

Transport hippomobile du Mont Saint-Michel

Organisation des essais

Alexandre Rousselet

10/02/2010



Document explicatif des calculs de dimensionnement pour le véhicule hippomobile du Mont Saint-Michel.

Sommaire

Introduction	3
Liste des personnes entrant dans l'organisation de l'essai	4
Rappel de la démarche calculatoire de pré-dimensionnement	5
Résumé de nos recherches au centre de documentation de la RATP	7
Les véhicules	7
Les chevaux.....	7
Le travail	8
Etude menée par la CGO	8
Conclusion.....	8
Outils à disposition	10
Préparation de l'essai	11
Déroulement de l'essai.....	12
Charge de départ	13
Profil de vitesse.....	14
Validation d'un essai.....	15
Utilisation des résultats de l'essai.....	16
Planning	17
Cout prévisionnel.....	17
Annexe : photographies du dynamomètre.....	18



10 février 2010

Introduction

Les essais de traction pour le dimensionnement du système de transport du Mont Saint-Michel sont menés afin de déterminer l'effort de traction admissible par deux chevaux de trait pendant un cycle de trois heures.

Afin de coller au plus près de la future situation de fonctionnement sur le site d'exploitation, nous utiliserons des paires de chevaux issues de l'exploitation de Monsieur Coulon, futur fournisseur pour le Mont Saint-Michel.

Par ailleurs, afin de coller au mieux au futur profil de la voie parcourue, nous choisirons un parcours de test possédant peu de déclivités.

Pour finir, lors des essais nous aurons recours à une calèche sur roue que nous lesterons de manière progressive à chaque début d'essai suivant le résultat de l'essai précédent.

DRAFT



10 février 2010

Liste des personnes entrant dans l'organisation de l'essai

Nom	Prénom	Rôle dans les essais	Numéro de téléphone	de	Adresse email
Mars	Guillaume	Responsable projet	06.29.36		@veolia.com
Jourdain	Hervé	Responsable dynamométrie	06.98.56		@hotmail.com
Hervé	Alain	Conseiller Veolia Transport	06.11.22		@veolia-transport.fr
Coulon	Norbert	Mise à disposition des chevaux et du matériel roulant	06.75.40		
Ristorcelli	Jean-Baptiste	Consultant R&D			@laposte.net
Rousselet	Alexandre	Consultant R&D	06.28.53		@gmail.com

DRAFT



Rappel de la démarche calculatoire de pré-dimensionnement

Dans les précédentes documentations relatives au *Transports hippomobile du Mont Saint-Michel* il a été établi que le système de transport serait tracté par deux chevaux de trait.

Pour rappel, la formule utilisée est la suivante :

$$F_{traction} = kM + \frac{Mg}{10} + 1000 \times M\gamma + \frac{1}{2} \rho_{air} S C_x V_r^2 \quad (i)$$

Afin de dimensionner correctement notre système, nous effectuerons notre calcul dans le cas le plus contraignant par rapport à la future mission des chevaux, nous prenons alors :

- Le coefficient de frottement dû au roulement pneumatique $k = 150 \text{ N/t}$ (omnibus 200 daN/t)
- La masse embarquée $M = 6 \text{ tonnes}$ 15 daN/t
- La gravité $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- La pente $i = 2 \text{ cm/m}$
- L'accélération maximale $\gamma = 1 \text{ m/s}^2$
- La densité volumique de l'air $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$
- La surface mouillée du véhicule $S = 8 \text{ m}^2$
- Le coefficient de traînée $C_x = 0.7$
- La vitesse relative V_r égale à l'addition de la vitesse du vent et celle du véhicule
- La vitesse maximale du véhicule $V = 14 \text{ km/h}$
- La vitesse du vent $V_{vent} = 50 \text{ km/h}$

L'ensemble de ces données donne alors un effort de traction $F_{traction}$ égale à :

