

Chèvre, grue, derrick, ... : petite histoire des engins de levage

Elève de l'ENS Paris-Saclay, Edgar Pierre Burkhardt, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

De tout temps la volonté de construire des bâtiments les plus hauts possibles en utilisant des matériaux lourds a poussé les bâtisseurs à inventer différents moyens de soulever de lourdes charges aux hauteurs souhaitées.

On peut distinguer trois périodes dans l'évolution de la hauteur des plus hauts bâtiments construits. De l'Antiquité à la révolution industrielle, la hauteur des bâtiments a très peu évolué, avec une hauteur limite de 150 m qui semble infranchissable avant le XIXe siècle. Après la révolution industrielle, on observe le franchissement d'un palier avec l'amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux de construction, puis une augmentation exponentielle des hauteurs de construction jusqu'à aujourd'hui.

Quels instruments ont été utilisés pour permettre de soulever des charges ? Quelles évolutions ont permis une telle amélioration des hauteurs de constructions ?

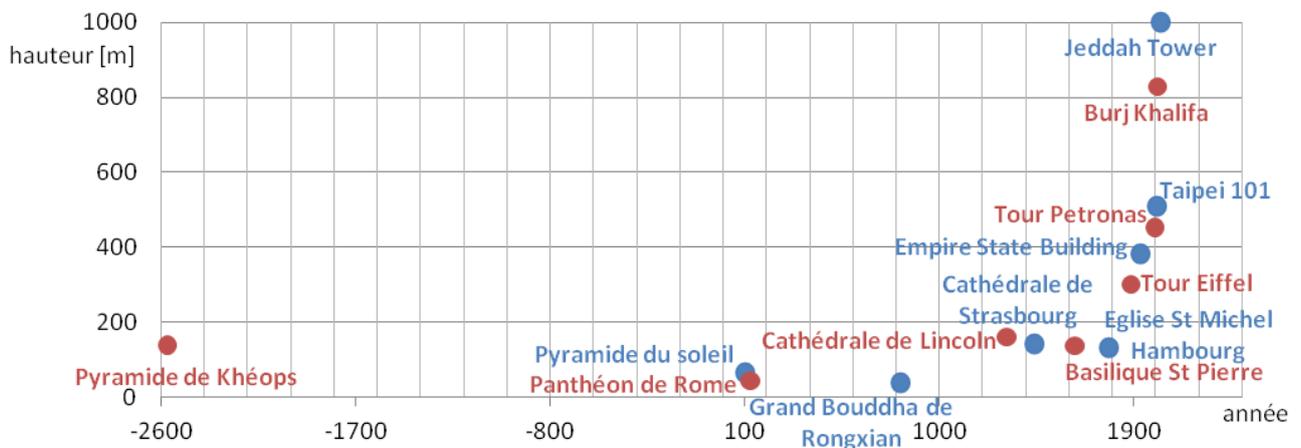


Figure 1 : Chronologie de quelques hauteurs de bâtiments

Cette ressource parcourt l'évolution des engins de levage utilisés dans la construction depuis l'antiquité à nos jours, les avancées de la révolution industrielle et l'impact sur les hauteurs de construction sont exposées, les ordres de grandeurs en puissance, hauteur et masse de levage sont indiqués.

1 – De l'antiquité à la révolution industrielle

Durant cette longue période, la construction des bâtiments fait appel à des engins connaissant peu de changements. Les mêmes principes physiques sont utilisés pour soulever les charges au sol quelle que soit la localisation de la construction.

Le bois est le principal matériau utilisé dans les chantiers de construction, simple à trouver et à utiliser, il s'est imposé jusqu'au XVIIIe siècle. Composées de poutres, les structures en bois des engins de levage sont démontables simplement et ont un faible coût. On retrouve également des cordages réalisés à l'aide de fibres végétales (roseau, palmier, lin, laine, chanvre, ...) mais aussi de cuir. Les matériaux ferreux sont durant toute cette période utilisés dans la fabrication de nombreux objets (armes, armures, mais aussi d'ustensiles moins belliqueux pour cuisiner par exemple). Il semble cependant que leur mise en œuvre dans les engins de levage n'apparaisse que dans les liaisons des parties structurelles de bois.



