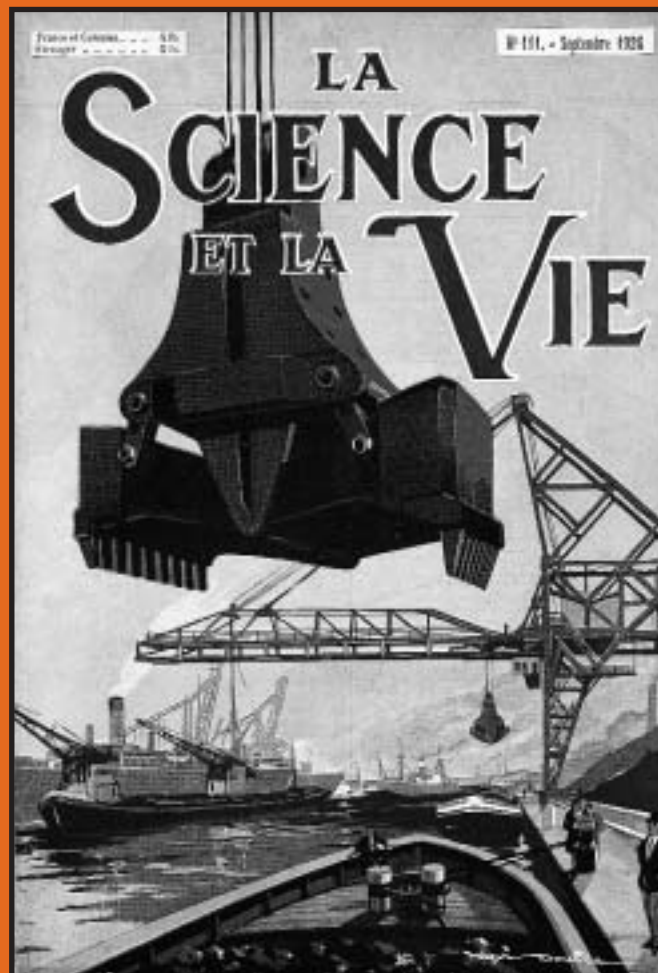


musée des arts et métiers

L E S C A R N E T S

LA GRAVITÉ VAINCUE : GRUES ET ENGIN DE LEVAGE

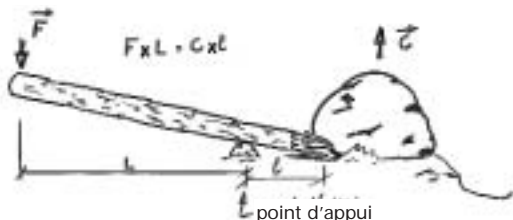


*« Donnez-moi
un point d'appui
et je soulèverai
le Monde »
Archimède
III^e siècle av. J. - C.*

L E S T H È M E S

Grues et engins de levage

Ce n'est qu'au XV^e siècle que le terme de grue apparaît pour désigner un engin de levage. Mais dès l'antiquité, l'homme a eu recours à des techniques de levage mécanisé pour satisfaire son besoin de laisser un témoignage de son passage sur Terre ou pour glorifier les Dieux, puis pour bâtir des infrastructures urbaines. Mais la grue ne sert pas qu'à bâtir, on la retrouve comme engin de destruction lors de sièges, comme engin de renversement des bateaux ennemis ou de déchargement et chargement de navires dans les ports, ou de wagons dans les gares. Elle est fixe, mobile sur roues, sur rails ou sur chenilles, montée sur véhicules motorisés ou non. Certaines permettent le déplacement de petites charges, d'autres de charges colossales.



Levier utilisé pour soulever une lourde charge

■ La préhistoire

Le principe fondamental du levage d'une charge plus lourde que la force qui la meut est celui du levier, utilisé pour les grandes constructions astronomiques ou religieuses, telles que Stonehenge, en Angleterre, ou les pyramides d'Égypte. La seule force motrice utilisée est celle de l'homme ou de l'animal. L'inconvénient majeur est le nombre de personnes nécessaires sur le chantier et le temps de construction de l'édifice. Les spécialistes évaluent le temps d'édification d'une des plus grandes pyramides à une vingtaine d'années en employant plus de 50 000 ouvriers.

■ De l'Antiquité au Moyen Âge

Les constructions de cités, de voies de transport,



Engin de levage romain pour la construction du tombeau des Haterii. Des « servants » grimpent dans la cage, une grande roue de bois ajourée. Ils la font tourner en grimpant tous du même côté. Celle-ci en tournant enroule ou déroule la corde de levage permettant de monter ou descendre la charge à mouvoir.