- Pour une phase d'accélération en rampe de 2 % :

$$F_{traction} = 150 \times 6 + \frac{6 \times 9.81 \times 2}{10} + 6 \times 1 \times 1000 + \frac{1}{2} \times 1.225 \times 8 \times 0.7 \times \left(\frac{64}{3.6}\right)^2$$

$$F_{traction} = 7995 \text{ N} = 815 \text{ kgF}$$

- Pour une phase stabilisée ($\gamma = 0 \text{ m/s}^2$) en rampe de 2 % :

$$F_{traction} = 150 \times 6 + \frac{6 \times 9.81 \times 2}{10} + 6 \times 0 + \frac{1}{2} \times 1.225 \times 8 \times 0.7 \times \left(\frac{64}{3.6}\right)^2$$

$$F_{traction} = 1995 \text{ N} = 203 \text{ kgF}$$

Ces calculs d'efforts nous montrent que pour un convoi il faut exercer un effort maximal de 815 kgF ce qui est raisonnable pour deux chevaux de trait (un cheval de trait peut fournir un effort égal à son poids de manière temporaire soit entre 600 kgF et 1000 kgF suivant les chevaux). Par ailleurs, le calcul pour une phase stabilisée donne un effort de 203 kgF pour l'ensemble du convoi ce qui correspond à l'effort de traction dans le cas le plus défavorable (pente continue de 2 %, vent de face



10 février 2010

permanent, roulement de mauvaise qualité), cet effort est donc surdimensionné mais nous atteignons pourtant tout juste la limite d'endurance des chevaux à savoir 10 % à 15 % de leur masse¹ au pas.

Il apparait donc d'après notre démarche calculatoire que deux chevaux soient suffisants pour effectuer la mission de transport en commun du Mont Saint-Michel.

Cependant, cette étude à été faite à partir de connaissances issues du monde ferroviaire, nous pouvons alors nous poser la question de la validité de celle-ci. En effet même si l'on peut considérer le cheval comme un moteur naturel dont la force varie dans de grandes proportions, celui-ci ne répond pas aux équations de la mécanique classique. Ainsi, de deux chevaux n'est pas deux fois l'effort d'un cheval.

Afin de compléter notre étude, nous nous sommes donc documentés auprès des archives de la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) qui, par le passé, utilisait une importante flotte de véhicules à traction hippomobile.

DRAFT



¹ Informations issues d'une discussion téléphonique avec M Jourdain : "Un cheval de trait tracte au pas entre 10 et 15 % de sa masse soit un effort allant de 60 à 90 kgF".

Résumé de nos recherches au centre de documentation de la RATP

La traction chevaline commerciale débute à Paris en 1662 par un décret du roi Louis XIV qui autorise alors Blaise Pascal et le duc de Roanne à mettre au point un service commercial régulier utilisant des chevaux. S'en suivront alors deux siècles durant lesquels d'autres compagnies se créeront (on en comptera jusqu'à onze) et c'est à l'occasion de l'Exposition Universelle que celles-ci fusionnent pour créer par décret impérial, la Compagnie Générale des Omnibus (CGO) en 1855.

Les véhicules

Le parc de véhicules connus des évolutions avec l'augmentation du nombre de passagers, ainsi en 1855 la compagnie possédait des véhicules omnibus de 40 places et arrivèrent ensuite :

- en 1859 : des omnibus 42 places
- en 1860 : des omnibus 48 places
- en 1864 : des omnibus 50 places
- en 1875 : des omnibus 51 places dont 21 en intérieur, 6 en plate-forme et 24 en impérial