Figure 2 : Cordes originales de la barque solaire de Khéops (vers 2550 av. J.-C.), source [1]

Avant la révolution industrielle du XIXe siècle, les sources d'énergie disponibles sur un chantier sont très limitées. L'utilisation de la force de l'eau ou du vent est souvent rendue impossible par leur éloignement des chantiers ou l'imprévisibilité du phénomène. L'homme et l'animal sont alors la seule énergie disponible pour soulever des charges.

Plusieurs solutions d'instrument de levage ont été mises en œuvre avec des variantes qu'il est impossible de lister entièrement, aussi leur description restera générale.

1.1 - La chèvre

Comme montré sur la figure 3, la chèvre est une structure simple et démontable composée de pieds (également appelé hanches), d'une poulie, d'une corde et d'un treuil manuel permettant l'enroulement de la corde. La corde devant soulever la charge passe dans la poulie accrochée en haut du système, et s'enroule ensuite sur le tambour du treuil manœuvré par leviers afin de limiter les efforts. L'enroulement peut également se faire par l'intermédiaire d'une moufle ou d'un palan, qui permet de réduire l'effort à fournir pour soulever la charge (figure 3b). Un cliquet anti-retour permet d'éviter que la charge n'inverse le sens de rotation du treuil.

On distingue différentes variantes issues de cette technologie, citons la **chèvre tripode** (ou à trois pieds) composée de deux longues hanches se rejoignant au sommet à un troisième pied (figure 3a), la **chèvre à haubans** composée de deux longues hanches et de haubans placés en arrière de la charge (figure 3b), la **chèvre verticale** composée d'une poutre verticale posée sur un coussinet et maintenue par des haubans, et au sommet d'une poutre horizontale supportant la poulie, ce système permet de faire pivoter la charge.

On note que grâce au système de moufles de la figure 3b, une charge de 180 kg n'exerce sur la corde allant au treuil qu'un effort de 600 N (avec $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$). Une moufle¹ constituée de n poulies permet une démultiplication de l'effort de n , la longueur de câble enroulée est de n fois la course

¹ Moufle est un nom féminin (dictionnaires Académie française, Larousse et Robert) il est cependant couramment utilisé au masculin dans le domaine du génie civil, forme admise par les dictionnaires sus-cités.

de levage. La longueur du levier manipulant le treuil permet ensuite d'exercer un effort manuel encore réduit (150 N). En négligeant les pertes par frottements, soulever cette charge de 3 m nécessite une énergie de 5,4 kJ.

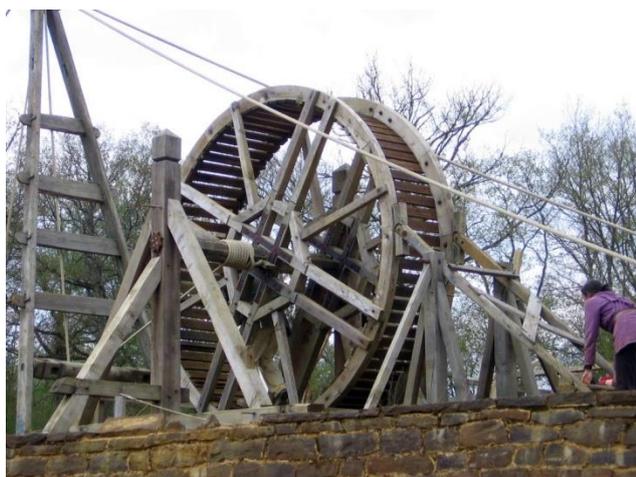


(a) (b)
Figure 3 : Chèvres (a) tripode (b) à haubans avec palan, source [2]

Des chèvres ont été employées depuis la plus haute antiquité, leur structure en bois n'a pas permis d'en garder trace en dehors d'écrits descriptifs des romains et des grecs. On sait par exemple que les chèvres furent utilisées lors de la construction d'aqueducs romains.

1.2 - La grue à tympan

La grue se différencie de la chèvre par la présence du tympan, roue en bois dans laquelle un ou des hommes (ou animaux) marchent permettant ainsi le mouvement du treuil. Le système de levage est similaire à celui d'une chèvre. Elle est également appelée roue de carrier puisque largement utilisée dans le travail de la pierre. On la retrouve décrite dans les places fortes de Vauban² au XVIIe siècle employée pour tirer l'eau des puits-citernes.