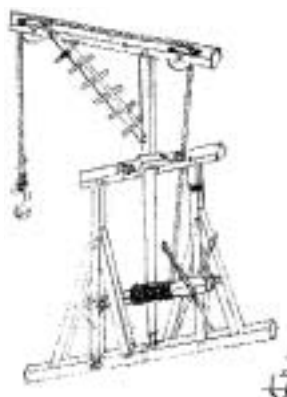
de ports, de ponts et le développement du commerce, avec l'apparition des civilisations grecque et romaine, nécessitent une plus grande rapidité de construction. Il faut dès lors démultiplier la force musculaire des hommes et des animaux à l'aide de systèmes mécaniques. C'est l'apparition des engins de levage en bois. Le matériel alors employé est très proche de celui de la marine : roues à cliquet, treuils, palans et moufles, engrenages à roues dentées... La Grèce antique a créé tous les mécanismes nécessaires à l'invention

de la grue. Tout cela permet la démultiplication de la force motrice qui reste humaine ou animale. L'instrument de levage des Romains était un mât unique, maintenu en position verticale ou incliné par quatre haubans allant en croix de son sommet jusqu'à des ancrages au sol. Des poulies étaient fixées à la base et au sommet du poteau. La technique de la « cage d'écureuil », qui démultiplie la force par le mouvement du poids des « servants » qui y étaient placés, sera utilisée jusqu'après la construction des cathédrales. Ce n'est qu'au début du XIII^e siècle qu'apparaissent les grues portuaires. En 1600, les quais de tous les ports européens ne totalisent que 60 grues.

Grues et engins de levage

■ De la Renaissance au siècle des Lumières

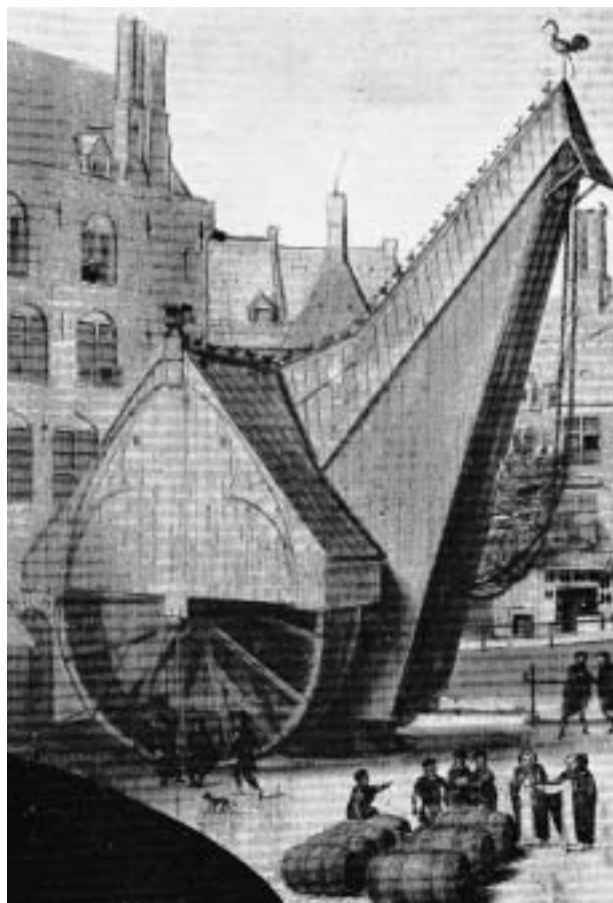
La mode est à la construction de châteaux beaux et décorés de pierres taillées et finement sculptées. Les guerres continuent de faire leurs ravages, mais elles sont plus mobiles, il faut donc construire rapidement des fortifications. Les systèmes de levage doivent être plus précis et légers et demander moins



