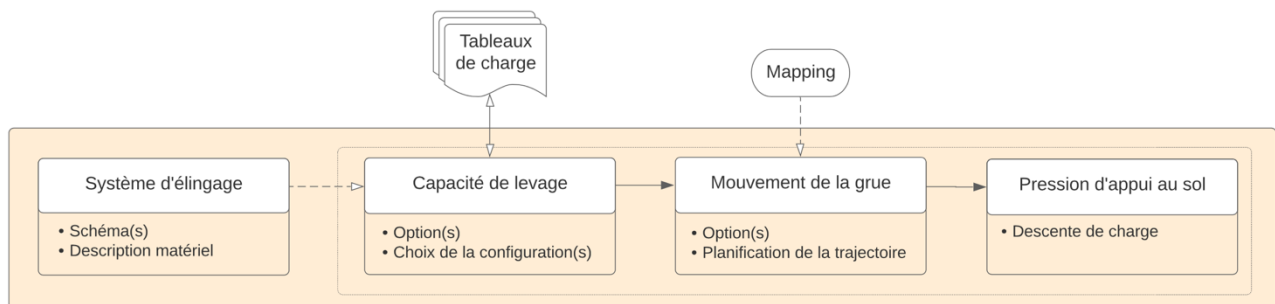


Figure 101 - Étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

3.2. Capacité de levage :

Il s'agit ici de déterminer si une configuration de la grue présélectionnée (LTM 1450-8.1) satisfait les facteurs techniques les plus contraignants. L'élément dimensionnant identifié suite à ces premières estimations des portées est la structure centrale sans chemin de roulement. Dans les fiches techniques figure une configuration sans équipement de flèche avec empattement maximal qui satisfait les conditions.

Facteurs techniques	
• Grue	LTM 1450-8.1
• Hauteur min tête de flèche (m)	10
• Portée (m)	38
• Charge (t)	25,5

Tableau 49 - Facteurs techniques - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

Facteurs techniques	
• Grue	LTM 1450-8.1
• Hauteur min tête de flèche (m)	10
• Portée (m)	38
• Charge (t)	25,5

Tableau 50 - Configuration - Scénario 1

(Source : Mincke F., 2021)

3.3. Mouvement de la grue :

Dans cette section, il convient de définir la trajectoire de la charge et de délimiter la zone où l'on dépose les éléments.

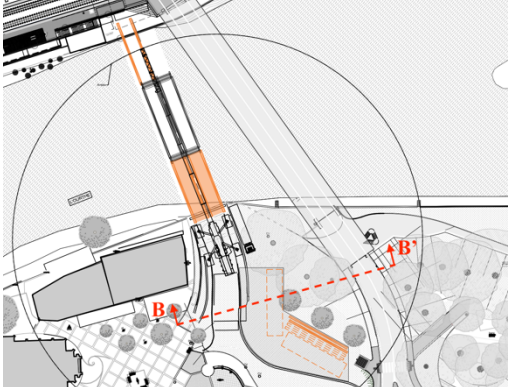


Figure 102 - Plan - Scénario 1

(Source: BAM) (Modifiée par Mincke F., 2021)

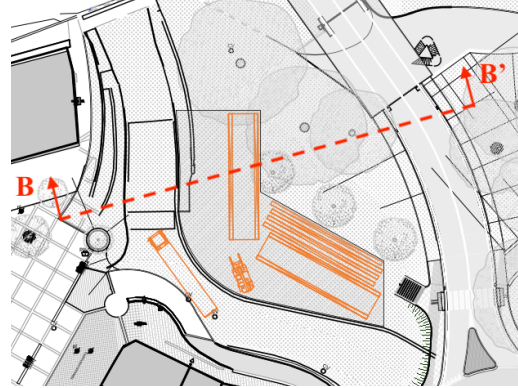


Figure 103 - Zone de stockage - Scénario 1

(Source: BAM) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Les mouvements de la grue doivent être analysés pour chaque élément à lever. Pour réaliser l'opération à cet endroit, il faut vérifier que la charge ne touche ni la flèche, ni l'arbre par-dessus lequel elle passe et que les dégagements entre les contrepoids de la machine et le bâtiment voisin sont suffisants. La figure ci-dessous représente la vérification des dégagements pour le levage d'une des structures de la partie du pont côté centre de Tilff.

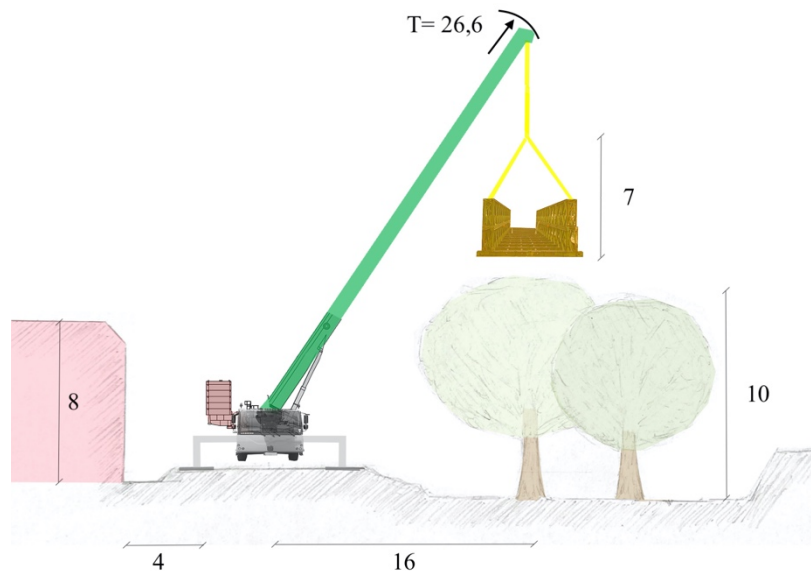


Figure 104 - Coupe BB' : vérification des dégagements

(Source: Mincke F., 2021)

La chronologie du levage choisie (cf. figure 105) se réalise comme suit: 1) on lève les éléments proches du côté centre de Tilff (rive droite), 2) on lève ceux du côté de la gare (rive gauche), 3) on lève les éléments du milieu. Ce choix a été orienté par des questions d'espace requis pour la zone de stockage des éléments démontés. Les opérations 1 et 2 s'effectuent dans une première phase du projet.

Étant donné que la zone de stockage sera remplie, une seconde phase du projet consistera à lever les éléments de la partie centrale.

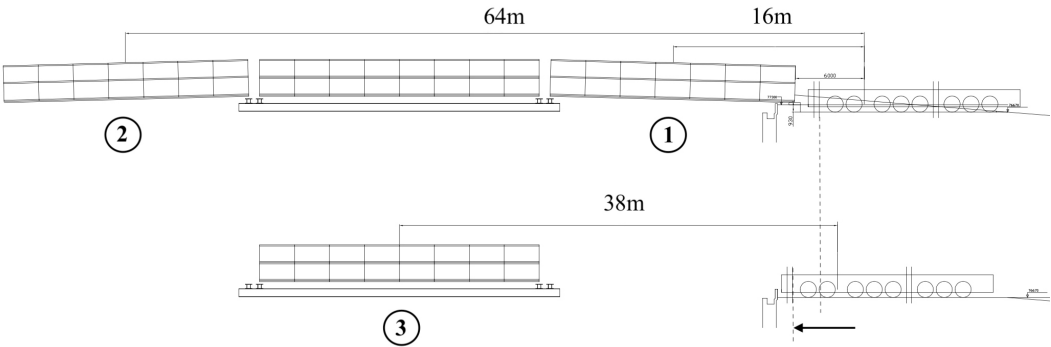


Figure 105 - Chronologie du levage en élévation - Scénario 1
(Source : Bam) (Modifiée par Mincke F., 2021)

Grâce à la représentation en plan et en coupe, on constate que les portées estimées dans l'étape de présélection sont différentes de celles déterminées par l'implantation exacte de la grue. En effet, pour la partie du pont côté gare, on passe de 60m à 64m. Dans la seconde phase du projet, il faut déplacer la grue afin de conserver la portée initialement estimée.

Étant donné que les portées ont varié, il convient de retourner à l'étape de calcul de la capacité de levage pour s'assurer que le modèle de grue convienne toujours pour le levage.

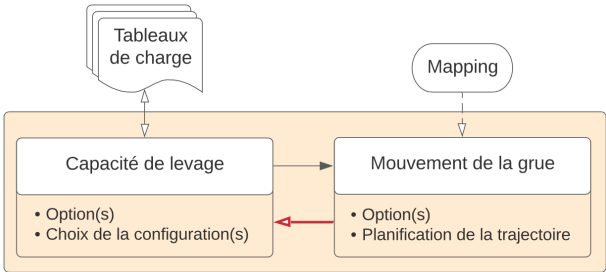


Figure 106 - Retour à l'étape de calcul de la capacité de levage
(Source : Mincke F., 2021)

La charge maximale à lever n'est plus l'élément dimensionnant. Les éléments dimensionnants sont dorénavant des éléments dotés d'une portée critique (partie du pont côté gare) car on observe une réserve de capacité plus faible pour cette configuration.

Facteurs techniques	
• Grue	LTM 1450-8.1
• Hauteur min tête de flèche (m)	10
• Portée (m)	64
• Charge (t)	9,2

Tableau 51 - Facteurs techniques - Scénario 1
(Source : Mincke F., 2021)

Configuration choisie	
• Télescopage flèche principale (m)	68,9
• Ballast (t)	134
• Vario ballast (rayon en m)	7
• % de la capacité	97 %

Tableau 52 - Configuration - Scénario 1
(Source : Mincke F., 2021)

Lors de ma visite de chantier, j'ai pu discuter avec le grutier à propos d'éléments techniques. Un élément important a été évoqué : le changement de crochet entre l'opération 1 et 2. Étant donné la grande portée, le grutier a opté pour un crochet plus compact : son poids passe de 1,5T à 500kg. Cette différence est non négligeable à 64 mètres de hauteur.

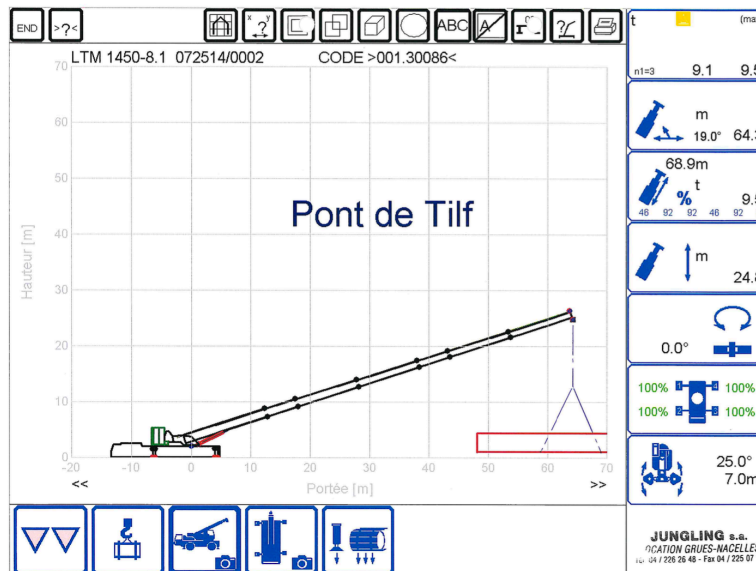


Figure 107 - Configuration sortie du logiciel Liccon

(Source : Jungling S.A.)

• 3.4. Pression d'appui au sol :

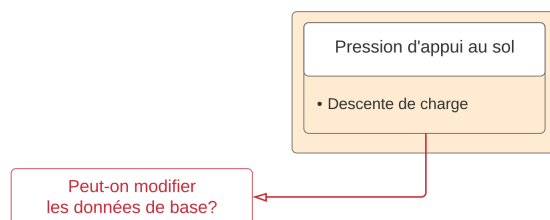


Figure 108 - Modification des conditions du site

(Source : Mincke F., 2021)

Pour implanter la grue en position 1, il faut se poser la question de savoir si l'on peut ou non modifier les conditions de site. Dans ce cas-ci, cela est possible à condition de réaliser un léger terrassement pour compenser l'inclinaison du sol. Aucune étude de la capacité portante du sol n'est retenue car la berge est considérée comme suffisamment résistante pour reprendre les efforts.

SCENARIO 3

3.2. Capacité de levage :

Pour ce scénario, lever les structures de la partie centrale ou celles de la partie du côté de Tilff requiert la même grue (LTM 1250-5.1). Il convient donc de comparer les facteurs techniques de ces deux opérations pour déterminer la configuration la plus contraignante. La configuration la plus contraignante est celle dont la réserve de capacité est la plus faible. Cette dernière consiste à lever la structure la plus éloignée de la grue côté centre de Tilff.