(a)



(b)

Figure 4 : Grues médiévales reconstituées (a) sur le chantier médiéval de Guédelon (Bourgogne), (b) devant l'abbaye de Hambye (Normandie), source [3] [4]

Un dispositif de sécurité, comme un cliquet, empêche l'inversion de rotation du tympan dans lesquels marchent hommes ou animaux. Un seul marcheur pouvait sans effort majeur soulever une

² Sébastien Le Prestre, marquis de Vauban (1633-1707), ingénieur et architecte français

charge de 180 kg sur 4 m, pouvait même soulever 500 kg en fonction des rayons du tambour du treuil et du tympan (l'effort à fournir = charge x $\text{rayon}_{\text{tambour}}/\text{rayon}_{\text{tympan}}$, sans tenir compte des frottements). Comme pour la chèvre, la charge soulevée peut être plus importante avec l'utilisation d'une moufle. Le tympan permet donc d'augmenter considérablement les charges levables par rapport à une chèvre, néanmoins le temps nécessaire au levage est plus long.

1.3 - La louve et la tenaille

L'échafaudage se modifie au fur et mesure de l'évolution des engins de levage. Les pierres n'y étant plus stockées, la structure en bois devient une simple plate-forme de travail pour les manœuvres montant les murs. Les échafaudages dits *de pied*, montés depuis le sol s'allègent pour des échafaudages dits *en bascule* qui s'accrochent directement à la façade des bâtiments en construction. Les poutres de soutien de ces échafaudages sont encastrées directement dans la façade par des trous de boulins qui restent visibles une fois le bâtiment achevé.



Figure 5 : Exemples d'échafaudages en bascule sur le chantier médiéval de Guédelon (Bourgogne), source [5]

Les pierres montées gardent elles-aussi la trace de leur transport. Les pierres peuvent être saisies par des pinces qui marquent leurs flancs de petits accros. Ces pinces articulées comme une paire de ciseaux exercent un effort de préhension d'autant plus grand que la charge est lourde. Les pierres peuvent également être équipées de louve, des anneaux dont la base en queue d'aronde était insérée sur la face supérieure de la pierre. Corde, crochet et paniers sont utilisés pour les charges plus fragiles, comme les sculptures.

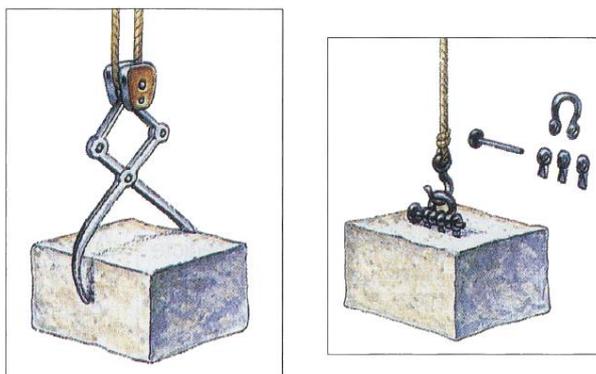


Figure 6 : Pince et louve de levage des pierres, source [6]

2 – Les avancées de la révolution industrielle

Le XIXe siècle voit l'émergence de nouvelles sources d'énergie (charbon et machines à vapeur puis pétrole et électricité) puis le développement de l'aciérie permet de nouvelles méthodes de construction, l'utilisation de nouveaux matériaux. Toutes ces révolutions ont permis une grande évolution des engins de levage.

En effet, l'utilisation de nouveaux moyens de conversion d'énergie permet le déplacement de charges plus importantes. Au début du XIXe siècle la machine à vapeur permet de remplacer le travail humain ou animal pour soulever des charges [7], améliorant ainsi grandement la masse levable, mais aussi la vitesse d'élévation des charges [8]. À partir du milieu du XIXe siècle, les systèmes hydrauliques font leur apparition et permettent d'améliorer encore le maniement des systèmes de levage [8]. L'utilisation des premiers moteurs électriques sur des grues fera son apparition à la fin du XIXe siècle [8].