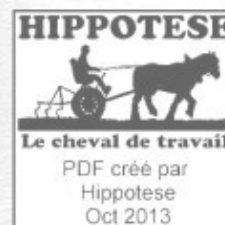
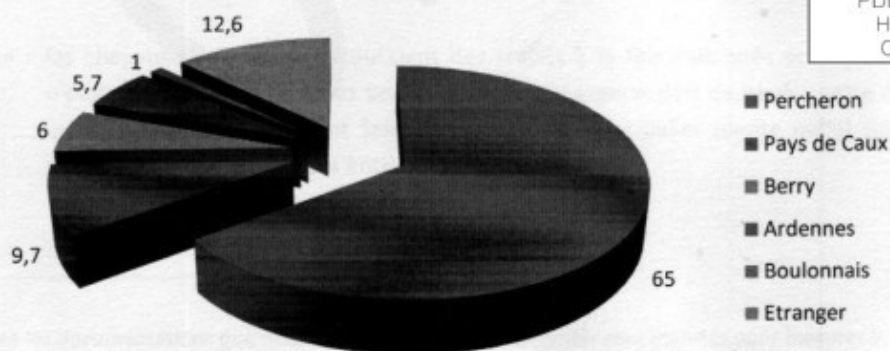
Ces omnibus étaient tractés par deux ou trois chevaux suivant le profil de la mission abordée (pentes, devers, qualité du revêtement...).

La vitesse moyenne était d'environ 8 km/h incluant les arrêts.

Les chevaux

Les chevaux étaient originaires de différentes régions de France et de l'étranger, le graphique ci-après en donne la répartition.

Origine des chevaux de la CGO en 1888



Les chevaux étaient choisis pour leur robustesse et leur endurance, ils mesuraient environ 1.60 m à 1.65 m. Deux modes d'approvisionnement existaient, soit la compagnie de transport possédait sa propre écurie (cas de la CGO), soit elle faisait appel à des haras qui lui fournissaient des chevaux chaque matin.

Le travail

Chaque jours les chevaux effectuaient un parcours de ^{16km} 17 à 18 km, ce qui représentait un effort continu de 3h30 à 4h d'affilée à des allures soutenues, plus souvent au trot qu'au pas, selon la nature du terrain ou la circulation. Afin d'évaluer ce travail, la CGO mis au point un appareil de mesure des efforts (dynamomètre) et mena une campagne de mesure.

Etude menée par la CGO

La CGO mena une étude en 1878 pour déterminer l'effort des chevaux de trait. Pour cette étude la CGO utilisa un dynamomètre que la compagnie avait elle-même mis au point. Les résultats de l'étude sont les suivants :

- vitesse ?*
- pour un tramway hippomobile tracté par deux chevaux, le travail² moyen par seconde d'un cheval est de 82 kilogrammètres soit 11/10^e du cheval vapeur
 - pour un omnibus hippomobile tracté par deux chevaux, le travail moyen par seconde d'un cheval est de 95 kilogrammètres soit 13/10^e du cheval vapeur
- 1 kgF x 2 m/s (7 km/h)* *F x l*
s

Un travail difficile à soutenir pendant une longue durée puisque de nombreux arrêts et reprises à plein colliers (30 à 40 fois par course) venaient briser les jarrets des chevaux. Pour rappel, à cette époque les véhicules s'arrêtaient à la demande imposant parfois des arrêts de manière brutale et/ou des redémarrages en pente.

Conclusion

De cette étude, nous retiendrons plusieurs choses :

- les chevaux de la CGO parcouraient des trajets à la fois vallonnés et dont le revêtement n'était pas forcément de très bonne qualité (une grande part de pavé à cette époque) alors que le futur trajet du Mont Saint-Michel doit être en palier (pente nulle) sur une grande partie et le revêtement sera entièrement neuf

² Dans les documentations que nous avons consultées, deux unités sont utilisées pour mesurer le travail :

- le kilogrammètre (kgm) : travail pour soulever de un mètre une masse d'un kilogramme en une seconde
- le cheval-vapeur (CV) : travail pour soulever de un mètre une masse de 75 kilogrammes en une seconde soit en deux heures 6'480'000 kgm



10 février 2010

- les études de la CGO donnent un effort moyen de *1.1 CV* par cheval alors que d'après notre étude de pré-dimensionnement, notre système n'en exigera que *0.9 CV* en situation stabilisée³.