Grue pivotante pour charges légères. Folio n° 10 recto du carnet de Hans Hammer, XV^e siècle. (découvert en 1986)

de main d'œuvre. Les premiers ingénieurs (les engingneurs, ou concepteurs d'engins) vont s'efforcer de concevoir des systèmes mécaniques

utilisant les découvertes de l'Antiquité qu'ils améliorent. Les documents techniques sur ce matériel de construction sont assez tardifs ; le plus ancien remonte au XV^e siècle, c'est le *Bellifortis* (1405) de Konrad Kyeser, qui décrit des machines de levage et de guerre. Des dessins de grues pivotantes apparaissent dans le *De Machinis libris decem* (vers 1440) de l'ingénieur militaire Mariano Taccola. La plupart de ces inventeurs sont des ingénieurs militaires, leurs engins servent essentiellement à la construction de fortifications. Léonard de Vinci invente une grue rotative conçue pour le curage des fossés de fortifications, ainsi qu'une grue pivotante sur chariot et un portique composé à ses deux extrémités de grues rotatives couvrant chacune une moitié du portique. Brunelleschi construit la cathédrale de Florence Santa Maria del Fiore dans la seconde moitié du XV^e siècle, à l'aide d'une grue d'environ



20 m de haut, s'orientant sur 360 degrés grâce à une tourelle pivotante. La charge et le contrepoids glissaient de manière synchrone en sens inverse le long d'une flèche munie d'une vis sans fin.

Grue du port de Bruges, peinture de Brueghel, XVI^e siècle, musée de Munich

Grues et engins de levage

■ Du siècle des révolutions à nos jours

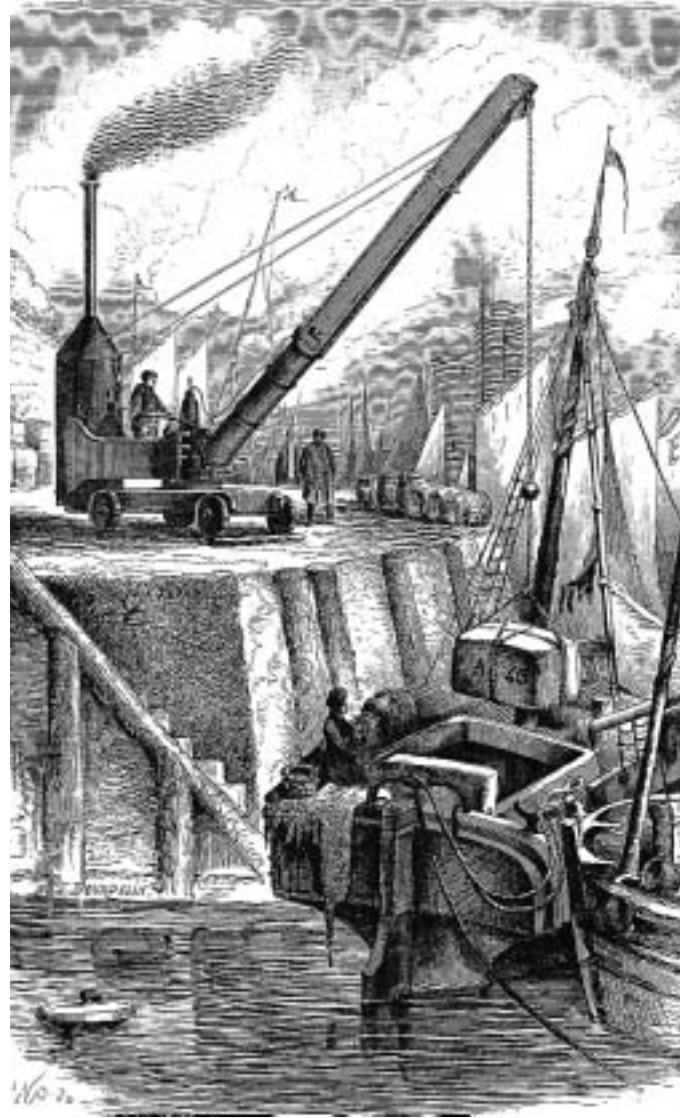
La force motrice et l'utilisation du bois pour la structure des grues, inchangées depuis l'Antiquité, sont remplacées à partir de 1800 en Angleterre par la force de la vapeur, qui actionne les systèmes de levage, et par la fonte. En 1846, la force hydraulique de l'eau sous pression, puis de l'huile, fera son apparition dans le maniement des grues.

Dans le dernier quart du XIX^e siècle, avec l'expansion coloniale, on a besoin de nouveaux ports ; les grues Titan ou grues Goliath se mettent à l'œuvre.

Elles évoluent sur voie ferrée et pèsent à la fin du siècle près de 500 t. Elles permettent d'immerger des blocs de plus de 100 t à plus de 7 m.