Les matériaux métalliques prennent le pas sur le bois permettant des réalisations plus grandes et plus résistantes. La fonte [7] remplace alors naturellement le bois dans la réalisation des engins de levage. Ce n'est que plus tard que la fabrication de l'acier sera suffisamment maîtrisée pour réaliser des engins de levage dans ce matériau [8].

2.1 - Le derrick

Les derricks sont les premiers engins de levage à faire usage du moteur à vapeur et des matériaux métalliques dans leur conception. Ils sont généralement constitués d'un mât vertical sur lequel est articulée, près de la base, la flèche. La flèche peut être inclinée ou relevée à l'aide d'un treuil mécanique, alimenté par un moteur à vapeur. La flèche est munie en son extrémité d'une poulie sur laquelle passe le câble de levage, lui même entraîné par un treuil à vapeur [8].

Un derrick pouvait développer une puissance de 5 kW pour lever une charge de 20 tonnes et faisait une hauteur de 20 m.



Figure 7 : Derricks à vapeur, Melbourne, et monté sur un navire, New-York 1920, source [9]

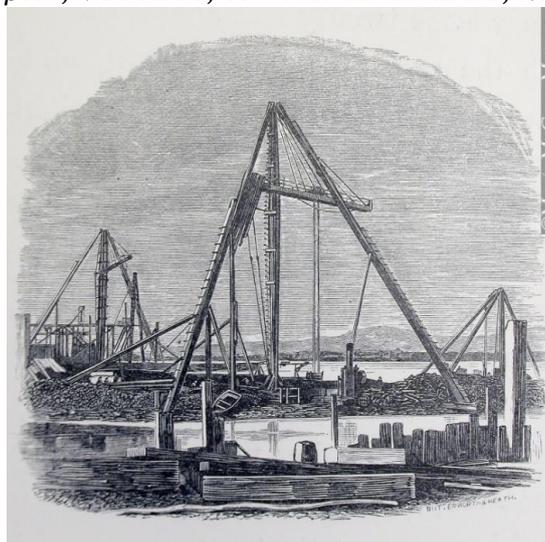


Figure 8 : Derrick à vapeur utilisé pour la construction du pont Victoria, 1860 Montréal, source [10]

2.2 - La grue

La grue désigne à cette époque un engin de levage mobile, sur rail, sur chenilles, sur pneumatiques ou sur portique. Les premières grues vont être actionnées par vapeur (figure 9). L'engin de levage est porté par un châssis tournant lui-même, reposant sur le châssis porteur muni du système de mobilité.

Les premières grues à vapeur pouvaient développer une puissance de 5 kW pour lever une charge de 20 tonnes à hauteur de 10 m.



Figure 9 : Grues à vapeur sur rail, Summerlee Heritage Park et sur chenilles, sources [11] [12]

3 – De nos jours

Le XXe siècle a vu se développer des solutions de levage performantes. Il y a eu peu d'évolution de matériaux si ce n'est le passage de la fonte à l'acier permettant d'obtenir des structures plus légères et plus résistantes.

La principale évolution se trouve sur l'énergie, dont deux sources sont principalement utilisées pour les engins de levage. L'énergie électrique est utilisée dès qu'il est possible de se relier au réseau, alors que lorsqu'une autonomie est nécessaire, c'est le plus souvent l'énergie thermique qui est privilégiée. Ajoutons que l'énergie hydraulique, générées par les deux premières, est utilisée dans les vérins ou les treuils.

3.1- Grue à tour

Comme le montrent les figures 10 et 11, les grues à tour permettent de soulever de lourdes charges à des hauteurs élevées. Elles sont constituées d'un mât (ou tour), sur lequel est fixée la flèche. Les charges sont soulevées par un câble, qui vient s'enrouler sur un treuil, en passant par des poulies dont les dernières se trouvent au niveau du chariot, celui-ci peut se déplacer le long de la flèche. Les grues à tour peuvent être équipées d'un contrepoids dans la contre-flèche qui équilibre le poids de la flèche et de sa charge. La flèche s'oriente par rapport au mât par l'intermédiaire d'un pivot situé juste en dessous de la cabine de pilotage.