DRAFT

³ A vitesse max et accélération nulle nous trouvons *136/2 kgF* par cheval soit *0.9 CV*

Outils à disposition

Afin de mener à bien nos essais et les mesures qui les accompagnent, différents outils nous sont nécessaires, ceux-ci sont répertoriés dans le tableau ci-dessous ainsi que leur moyen de mise à disposition.

Matériel	Mise à disposition	Particularités
Différentes paires de chevaux de traits similaires à ceux qui seront utilisés pour l'exploitation du Mont Saint-Michel	Exploitation de M. Coulon	Disponibilité des chevaux et conditions physique
Une calèche / remorque sur roue	Exploitation de M. Coulon	Véhicule lestable à roues de charge maximale admissible supérieure à 5 tonnes, masse à vide connue
Leste	Exploitation de M. Coulon	Leste de masse connue (400 kg)
Un dynamomètre électronique afin de mesurer les efforts effectués par les chevaux	CERRTA ⁴	Matériel disponible à la suite du salon de l'agriculture, possibilité de log à fréquence 4 Hz par transmission radio
Un système d'attelage	Exploitation de M. Coulon	Adapté aux conditions de l'essai (masse tractée, nombre de chevaux, disponibilité du matériel)
Un système de mesure et d'acquisition de la vitesse et du temps	VERI	Utilisation de téléphone type HTC avec programme de log
Parcours de test	A déterminer avec M. Coulon	Déclivité faibles, route carrossable (pas de chemin de terre), trafic faible
Système de mesure cardiaque (cardiofréquencemètre)	CERRTA	Pas de possibilité de log
Inclinomètre	CERRTA	Pas de possibilité de log

Par ailleurs, afin d'assurer la bonne tenue des essais et l'encadrement des chevaux, il est nécessaire de s'assurer de la présence d'un meneur et d'un éventuel accompagnateur pour les chevaux ainsi que d'un membre de Veolia Environnement Recherche et Innovation pour le suivi des mesures.



⁴ Centre Européen de Ressources et Recherches en Traction Animale, association située à Villers sous Chalamont dans le Doubs et créée en 1998 suite à une demande de l'association Hippotèse.

Préparation de l'essai

Préalablement à l'essai différentes étapes de préparation sont nécessaires et notamment pour le véhicule.

Ainsi, le dynamomètre s'insère entre le crochet d'attelage et le palonnier double, il est alors nécessaire de créer un point d'attache reculé de la longueur du dynamomètre (environ 38 cm) afin de ne pas modifier la distance entre l'attelage, les chevaux, le véhicule et le meneur.

Par ailleurs, nous devons également nous assurer que l'ensemble des attaches sont compatibles entre elles (liaison entre le point d'encrage de la voiture et le dynamomètre, liaison entre le dynamomètre et l'attelage). Si ce n'est pas le cas, les adaptations nécessaires seront effectuées préalablement aux essais.

Une préparation physique des chevaux est également nécessaire avant de mener les essais, celle-ci consiste à habituer les chevaux de trait au rythme d'un cycle de travail de trois heures. La préparation sera assurée par M. Coulon et devrait prendre environ deux semaines.

De plus, au cas où M. Jourdain ne serait pas disponible pour les essais, il est important de se familiariser au fonctionnement du matériel de mesure et acquisition des données afin d'être sûre de la bonne tenue des mesures.