Partie du pont :		centrale	côté centre de Tilff
Facteurs techniques	• Grue	LTM 1250-5.1	
	• Hauteur min tête de flèche (m)	10	
	• Portée (m)	22	28
	• Charge (t)	25,5	21,5
Configuration	• Télescopage flèche principale (m)	30,3	34,6
	• Ballast (t)	88	88
	• Vario ballast (rayon en m)	5,6	5,6
	• % de la capacité	83 %	95 %

Tableau 53 - Facteurs techniques et configuration du Scénario 3

(Source : Mincke F., 2021)

3.3. Mouvement de la grue :

Pour ce scénario, les mouvements que doit réaliser la grue ainsi que les dégagements à satisfaire ne sont pas compliqués car les contraintes de site sont moins importantes. Il convient simplement de vérifier que toute portée à satisfaire au cours des mouvements est bien inférieure à la portée critique (qui consiste à lever la structure). Cependant, il faut porter une attention particulière au calage de la grue. En effet, il faut assurer l'horizontalité de cette dernière malgré la pente du pont.

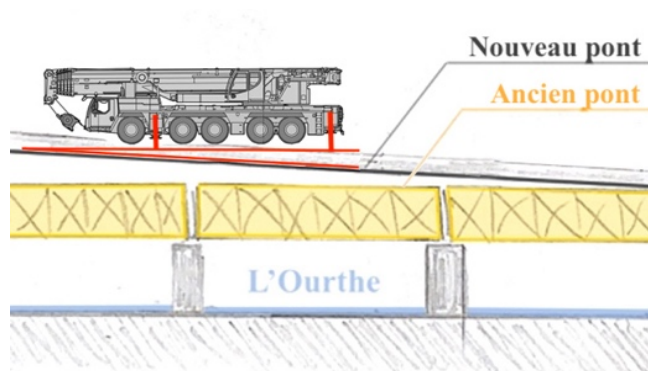


Figure 109 - Schéma de la pente du nouveau pont

(Source : Mincke F., 2021)

La grue étant implantée sur le pont, il faudra directement évacuer les éléments. Deux options sont à prendre en considération.

Il pourrait être envisagé de poser la charge sur une « SPMT » (Self-Propelled Modular Transporter). Il s'agit d'une remorque modulaire dédiée au transport de charges lourdes. Elle permettrait ainsi de transporter les différentes structures jusqu'à la zone de stock en vue de les démonter sur le site. Cependant, il faudra déplacer la grue pour lever à nouveau chaque structure en vue de les stocker et les conditions de site sont trop contraignantes. Il aurait pu être envisagé de couper des arbres pour gagner de l'espace dans la zone de stock mais la végétation doit être conservée car cet espace se trouve en connexion avec la place de Tilff.



Figure 110 - SPMT Kamag K24 de chez Sarens

(Source : <https://www.kamag.com/fr/produits/kamag-k24.html>)



Figure 111 - Zone de stock

(Source : Bam)

Une option plus plausible consisterait à transporter les structures par convoi exceptionnel. Étant donné la connexion directe du lieu de levage avec la E25 et que l'entrepôt Galère se trouve à 7 km (à Chênée), il pourrait être envisagé d'introduire une demande d'autorisation pour un convoi exceptionnel. De par la charge et les dimensions de la structure de la partie centrale (L=24,4m ; l=5,5m ; H=3m ; 24t), un convoi exceptionnel de catégorie 1 est nécessaire.

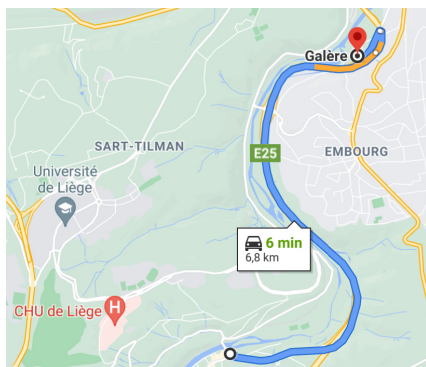


Figure 112 - Trajet : chantier - entrepôt

(Source : Google Maps)



Figure 113 - Entrepôt Galère à chênée

(Source : Google Maps)

■ 3.4. Pression d'appui au sol :

Une étude de stabilité doit être menée afin de positionner la grue sur le pont. On considère dans ce cas d'étude théorique que le pont est suffisamment résistant pour reprendre les efforts transmis par les patins de la grue et par la charge du convoi exceptionnel.

SCENARIO 4

Ce scénario constitue une variante du scénario précédent ; dès lors, l'étape consacrée à la réflexion sur les mouvements de la grue reste la même. Pour les pressions d'appui au sol, bien que les efforts augmentent à cause de l'utilisation d'une grue de plus grande capacité, on considère également que le pont est suffisamment résistant pour reprendre les efforts.

▪ 3.2. Capacité de levage

Il faut vérifier quelle configuration de la grue (LTM 1350-6.1) est la plus contraignante. Il se trouve que les deux configurations ci-dessous sont les plus contraignantes car elles ont la même réserve de capacité. Avec pourcentage de la capacité équivalent à 89%, une certaine marge de sécurité est assurée. Il n'aurait pas été possible de prendre une configuration de grue avec moins de ballast car on aurait surdimensionné la grue.

Partie du pont:		centrale	côté centre de Tilff
Facteurs techniques	• Grue	LTM 1350-6.1	
	• Hauteur min tête de flèche (m)	10	
	• Portée (m)	22	34
	• Charge (t)	37	21,5
Configuration	• Télescopage flèche principale (m)	30,1	40,2
	• Ballast (t)	140	140
	• % de la capacité	89 %	89 %

Tableau 54 - Facteurs techniques et configuration du Scénario 4

(Source : Mincke F., 2021)

4. Examen d'adéquation

Dans cette section, il s'agit de vérifier que les éléments calculés pour les différents scénarios ainsi que leurs options respectives satisfont les données de base. Suite au contrôle des résultats obtenus dans les étapes de calcul, l'examen d'adéquation est satisfait pour ce cas d'étude théorique.

5. Sélection de la grue la plus adaptée

Comme dans le cas d'étude 1, la dernière étape du processus de sélection consiste en la mise en application de la proposition d'optimisation. Il convient donc de reprendre les facteurs importants du projet et de les pondérer selon leur impact positif ou négatif sur le projet. Chacun de ces facteurs est pondéré en fonction des différents scénarios. Hors de la liste exposée dans le tableau 24 de la section V.3, 16 facteurs ont été retenus comme ayant un impact sur le projet.

Pondération des facteurs pour chaque scénario							
Catégories des facteurs			Listing	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Quantitatif	Facteurs ayant un caractère financier modulable	Coût direct	Machine	1	0,75	2	1,25
			Transport de la charge	2	1	0,5	0,5
			Transport de la machine	1	0,75	1,5	1,25
			Transport des équipements	1	0,75	1,5	1
			Intervention sur la capacité portante (l'état/nature du sol)	0,75	1	1	1
			Intervention sur le design de l'élément à lever	1,5	2	2	2
			Main-d'oeuvre pour l'exécution du levage	1	0,75	0,75	0,75
			Main-d'oeuvre pour la découpe	0,75	1	1	1
			Durée du temps de travail	0,75	0,75	1,75	2
		Coût indirect	Signalisation	1,5	0,75	0,75	0,75
			Permis / Demande d'autorisation	1,5	0,25	0,25	0,25
			Trajectoire de la charge	0,75	1	1,5	1,5
			Zone de stock	0,75	0,75	1	1
Qualitatif	Facteurs relevant d'une certaine subjectivité		Impacts sur le voisinage	1	0,75	0,75	0,75
			Risque	1	0,75	0,75	0,75
Disponibilité			Machine	0,75	1	1	1
Facteur de correction			Laissé à l'appréciation du management		1	0	1
Mutliplication des pondérations				1,2	0,0	0,9	0,4

Tableau 55 - Grille de pondération des facteurs appliquée au cas d'étude 2

(Source : Mincke F., 2021)

Relevons d'emblée l'élimination du scénario 2. En effet, un facteur zéro a été attribué au facteur de correction du scénario 2 suite à la décision prise à l'étape de présélection. Les autres cases ont toutefois été remplies pour l'exercice.

Concernant la disponibilité des machines, il se peut qu'il y ait un délai pour la grue 450 tonnes du scénario 1. Pour les autres scénarios, aucun délai n'est à prévoir car plus la capacité de la grue est faible, plus le nombre de grues disponibles dans la région est élevé.

Certaines pondérations sont également liées aux machines dans les facteurs corrélés au coût direct. Plus la grue nécessaire pour le levage est de faible capacité, moins son coût horaire est élevé et plus elle se voit accorder une pondération importante. Par exemple, une pondération de 2 est accordée au scénario 3 car il fait appel à une grue 250 tonnes.

Il en va de même pour le facteur lié au transport des machines. Etant donné que recourir à deux grues différentes a un coût plus élevé, on attribue une pondération de 0,75 au scénario 2.

Pour le transport des équipements, il convient d'amener sur site les plaques de répartition et les contrepoids. Le nombre de semi-remorques nécessaires au transport varie en fonction des contrepoids que les machines requièrent afin de satisfaire leur configuration préétablie. Le transport des équipements pour le scénario 3 fait donc appel à 2 semi-remorques là où les scénarios 1 et 4 en demandent 3.

En ce qui concerne le transport de la charge, les scénarios 3 et 4 ne permettent aucune découpe. Il faudra donc recourir à des convois exceptionnels de catégorie 1 pour le transport. Dans le scénario 1, le transport de la charge est plus aisé car celle-ci est découpée pour ne reprendre que les éléments verticaux. Remarquons que des pondérations sont aussi accordées pour l'intervention sur le design de l'élément à lever. Moins il y aura d'interventions, plus la pondération accordée sera grande.

Deux facteurs déterminants dans ce cas d'étude concernent les demandes d'autorisation et la signalisation. La pondération accordée aux scénarios 2, 3 et 4 est faible à cause des demandes d'autorisations nécessaires pour implanter la grue sur le pont mais aussi pour les convois exceptionnels et la signalisation qui en découle (route barrée). Ces pondérations mettent à mal ces scénarios à cause des démarches administratives à effectuer et du délai au profit du scénario 1 pour lequel aucune demande d'autorisation ni de signalisation n'est nécessaire.

Les facteurs liés à l'impact sur le voisinage et aux risques potentiels du levage ont également reçu une pondération plus faible pour les scénarios 2, 3 et 4. En effet, les opérations réalisées de nuit sont plus risquées et plus gênantes pour le voisinage.

Les facteurs liés à la zone de stock, à la trajectoire de la charge et à l'intervention sur la capacité portante ont quant à eux reçu une pondération plus faible pour le scénario 1 que pour les scénarios 3 et 4. Cela s'explique par la présence d'une zone de stock et par la nécessité de réaliser un terrassement. De plus, la trajectoire de la charge est plus complexe pour le scénario 1 étant donné les contraintes de l'environnement et la grande portée à satisfaire.

Pour les facteurs liés à la main-d'œuvre, on peut dissocier la main-d'œuvre nécessaire à l'exécution du levage de la main-d'œuvre nécessaire à la découpe des éléments. On suppose que le coût global de la main-d'œuvre est plus ou moins équivalent dans le scénario 1 et les scénarios 2, 3 et 4 car si ces derniers scénarios se réalisent de nuit (main-d'œuvre plus nombreuse et plus chère), le scénario 1 quant à lui demande des découpes de l'élément.

Nous clôturerons cette explication de l'emploi des pondérations par un facteur qui concerne la durée du temps de travail. Les scénarios 3 et 4 sont caractérisés par une exécution rapide grâce à l'implantation de la grue sur le pont. Le scénario 4 reçoit une pondération plus grande que le scénario 3 grâce au temps gagné par la réalisation de l'opération en une position fixe. La durée du temps de travail pour le scénario 1 est plus longue car le travail se réalise en deux phases.

Une fois les facteurs pondérés, certains ressortent comme prépondérants dans ce projet : ceux liés à la machine, au transport de la charge et aux demandes d'autorisation. Cet exercice met en évidence la multitude de facteurs ainsi que leur interdépendance dans le choix de la grue. Il ressort de cette analyse que le scénario 1 est à privilégier car il a obtenu le plus grand score. C'est aussi ce scénario qui a été observé *in situ*. Cependant, il faut noter que le score du scénario 3 se rapproche fort du scénario 1. Si les formalités pour introduire une demande d'autorisation étaient simples et que le délai était court, le scénario 3 primerait sur le premier.