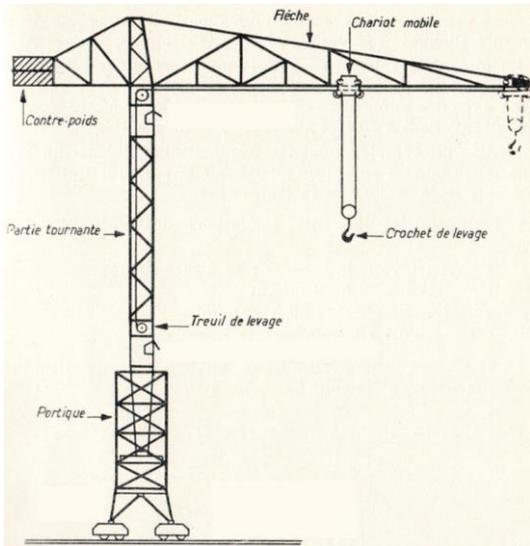


Figure 10 : Schéma d'une grue à tour à fût tournant dans les années 1960, source [8]

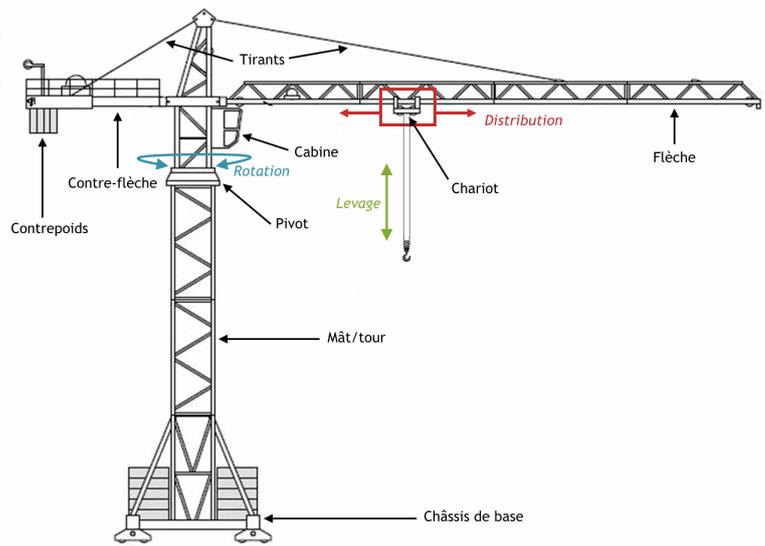


Figure 11 : Schéma d'une grue à tour contemporaine

On peut distinguer deux types de grues à tour : les grues à montage par éléments ou GME (figure 12), qui sont montées sur chantier grâce à une grue mobile par exemple (paragraphe 3.2), et les grues à montage automatisé ou GMA (figures 13 et 14), qui ne nécessitent pas d'autre moyen de levage, et qui sont souvent montées sur porteur [13]. Les GMA sont reconnaissables par l'absence de contre-flèche.



Figure 12 : Grues à montage par éléments (GME) à tirants (droite) et sans tirants (flat top), source chantier ENS Paris-Saclay 2018



Figure 13 : Grue à montage automatisé, source [14]

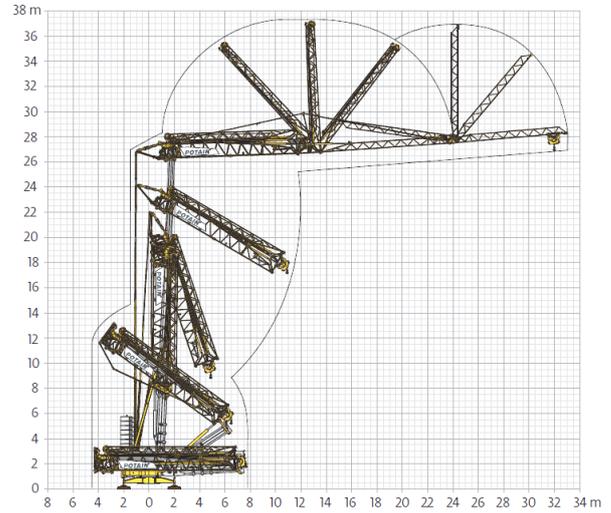


Figure 14 : Cinématique de dépliage de la grue Potain HUP 32-27, source [15]

La rotation se fait en haut du mât pour les GME et en dessous du mât pour les GMA pour lesquelles la totalité du lestage se trouve sur le châssis. Les GME offrent une plus grande capacité de chargement et une portée plus grande.