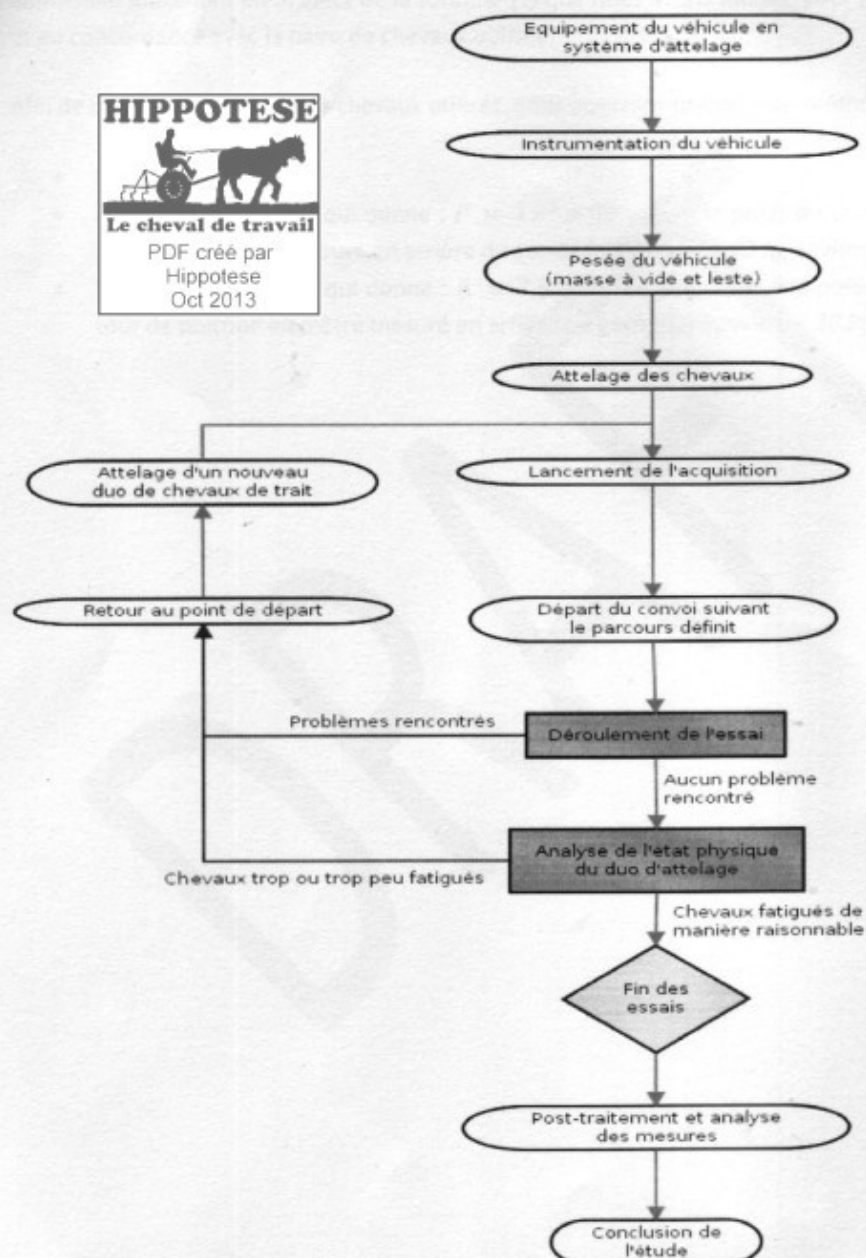
Enfin, une étape de prise de connaissance du matériel roulant, du parcours d'essai et du matériel de lestage est nécessaire, celle-ci devra s'effectuer au moins une semaine avant la date prévue des essais afin de pouvoir effectuer tout changement.



Déroulement de l'essai

Afin de représenter l'organisation de l'essai, nous nous référons au diagramme ci-après.

Concernant l'enchaînement des essais, l'évolution de la masse embarquée par les chevaux reste un paramètre à définir en accord avec messieurs Coulon et Jourdain.



Idéalement, l'essai se déroulera sur une route présentant peu de déclivités et dont le revêtement pourra être considéré comme carrossable (chaussée sans trou, pas de chemin de terre...)

Charge de départ

Le premier essai se fera avec une charge dépendante de la masse de la calèche utilisée, de la qualité du roulement, de la prise au vent éventuelle et des conditions météorologique locales.