6. Impondérables

On peut constater que, pour chaque scénario, la réserve de capacité est faible. De plus, la marge de sécurité ajoutée aux hypothèses sur la charge est de l'ordre de 10%. Cette marge de sécurité reste faible lors d'un démontage. En effet, l'alarme de la machine s'est déclenchée sur ce chantier car des efforts de décollement trop importants sont survenus. Il a tout de même été possible de lever la charge grâce à la dextérité du grutier. S'il n'avait pas été possible de la soulever, il aurait fallu alors se poser la question du déplacement de la grue pour la rapprocher de l'élément à soulever, voire envisager de changer de grue.

3. Cas d'étude 3 – Montage de 5 éoliennes à Fauvillers

1. Données de base

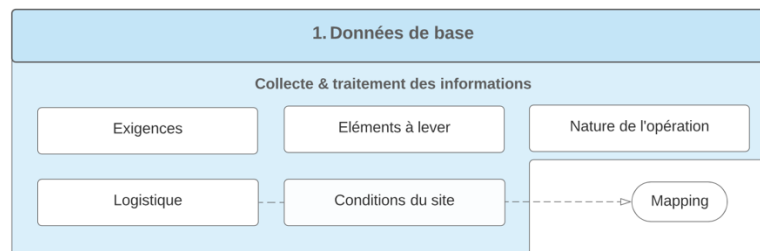


Figure 114 - Étape 1 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

■ 1.1. Exigences :

L'entreprise Eneco veut développer un parc éolien comprenant 5 sites dans la commune de Fauvillers. Pour ce faire, il est nécessaire de faire appel à différents intervenants. Un appel d'offre est ainsi lancé afin de choisir les différentes entreprises qui réaliseront les différents travaux. Ces dernières ont été choisies en fonction de leurs aptitudes à réaliser le travail (fiabilité, régularité, expérience, réputation de l'entreprise, vétusté du matériel ...) ainsi que du devis qu'elles proposent. Selon ces critères, Eneco retiendra l'entreprise danoise Vestas, fabricant d'éoliennes, pour son modèle V100 ainsi que pour la réalisation de l'élingage. L'entreprise Dufour (engineering, méthodologie, exécution), leader européen dans l'installation de parcs éoliens, sera sollicitée pour la réalisation de l'opération de levage ainsi que pour l'élaboration du mode opératoire. Quant à la logistique (transport des éléments), elle sera assurée par l'entreprise Aertssen.



Figure 115 - Parc éolien

(Source : <https://wind.eneco.be/fr/windfarm/fauvillers-fr/>)

Dans les projets d'une telle envergure, la communication entre les différents corps de métiers est primordiale. Le chef de chantier, R. Servaye, a pour rôle de s'assurer que les informations nécessaires soient transmises aux différentes parties impliquées dans le levage.

Le chantier a été initié des années à l'avance (+/- 12ans) étant donné les lourdes démarches administratives ainsi que la présence d'un voisinage réticent à l'implantation de ce projet. Le délai imparti entre le choix de la grue et son emploi sur le chantier est également long. Il n'y a pas de contrainte environnementale pour le levage. Note : Eneco réalise des mesures compensatoires dans les environs comme la création d'un parc qui favorise la biodiversité et le remaniement du paysage.

■ 1.2. Éléments à lever :

Une éolienne est composée de différents éléments à assembler sur place. Le modèle de l'éolienne Vestas V100 utilisé sur ce chantier est composé de 9 éléments. On est en présence de quatre parties qui composent le mât (dénommées respectivement : Bottom, Middle 1, Middle 2, Top), d'une nacelle (représentée en bleu dans la figure 116), de 3 pales d'éolienne et d'un HUB (élément de jonction entre la nacelle et les pâles).



Figure 116 - Vestas V100 – 9 éléments

(Source : Mincke F., 2021)

Il existe deux façons de lever les pales d'une éolienne. Soit on lève l'ensemble des 3 pales accrochées au HUB, soit on lève la nacelle et le HUB conjointement puis on accroche les pales d'éolienne une à une. La première technique (voir figure 12) consiste à assembler l'ensemble (pale + HUB) au sol puis à le soulever. Une force doit être exercée sur une des pales afin d'effectuer la rotation de l'ensemble de l'horizontale à la verticale afin de fixer le HUB à la nacelle. Le désavantage de cette technique réside dans l'effort exercé sur la pale. Cette dernière étant composée de fibre de verre (fragile), elle se plie sous l'effet d'une force et risquerait d'atteindre le point de rupture. Dans ce cas d'étude, comme dans la situation observée *in situ*, le deuxième principe de montage sera employé. Cette technique « single blade » a le désavantage de nécessiter un plus grand nombre de manipulations de levage et dès lors, un temps de travail plus long.

Éléments	Bottom	Middle 1	Middle 2	Top	Nacelle + HUB	Pale
Poids (t)	43	48	37	28	84	8,3
H (m)	14,86	24,36	26,88	27	4	/
Ø down (m)	3,85	3,65	3,1	3,1	/	/
Ø top (m)	3,65	3,1	3,1	2,3	/	/
Longueur (m)	/	/	/	/	15	50
Largeur max (m)	/	/	/	/	3,7	3,5
Niveau de pose (m)	0	15	40	67	94	95

Tableau 56 - Données sur les éléments à lever

(Source : Mincke F., 2021)

Outre leur nature fragile, les pales de l'éolienne ont aussi un faible rapport poids/surface. Des calculs concernant la prise au vent de ces éléments doivent être effectués. L'élément à lever composé de la nacelle + HUB est le plus lourd et il conviendra de faire attention à l'inertie de l'ensemble lors du levage. Les différents éléments qui composent le mât ont tous une forme de cône tronqué (faible différence de superficie entre la face supérieure et inférieure des éléments) mais ont chacun des dimensions, un poids et un niveau de pose différents.

Le niveau de pose est ici estimé sur base de la superposition des différents éléments. Il convient de préciser cette hypothèse pour les différents sites de levage.

▪ **1.3. Nature de l'opération :**

Un grand nombre d'opérations de levage doivent être réalisées afin d'assembler les différents éléments qui composent l'éolienne. Il convient donc d'établir une chronologie des actions. Le programme de levage est défini par l'ordre de superposition des éléments.

- | | |
|-------------|------------------|
| 1. Bottom | 5. Nacelle + HUB |
| 2. Middle 1 | 6. Pale 1 |
| 3. Middle 2 | 7. Pale 2 |
| 4. Top | 8. Pale 3 |

Pour chacun de ces éléments, il faut décomposer chaque étape entre leur position initiale et leur position finale. Les différents éléments à lever arrivent sur une semi-remorque par transport exceptionnel. Ils vont devoir être déchargés et stockés en attendant le levage. Les parties qui composent le mât de l'éolienne vont devoir subir un retournement pour passer de la position de stock (horizontale) à la position de pose (verticale) (cf. relevé photographique figure 120). Une analyse de la distribution des charges (cf. chapitre II section 1.6) doit donc être réalisée.

Le levage peut être caractérisé de répétitif. En effet, l'ensemble des opérations de levage pour une éolienne devront être reproduites en 5 lieux différents car il y a 5 éoliennes à monter. Il convient cependant de tenir compte des spécificités de chaque site de levage. Celles-ci sont détaillées dans la partie « conditions de site ».

Pour l'érection d'une éolienne, il y a aussi des opérations reproductibles comme par exemple le levage des trois pâles d'éolienne.

▪ **1.4. Logistique :**

En ce qui concerne l'accessibilité du site, les voies d'accès sont les mêmes pour le transport des éléments à lever, des machines et des équipements. Les transporteurs arrivent depuis la nationale 4 et doivent ensuite emprunter des routes de campagne (chemins de terre pour la plupart). Pour faciliter les déplacements entre les différents sites qui sont éloignés les uns des autres, la route parallèle à la nationale sera privatisée (démarches administratives et signalisation à prendre en compte). Les éléments de l'éolienne sont amenés par convoi exceptionnel de catégorie 3. Un repérage préalable est à effectuer (par LIDAR) afin d'établir l'itinéraire.

Un élément important à prendre en compte pour l'accès au site de l'ET4 est le passage de lignes haute tension au-dessus de la voie d'accès (cf. figure 117 (a)). Une mesure doit être prise afin d'éviter que les engins de chantier ne touchent les câbles. À cette fin, des cadres de limitation de hauteur sont posés en début de voirie pour rappeler aux transporteurs de rabattre les flèches des grues mobiles.

▪ 1.5. Conditions du site :

Pour les chantiers éoliens, une plateforme est systématiquement créée au pied des éoliennes afin d'augmenter leur stabilité, pour avoir un sol plat et pour ne pas travailler sur des terrains boueux (souvent des sites de campagne). L'étape de calcul des pressions d'appuis au sol ne sera pas réalisée dans ce cas d'étude car on admettra qu'à tout instant la pression des chenilles est inférieure à la capacité portante des plateformes.

Les routes de campagnes qui desservent les différents sites sont des chemins de terre en mauvais état. Elles nécessitent donc un aménagement pour pouvoir accueillir les semi-remorques (agrandissement, équilibrage et compression des terres).

Les emplacements des éoliennes ont été choisis en amont du projet. Ces derniers ont été choisis pour des raisons techniques mais également pour faciliter leur installation : les sites de levage sont dépourvus de contraintes de site (obstacles aériens, enterrés...). Cependant, l'éolienne elle-même deviendra un obstacle au fur et à mesure du levage.



(a)



(b)

Figure 117 - (a) Accès au site de l'ET4 et (b) pente d'un site

(Source : Mincke F., 2021)

Chacun des sites éoliens a toutefois ses spécificités qu'il convient de relever lors d'une visite de site. En effet, l'inclinaison des terrains est de pente douce mais variable d'un site à l'autre. Le niveau de pose des éléments sera donc différent d'un site à l'autre car, en fonction de la pente du terrain, le niveau de la plateforme sera soit inférieur soit supérieur à celui de la base de l'éolienne. A cause de ce dévers, il faudra veiller à descendre la flèche de grue dans le sens descendant de la pente du terrain et des mesures devront être prises afin d'assurer l'horizontalité pour le montage/démontage d'équipement comme le montrent les terre-pleins de la figure 117 (b).

Sur chacun des sites éoliens, des chariots télescopiques (Manitou) sont constamment en mouvement sur la plateforme pour déplacer des objets. Il faut prendre en considération cette co-activité ainsi que la présence ponctuelle de camions de logistique, de chariots élévateurs, etc. Quand le transporteur arrive, il faut directement décharger l'élément car il repart tout de suite. Des zones de stock pour les différents éléments sont donc à prévoir.

Le chantier se situe à Fauvillers dans la province du Luxembourg en Belgique. Il s'agit d'une zone rurale vallonnée. La zone est exposée et il n'y a pas de construction aux alentours. Il se peut que la zone soit soumise à des vents dont l'intensité et la direction varient fréquemment.

- **Mapping** → Réalisé sur base de la logistique et des conditions du site

Un mapping global et un mapping spécifique à chaque site de levage sont à réaliser sur base des points traitants de la logistique et des conditions de site.