Les GMA ont une hauteur maximale de 40 m, soulèvent jusqu'à 6 tonnes pour une puissance de 20 kW. Les GME peuvent soulever jusqu'à une hauteur de 100 m (par exemple la MD3200 de chez Manitowoc), des charges de 80 tonnes pour des puissances de 240 kW. À titre de comparaison il faut environ 6 minutes et 30 secondes pour une grue à tour pour lever 80 tonnes à 100 mètres de haut, il faudrait 667 humains pour réaliser la même chose dans le même temps :

$$\text{Temps nécessaire à la grue : } t = \frac{\text{Energie}}{\text{Puissance}} = \frac{M.g.h}{P} = \frac{80.10^3.9,81.100}{200.10^3} = 392,4 \text{ sec ou } 6,54 \text{ min}$$

La puissance musculaire d'un humain est estimée de 200 à 300 W :

$$\text{Nombre d'humains : } n_h = \frac{\text{Puissance grue}}{\text{puissance humain}} = \frac{200.10^3}{300} = 666,67 \text{ soit } 667 \text{ humains}$$

La charge maximale de levage dépend de la position de la charge sur la flèche. Une grue est caractérisée par sa résistance au pied à un moment maximal au-delà duquel la stabilité de la grue est incertaine. La charge maximale indiquée est levée lorsque le chariot est au plus près du mât ; lorsque la charge est levée en bout de flèche, la charge doit être plus faible. Des capteurs permettent de contrôler en permanence que la charge limite n'est pas atteinte.

Notion de moment

Le moment s'exprime en Newton mètre [N.m], il correspond au produit d'une force (ici le poids de la charge) par la distance entre le point concerné (ici le pied de la grue) et le point d'application de la force (ici la position du chariot par rapport au mât). Cette distance, également appelée bras de levier, doit être prise perpendiculaire à la direction de la force. Notons que le contrepoids génère un moment en pied de grue de sens contraire, il contribue ainsi à l'équilibre de la grue.

Plus la charge est éloignée du mât, plus le moment en pied dû à la charge sera important. La charge maximale est levée lorsque le chariot est proche du mât, le bras de levier est petit et ainsi le moment sera moins important.

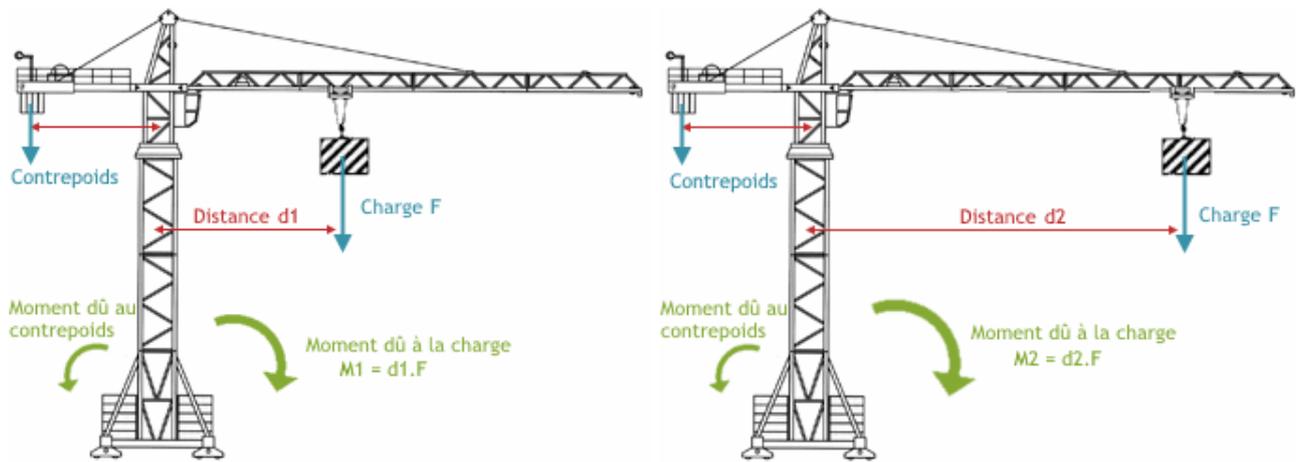


Figure 15 : Schématisation des moments en pied de grue dus à la charge et au contrepoids pour deux positions de la charge ($M_2 = d_2.F > M_1 = d_1.F$)