Seule certitude, nous dimensionnerons la charge de départ afin d'être au plus proche de la masse admissible maximum en respect de la formule (1) que nous avons utilisée pour le dimensionnement et en concordance avec la paire de chevaux utilisée.

Afin de connaître la masse des chevaux utilisés, nous pourrons utiliser trois méthodes⁵ différentes :

- la pesée
- la formule de Crevat qui donne : $P = TP^3 \times 80$ avec P le poids du cheval et TP le tour de poitrine en mètre mesuré en arrière du garrot (précision de 25 kg environ)
- la formule de Rosset qui donne : $P = 7.3 \times TP - 800$ avec P le poids du cheval et TP le tour de poitrine en mètre mesuré en arrière du garrot (précision de 28 kg environ)

DRAFT

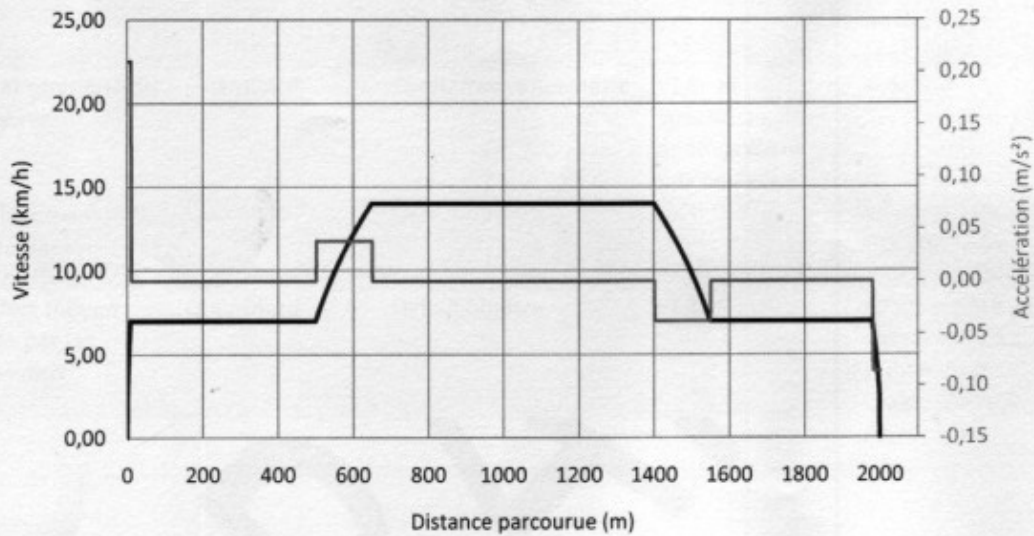


⁵ Informations calculatoires issues du site web <http://www.le-site-cheval.com>

Profil de vitesse

Lors de notre essai nous essayerons de nous rapprocher le plus possible des futures conditions de travail des chevaux. Ainsi nous adopterons le profil de vitesse ci dessous en effectuant de courtes pauses en fin de profil de l'ordre d'une à deux minutes afin de simuler les temps de montée et descente des passagers permettant ainsi un léger repos aux chevaux, mais imposant également une nouvelle phase d'accélération.

Cinématique du véhicule



DR



Validation d'un essai

La validation d'un essai se fera par des critères qualitatifs et quantitatifs. Ces critères sont répertoriés dans le tableau ci-après.