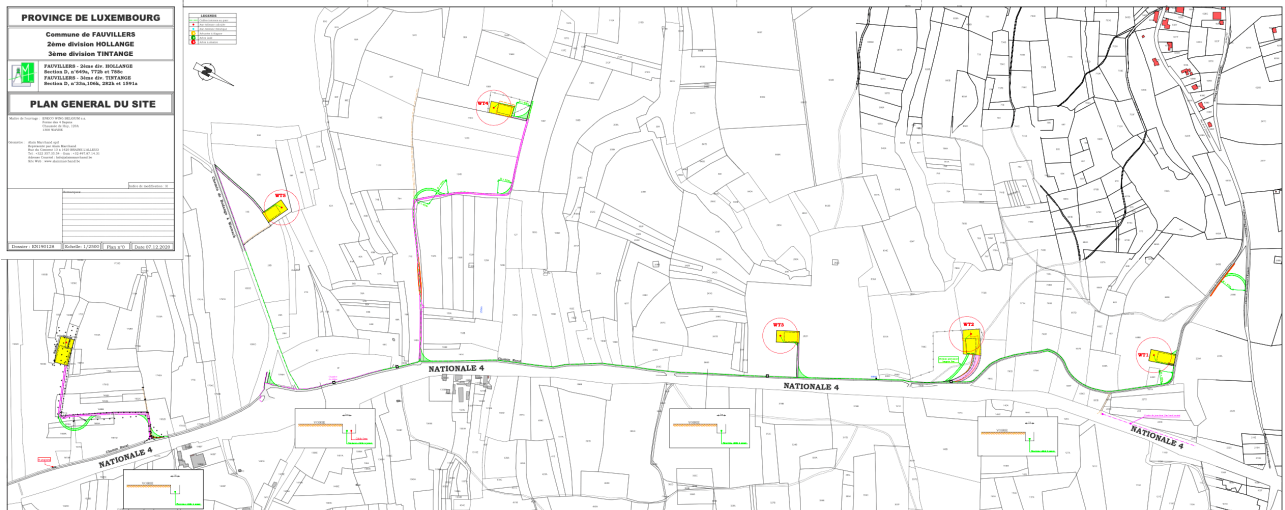


Figure 118 - Mapping - plan

(Source : Eneco - Romuald Servaye)

- **Relevé photographique**

Lors de ma première visite du chantier (17/03/21), j'ai pu assister à l'arrivée du semi-remorque ainsi qu'à des opérations de déplacement et de retournement sur le site 1 (cf. relevé photographique figure 120). Le levage des pales était normalement prévu sur le site 3 mais les conditions météorologiques n'étaient pas favorables à cette opération. En effet, le grutier n'a pas pris le risque de lever la charge car la vitesse du vent excédait les valeurs autorisées. Je me suis donc à nouveau rendu sur site le 22/03/21 afin d'assister à la suite du levage. J'ai assisté au levage de la nacelle + HUB ainsi qu'au levage des pales de l'éolienne sur le site 4. L'éolienne sur le site 2 était déjà construite tandis que sur le site 5 seule la base avait été montée.

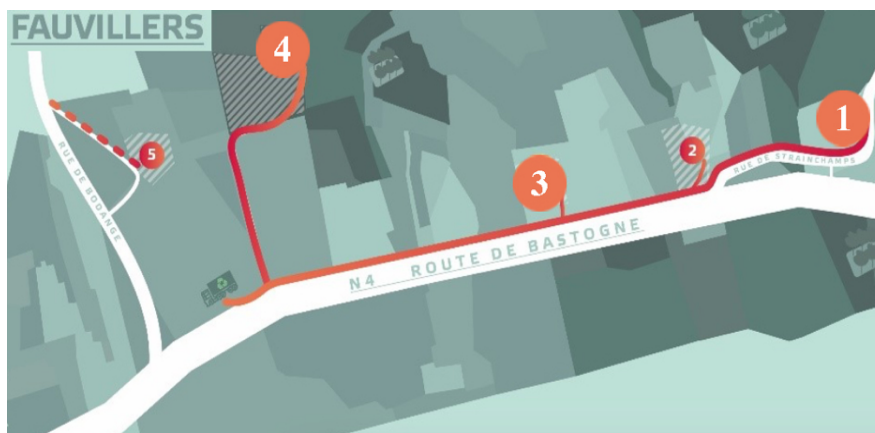


Figure 119 - Sites visités

(Source : <https://www.fauvillers.be/5-eoliennes-a-fauvillers-derniere-ligne-droite-mise-en-service-en-avril/>) (Modifiée par Mincke F., 2021)



Figure 120 - Site 1 visite de chantier 17/03/21

(Source : Mincke F., 2021)



Figure 121 - Site 3 visite de chantier 17/03/21

(Source : Mincke F., 2021)



Figure 122 - Site 4 visite de chantier 22/03/21

(Source : Mincke F., 2021)

2. Présélection

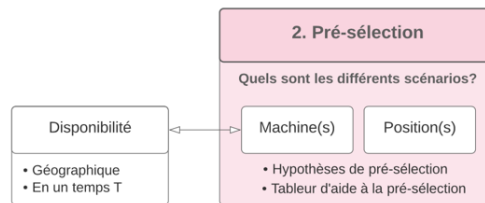


Figure 123 - Étape 2 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

■ Scénarios :

Dans ce projet, où un grand nombre d'intervenants sont impliqués, l'élaboration de scénario de levage plausible passe d'abord par l'établissement d'un planning. Un plan d'action est à élaborer afin de minimiser la durée du chantier.

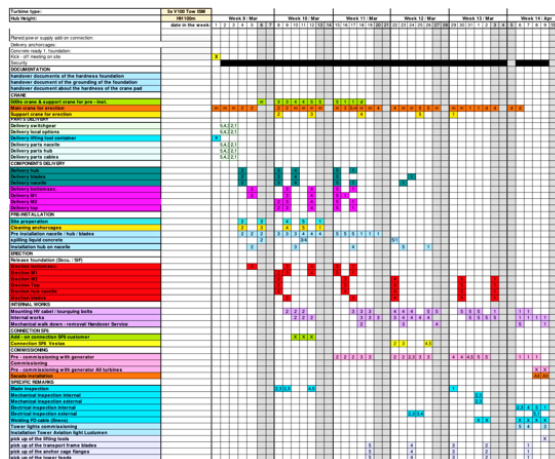


Tableau 57 - Extrait du planning de levage

(Source : Geoffrey Andrieux de chez Dufour)

La stratégie client employée *in situ* rejoint la méthode développée par Furusaka & Gray (1984) exposée dans la section 4.2 de l'état de l'art partie 2. Cette solution consiste à d'abord employer une grue avec un coût de location moindre pour les premiers éléments à lever et puis de la remplacer par une autre grue lorsqu'elle a atteint ses capacités maximales de levage. Cette méthode permet d'optimiser le coût de location mais aussi d'optimiser le temps de travail car les phases de montage peuvent se réaliser en décalage (cf. tableau 57). En effet, lorsque la grue de plus faible capacité a terminé les premières phases de montage sur un site, elle passe au site suivant et la grue de plus grande capacité reprend sa place.

Dans la situation observée *in situ*, les éléments Bottom et Middle 1 ont donc été levés dans un premier temps par une AC500 full ballast équipée d'un spanlift et le reste des éléments ont été levés dans un second temps par la grue de grande capacité. La grue AC500 réalisait le déchargement des semi-remorques et l'opération de retournement à l'aide d'une grue d'appont, une AC200. La grue de grande capacité doit, elle aussi, être accompagnée d'une grue d'appont afin de retourner les éléments supérieurs qui composent le mât. Cette deuxième grue secondaire est une LTR1100, c'est-à-dire une grue sur chenilles dotée d'une flèche télescopique. Ce modèle de grue tout-terrain est nécessaire pour monter les flèches treillis et les équipements de la grue principale. Elle peut se déplacer avec la charge au crochet et déployer sa flèche dans la position souhaitée en fonction des besoins.

On est face à un cas de levage où le processus de sélection implique différents intervenants et dont la solution observée *in situ* « est déjà optimisée car elle résulte de stratégie client » (Geoffrey Andrieux, entretien numéro 6). En effet, l'utilisation des grues est maximisée et le mode opératoire pour la construction de parcs éoliens en terre agricole suit, dans la plupart des cas, le même schéma. Il est donc difficile de dégager des scénarios et d'optimiser le choix de la grue pour ce cas d'étude.

▪ 2.1. Position(s) :

L'implantation de la grue dépend du zonage effectué sur chacune des plateformes en fonction de l'emprise au sol des différents éléments à lever. Pour ce type de levage, le but est de travailler à portée minimale et donc, avec la flèche complètement relevée afin d'utiliser la capacité maximale de levage de la grue.

Une donnée importante dans les levages éoliens est la hauteur du rotor. Cette dernière peut être estimée à 100 mètres pour le cas le plus défavorable, à savoir le site pour lequel le niveau de la plateforme est inférieur à celui de la base de l'éolienne. Étant donné qu'une flèche principale peut avoir au minimum un angle de 5% par rapport à la verticale et que l'on doit utiliser une fléchette supplémentaire, on peut estimer à 20 mètres la portée.

▪ 2.2. Machine(s) :

Pour ce cas d'étude, le tableur de présélection développé n'est pas applicable. En effet, ce dernier se base sur le tableau de chez Sarens qui n'intègre pas la hauteur du levage. Or, dans le levage éolien, la hauteur du rotor est une donnée prépondérante.

Pour effectuer la présélection, il convient donc de trouver des grues compatibles pour un levage éolien dont la hauteur de rotor est de 100 mètres et la charge de la nacelle avec le HUB est de plus ou moins 86 tonnes avec l'élingage. Pour ce faire, il faut consulter les fiches techniques des fabricants spécifiques au levage éolien.

Hauteur du rotor éolien	LTM 1350-6.1	LTM 1400-7.1	LTM 1450-8.1	LTM 1500-8.1	LTM 1750-9.1	LTM 11200-9.1
80 m	21,1 t	27,5 t	27,2 t	56 t	84,7 t	141 t
100 m	10,1 t	14,9 t	14,9 t	31 t	59,7 t	97 t
140 m	-	-	-	-	13,3 t	26,1 t

Hauteur du rotor éolien	LR 1350/1	LR 1500	LR 1600/2	LR 1600/2-W	LR 1750/2	LR 11000	LG 1750
80 m	83 t	104 t	137 t	132 t	150 t	179 t	150 t
100 m	-	82 t	118 t	106 t	140 t	179 t	144 t

Figure 124 - Présélection sur base d'une fiche technique

(Source : fiche technique "des grues pour l'énergie éolienne" Liebherr p.4 et p.5) (Modifiée par Mincke F., 2021)

La figure 124 fait apparaître des modèles de grue de chez Liebherr qui pourraient convenir pour le travail. Il convient de choisir une grue qui ne soit pas surdimensionnée. Par exemple, il faut écarter les grues mobile LG à flèche en treillis car ce type de grue est utilisé pour lever des charges particulièrement lourdes à des hauteurs et des rayons de travail énormes qui dépassent le cadre du travail à réaliser dans ce cas d'étude.

La figure 125 met en évidence les avantages et les inconvénients des différents types de grue de chez Liebherr compatibles pour un levage éolien.





	Taille des installations	Transport économique	Mise en place sur le chantier	Flexibilité
LTM 
LR 
LR-W 
LG 

Figure 125 - Concepts pour l'énergie éolienne de chez Liebherr

(Source : fiche technique "des grues pour l'énergie éolienne" Liebherr p.3)

On peut constater une grande différence entre les grues mobiles sur porteur et celles sur chenilles concernant les coûts liés au transport. En effet, chaque élément des grues sur chenilles doit être transporté sur une semi-remorque tandis que seuls les équipements des grues sur porteur doivent être amenés sur site. Les phases de montage/démontage sont également plus longues pour les grues mobiles sur chenilles.

Afin d'établir des scénarios, on peut comparer différents types/modèles de grue de grande capacité. Les grues qui pourraient convenir pour ce levage éolien sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Grues compatibles	Grue 1	Grue 2	Grue 3
Marque	Terrex	Liebherr	Liebherr
Type	Grue mobile sur chenilles	Grue mobile sur chenilles	Grue mobile sur porteurs
Modèle	SL3800 (650t)	LR1600/2	LTM11200-9.1

Tableau 58 - Grues compatibles

(Source : Mincke F., 2021)

▪ Disponibilité

La disponibilité est un facteur important pour les grues de grande capacité. On peut dissocier la disponibilité en un temps T de la disponibilité géographique. Ces grues doivent être réservées longtemps à l'avance à cause de leur faible disponibilité géographique. En effet, les grues de grande capacité sont en nombre restreint dans un cercle de x kilomètres à la ronde autour de Fauvillers. La 3^{ème} grue proposée dans le tableau ci-dessus est encore plus rare dans la région, ce qui l'élimine d'entrée de jeu. Entre la 1^{ère} et la 2^{ème} grue, deux modèles similaires mais de marque différente, il conviendra de choisir celle qui est disponible le plus rapidement.

Une grue SL3800 a été choisie pour effectuer le levage car elle fait partie du parc de grues de chez Dufour. Etant donné sa réputation de leader européen dans l'installation de parcs éoliens, cette entreprise a été choisie par Eneco pour réaliser le travail.