Avec l'augmentation de la hauteur des grues, les effets du vent augmentent très fortement, ce qui est à l'origine de nombreux renversements de grues à la fin du XXe siècle. Pour éviter ces accidents, la **mise en girouette** d'une grue permet de libérer la rotation autour de l'axe vertical de la grue [16], ce qui permet à la grue de s'orienter dans le sens du vent, à la manière d'une girouette, lorsque le chantier est à l'arrêt ou en cas de risque de vents violents. Ce dispositif permet ainsi de diminuer fortement le moment en pied causé par le vent lorsque la grue n'est pas en fonctionnement puisque la surface au vent diminue alors fortement !

3.2 - Grue mobile

Plus maniables que les grues à tour, les grues mobiles peuvent être mises en place très rapidement sur chantier. Bien que les grues mobiles standards soient limitées par leur portée et la charge maximale qu'elles peuvent soulever, elles sont très utilisées sur chantier du fait de leur polyvalence. Une grue mobile est constituée d'un porteur (à roues, à chenilles) permettant le déplacement de la grue, et d'une flèche relevable et généralement télescopique qui permet le levage [13]. Notons qu'il est important de vérifier le sol sur lequel la grue pose ses stabilisateurs.

Les grues mobiles peuvent être utilisées en remplacement des grues à tour sur des chantiers de petite envergure, et sont en général utilisées lors du montage de GME (figure 16). Il est aussi possible que la configuration du chantier ne permette pas l'installation d'une grue à tour, ce qui force parfois l'utilisation d'une grue mobile.

Une grue mobile classique a une puissance de 120 kW et peut lever des charges jusqu'à 100 tonnes à une hauteur de 30 m.



Figure 16 : Montage d'une GME à l'aide d'une grue mobile, source [17]

3.3 - Levage aéroporté

Sur certains chantiers, des hélicoptères sont utilisés pour permettre la construction dans des zones sensibles ou dans des conditions difficiles, comme dans la province du Zhejiang en 2018 (figure 17) ou plus généralement dans les zones peu accessibles (mise en place des pylônes des télésièges dans les stations de sport d'hiver notamment).



Figure 17 : Construction de pylônes électriques dans la province de Zhejiang (Chine) en octobre 2018, levage de charges de 9 tonnes par hélicoptère, source [18]



Figure 18 : Héliportages pour le montage de grues dans des lieux difficiles d'accès, source [19]

3.4 - Quelques records

Actuellement, la plus imposante grue mobile a une puissance de 270 kW, et peut soulever 1200 tonnes. Il s'agit de la LTM 11200-9.1 de chez Liebherr [20]. Sa flèche télescopique mesure 100 m, sa hauteur de levage maximale est 188 m et sa portée maximale est de 136 m.



Figure 19 : Grue mobile LTM 11200-9.1 Liebherr, source [20]

La plus imposante grue est la SGC-140 de chez Sarrens [21] avec une puissance de 520 kW (deux moteurs de 260 kW). Elle a une capacité de levage de 2820 tonnes sur un rayon de 50 m et propose trois configurations.



Figure 20 : Grue SGC-140 Sarrens, source [21]