Valeurs évaluée ou mesurée	Type de critère	Outil(s) de mesure	Personne évaluant le critère	Domaine de validation
Etat physique du cheval	Qualitatif		Spécialiste équin présent lors de l'essai	Acceptation par le(s) spécialiste(s) équin(s) présent(s)
Etat physique du cheval	Quantitatif	Cardiofréquence-mètre	VERI et Spécialiste équin présent lors de l'essai	A définir
Effort maximale vue par les chevaux	Quantitatif	Dynamomètre	VERI	Effort par cheval inférieur à la masse du cheval
Effort moyen vue par les chevaux	Quantitatif	Dynamomètre	VERI	Effort moyen par cheval inférieur à 15 % de la masse du cheval

DRAFT



Utilisation des résultats de l'essai

A la suite des essais que nous mènerons, nous serons capables de donner les efforts maximal et moyen qu'une paire de chevaux de trait (représentative de celle qui seront utilisées lors du fonctionnement du système de transport) peut exercer.

Ainsi, une fois ces données transmises au constructeur du matériel roulant, celui-ci devrait être capable de dimensionner le futur véhicule de transport en fonction de la pente maximale de la voie (2%), du nombre de passager et de leur masse, de la prise au vent du véhicule et de la vitesse du vent, du type de roulement utilisé... Le constructeur sera donc amené à faire l'équilibre entre les différentes données de dimensionnement en s'assurant de ne pas dépasser l'effort maximal admissible par les chevaux dans le cas le plus contraignant, et en s'assurant également de ne pas dépasser l'effort moyen admissible pour les marches stabilisées.

Afin d'anticiper des scénarios imprévus, il serait judicieux de prévoir une marge de sécurité en minimisant l'effort maximal des chevaux de 10 % par exemple.

DRAFT



Planning

M. Jourdain sera présent au salon de l'agriculture de Paris mardi 2 et jeudi 4 mars, il pourra alors nous faire une démonstration du matériel de mesure et nous le transmettre pour notre utilisation future. Le matériel serait ensuite disponible pendant deux à trois semaines. Par ailleurs, M. Jourdain pourrait nous accompagner sur les essais si ceux-ci se déroulent à la suite du salon de l'agriculture ce qui nous permettrait de bénéficier de son expertise lors de l'expérimentation.

Ainsi si l'on souhaite faire les essais en présence de M. Jourdain le plus tard serait le vendredi 5 mars, il faut donc que tous soit réglé avec M. Coulon au plus tard deux semaines avant afin de préparer les chevaux.

Par ailleurs, après concertation avec M. Coulon, il s'avère que celui-ci serait également disponible pour faire les essais à la suite du salon de l'agriculture. Concernant la préparation des chevaux pour les essais, cette phase ne prend vraisemblablement qu'une semaine. Dans le planning ci-dessous cette phase est rallongée mais cela n'a pas d'incidence sur le projet.

Mois	Février																												Mars						
Semaine	1							2							3							4							1						
Jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1	2	3	4	5	6	7
Organisation des essais																																			
Préparation des chevaux																																			
Présence de M. Jourdain au salon de l'agriculture																																			
Possibilité d'essai																																			