3. Phase de calcul

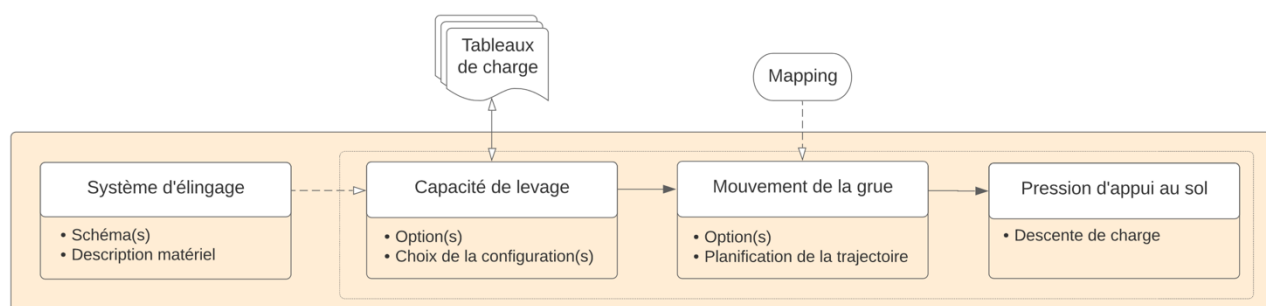


Figure 126 - Étape 3 du logigramme

(Source : Mincke F., 2021)

3.1. Système d'élingage :

Des pièces d'élingage ont été spécialement conçues pour les différents éléments de l'éolienne. C'est la compagnie VESTA qui fournit les éléments de l'éolienne et les pièces d'élingage spécifiques. Celles-ci sont réglables et dimensionnées pour être utilisées pour le montage des différents modèles d'éolienne de l'entreprise.

Les points de levage, pour les parties qui composent le mât (Bottom, Middle 1, Middle 2 et Top), se trouvent aux connexions entre chaque partie. Pour l'élément nacelle + HUB, ils se trouvent sur les éléments lourds de la nacelle. En revanche, pour les pales, un système spécial est nécessaire car elles n'ont pas de point de levage. L'élingage de la pale de l'éolienne se fait sur le principe du Squat board ou « J HOOK » (cf. relevé photographique figure 122). Ce dernier permet de maintenir la pale horizontalement et de la présenter dans la bonne position pour l'accrocher au HUB.

Il convient d'intégrer la hauteur d'élingage et le poids des différents systèmes d'élingage dans l'étape de calcul de la capacité de levage ci-après.

3.2. Capacité de levage :

La grue SL3800 possède un grand nombre de configurations d'équipement différentes.

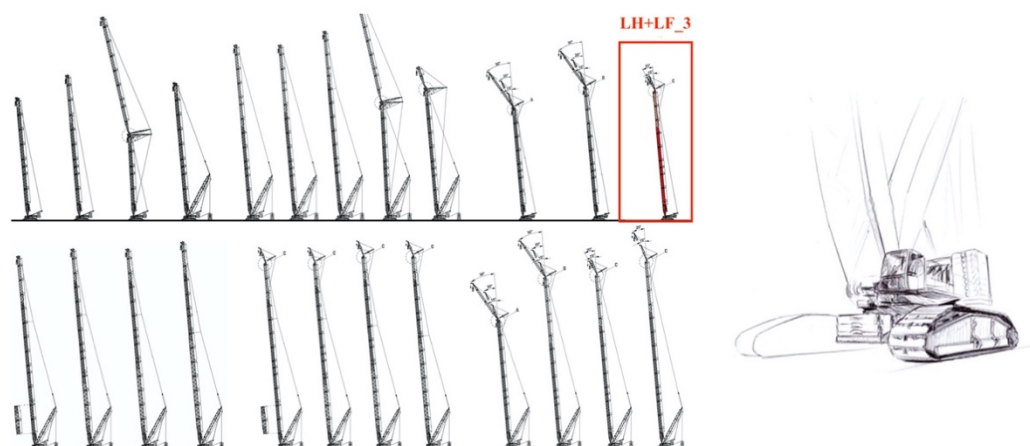


Figure 127 - Ensemble des configurations d'équipement de la grue SL3280 et dessin d'une grue sur chenilles

(Source : Fiche technique SL3800 ; 9/25/2013 Crane & Rigging Workshop p.1) (Modifiée par Mincke, F. 2021)

Cette variété d'équipements est due à la présence ou non de fléchettes fixes, de fléchettes à volée variable, de superlift ainsi que de la longueur des équipements et de la flèche principale.

Pour sélectionner une configuration d'équipements de la grue, on cherche la configuration la plus « simple » qui répond aux exigences de l'élément dimensionnant. Le but est d'avoir le moins d'équipements auxiliaires pour effectuer le travail.

Les facteurs techniques sont les suivants : une hauteur minimale de tête de flèche de 110 mètres, une portée minimale estimée précédemment à 20 mètres et une charge de 86 tonnes au crochet pour le levage de la nacelle + HUB. Pour satisfaire ces facteurs techniques, l'emploi d'un superlift n'est pas nécessaire car son usage ne justifie pas les moyens employés pour le mettre en œuvre. On opte pour une fléchette fixe afin de satisfaire les dégagements entre l'élément à lever et la flèche principale. La configuration LH+LF_3 avec 108 mètres de flèche principale et 12 mètres de fléchette semble convenir.

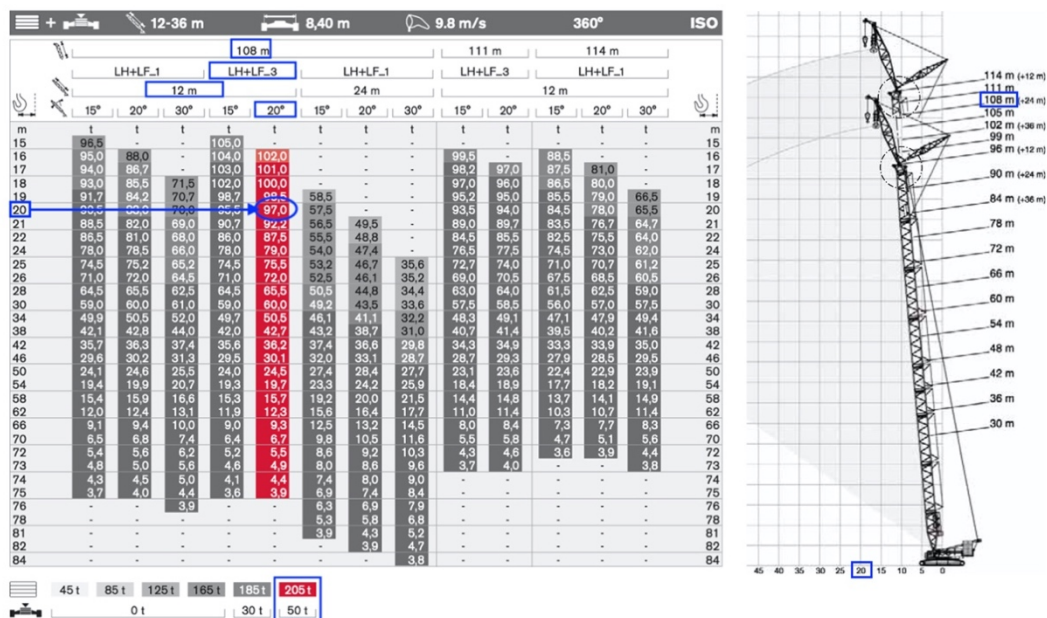


Tableau 59 - Tableau et diagramme de charge

(Source : Fiche technique SL3800 p. 56 et p.42)

Cette configuration requiert 205 tonnes de ballast ainsi que 50 tonnes supplémentaires entre les chenilles. L'angle de la fléchette avec la flèche principale est fixé à 20°. Le mouflage choisi est composé de 6 brins et un ballast a été ajouté au crochet afin d'éviter que ce dernier ne remonte dans les poulies à cause de la force du treuil. Des stabilisateurs sont également employés sur cette grue sur chenilles pour le démontage/montage de la flèche (cf. relevé photographique figure 121).

J'ai eu la chance de pouvoir rentrer dans la cabine de cette grue. Le grutier m'a montré le tableau de bord et m'a fait la démonstration des différents mouvements de la grue. Quand la grue bougeait, les informations sur le tableau de bord changeaient également : la pression sur les chenilles, l'inclinaison, l'orientation, la charge (qui augmente avec les mètres de câble déroulé), le pourcentage de capacité... La charge maximum qu'il pouvait reprendre au crochet était de 96 tonnes, c'est-à-dire que la réserve de capacité était de l'ordre de 10%.

La configuration de la grue a été choisie sur base des facteurs techniques liés au levage de l'élément nacelle + HUB. Il convient maintenant de regarder si le vent influence l'utilisation de la grue. En effet, on implante généralement des parcs éoliens dans des lieux où le vent souffle fort. Dans le cas présent, les éoliennes sont implantées à la campagne. Ces terrains sont caractérisés par l'absence d'obstacle au vent et par une faible rugosité de la surface du sol.

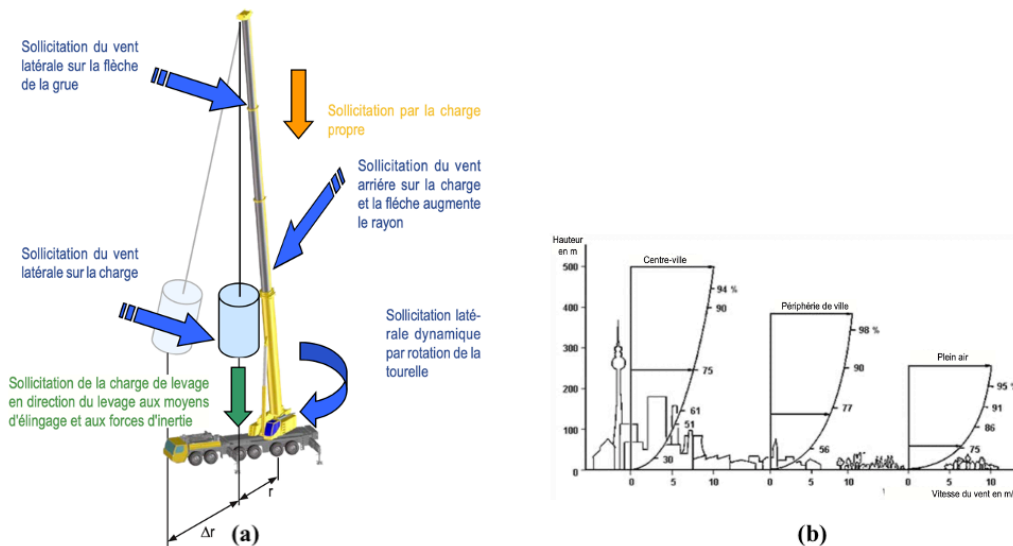


Figure 128 - (a) Sollicitations du vent et (b) Influence de la rugosité et des obstacles du paysage

(Source: Fiche technique Liebherr, 2021, Whatever way the wind blows, p.9 et p.15)

L'orientation du vent est de direction changeante (vent de face, vent arrière, vent latéral). Le vent applique des forces sur la grue et sur l'élément à lever. Il convient de surveiller la vitesse du vent et de ses rafales (facteur imprévisible) car le vent induit des sollicitations supplémentaires qui peuvent mener à des accidents.

La grue ne doit donc pas être exposée à des vents excédant les limites fixées. Cette vitesse du vent admissible est indiquée dans les tableaux de charge mais une nouvelle vitesse de vent plus faible peut être attribuée pour le levage de certains éléments ayant une grande prise au vent. La formule ci-dessous permet de vérifier si la vitesse du vent admissible se voit affectée d'un facteur de réduction.

$$V_{\max} = V_{\max_TAB} \cdot \sqrt{\frac{1,2 \frac{m^2}{t} \cdot m_H}{A_w}}$$

Figure 129 - Formule de réduction de la vitesse du vent admissible

(Source: Fiche technique Liebherr, 2021, Whatever way the wind blows, p. 33)

Charge de levage [t] m_H ; Surface de projection [m²] A_p ; Coefficient de résistance au vent [/] c_w ; Surface de prise au vent [m²] $A_w = A_p \cdot c_w$; $V_{\max_TAB} = 9,8\text{m/s}$ dans le tableau 59.

Les pales de l'éolienne ne se voient pas accorder un facteur de réduction pour leur vitesse de vent admissible car elles ont une surface de projection (A_{p_pale}) très faible étant donné qu'elles sont levées horizontalement (cf. relevé photographique figure 121). Le levage des pales ne se voit donc pas attribuer une vitesse de vent admissible plus faible que celle inscrite dans le tableau.

3.3. Mouvements de la grue :

Chacune des opérations de levage doit être représentée en plan et en élévation. Un zonage est réalisé afin de déterminer l'emplacement optimal des grues, de la zone de montage de la flèche ainsi que des zones de stock. Une zone de sécurité autour du lieu de levage doit également être établie. En effet, il faut éviter que des personnes non habilitées ne se trouvent dans la zone de levage. Sur les figures ci-dessous, on peut voir en (a) - (b) des opérations de déchargement avec les grues AC200, AC500 et en (c) - (d) des opérations de levage avec la SL3800.