En 1880, pour la première fois un moteur électrique actionne une grue. L'installation d'une grue sur un camion, son énergie fournie par un moteur à essence ou diesel sont acquises après 1920. C'est vers le début du XX^e siècle qu'apparaissent les grues à tour auxquelles nous sommes habitués. Elles sont actionnées par des moteurs électriques, d'un bâti métallique avec structure en treillis et d'un chemin de grue. Elles se développeront rapidement après la Seconde Guerre mondiale et participeront à la reconstruction d'une Europe en ruines.

Les flèches télescopiques, actionnées par vérins hydrauliques, apparaissent vers 1960. L'électronique est peu à peu intégrée dans les commandes du grutier. Les performances de ces engins de levage sont assez impressionnantes : pour les grues statiques, les charges soulevées dépassent les 1 000 tonnes, les grues flottantes soulèvent plus de 5 000 tonnes. L'évolution des grues ne s'envisage pas dans leur forme mais plus dans leur pilotage guidé probablement par ordinateur dans le début de ce troisième millénaire, avec peut-être l'aide de satellites de géodésie et de topographie.



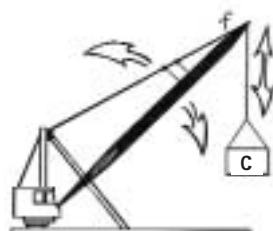
Grue locomobile à vapeur. Dessin de Bourdelin

Grues et engins de levage

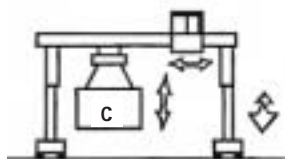
Il est possible de classer les grues en trois grandes familles: les grues fixes, les grues mobiles et les ponts portiques. Ces derniers sont installés de manière définitive dans l'enceinte d'usine ou aux abords de ports ou de zones de chargement-déchargement. Les grues se composent d'un châssis, d'une flèche et d'un treuil. Le châssis se divise en deux parties, une partie fixe et une partie tournante. Trois moteurs sont disposés sur le châssis, pour actionner les treuils de levage de la charge, de levage de la flèche



Grue mobile



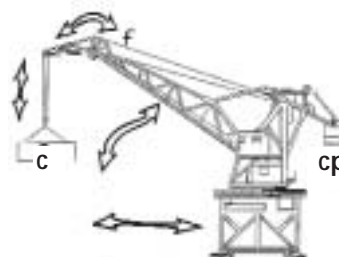
Derrick



Pont portique

et d'orientation de cette dernière. Les treuils sont constitués d'un ou deux tambours, filetés pour faciliter l'enroulement des câbles. L'énergie électrique est utilisée dans les grues portuaires et de chantier, tandis que les énergies mécanique et hydraulique sont omniprésentes dans les grues mobiles. La flèche (f) est placée à l'avant du sommet de la partie tournante du châssis. Le contrepoids (cp), comme son nom l'indique, est à l'autre extrémité. La charge définie pour le contrepoids est déterminée en fonction

des besoins de levage. Pour les grues mobiles, le châssis fixe est dit « en translation ». Pour les châssis sur rails, leur translation se fait grâce à l'énergie électrique. Les châssis à translation sur chenilles sont mus par des moteurs hydrauliques, tandis que les châssis automoteurs ou sur pneumatiques le sont par moteurs thermiques. Tous les châssis mobiles nécessitent l'emploi d'un calage matérialisé par quatre pieds à vérins hydrauliques (v) permettant d'augmenter considérablement la surface d'appui au sol, en supprimant les effets de souplesse dus aux roues. La longueur de la flèche croît avec la puissance de levage de la grue. Une grue soulevant 100 t



Grue portuaire



Semi-moufle

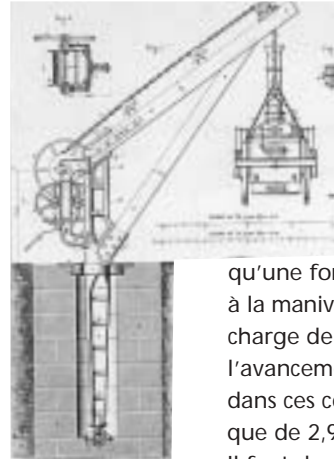
aura une flèche de 80 à 100 m. La flèche en treillis est composée de deux parties: le pied de flèche posé sur le châssis et la tête de flèche par laquelle passent les câbles de levage. La flèche télescopique est constituée d'éléments emboîtés qui se déplient à l'aide de vérins hydrauliques. Cela permet, en charge, un allongement ou un raccourcissement de la flèche. Des poulies sont disposées tout le long du chemin de câbles et un moufle constitué de poulies et terminé par un crochet autorise l'accrochage des charges (c).