4 – Bilan

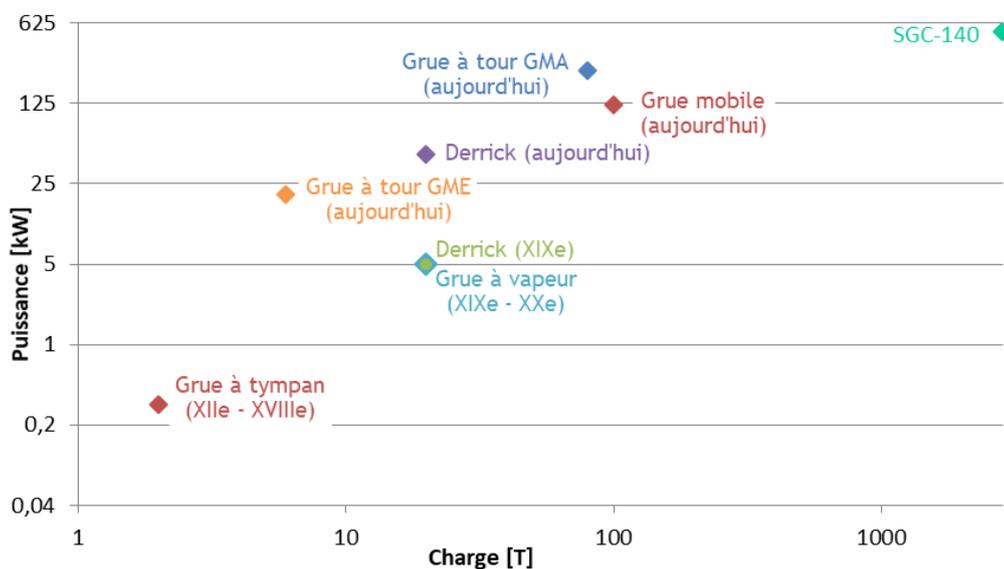


Figure 21 : Évolution des puissances des engins de levage en fonction des charges au cours de 20 siècles (les échelles des puissances et des charges sont logarithmiques)

5 – Et demain ?

Après des siècles de développement, il semblerait que les engins de levages aient atteint des sommets difficiles à dépasser. La course à la hauteur ne demande plus d'augmenter la hauteur des engins de levage, puisque ceux-ci s'accrochent sur la structure en construction. L'évolution se fait désormais sur l'économie de matière et de puissance consommée afin de limiter l'empreinte écologique des moyens de levage (piles du Viaduc de Millau, tours de grande hauteur, etc).

Références :

[1]: Jon Bodsworth – www.egyptarchive.co.uk, Copyrighted free use, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2435158>

[2]: Eric Gaba (Sting - fr:Sting) – Own workBased upon : Dienel, Hans-Liudger & Meighörner, Wolfgang: Der Tretradkran, Publication of the Deutsches Museum (Technikgeschichte Series), 2nd

ed., München 1997, p.12f., CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4190698>

[3]: Stefdn – Travail personnel, CC BY 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3241908>

[4]: Ji-Elle – Travail personnel, Domaine public,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3929041>

[5]: <http://www.benevoleguedelon.com>

[6]: Bestiaire des instruments de levage, Perrine Vennetier, Les cahiers de Science et Vie, Illustrations Michel Sinier

[7]: É. Canouët, La gravité vaincue : grues et engins de levage, https://www.arts-et-metiers.net/sites/arts-et-metiers.net/files/asset/document/carnet_grues.pdf

[8]: P. Galabru, Équipement général des chantiers et terrassements, 1966

[9]: <https://nara.getarchive.net/>

[10]: Musée McCord, <http://collections.musee-mccord.qc.ca/>

[11]: Thomas Nugent, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8378820>

[12]: Leonard Frank Photos, City of Vancouver, <https://searcharchives.vancouver.ca/>

[13]: Grues à tour GME et GMA, Construction et travaux publics, Techniques du bâtiment : préparer la construction, Techniques de l'Ingénieur, décembre 2010

[14]: <https://www.jfm.fr/produit/grue-igo-36/>

[15]: <https://www.manitowoccranes.com/fr-FR/>

[16]: Précis Chantier - Matériel et matériaux, mise en œuvre, normalisation, D. Didier, N. Girard, M. Le Brazidec, P. Nataf, R. Pralat, and J. Thiesset, Éditions Nathan, 1999

[17]: J.- S. Clavel, Chantier de logements sociaux, Béziers février 2010,

<http://photostp.free.fr/phpbb/viewtopic.php?f=39&t=3930&start=20>

[18]: <https://newsfr.cgtn.com/news/3d3d514d665a7a4e794d7a6333566d54/p.html>

[19]: http://www.helicomontage.fr/montage_helicoptere.html

[20]: <https://www.liebherr.com/fr/fra/produits/grues-mobiles-et-sur-chenilles/grues-mobiles/liebherr-grues-mobiles/details/lm1120091.html>

[21]: <https://www.sarens.com/about/news/sarens-sgc-140-launched.htm>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>