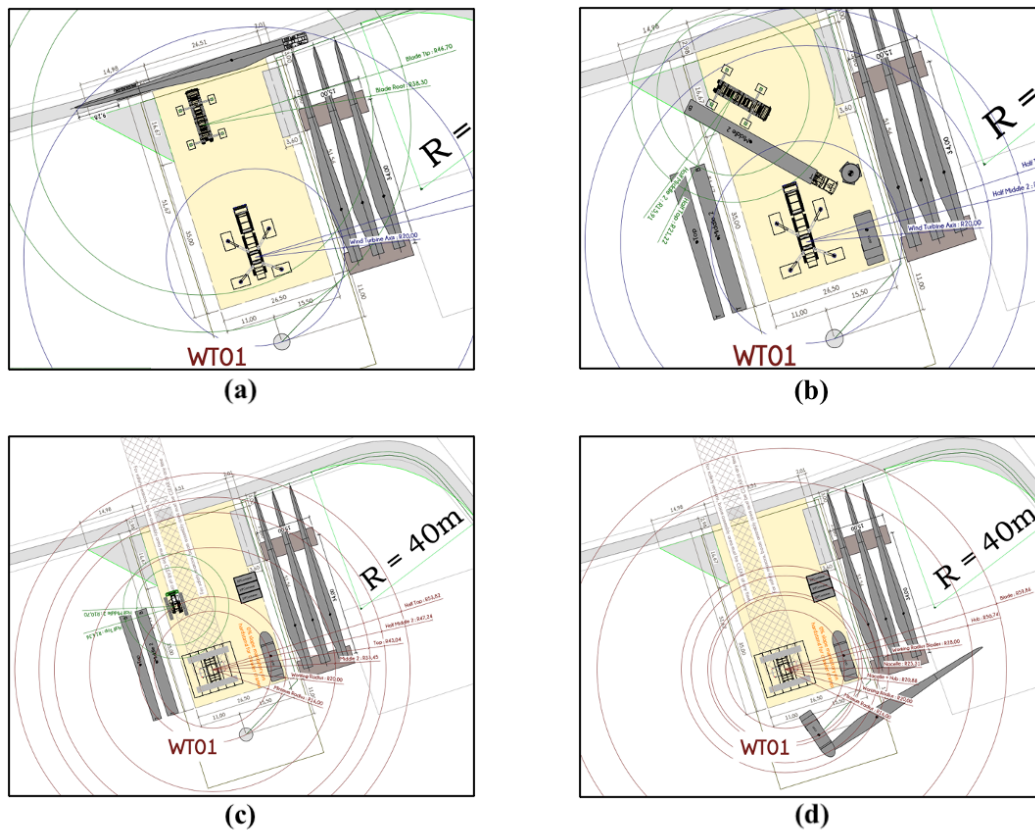


Figure 130 - Exemples de plans de levage site 1

(Source : Geoffrey Andrieux de chez Dufour) (Modifiée par Mincke F., 2021)

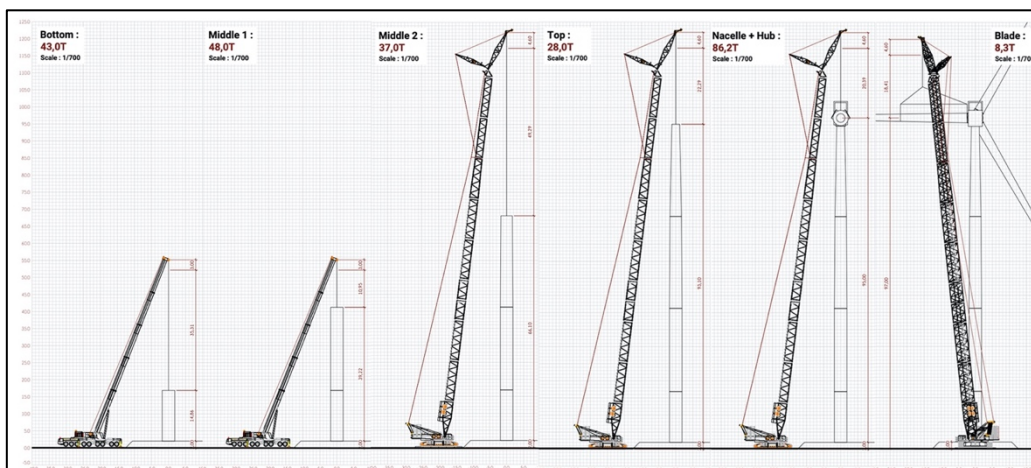


Figure 131 - Élévation des différents éléments à lever

(Source : Geoffrey Andrieux de chez Dufour) (Modifiée par Mincke F., 2021)

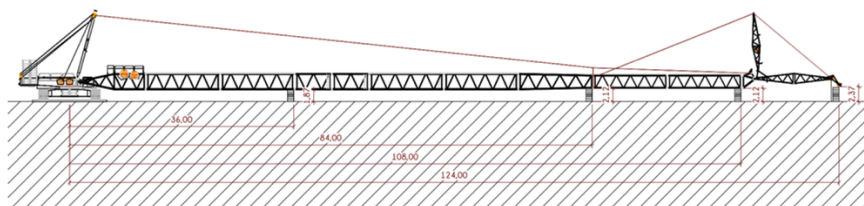


Figure 132 - Montage flèche treillis

(Source : Geoffrey Andrieux de chez Dufour) (Modifiée par Mincke F., 2021)

6. Impondérables

Dans tout chantier, des mesures sont prises afin d'écartier tout danger. Suite à une discussion avec le grutier, il apparaît, par exemple, qu'il est nécessaire d'avoir deux grutiers qui se relaient pour des grues de grande capacité. En effet, s'il arrivait un accident à l'un des deux (se casser une jambe, par exemple), l'autre pourrait reprendre le travail. S'il n'y avait qu'un grutier, ce serait l'arrêt du chantier, ce qui engendrerait des coûts supplémentaires. Des options B et C sont ainsi prévues à l'avance pour différentes situations extérieures au plan de départ. Malgré tout, il se peut que des impondérables surviennent. En effet, un problème est survenu pour un des convois exceptionnels : l'élément transporté a été endommagé, soit à cause d'une erreur lors du repérage par LiDAR, soit à cause d'un mauvais itinéraire. Cet imprévu a engendré des retards sur le planning et des coûts supplémentaires.

Un autre impondérable précédemment énoncé concerne les conditions météorologiques. En effet, le grutier n'a pas pris le risque de lever les pales de l'éolienne sur le site 3 le 17/03/21 car la vitesse du vent excédait les valeurs autorisées. Cet impondérable a également engendré des retards sur le planning.

VII. Discussion

1. Contributions

La méthode proposée pour optimiser le choix d'une grue mobile est le résultat d'une réflexion basée sur l'état de l'art et les recherches menées sur le terrain (enquête, entretiens, visites de chantier). Cette réflexion a abouti à l'élaboration d'un **logigramme** et d'une **check-list** dans lesquels figurent les étapes à suivre afin de sélectionner la grue mobile la plus adaptée au projet.

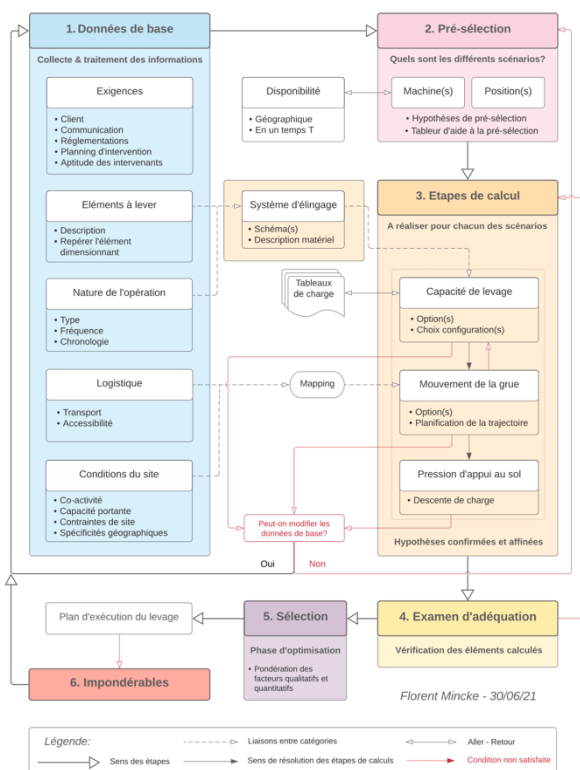


Figure 133 - Logigramme final - 30/06/21

(Source : Mincke F., 2021)

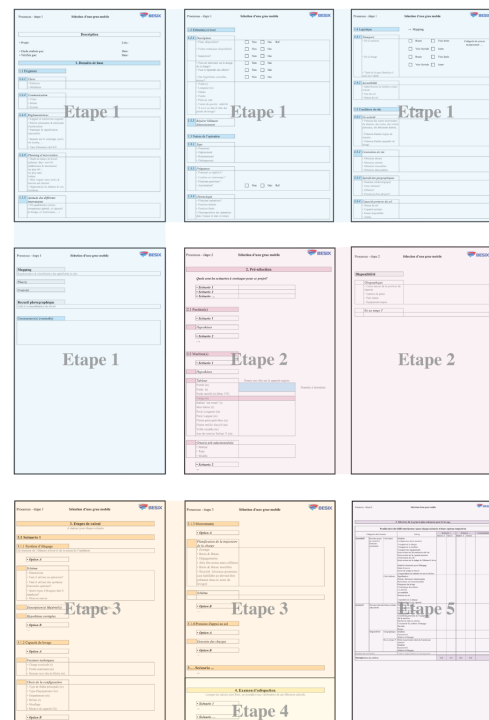


Figure 134 - Version miniature de la check-list

(Source : Mincke F., 2021)

Parmi ces étapes, deux rejoignent celles établies par les chercheurs Al- Hussein *et al.* (2005), Wu *et al.* (2011) ainsi que Han *et al.* (2018) : l'étape 1 (données de base) et l'étape 3 (étapes de calcul). La collecte et le traitement des données de base sont décrits dans la littérature comme les premières étapes du processus de sélection et sont également considérés comme tels dans le logigramme. Les participants aux entretiens rapportent que cette étape représente une grande part du travail à fournir pour la sélection d'une grue adéquate. Quant à la proposition de l'ordre des étapes de calcul (capacité de levage, mouvement de la grue, pression d'appui au sol), elle correspond aux travaux des auteurs Wu *et al.* (2011) ainsi qu'aux résultats des recherches sur terrain.

L'étape 2 (présélection) n'est proposée dans la littérature que par Han *et al.* (2018). Or, elle s'est révélée fondamentale dans l'enquête. En effet, 70 % des participants ont défini les processus de sélection d'une grue comme se caractérisant par une présélection rapide suivie d'une analyse

spécifique. Lors de cette étape, des hypothèses sont émises et des combinaisons de variables (scénarios) permettent d'envisager le déroulement des actions. Un **tableur Excel** est également développé afin de faciliter la présélection des machines.

L'étape 4 (examen d'adéquation) qui consiste à vérifier des éléments calculés ne figure pas dans les méthodes proposées par les chercheurs car ces dernières sont automatisées.

L'étape 5 propose une comparaison entre les différents scénarios et options respectives au projet de levage via une **grille d'optimisation**. Cette dernière a comme vocation de guider vers le choix final de la grue la plus adaptée au projet.

L'étape 6 tient compte des impondérables qui peuvent entraîner une modification des données de base. Si les chercheurs n'en font pas état, les impondérables ont été mis en exergue par les visites de chantier et les résultats de l'enquête. Envisager une/des solution(s) de rechange est primordial afin de faire face aux impondérables.

Un autre aspect uniquement évoqué par les chercheurs Furusaka & Gray (1984) et Han *et al.* (2018) mais abondamment mis en évidence par les recherches sur le terrain est celui de la disponibilité des grues. En effet, il est nécessaire de vérifier la disponibilité des machines présélectionnées avant d'aller plus loin dans le processus de sélection.

Enfin, alors que seuls Shapira & Glascock (1996) s'intéressent à l'aspect « culture d'entreprise » du processus de sélection, les recherches sur le terrain mettent en évidence un manque de formalisation du processus de sélection d'une grue mobile, problème que la méthode proposée tente précisément de résoudre.

2. Limites

Ce travail a l'ambition de répondre à une problématique en proposant une méthode mais il connaît toutefois quelques limites.