Grues et engins de levage

■ La grue de Cavé :

Avec le développement des voies ferrées, les mécaniciens doivent régulièrement contrôler l'état des locomotives, de leurs chaudières et du mécanisme situé sous la locomotive ; il faut donc la soulever pour pouvoir effectuer l'entretien. En 1841, l'ingénieur britannique Clarke, chargé des travaux de construction et de réparation des machines locomotives en Angleterre, commande au mécanicien Cavé la construction d'une grue pouvant soulever une charge de plus de 20 t. Les autres contraintes du cahier des charges sont que la grue ne doit pas posséder de contrepoids et que son bras doit être en bois. Cavé, à partir des plans de Clarke et après de nombreuses améliorations, construit cette grue dans les ateliers de la compagnie de chemin de fer Paris-Orléans.

Sa particularité réside dans son arbre logé dans une fosse cylindrique de 4 m de profondeur, ménagée au centre d'une maçonnerie de pierre. La rotation de la grue est assurée par une pointe en acier encastrée sur son arbre et pivotant sur un grain d'acier trempé fixé au fond de la fosse. Six galets en fonte permettent une rotation de l'arbre ainsi que son maintien en position verticale malgré la charge soulevée. Un trou d'homme est prévu pour l'entretien de la partie enterrée. Au sommet de l'arbre sont disposées deux parties inclinées prévues pour recevoir le bras de la grue. Le bras se compose de deux pièces de charpente en bois de chêne, dont la plus importante a une section d'environ 16 dm², ce qui autorise un levage à plus de 4 m de l'axe de l'arbre. Une poulie à gorge est placée à l'extrémité libre du bras et laisse passer une chaîne au bout de laquelle est fixé un anneau prêt à recevoir les crochets présents au bout des chaînes qui enserrant la locomotive sous sa chaudière et les axes de ses roues. L'autre extrémité de la chaîne est fixée sur un treuil creux en fonte de 57 cm de diamètre. Un tour de treuil permet une élévation de la locomotive de 1,791 m.



Plan de la grue de Cavé, 1841.

Un train d'engrenages et de pignons de 105, 18, 92 et 11 dents démultiplie le mouvement de la manivelle actionnant le treuil dans un rapport de 652. Ce qui signifie

qu'une force de 30 kg appliquée à la manivelle suffit pour mouvoir une charge de 20 t, l'inconvénient reste l'avancement de la chaîne qui, dans ces conditions, ne se meut que de 2,9 mm par tour de manivelle. Il faut donc 600 tours de manivelle pour lever la locomotive à 1,79 m.

La solution retenue par Cavé aura été de réduire le rapport à 78, la force nécessite l'intervention de deux hommes, mais la locomotive se soulèvera de 1 m après 40 tours de manivelle. Cette opération demande moins de 5 minutes. Par sécurité un frein est ajouté au mécanisme pour prévenir tout accident.

Menuisier picard, François Cavé vient à Paris pour travailler et étudier le calcul, le dessin et la mécanique. Contremaître chez un fabricant de cachemire, il transforme tout l'outillage et invente à cette occasion la « machine oscillante » dont il multipliera les applications. Il crée son entreprise qui emploiera jusqu'à 900 ouvriers dans les chantiers de Saint Denis et de Clichy. Y seront construits des machines-outils, machines à vapeur, locomotives, navires, laminoirs, etc. Il cherche aussi à comprendre les phénomènes de torsion et la force des hélices.

Grues et engins de levage

Quelques modèles de grues et machines élévatoires choisis dans la collection du Musée des arts et métiers

Grue de Brulé,
inv. 1179
Grue de Cavé,
inv. 2703
Grue double,
inv. 4038
Grue rouleuse,
inv. 6951
Grue roulante à pivot,
inv. 8600
Machine à élever
les fardeaux,
inv. 1118
Machine à élever
les matériaux,
inv. 7737



Grue double, inv. 4038

Maquette de grue
à vapeur,
inv. 7811
Modèle de l'appareil
de Lebas utilisé pour
la mise en place
de l'obélisque,
inv. 17 848-1

POUR EN SAVOIR PLUS

Encyclopédie Internationale des Sciences et des Techniques , Paris, Les Presses de la Cité, volume X, 1972
R. J. Stephen, F. Carlier, Les grues , Paris, Gamma-École active, Bibliothèque en images, 1987
L'Encyclopédie médiévale , d'après Viollet le Duc. Réimpression Inter-Livres, tome I, Architecture, 1995.
Philippe Laurier, Les Machines de construction de l'Antiquité à nos jours, une histoire de l'innovation , Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1996.
Les bâtisseurs du Moyen-Age , Dossier d'Archéologia n° 219, décembre 1996/janvier 1997