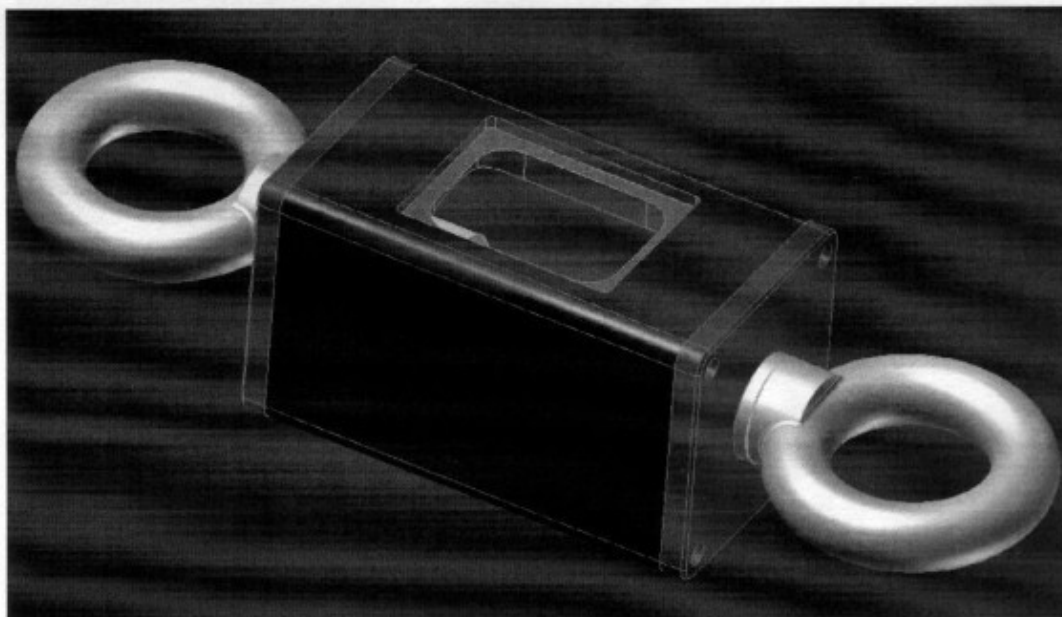
Coût prévisionnel

CERRTA :

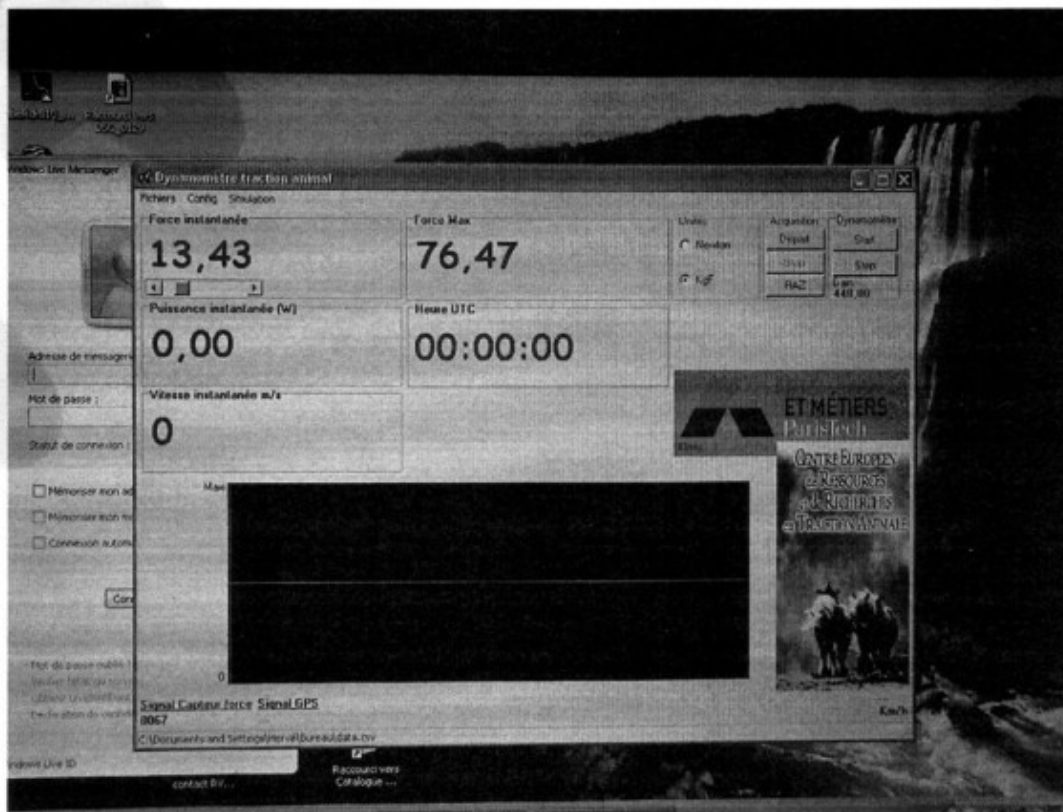


10 février 2010

Annexe : photographies du dynamomètre



10 février 2010



DRAFT