• Pré-requis

Réalisé dans le cadre d'un travail de fin d'études, la première limite est relative au manque de prérequis de son auteur :

- Aucun cours du cursus n'a abordé le sujet des grues mobiles ;
- Il s'agit d'un domaine dans lequel on se forme principalement par expérience.

Un grand investissement personnel s'est donc révélé indispensable pour acquérir les compétences nécessaires à la compréhension des opérations de levage.

• Subjectivité

Une seconde limite est la forte part de subjectivité présente dans le processus de sélection. « Les personnes sélectionnant le type de grue peuvent se baser non seulement sur des critères objectifs mais aussi sur l'expérience passée et peuvent être influencés par des préférences personnelles et des traditions d'organisations » (Sawhney & Mund, 2002, p. 266).

Le processus de sélection d'une grue dépend fortement de l'expérience professionnelle de chacun : la réalisation d'une enquête auprès des acteurs du terrain est donc apparue nécessaire. De cette enquête est ressorti le fait qu'il n'y a pas d'ordre préférentiel au sein d'une liste de facteurs de sélection, mettant en évidence le nombre important de variables et de permutations possibles. Il faut aussi souligner un manque d'exhaustivité des facteurs de sélection. En outre, il existe des facteurs non contrôlés, comme ceux qui résultent de la stratégie du client (cf. chapitre VI cas d'étude 3).

- **« Rationalité limitée »**

Selon Herbert Simon¹⁰, « l'homme n'est pas un animal qui cherche l'optimisation, mais la satisfaction » (Crozier & Friedberg, 1977, p. 321). Le processus de décision et le choix final ont un caractère approximatif car l'individu « propose et accepte des solutions correspondant à la fourchette de rationalité déterminée par ses propres critères de satisfaction » (Crozier & Friedberg, 1977, p. 336).

Dans la grille d'optimisation, un facteur de correction est laissé à l'appréciation du management. Ce facteur de correction reflète la « rationalité limitée » énoncée par Herbert Simon et représente le fonctionnement de systèmes de décision. Malgré cette volonté de réunir un maximum de ressources pour garantir la rationalité du processus de sélection, des paramètres humains tels que l'expérience personnelle, les affinités possibles entre intervenants etc. orientent la sélection.

- **Unicité**

Au cours d'un entretien réalisé le 16/06/2021, M. Canor expose le propos suivant : « *Vous pouvez trouver quelques lignes directrices mais il est important de garder à l'esprit que chaque levage est différent et doit être évalué soigneusement et indépendamment. L'approche "copier-coller" est généralement une recette pour le désastre* ».

Ce propos met en lumière le fait que chaque projet de levage reste unique. L'étude du cas numéro 3 (chantier éolien à Fauvillers) illustre bien cette difficulté d'appliquer la méthode proposée.

- **Coûts**

Un autre aspect manquant dans ce travail est l'intégration des notions sur les coûts. Malgré la demande d'information à ce sujet auprès des acteurs de terrain, il était difficile d'intégrer une fourchette de prix pour les coûts matériels et immatériels. Le prix est sujet à débats entre les personnes impliquées et dépend de multiples variables. N'ayant pas d'expérience professionnelle à ce sujet, je ne me suis pas aventuré sur ce terrain.

Conscient toutefois que le coût est l'un des facteurs principaux de sélection, j'ai catégorisé les facteurs de la grille de pondération en fonction de leur influence sur le coût direct et indirect. Cela permet d'intégrer le prix à la sélection sans donner de chiffre exact mais plutôt un ordre de grandeur d'influence.

¹⁰ Herbert Simon (1916 - 2001), économiste américain. "Le fil conducteur de sa recherche se trouve dans le problème de la décision et leurs conséquences". (<https://www.cairn.info/revue-regards-croises-sur-l-economie-2018-1-page-54.htm>)

3. Perspectives

Le but de ce document est double :

- Introduire de jeunes ingénieurs au domaine du levage ;
- Faire en sorte que le logigramme, la check-list, le tableur et la méthode d'optimisation développée soient utilisés dans la pratique.

Il peut être complété par les développements suivants :

- **Evolution des outils**

Il pourrait être envisagé de continuer à faire évoluer le logigramme afin d'enrichir son application. Le logigramme proposé a été testé sur trois cas hors des onze chantiers visités et il pourrait être testé sur d'autres cas d'étude afin de palier à la limite d'unicité des projets de levage énoncée précédemment.

Le tableur conçu pour faciliter la présélection d'une grue mobile sur porteur pourrait être développé pour la présélection des grues sur chenilles.

Afin de rendre la grille d'optimisation plus complète, une recherche d'autres facteurs pouvant avoir un impact sur les projets de levage pourrait être menée. Cette grille pourrait également comporter des estimations sur les coûts.

- **Cours de levage**

En plus des sources utilisées pour la rédaction, il pourrait être envisagé de reprendre ce document pour créer un cours sur le domaine du levage car celui-ci est inhérent à chaque projet de construction.

- **Automatisation**

Dans le monde de l'entreprise, l'automatisation du processus imaginé pourrait être considérée. Une comparaison serait ainsi plus aisée entre les différents scénarios et options de levage.

VIII. Conclusion

Des entretiens et discussions avec des personnes du métier, il ressort que la préparation d'une opération de levage n'est accessible qu'aux personnes ayant suivi une formation dans ce domaine. Une des étapes fondamentales de la préparation d'une telle opération est le choix de la grue la plus adaptée au projet. Ce choix est l'aboutissement d'un processus de sélection complexe étant donné la pluralité des facteurs à contrôler, leur interdépendance ainsi que l'absence de liste exhaustive.

Pour faire face à la complexité du processus de sélection ainsi qu'à son manque de formalisation, ce travail propose une méthode composée de quatre outils permettant d'optimiser le choix d'une grue mobile. Cette méthode est essentiellement conçue comme un outil pour les personnes qui débutent dans le domaine du levage. A cette fin, une vue d'ensemble des différents éléments auxquels il faut prêter attention lors de la sélection d'une grue mobile a été formalisée.

Le logigramme permet une meilleure compréhension et une plus grande lisibilité du processus. Il se veut être un outil aisé à utiliser : le logigramme est accompagné d'un fichier Excel qui en reprend les différents éléments. Ce fichier se présente comme une check-list détaillée pouvant être utilisée par toute personne en charge de l'élaboration d'un levage lors duquel il faut recourir à une grue mobile. Cette check-list enrichit les lignes directrices du logigramme et balise une grande partie des questions que l'on peut se poser lors du choix d'une grue.

La structure du logigramme a ensuite été testée sur des cas d'étude dans le but de vérifier l'efficacité de la méthode développée. Ces cas d'étude ont également permis de mettre en exergue la méthode d'optimisation proposée pour sélectionner le mode opératoire le plus adapté au projet. Cette méthode découle du logigramme car elle se base sur les facteurs abordés au cours des différentes étapes.

La méthode élaborée permet également de faire gagner du temps à ses utilisateurs, notamment grâce au tableur développé dans le fichier Excel, qui facilite la présélection de la gamme de grue mobile requise pour le projet.

Cette recherche m'a vraiment intéressé car, combinant l'aspect théorique à l'aspect pratique, elle porte sur une opération indispensable de chaque chantier. Les démarches entreprises ont été enrichissantes. J'ai été accueilli et bien accompagné sur les différents chantiers visités. J'y ai rencontré différents corps de métier qui m'ont partagé leur expérience en matière de levage. Les avis et conseils des ingénieurs, des chefs de chantier ainsi que des grutiers m'ont permis d'élargir mes connaissances dans le domaine du levage.

Enfin, ce travail n'aura pleinement atteint ses objectifs que s'il parvient à donner l'envie à d'autres d'utiliser ces outils et de les adapter à leurs besoins.

IX. Bibliographie

1. Livres et articles scientifiques

- Al-Hussein, M. (1999). *An integrated information system for crane selection and utilization*. Thèse de doctorat, Montreal, Concordia University, inédit, 170 p.
- Al-Hussein, M., Alkass, S., Moselhi, O. (2001). An algorithm for mobile crane selection and location on construction sites. *Construction Innovation*, 01, 91–105.
- Al-Hussein, M., Alkass, S., Moselhi, O. (2005). Optimization algorithm for selection and on site location of mobile cranes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(5), 579-590.
- Anderson, J.-K. (2016). *Rigging engineering basics*. Woodland : ITI Bookstore, 466 p.
- Anderson, J.-K. (2018). *Rigging engineering calculations*. Woodland : ITI Bookstore, 219 p.
- Artarit, F.-X. (2018). Grues mobiles, manuel de sécurité. *Inrs, Institut National de Recherche et de Sécurité*, 6107, 1-95.
- Artarit, F.-X. (2020). Accessoires de levage, mémento de l'élingueur. *Inrs, Institut National de Recherche et de Sécurité*, 6178, 1-70.
- Auclair, B., Porporato, A., Rousseau, T., Hedelin, D., Moutel, P., Bibollet, B. (2018). Guide de bonnes pratiques, utilisation des grues mobiles. *UFL, Union Française du Levage, du montage, de la manutention et de l'élévation de personnes*, 1-45.
- Augoyard J.-P., Lecoq A. (1992). Grues de chantier. *Techniques de l'ingénieur*, 120, 1-27.
- Berger, R. (2016). *L'encyclopédie des engins de chantier*. Clermont-Ferrand : De Borée, 336 p.
- Bodart, E. (1963). *Appareils de levage*. Notes de cours, Liège, Université de Liège, inédit, 125 p.
- Crozier, M., Friedberg, E. (1977). *L'acteur et le système: les contraintes de l'action collective*. Paris : Seuil, 436 p.
- Didier, D., Girard, N., Le Brazidec, M., Nataf, P., Pralat, R., Thiesset, J. (2009). *Précis de chantier. Matériel et matériaux, mise en œuvre, normalisation*. Paris : Nathan, 245 p.
- D'Othée, J. (1972). *Synchronisation de deux grues pour travail sur charge unique*. Mémoire de licence en sciences de l'ingénieur, Liège, Université de Liège, inédit, 145 p.
- Ernst, H. (1955). *Les appareils de levage, tome I, principes et éléments de construction*. Paris : Gauthier-Villars, 307 p.
- Ernst, H. (1958). *Les appareils de levage, tome II, appareils courants*. Paris : Gauthier-Villars, 302p.
- Ernst, H. (1961). *Les appareils de levage, tome III, appareils spéciaux*. Paris : Gauthier-Villars, 340p.
- Furusaka, S., Gray, C. (1984). A model for the selection of the optimum crane for construction sites.

Construction Management and Economics, 2, 157-176.

Guitoni, A., Martel, J.-M. (1997). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501-521.

Han, S., Hasan, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., Kosa, J. (2018). An integrated decision support model for selecting the most feasible crane at heavy construction sites. *Automation in Construction*, 87, 188-200.

Hanna, A. S., Lotfallah, W.B. (1999). A fuzzy logic approach to the selection of cranes. *Automation in Construction*, 8, 597-608.

Hermann, U.H., Hasan, S., Al-Hussein, M., Bouferguene, A. (2011). Innovative system for off-the-ground rotation of long objects using mobile cranes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(7), 478-485.

Laing, J., Halcrow, W., (2003). *Crane stability on site, an introductory guide*. 2nd edition. London : CIRIA, 117p.

Lee, D., Park, J.Y., Ho, J., Kim, S. (2014). Automatic design algorithms for securing the ground contact stability of mobile cranes. *Visualization in Engineering*, 2(7), 1-13.

Lei, Z., Taghaddos, H., Hermann, U., Al-Hussein, M. (2013). A methodology for mobile crane lift path checking in heavy industrial projects. *Automation in Construction*, 31, 41-53.

Lei, Z., Taghaddos, H., Olearczyk, J., Al-Hussein, M., Hermann, U. (2013). Automated method for checking crane paths for heavy lifts in industrial projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139 (10), 1-9.

Lei, Z., Han, S., Bouferguène, A., Taghaddos, H., Hermann, U., Al-Hussein, M. (2014). Algorithm for mobile crane walking path planning in congested industrial plants. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(2), 1-9.

Liu, X., Chan, D.H., Gerbrandt, B. (2008). Bearing capacity of soils for crawler cranes. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1282-1302.

Lugen, M. (2015). *Petit guide de méthodologie de l'enquête*. Université Libre de Bruxelles, inédit.

Pelletier, C. (1999). Grues mobiles de chargement. *Techniques de l'ingénieur*, 7030, 1-16.

Rousselet, L. (1913). *Mécanique, électricité et construction appliquées aux appareils de levage, tome II, les ponts-roulants à treillis et les grues portiques actuels*. Paris : Dunod, 375 p.