Les collections du Musée des arts et métiers sont aussi consultables sur Internet.
Adresse électronique :
<http://www.cnam.fr/museum/>



Grue à vapeur, inv.7811

- Rédaction: Éric Cancouët
- Schémas: Éric Cancouët
- Coordination: Élisabeth Drye
- Conception graphique: Agnès Pichois
Atelier Michel Bouvet.
- Photos: Musée des arts et métiers/S. Pelly
Musée des arts et métiers
L. Karleskind
Bibliothèque centrale du CNAM
Kharbine-Tapabor
- Musée des arts et métiers,
Service éducatif
Conservatoire national des arts et métiers
292, rue Saint-Martin - 75003 Paris

ISBN : 2-908207-64-8



Machine à élever les fardeaux,
inv.1118

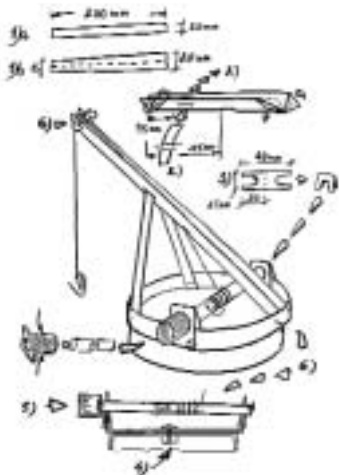
Grues et engins de levage

■ La grue portuaire du XVI^e siècle

Construisez une grue portuaire du type de la peinture du Port de Bruges de Brueghel.

Vous devez disposer du matériel suivant :

une boîte de camembert (ou toute autre boîte de fromage ronde en carton ou en bois), un pot de petit suisse, un morceau de rondin de bois (diamètre 7 ou 8 mm et 12 cm de longueur minimum), environ 40 cm de fil, trois punaises, une brique de lait usagée et nettoyée et deux trombones.



1. Coupez dans la brique de lait :

- une bandelette rectangulaire de 200 x 20 mm
- une bandelette trapézoïdale de 200 mm de long et de 15 mm puis 20 mm aux extrémités. Pliez la bandelette trapézoïdale par le milieu dans le sens de la longueur. Entaillez-la de part en part, sur les côtés, d'une fente de 20 mm minimum (de 95 à 115 mm de l'extrémité la plus petite). Coupez, sur le pli, aux ciseaux une petite ouverture à 130 mm de la même extrémité. Rabattez vers l'extérieur les deux angles de l'extrémité la plus large à 90°.

2. Passez la bandelette rectangulaire, de manière équilibrée, dans la fente de la bandelette trapézoïdale que vous percerez d'un « trombone-poulie » à son extrémité libre.

3. Construisez deux chapes dans le carton de lait. Agrafez-les en vis-à-vis à cheval sur le bord du couvercle

4. Repérez le centre sur le fond et sur le couvercle de la boîte. Placez les deux parties plates du fond et du couvercle l'une sur l'autre, puis maintenez-les à l'aide d'une punaise. Veillez à protéger la pointe de la punaise par une pièce de liège, de carton ou de bois.

5. Passez le rondin dans les chapes. Fixez, sur une extrémité du rondin, le fond du pot de petit suisse préalablement réduit dans sa hauteur, à l'aide de deux punaises ou d'une vis. Fixez sur l'autre extrémité une punaise pour empêcher la translation.

6. Placez ensuite le trépied obtenu avec les bandelettes de carton dans le couvercle, perpendiculairement à l'axe du rondin. Fixez-les par des agrafes aux bords du couvercle. Passez ensuite le fil dans l'entaille de la flèche en carton. Glissez-le jusqu'à son extrémité, en le passant dans le « trombone-poulie », fixez au bout du fil un trombone qui servira de crochet. L'autre bout sera maintenu par du ruban adhésif sur le rondin.

La grue est prête, vous pouvez l'actionner.

Vous pouvez améliorer cette grue en remplaçant les bandelettes de carton par des bandelettes de bois extraites d'autres boîtes de camembert. Rajoutez une poulie en tête de flèche à la place du « trombone-poulie ». Inspirez-vous de la peinture de Brueghel et habillez votre grue de lattes de bois, elle sera plus vraie que nature.