Rousselet, L. (1932). *Mécanique, électricité et construction appliquées aux appareils de levage, Tome III, les grues terrestres et flottantes, leur stabilité par leur poids propre*. Paris : Dunod, 590 p.

Sacré, L. (2019). *Installation de chantier et grues. Livre théorique*. Liège : Edipro, 188 p.

Sacré, L. (2019). *Installation de chantier et grues. Livre pratique*. Liège : Edipro, 229 p.

- Safouhi, H., Mouattamid, M., Hermann, U., Hendi, A. (2011). An algorithm for the calculation of feasible mobile crane position areas. *Automation in Construction*, 20(4), 360–367.
- Sawhney, A., Mund, A. (2001). IntelliCranes: an integrated crane type and model selection system. *Construction Management and Economics*, 19(2), 227-237.
- Sawhney, A., Mund, A. (2002). Adaptive probabilistic neural network-based crane type selection system. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(3), 265-273.
- Shapira, A., Glascock, J.D. (1996). Culture of using mobile cranes for building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 298-307.
- Shapira, A., Schexnayder, C.J. (1999). Selection of mobile cranes for building construction projects. *Construction Management and Economics*, 17(4), 519-527.
- Shapiro, L.K., Shapiro J.P. (2011). *Cranes and derricks*. Fourth edition. New York: Mc Graw Hill, 654 p.
- Tran, L. (2018). Herbert Simon et la rationalité limitée. *Regards croisés sur l'économie*, 22, 54-57.
- Vuillerme, B., Richaud, H. (2002). *Chantiers de bâtiment. Préparation et suivi*. Paris: Nathan, 191 p.
- Warszawski, A. (1990). Expert systems for crane selection. *Construction Management and Economics*, 8, 179-190.
- Wu, D., Lin, Y., Wang, X., Wang, Xi., Gao, S. (2011). Algorithm of crane selection for heavy lifts. *Journal of computing in civil engineering*, 25(1), 57-65.

2. Webographie

20 minutes. (2015). *Video. Pays-Bas : La spectaculaire chute de deux grues sur des maisons*. En ligne <https://www.20minutes.fr/monde/1662147-20150804-video-pays-bas-spectaculaire-chute-deux-grues-maisons>, consulté le 18/07/2021.

Administration communale de Fauvillers. (2021). *5 éoliennes à Fauvillers : dernière ligne droite, mise en service en avril !* En ligne <https://www.fauvillers.be/5-eoliennes-a-fauvillers-derniere-ligne-droite-mise-en-service-en-avril/>, consulté le 23/07/2021.

Administration communale de Fauvillers. (2020). *Construction en cours de 5 éoliennes du parc de Fauvillers, un pas de plus vers la transitions énergétique*. En ligne <https://www.fauvillers.be/construction-en-cours-des-5-eoliennes-du-parc-de-fauvillers-un-pas-de-plus-vers-la-transition-energetique/>, consulté le 23/07/2021.

Aertssen. (n.d.). *Grues*. En ligne <https://www.aertssen.be/fr/>, consulté le 11/12/2020.

Anthony Cranes. (n.d.). *Wij hijsen uw werk naar een hoger niveau*. En ligne <https://anthonycranes.be>, consulté le 11/12/2020.

Arnould Manutention. (n.d.). *Location de grues de levage télescopiques sur pneus*. En ligne <http://www.arnouldmanutention.be/location-grue-de-levage-sur-pneus.html>, consulté le 11/12/2020.

Barge Master. (n.d.). *Motion compensation solutions*. En ligne <https://www.barge-master.com>, consulté le 23/02/2021.

Bernardon, A., Neuwahl, A. (2014). *Les engins de chantier de Léonard de Vinci*. Construire à la Renaissance, 31-50. En ligne <https://books.openedition.org/pufr/8042>, consulté le 3/11/ 2020.

CHU de Liège. (n.d.). *Fermeture du pont de Tilff*. En ligne https://www.chuliege.be/jcms/c2_19361750/en/fermeture-du-pont-de-tilff, consulté le 25/07/2021.

Cstc. (n.d.). *Nouvelles*. En ligne <https://www.cstc.be>, consulté le 28/12/2020.

Demag. (n.d.). *Grues tout-terrain*. En ligne <https://www.demagmobilecranes.com/fr/products/all-terrain-cranes/>, consulté le 21/11/2020.

Eneco. (n.d.). *Février – Construction en cours de 5 éoliennes du parc de Fauvillers*. En ligne <https://wind.eneco.be/fr/home-fr/>, consulté le 25/03/2021.

Eneco. (n.d.). *Parc éolien de Fauvillers*. En ligne <https://wind.eneco.be/fr/windfarm/fauvillers-fr/>, consulté le 30/07/2021.

Engineering Standards and Regulations. (n.d.). *Lifting Equipment*. En ligne https://roymech.org/Refer_Docs/Stand_Reg_Lifting.html, consulté le 17/05/2021.

Equipment handbooks. (2012). *Liebherr LR 13000 on impressive Liebherr crane days*. En ligne <https://www.equipmenthandbooks.com/2012/06/liebherr-lr-13000-on-crane-days/>, consulté le 23/07/2021.

- Groupe Dufour. (n.d.). *Nos solutions*. En ligne <https://dufour-cranes.com/fr/>, consulté le 18/12/2020.
- Groupe Jean Boutique. (n.d.). *Grues sur chenilles*. En ligne <http://www.jean-boutique.com>, consulté le 18/12/2020.
- Grutier.net. (n.d.). *Tout ce qu'il faut savoir sur les grues à tour*. En ligne www.grutiers.net, consulté le 19/01/2021.
- Heavy Lift News. (n.d.). *Company Profiles*. En ligne <https://www.heavyliftnews.com/company-profiles/>, consulté le 23/02/2021.
- Havart. (n.d.). *Une flotte et un service complet*. En ligne <https://www.havart.be>, consulté le 19/12/2020.
- Jungling. (n.d.). *Levage, transport, manutention*. En ligne <http://www.jungling.be>, consulté le 19/12/2020.
- Kamag. (n.d.). *Kamag K24*. En ligne <https://www.kamag.com/fr/produits/kamag-k24.html>, consulté le 20/07/2021.
- Kirow. (n.d.). *Multi tasker*. En ligne <https://www.kirow.de/fr/products/railway-logistics/multi-tasker/>, consulté le 25/07/2021.
- Kobelco. (n.d.). *Cranes: Europe*. En ligne <https://www.kobelcocm-global.com/products/cranes/europe/index.html>, consulté le 24/11/2020.
- La langue française. (n.d.). *Logigramme*. En ligne <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/logigramme>, consulté le 10/12/2020.
- Larousse. (n.d.). *Algorithme*. En ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/algorithme/2238>, consulté le 29/07/2021.
- Larousse. (n.d.). *Scénario*. En ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/scénario/71355>, consulté le 29/07/2021.
- Lehoux, N., Vallée, P., (2004). Analyse multicritère. 1-28. https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance_publique/files/files/documents/performance/controle_gestion/qualite_et_CG/Analyse_multicriteres/1_Multi_criteres2004.pdf, consulté le 21/05/2021.
- LGH. (n.d.). *Équipement de levage*. En ligne <https://www.lgh.eu/fr/categorie-produit/levage/>, consulté le 21/12/2020.
- Liebherr. (n.d.). *Grues mobiles et sur chenilles*. En ligne <https://www.liebherr.com>, consulté le 18/11/2020.
- Liebherr. (2015). *Liebherr présente la nouvelle grue mobile compacte LTC 1050-3.1 sur le salon Intermat 2015*. En ligne <https://www.liebherr.com/fr/bel/actualités/news-communiqués-de-presse/detail/liebherr-présente-la-nouvelle-grue-mobile-compacte-ltc-1050-3.1-sur-le-salon-intermat-2015.html>, Consulté le 21/11/2020.

Liebherr. (n.d.). *LR 1500 - Puissante, intelligente, compacte*. En ligne <https://www.liebherr.com/fr/bel/produits/grues-mobiles-et-sur-chenilles/grues-sur-chenilles/grues-sur-chenilles-lr/lr-1500.html>, consulté le 20/07/2021.

Linkedin. (2021). *Indrukwekkende hijsklus eerste dilatatiebalk Rottemerentunnel*. En ligne https://www.linkedin.com/posts/a16-rotterdam_a16rotterdam-tunnel-heavylifting-activity-6771043387266101248-Tu-g/, consulté le 24/07/2021.

Mammoet. (n.d.). *Heavy lifting*. En ligne <https://www.mammoet.com>, consulté le 19/12/2020.

Manitowoc. (n.d.). *Lattice-boom crawler cranes*. En ligne <https://www.manitowoc.com/manitowoc/lattice-boom-crawler-cranes>, consulté le 19/12/2020.

MB Groupe. (n.d.). *Un groupe solide & 4 pôles de compétences*. En ligne <http://mbgroupe.be>, consulté le 26/03/2020.

Méthodes BPT. *Vous construisez, nous formons*. En ligne <https://methodesbtp.com>, consulté le 05/12/2020.

Michielsens. (n.d.). *Notre flotte*. En ligne <https://www.michielsens.be/fr/>, consulté le 19/12/2020.

PreventFocus. (2016). *Chute de deux grues aux Pays-Bas*. En ligne https://prevent.be/fr/banque_de_connaissance/chute-de-deux-grues-aux-pays-bas, consulté le 18/07/2021.

Sarens. (n.d.). *Nothing too heavy, nothing too high*. En ligne <https://www.sarens.com>, consulté le 04/12/2020.

Techno-Science.net. (n.d.). *La théorie des ensembles flous*. En ligne <https://www.techno-science.net/definition/6226.html>, consulté le 15/03/2021.

Terex. (n.d.). *Les grues Terex ont tout ce dont vous avez besoin*. En ligne <https://www.terex.com/cranes/fr>, consulté le 18/11/2020.

Tran, L. (2018). *Herbert Simon et la rationalité limitée*. En ligne <https://www.cairn.info/revue-regards-croises-sur-l-economie-2018-1-page-54.htm>, consulté le 17/04/2021.

Trucks and cranes. (n.d.). *Hijzen van een jacht door hebo*. En ligne <http://www.trucks-cranes.nl/nederlands/hijskranen/hijsklussen/hebonassima.html>, consulté le 20/07/2021.

UFL. (n.d.). *Levage*. En ligne <http://www.uflevage.fr>, consulté le 04/12/2021.

Van Der Spek. (n.d.). *Machines en materieel voor bouwnijverheid, wegenbouw, recyclage en openbare werken*. En ligne <https://www.vanderspek.be>, consulté le 19/03/2021.

Vertikal. (2019). *Liebherr uprates LTM 1750-9.1*. En ligne <https://vertikal.net/en/news/story/34158/liebherr-uprates-ltm-1750-91>, consulté le 14/04/2021.

3. Check-lists & Normes

Besix. Generic lift plan South Hook LNG Terminal. 1-3.

Besix. Toolbox talk – lifting operations South Hook LNG Terminal. 1-7.

British Standard. Examples of checklists for pre-use checking and in-service inspections of mobile cranes. BS 7121-2-3:2012. 23-24.

British Standard. Examples of checklists for pre-use checking and in-service inspections of mobile cranes. BS 7121-2:2003. 53-61.

British Standard. Code of practice for safe use of cranes (mobile cranes, tower cranes and derrick cranes). CP 3010:19712. 1-67.

British Standard. Code of practice for safe use of cranes. Part 3: Mobile cranes. BS 7121-3:2000. 1-33.

ENAS Technical Requirement for lifting Equipment Inspection Bodies ID. N°. ETR 06

Groupe Dufour. (2020). Mode opératoire Montage/Démontage LTM1750. 1-64.

HSE, Health and Safety Executive. (1997). Avoidance of danger from overhead electric power lines. Guidance note GS 6 (third edition). 1-8.

HSE, Health and Safety Executive. (2000). Lifting operations. An explanation of LOLER (Lifting Operations and Lifting Equipment Regulations). 1-26.

J. Boutique sa/nv. Check-list de mise en place d'une grue mobile. 1-4.

Liebherr. (2016). Aperçu de la technique des grues mobiles. 1-40.

Liebherr. (2021). Whatever way the wind blows, cranes for wind power, mobile and crawler cranes. 1-40.

Qatar Petroleum Corporate lifting equipment regulation DOC.N°. QP-REG-Q-001. 11-14.

Sarens. General Crane Lifting - Slewing. Method Statement MS-001. 1-8.

Total Petrochemicals Feluy (2016). Procédure de levage site pétrolier Grand SEVESO. 1-19.